

地下電気鉄道の

電食に関する研究

昭和 50 年 11 月

小 山 徹

地下電気鉄道の 電食に関する研究

昭和 50 年 11 月

小 山 徹

DOC
1975
24
電気系

目 次

第 1 章 序 論

- 1.1 都市交通体系における地下鉄の位置づけ 1
- 1.2 電気鉄道からの漏れ電流と電食対策のあり方 1
- 1.3 地下鉄構築物電食防止の必要性 2
- 1.4 研究の概要と論文の構成 3

第 2 章 電気鉄道車両への電力供給方法と電食の諸問題

- 2.1 地下鉄の電気方式と電食の可能性 5
- 2.2 電車線路の構成と電食に関する事項 5
- 2.3 電車線の形態、単線式と複線式 6
- 2.4 き電方式、単独き電と並列き電 11
- 2.5 き電極性の選択と電食対策 11

第 3 章 レールの対地電圧と漏れ抵抗

- 3.1 レール電圧測定の意義 13
- 3.2 東京地下鉄におけるレール電圧の測定 14
 - 3.2.1 東京地下鉄の路線概要 14
 - 3.2.2 5号線における測定 16
 - 3.2.3 2号線および3号線における測定 21
 - 3.2.4 4号線における測定 22
 - 3.2.5 1号線および6号線における測定 23
 - 3.2.6 9号線における測定 25
- 3.3 大阪地下鉄および神戸地下鉄のレール電圧 27
 - 3.3.1 線路の接続条件とレール電圧、両地下鉄の選定 27
 - 3.3.2 大阪地下鉄の路線概要 27
 - 3.3.3 大阪地下鉄各線のレール電圧 28

3.3.4	神戸地下鉄の路線概要	33
3.3.5	神戸高速東西線のレール電圧	33
3.4	漏れ抵抗とその測定	35
3.4.1	漏れ抵抗値に対する考え方	35
3.4.2	定電流試験における漏れ抵抗測定	35
3.4.3	短いレールの漏れ抵抗測定	36
3.4.4	軌道回路毎の漏れ抵抗測定	38
3.4.5	漏れ抵抗の測定値	39
第4章 レール電圧の距離的分布の解析		
4.1	レールを流れる電流と電圧の一般式	41
4.2	負荷条件などを変えた場合のレール電圧	44
4.3	各線で測定されたレール電圧の検討	52
4.3.1	き電距離と帰線全電圧降下	52
4.3.2	変電所の負荷分担	52
4.3.3	地上線、地下線間に融通電力がある場合	55
4.3.4	地上線の高いレール電圧が地下線に波及する場合	59
4.4	総括	68
4.4.1	レール電圧の距離的分布形態	68
4.4.2	レール電圧および漏れ電流分布の要因	69
第5章 地下鉄構造物の電気的特性		
5.1	構造物電気の測定の目的	70
5.2	鉄骨・鉄筋コンクリート箱形トンネルの場合	70
5.2.1	三越前駅における測定	70
5.2.2	新橋・虎ノ門間における測定	72
5.2.3	東京駅における測定	75

5.2.4	外苑前駅における測定	77
5.3	鉄筋コンクリート・セグメントによるシールド形トンネルの場合	80
5.3.1	シールド形トンネルにおける電食の特殊性	80
5.3.2	セグメントの電氣的連続性	80
5.3.3	電らん棚および側歩道を流れる漏れ電流	81
5.3.4	電位測定	82
5.3.5	通電分極試験	90
5.3.6	セグメント電食の可能性	94
5.4	総括	95
5.4.1	構築物の電氣的連続性	95
5.4.2	自然電位	96
5.4.3	電食係数	97
5.4.4	分極残留電圧	97
第6章	鉄筋コンクリート試料の電食調査	
6.1	鉄筋コンクリートの電食調査	99
6.2	コンクリートの中性化と鉄筋の電食環境	99
6.3	塩化物イオンの浸透と鉄筋の電食環境	102
6.4	総括	103
第7章	コンクリート中の鉄筋への電流流入実験	
7.1	鉄筋コンクリートの電食と模擬実験の目的	104
7.2	電位の設定に関する諸問題	105
7.3	電解液中の軟鋼およびコンクリート模形	109
7.4	総括	113
第8章	地下電気鉄道の電食に関する総合的考察	

8.1	電食の予知と監視を目的とした調査方法	114
8.1.1	レール電圧の距離的分布形態の把握	114
8.1.2	構築物内部状態の電氣的診断	115
8.2	地下鉄における電食を支配する要因	115
8.2.1	電食するものとしての地下鉄	116
8.2.2	電食されるものとしての地下鉄	116
8.3	地下鉄における電食を防止するための提言	116
第9章	結 論	118
	謝 辞	120
	文 献	121
	付表・付図	123

第 1 章 序 論

1.1 都市交通体系における地下鉄の位置づけ

今日、我が国はもとより、世界各国の多くの大都市がかかえている都市問題の一つに都市交通の問題がある。過度に集中した膨大な人口とその交通需要に十分対処できる交通体系の確立のために、いわゆる新交通システムを含めて多くの提案がなされているが、いずれの大都市においても大量公衆輸送機関としての都市高速鉄道—地下鉄の建設、拡充、整備が強力に推進されており、今後の都市交通体系が地下鉄網を基幹として形成されつつあることは明白である。

現在、地下鉄もしくは都市交通に寄与している鉄道の地下区間は、1863年1月10日に蒸気運転で開業したLONDONのthe Metropolitan（電気運転は1890年12月18日のthe City and South London Tube）に始まり、最新の電子技術を縦横に駆使したSAN FRANCISCO*のBART（サンフランシスコ湾域交通管団の高速鉄道、1972年9月11日部分開通、サンフランシスコ市内は1973年11月3日開通）まで、付表-1に見る如く世界五十数都市に存在しており、⁽¹⁾さらに、AMSTERDAM、XAPbKOB、北京*（開通済なれど限定使用という）、WASHINGTON、SAO PAULOなどに地下鉄が開業する日も近い。

（*運転時間等が限られており、未だ全面的に供用されていない。）

我が国においても⁽²⁾東京およびその周辺では13路線、総延長五百数十料の都市高速鉄道網が都市交通審議会から答申されており、うち11路線286.2kmは都市計画として決定されていて、すでに8路線164.4kmが全通あるいは部分開通している。また大阪では6路線108.5kmの計画のうち各線とも部分開通で70.2kmが、名古屋では5路線80.8km中3路線38.1kmが供用されており、神戸の2路線7.6km（他に4路線36kmを計画）、札幌の12.1km（計画は2路線45km）、横浜の5.3km（計画は4路線65km）を加えると、全国で297.7kmが開通していることになる。さらに今回本格的地下鉄工事を開始した京都、近く新規に着工を予定している福岡、計画中の広島、仙台等の地下鉄や、東京、名古屋、奈良、京都、大阪、神戸に見られる国鉄、私鉄の地下方式による都市中心部への乗り入れを考える時、極めて近い将来、都市における電気鉄道はすなわち地下鉄道という時代の到来が予想される。

1.2 電気鉄道からの漏れ電流と電食対策のあり方

一般に、レールを電車電流の帰路としている直流の電気鉄道では、レールの大地に対する絶縁が不十分であると、レールを流れる電流が一部地中に流出し、埋設金属体のような低抵

抗の回路を經由して負き電点である変電所付近にまで戻り、ここで帰流する。この際、漏れ電流が地中から埋設金属体に流入する箇所では電気防食を受けた状態となるので金属体の腐食が抑制されるのに対し、埋設金属体から地中へ流出する箇所は陽極的状态となり、電気分解作用を受けて激しい腐食をひきおこすことは周知の事実である。(3)

この漏れ電流による電食を防止するためには、電気鉄道の側においては、電車線電圧の昇圧、変電所の増設、絶縁負き電線設備による負き電点間隔の短縮などによって電電流および電距離を可及的に小さくし、長尺レールの採用、レール・ボンドの完全保守などによって帰線路の抵抗を減じ、道床の清掃と排水、枕木やレール締結装置の絶縁性の向上によって漏れ抵抗を高め、漏れ電流を抑制する必要がある。

一方、埋設金属体側においても、施設の絶縁塗装、絶縁接続、電氣的遮蔽、敷設経路の選択などによって電気鉄道の漏れ電流流入を極力阻止し、流入した電流には適当な帰路を準備することによって金属体からの直接流出を回避している。

このような対策は、従来ややもすると個別にとりあげられ、また、現象が発現してから原因が探索されることが多かった。

これに対して筆者は、現象を総合的に検討した上で、電食の可能性を事前に知り、効果的な対策をたてるための体系的な調査方法研究を提唱するものである。

1.3 地下鉄構築物電食防止の必要性

ここで、電気鉄道からの漏れ電流は、地中の埋設金属体を電食させるに先き立ち、大地へ流出する箇所、レールとその締結装置、およびそれらが接続されている構築物などを電食するという事、そしてこれらの電食は、概して変電所から遠方でレール電圧が高く、トンネル内で道床が湿潤な箇所や併用軌道でレールが埋没している区間のようにレールの漏れ抵抗が小さい所に発生するという事も等閑視できない。

地下鉄の場合、ほとんど全線がトンネルであり、漏水などによって多湿となり易い環境にあるので、レールをはじめとする軌道材料の電食は当然問題となる。しかしそれ以上に重要なことは、一般の電気鉄道と違ってレールと大地間にトンネル構築が存在することであり、レールからの漏れ電流は、大地に流出して地下埋設金属体に流入する以前に、一旦トンネル構築物を通ることになる点である。したがって地中埋設金属体との関係を検討するのみならず、地下鉄自身の施設、とりわけ、軌道材料のようには検査、取り替えができないトンネル構築物自体について、何らかの方法で外部から事前に電食の可能性を知り、設備を防食管理する方法を確立すること、そしてそのような方法が可能な設備として地下鉄そのものを

設計しておくことが要望されるのである。そして筆者の研究も、これに応えようとするものである。

このことは、ひとり我が国においてのみならず、世界各都市の地下鉄に普遍的な課題であり、特に新しく都市内大量輸送機関として直流式電気鉄道を採用しようとしているアメリカで強く意識されている。⁽⁴⁾ところがこの問題を実際の地下鉄において検討した文献は未だ少なく、ソ連のカスピ海沿岸の都市BAKYで地下鉄を建設するに際しての、地下鉄トンネルの鉄鋼製リングおよび鉄筋コンクリート・ブロックの防食方法に関する発表⁽⁵⁾や、アメリカでは、地下鉄トンネルではないが、BOSTON 地下鉄の河底トンネルと並行したカラハン自動車トンネルにおける防食設備の研究、⁽⁶⁾ 我が国では埋設物防食の見地から地下鉄への排流の可否と関連して、名古屋地下鉄構築物の電食調査の報告⁽⁷⁾があげられる程度である。

実際、河海近くの地下鉄トンネルでは、塩化物イオンを含むなど水質に難点がある漏水も多く、⁽⁸⁾ レールの電食のみならず、トンネル構築物の鋼材や鉄筋コンクリートの電食と劣化の可能性が研究されなければならない。

しかし、この問題に関しても、レールの電食防止に限ればいくつかの文献⁽⁹⁾、⁽¹⁰⁾が見られるが、一般の鉄道やその長大トンネルにおけるものであり、鉄筋コンクリートに及ぼす塩化物の影響⁽¹¹⁾、⁽¹²⁾、鉄筋コンクリートの陰極防食基準⁽¹³⁾といった論文もすべて一般論であって、地下鉄を特に対象とした研究ではない。

そこで筆者は、都市近郊の電気鉄道と相互に直通運転を実施する地下鉄路線が近年各都市に誕生しており、この場合、地上と地下とで運転条件や線路条件の異なる2路線のレールが接続されることによって、電食を解明する上で最も基本的な調査項目であるレール電圧が如何なる影響を受け、その24時間平均値の距離的分布がどのような形状を示すようになるか、さらに鉄骨ないし鉄筋コンクリートを使用した従来の箱形トンネルと、鉄筋コンクリート製のセグメントで組み立てた最近のシールド形トンネルとでは、構築の電気的連続性がどのように相違していて、電食防止上留意すべき点はどこにあるかの研究を計画し、すでにその成果の要点は、電気学会全国大会論文集、鉄道電化協会雑誌、同委員会報告書などに発表している。⁽⁸⁾、⁽¹⁴⁾、⁽¹⁵⁾、⁽¹⁶⁾、⁽¹⁷⁾

1.4 研究の概要と論文の構成

本研究は、このような状況のもとにおいて、都市交通の主体となりつつある地下鉄および地下式電気鉄道においてトンネル構築物電食の可能性を予知し、適切な対策を講じるための電食調査方法を確立することを目的としている。

まず、地下鉄各線のレール電圧を実地に測定して、地下鉄が独立した路線である場合と、地上の電気鉄道に接続され相互直通運転が実施されている場合の相違点を明確にし、そのレール電圧の24時間平均値の距離的分布形態を路線の性格との対応において体系化するとともに、レール電圧に影響する各種の要因を検討して、それを低減する方法も提案している。

次に、トンネル構築鉄筋の電氣的連続性と電位を電食との関連において考察し、コンクリート内の鉄筋の電気化学的状態を自然電位および既知の電流を通電した後の分極残留電圧で、レールからの漏れ電流の影響を電食係数という考え方でとらえて、それらの総合判定により鉄筋の電食の可能性を外部から診断する方法を確立した。なおその結果、地下鉄トンネル構築の或る部分には電食のおそれがあることも判明し、防食管理の必要性が改めて認識されるに至っている。

さらに、現実の地下鉄構築物から鉄筋コンクリート試料を採取して行なったコンクリートの中性化、内部鉄筋の腐食度、周囲土壌中の塩化物イオンの測定によって、先に外部から鉄筋の電位を測定して得た内部状態の診断結果を裏付ける一方、模形でコンクリート中の鉄筋への迷走電流の流入を実験する方法を考え、鉄筋が電食する条件を確認することもできた。

この論文では、第1章で地下電気鉄道における電食の問題提起を行ない、第2章で電気鉄道の電気方式やき電極性などの問題を電食との関連で論じ、第3章で地下鉄各線におけるレール電圧測定を述べて、第4章の「地下電気鉄道における電食の可能性を予知し適切な対策を講じるためには路線の接続条件や負荷条件とともにレール電圧の24時間平均値の距離的分布状態を把握すること」、そして、第5章の「トンネル構築物の電氣的諸特性を外部から測定することによって内部状態の診断が可能であること」へと論を進め、さらに第6章と第7章でその妥当性を検証した後、第8章では地下電気鉄道の電食調査の方法を体系的にまとめるとともに、防食設計と防食管理のために考慮すべき事項も列挙してむすびとしている。

第 2 章 電気鉄道車両への電力供給方法と電食の諸問題

2.1 地下鉄の電気方式と電食の可能性

電気鉄道は電気を動力とする鉄道であって、動力車は外部から電気エネルギーの供給を受けて走行する電気車、すなわち、電車と電気機関車である。

したがって供給される電気の、直流、交流等の種別とその電圧、すなわち電気方式によってまず分類してみる。

現在世界で一般的な電気方式は、直流の場合 3000 V、1500 V または 1200 V、750 V または 600 V であり、交流の場合は、単相交流が商用周波数 60 Hz または 50 Hz で 25 kV または 20 kV、25 Hz で 11 kV、 $16\frac{2}{3}$ Hz で 15 kV、三相交流が $16\frac{2}{3}$ Hz で 3.7 kV である。

地下鉄の場合、都市交通機関として路線網が特定の地域内に限られていること、トンネル内の電力供給方法が設備上から制約を受けることなどの理由で、交流や直流でも 3000 V は極めて稀であり、ほとんどが直流 1500 V 以下である。実際、直流 3000 V は NAPOLI にある FS (イタリア国鉄) の地下鉄区間に、単相交流 15 kV は MÜNCHEN にある DB (ドイツ国鉄) の V-Bahn (中央駅と東駅を結ぶ市内横断地下鉄区間) に存在するが、これらはいずれも地下鉄単独の路線ではないし、XAPbKOB に建設中の地下鉄が直流 3000 V を予定しているとすれば、ソ連国鉄との関係であろうと筆者は考えている。

三相交流は、4160 V が SAN FRANCISCO の BART (既述) で独自に検討され、試験運転もされたが、結局は直流 1000 V が採用されている。

なお、電食を問題にする場合、交流電気鉄道からの漏れ電流や一般の送配電系統が原因で生じる地中埋設金属体の交流腐食は、60 Hz の場合直流と比較して 1% 程度にすぎないといわれている。⁽¹⁸⁾したがって、地下鉄の電気方式が直流で、しかも負荷電流が大きくなる低電圧であるということは、他に利点があるにしろ、電食防止の見地からは決して好ましいことではない。

2.2 電車線路の構成と電食に関する事項

電気鉄道用変電所と電気車間の電力供給設備を総称して電車線路と呼び、特に電気車側の電気回路に直接つながる部分の導体を電車線と呼ぶ。変電所と電車線を結ぶ電線路は電線である。一方、電気車側において電気を授受する機構が集電装置であり、通常、摺動接触ないし回転接触で地上側の接触導体すなわち電車線と電氣的に結合している。そして電車線と集電装置の組合わせで地上と車上間の電氣的な結合の仕方がきまる。これが集電方式である。

筆者は、集電方式を電車線の形態、基本的には電車線路の構成方法によって規定されるものであると考え、

電車線路を、

- (1) 車両の走行路すなわち軌道と如何なる位置関係にあるか
- (2) 軌道をその電気回路の一部として使用しているか否か
- (3) 集電装置が接触する導体すなわち電車線の材質と形状

によって表-2.1のように体系づけている。

このうち、電食の問題と特に関係がある項目は(1)と(2)、とりわけ(2)である。

表-2.1 電車線路の方式

電車線路の施設位置 電車線材料	車両の走行路の上方		車両の走行路の下方
	電線	導電	形材
電車線路の一部として車両の走行路（軌道）が使われている	架空単線式 （一般の電気鉄道、東京地下鉄1,6号線等）	剛体単線式 （東京地下鉄2,5,9号線、ノルウェーのオスロ地下鉄等）	第三軌条式 （一般の地下鉄）
電車線路は、車両の走行路と全く独立している。	架空複線式 （トロリーバスなど）	剛体複線式 （上野公園モノレールなど）	第四軌条式 （札幌市交通局の地下鉄、イギリスのロンドン地下鉄、イタリアのミラノ地下鉄など）

2.3 電車線の形態、単線式と複線式

電車線路が車両の走行路から全く独立している方式では、回路は、電鉄用変電所からき電線を経て電車線に至り、電気車を通過し、もう一つの電車線、き電線から変電所へと一巡して構成される、電車線は複線式となるが、正負いずれも大地に対して完全に絶縁することができて、大地へ漏れる電流は殆んどなく、地中埋設金属体に対する電食のおそれはない。しかし架空式で線材を用いた架空複線式は設備が複雑になって架線故障の発生率も高く、保全作業が困難であり、電圧降下も大きいので、現在では無軌条電車など特殊な電気鉄道にのみ採用される。形材を用いた剛体複線式や第四軌条式は構造が簡単で高速大容量の電気鉄道にも適用できるが、経済的には高価な設備となる。したがってモノレールやゴム・タイヤ式の

地下鉄などのように走行路の構造上別箇に電線路が必要となる場合や、電食防止の必要上、特に軌道から独立した電線路として大地と完全に絶縁する場合に限られている。

走行路ないし軌道が鋼レールなどの導電材で構成されており、き電回路の一部として使用し得る状態にあるならば、電鉄用変電所と電気車間の電線路のうち一線にこれを充当し、電車線は単線式とすることができる。今日ではこの方式による架空単線式が一般的であるが、電車線は必ずしも線材である必要はなく、特に地下鉄のように膨大なトンネル建設費を必要とするためトンネル断面を可及的に縮小したい場合、そして軌道が完全に専用化されていて一般公衆に対する危険が少ない場合には、形材の電車線を軌道脇に敷設する第三軌条式⁽¹⁹⁾が最も適した方式である。また近年、我国では郊外電鉄との間に直通運転を実施する地下鉄路線の建設に際して、郊外電鉄の架空電車線と同一集電装置の使用が可能であり、架空式であっても狭小トンネル内に電線を架線し引止める必要のない形材を用いた簡素な構造で、当然断線事故のおそれもなく、電車線設備の占有空間が小さい剛体電車線⁽²⁰⁾⁽²¹⁾が開発されているが、これも架空第三軌条とでもいうべき方式で、剛体単線式として用いられている。なお、ノルウエーのOSLO地下鉄ホルメンコル線⁽²²⁾や、欧米の中都市における路面電車の地下区間にも類似の方式がみられる。

これら電車線が単線式の電気鉄道にあっては、走行レールがレール・ボンドにより縦列方向に接続されていて電気的にもう一つの電車線としての機能を果しており、帰線と呼ばれる。さらに必要に応じて、レールを並列的に結ぶクロス・ボンド、導体としての電氣的断面積の不足を補う補助帰線などが付加されるが、支持物を含むこれらを総称して帰線路という。変電所と電車線を結ぶ正極性の(正)き電線に対して、帰線を変電所に導く電線路は負き電線と呼んでいる。帰線路が電氣的に整備されていないと、レール継目部の電気抵抗は相当に大きく、レール締結部から枕木を経て道床に至る間の絶縁抵抗は比較的小さいため、帰線電流がレールから大地に漏洩し、付近の地下埋設物に電食を発生させたり、レール電位を異常に上昇させたりする。とりわけ地下鉄においては、構築物自体の電食の可能性も加わるから、帰線路の保全は一層確実に行う必要があり、それが期待できない場合には電車線を複線式とすることになる。LONDON 地下鉄の全線、MILANO 地下鉄の1号線⁽²³⁾が、いずれも鋼レールを使用しているにもかかわらず、負の電車線として軌間中央に第四軌条を敷設しているのはこのためである。特にLONDON の地下鉄では、図-2.1でも明らかなように、鋳鉄製のチューブ形トンネル構築物に走行レールが極めて接近しており、電食防止の見地から第四軌条の必要性が理解される。ちなみに英国鉄のLONDON 近郊電車区間は第三軌条のみである。また、MILANO の地下鉄1号線は鉄筋コンクリート箱形トンネルであるが、図-2.2のよう

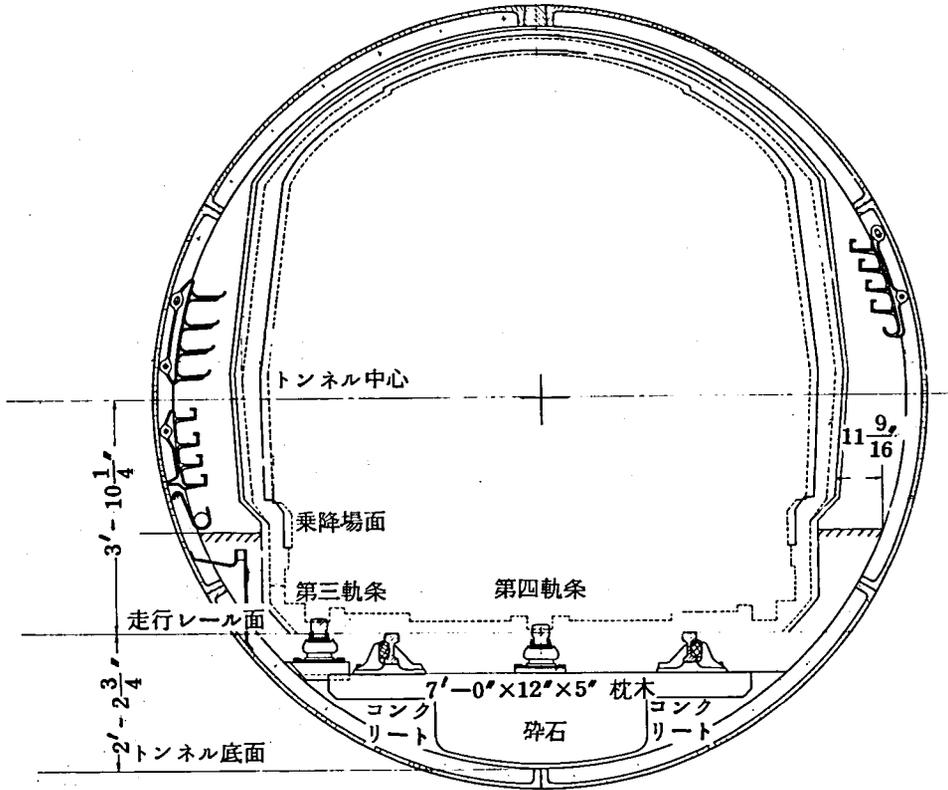


図-2.1 ロンドン地下鉄（チューブ）のトンネル断面図

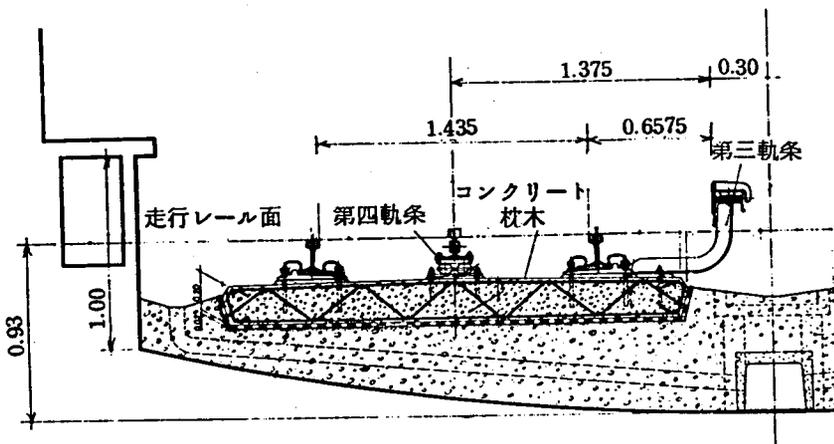


図-2.2 ミラノ地下鉄（1号線）の軌道構造図

に側面接触式の第三軌条と上面接触式の第四軌条をそれぞれ正負の電車線とする複線式であり、車庫構内では作業の安全上から架空電車線としているので、各車両とも正負の集電靴のほか小形パンタグラフも装備している。しかし同2号線は、郊外電鉄乗り入れのため、地下区間を含む全線が架空式で、一部は形材の電車線を用いた剛体単線式としている。ゴム・タイヤ式地下鉄の場合には、走行路をそのまま電車線路として共用することはできないが、軌道を構成する連続構造物のうち電氣的に利用可能な金属体があればそれを利用している。PARIS, MONTRÉAL, MEXICO CITY いずれの地下鉄においても、非常時の走行用兼

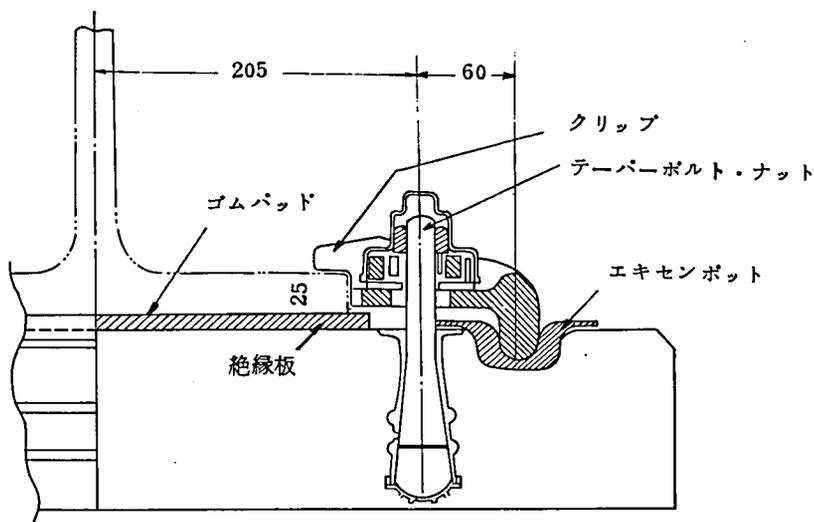


図-2.3 札幌地下鉄南北線案内軌条締結装置

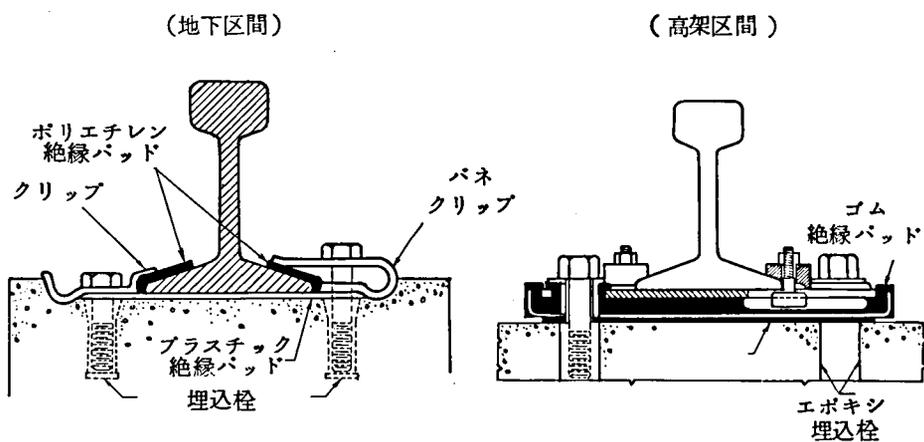


図-2.4 サンフランシスコ地下鉄のレール締結装置

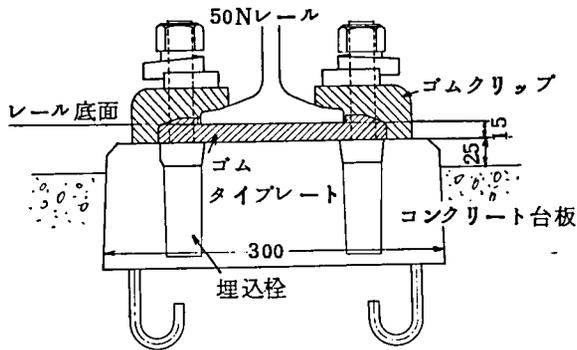


図-2.5 東京地下鉄5号線レール締結装置

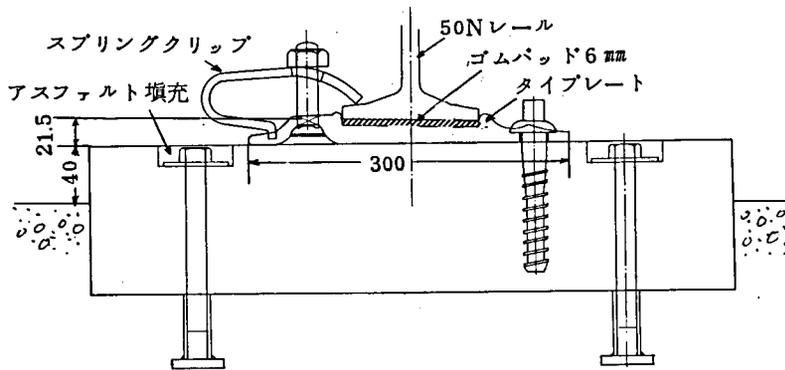


図-2.6 東京地下鉄9号線レール締結装置

分岐点での案内用として全線にわたり従来どおりに敷設されている鋼レールが負の電車線すなわち帰線とされ、走行路の左右両側方にある案内軌条が正の電車線とされており、札幌の地下鉄では走行路の中央にある案内軌条が負の電車線で、正の電車線は従来どおり上面接触式による第三軌条としているので、どちらの方式も実質的には、電車線が単線式である第三軌条式の形態を踏襲しているといえよう。したがって電食の問題に関しては同様に取り扱いことができるとするのが筆者の立場である。

なお、札幌の場合、帰線兼用の案内軌条は図-2.3のように絶縁して締結されている。

図-2.4から図-2.6は電車線が単線式でレールが帰線として使われる一般の場合である。

2.4 き電方式、単独き電と並列き電

一般に電気鉄道には、その規模が特に小さい場合を除いて、複数の負荷と複数の電源が存在する。列車負荷は運転ダイヤグラムにしたがって時間的に線路上を移動するが、電鉄用変電所は空間的に位置が固定されているから、変電所を如何に配置し、き電区間を如何に設定するかは基本的な事項である。

二つ以上の変電所が、き電線、電車線を介して互に結ばれる場合、すなわち、き電区間を共有することになる場合を並列き電方式といい、一つの変電所が、き電線、電車線の一区間すなわち一つのき電区間と一対一に対応し、その間に連けいがない場合を単独き電方式という。普通、電車線路の電圧降下を減らし電力損失を少くするために、変電所と電車線路の利用効率が高い並列き電方式が採用されているが、事故時のき電停止を短区間に限定できるのは単独き電方式である。地下鉄では、第三軌条や剛体電車線など区分装置が容易に設置できる形材の電車線が使用されており、並列き電している変電所と変電所の中間に区分閉閉器を設置し、変電所のき電点においても、変電所母線から見て線路の方向別を考慮しないT形き電でなく、方向別に別箇のき電線を出すπ形き電として、常時は並列き電方式であっても事故時には単独き電方式となるように電車線を区分しておくことが多い。しかしこの場合にも帰線側すなわち走行レールは連続しており、このことは、一般に漏れ電流やレール電圧の計算など電食の可能性を検討する際、先ず考慮すべき事項であると筆者は考える。

また、変電所容量の選定にあたって、特に走行レールを帰線とする電気鉄道においては、レールと大地間に大きな電圧が発生して感電や電食の危険が生じないように、強力な変電所を集中的に配置するより適当な容量の変電所を分散して配置し、き電区間長を適正化するのがよい。ストックホルム地下鉄⁽²⁴⁾などのユニット変電所方式は、このような考え方によっている。

2.5 き電極性の選択と電食対策

電車線が単線式である電気鉄道にあっては、変電所の正極を電車線に、負極を帰線に接続する正き電方式と、負極を電車線に、正極を帰線に接続する負き電方式とがある。

正き電方式の場合、地下埋設金属体に対する電食の量は大きくなるが、電食発生区域が変電所付近に限られ、したがって変電所付近で排流することができれば殆んど防止し得る。

負き電方式にすると電食量は約半に減少するものの、電食の危険区域が変電所付近を除く他の広い範囲におよび、排流により電食を防止しようとする、変電所から離れたところにも多数の排流器を設置することが必要になる。

そこで我が国では、電気設備の技術基準で正き電方式もしくは正き電と負き電を隔日に行う方式にきめているが、後者は電流方向の変更による腐食効率の低下すなわち電食量の軽減効果よりも、変電所において回路や計器を切換えることの繁雑さのために、現在は採用されていない。しかし負き電方式にすると電車線の摩耗量は減少するし、電鉄用変電所で鉄製の水銀整流器が使用されていた頃には、鉄槽が帰線側に接続されているということも作業員の安全上望ましいことであった。外国の文献⁽²⁵⁾には、地中埋設金属体からの排流を認める電気鉄道では正き電方式、排流を禁止している地下鉄などには負き電方式を推奨しているものもある。

第 3 章 レールの対地電圧と漏れ抵抗

3.1 レール電圧測定の意味

電車線の方式が単線式である電気鉄道にあっては、車両の走行路すなわちレールがその電気回路の一部として使用されることは既に前章で述べた。電気導体としての抵抗が 料当り $r[\Omega]$ のレール L (km) を電流 I (A) が流れれば、負荷点 A と電鉄用変電所負き電点 B 間には、当然

$$V = I \cdot r \cdot L \text{ (V)} \dots\dots\dots (3.1)$$

の電位差が生じる筈である。

一方、レールは大地に対して完全に絶縁されてはならず、一般には約 $0.1 \sim 1 [\Omega \cdot \text{km}]$ の抵抗で全線ほぼ一様に接地された状態にあるので、レールを流れる電流の一部 I_l が大地にも分流し、この漏れ電流が電食をもたらすことも周知の事実である。このような状態のもとで、レールと大地との電位関係は図-3.1の如くなり、⁽³⁾大地に対して負荷点側のレール電位は正、変電所側のそれは負となる。もちろんその途中ではレールと大地の電位が等しい点、すなわち中性点 N が生じて、この点から負荷側のレールでは電流が流出し、変電所側では流入することになり、流出電流の総和と流入電流の総和は当然等しい筈であるから、レールの導体抵抗 r と漏れ抵抗 ω 、さらに大地の抵抗率 ρ が一樣ならば、電流が流出する区間長 \overline{AN} と流入する区間長 \overline{NB} は等しくなる。なお、レールの電位を無限遠の大地を基準とし

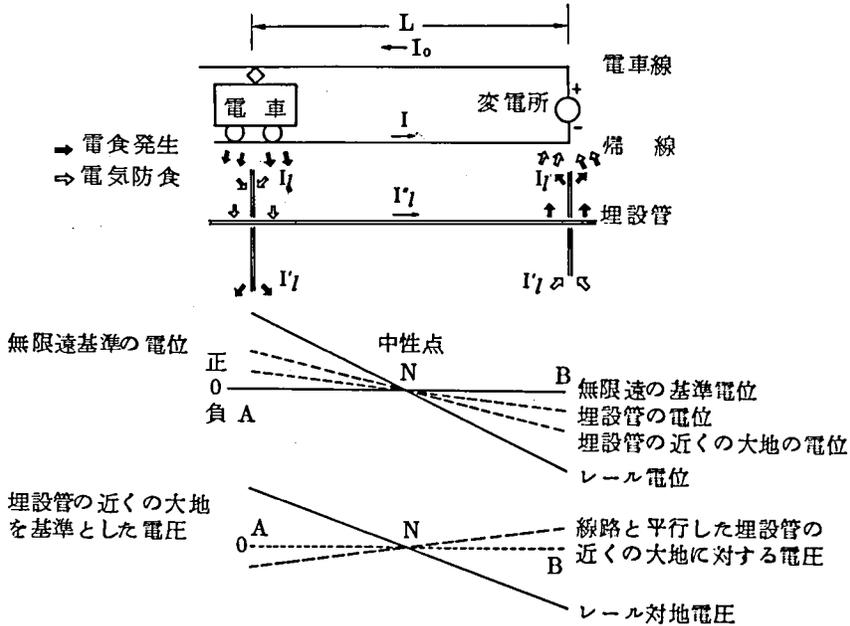


図-3.1 レールと大地との電位関係

て測定することは容易でないので、通常、その近くの大地に対する電位差、すなわちレール対地電圧（以下レール電圧という）を測定して代用する。この場合、レール電圧には大地中の電位傾度が含まれないから、無限遠を基準としたレール電位よりも若干小さな値となるが、それもほぼ10〔%〕以内であり、地下鉄のような都市内の電気鉄道の場合には線路経過地の土壌抵抗率が比較的小さく、レール締結装置とその近傍の道床で大部分の電圧を負担してしまふ結果、実用上殆んど問題とならない。ただ埋設金属体の場合は無限遠基準電位と対地電圧とで極性が逆になる。

さて、レールから大地へ流出する漏れ電流 I_l は、その地点におけるレール電圧 V に比例し漏れ抵抗 ω に反比例するが、仮りに ω を一定と考えると I_l は V に比例することになり、レールから大地に流出する電流の距離的分布の形状は、レール電圧の距離的分布のそれと同じになる。すなわち、レール電圧の測定を、電食の調査、研究の出発点とすることができる。

もちろんレール電圧は、電車の位置と電流のとり方によって、時々刻々変化する。一き電区間に一電車しか存在しない状態を考えると、当該区間の末端を電車が発進する時点でその地点のレール電圧は高い正值をとり、変電所の負き電点では大きな負値になる。電車が接近するにしたがい、この傾向は正負とも小さくなる。しかし変電所の負き電点に電車が来ても負荷電流は変電所相互の電圧変動率の関係で隣接変電所から供給されることがあり、なお正のレール電圧を示すこともある。変電所位置を過ぎて次の変電所との中間地点に来ると、変電所位置でのレール電圧は負値となり、それより先の線路末端におけるレール電圧は一層負の値となる。このようにレール電圧の変化は、電車の運転状態すなわち列車運行図表に関係したパターンを示し、複数の電車が運行されている状態では上述の場合の重ね合わせとして理解される。したがって、電車運転間隔、朝夕のラッシュ時と他の閑散時、平日と休日、夏季と冬季等々、ほぼ一定した変化の繰り返しとなり、時として異常に高い電圧が変電所の高速度シャ断器の一時的な動作などの原因で記録されることはあっても、レール電圧はその路線に特有の或る範囲内におさまっている。

このように、電車負荷の位置によって個々の時刻における異同はあっても、一般的には変電所付近で負、変電所から遠隔地で正の値を示すのがレール電圧であり、時間的に平均した値がその路線の或る区間において如何なる距離的分布を示すかということから電食の可能性を論じることができる。何故なら、レール電圧の一昼夜平均値の距離的分布曲線は、全線の負荷が均一分布しているとした時のレール電圧の計算値を描いた曲線と同じ形であり、現実の多数の電車負荷を一日単位で平均すると、距離的に一様な分布をした負荷の場合と、ほぼ等しいからである。

そこで筆者は、電食に関する調査と研究の最も基本的な項目であるレールからの漏れ電流の分布状況の把握は、すなわちレール電圧の特性を把握することであり、地下電気鉄道における電食の研究をすすめるにあたって、先ず地下鉄各線におけるレール電圧を測定して、その結果を体系的に整理、検討することから始めるべきであると考えた。

3.2 東京地下鉄におけるレール電圧の測定

3.2.1 東京地下鉄路線概要

東京の地下鉄は、昭和2年12月に開通した東京地下鉄道の浅草～上野間2.2kmをもって嚆矢とする。以後同線は逐次延長されて新橋に達し、別途開通していた東京高速鉄道の渋谷～新橋間6.3kmと接続して昭和14年9月から浅草～渋谷間14.3kmの直通運転が実施された。現在、両線は東京都市計画高速鉄道網第3号線（銀座線）を構成しており、帝都高速度交通営団により一路線として運営されている。

さらに地下鉄の建設は、昭和29年1月の池袋～御茶ノ水間6.6km以来間断なく続けられ、すでに8路線164.4kmが全通あるいは部分開通していて、都心部と周辺地域を放射状に直結するとともに都心部で相互に連絡するターナー形の路線網を形成している。

電気方式は、地下鉄単独の路線である3号線、4号線およびその分岐線が直流600V第三軌条式、地上の既設電気鉄道と列車の直通乗り入れを実施もしくは予定している他の6路線はいずれも直流1500V架空単線式で、東京都交通局により運営されている2路線を除き、地下トンネル内では剛体電車線を使用して、いわゆる剛体単線式としている。

相互直通運転にともなう線路の接続関係は、次のとおりである。

京成押上線 ↔ 1号線（都営線） ↔ 京浜電鉄線
東武伊勢崎線 ↔ 2号線（日比谷線） ↔ 東急東横線
国鉄中央線 ↔ 5号線（東西線） ↔ 国鉄総武線
国鉄常磐線 ↔ 9号線（千代田線）

6号線（都営線）と8号線（有楽町線）は未だ相互乗り入れを実施するに至っていない。なお、3号線（銀座線）と4号線（丸の内線）間、および8号線（有楽町線）と9号線（千代田線）間は、地下鉄相互の回送連絡線により線路がつながっている。

また、京成線上野～日暮里間に1.4km、京王線新宿～初台間に1.7km、国鉄新総武線東京～両国間に3.2kmの直流1500V架空単線式による地下線があるが、これらの路線はいずれも地下鉄の路線と全く無関係である。

地下鉄各線の概略を図-3.2および表-3.1にまとめておく。（巻末の付図、付表参照）

3.2.2 5号線における測定

東京地下鉄5号線におけるレール電圧測定は、筆者らにより3回実施されている。(8)

第1次測定は、江東地区の門前仲町から東陽町までのシールド形トンネル区間約1.8 [km]を含む茅場町変電所～東陽町変電所間と、比較区間として山手地区の箱形トンネル区間である早稲田変電所～飯田橋変電所間で行なわれた。前記区間は、表土の下に軟弱な沖積シルト層が30～40 [m]の厚さで横たわり、年間に5～10 [cm]も地盤が沈下している所謂江東零メートル地帯であり、一方、シールド形トンネルは、二次巻が施工されていない場合、完全な漏水止めは構造上困難とされているので、電食の可能性が最も大きい区間と考えてよい。

測定は、記録電圧計（横河製）および水銀電量計（高千穂製）を用い、図-3.3に示すように、茅場町、東陽町の両変電所と門前仲町、木場の両駅の計4個所で、レール（インピーダンス・ボンドの中性点）とアース（電らん棚）間の電位差を2昼夜記録するとともに、変電所以外の地点ではA、B両線のレール電圧 V_A 、 V_B が異なることも予想して、両線間の電位差 V_{AB} も測定している。

その結果は、表-3.2に示す如く、門前仲町が最大+130[V]、一昼夜平均+11.3[V]と極めて高く、変電所間を全体として比較しても、茅場町～東陽町間が早稲田～飯田橋間よりはるかに高い。なお、図-3.4、図-3.5および図-3.6は、 V_A 、 V_B および V_{AB} の測定記録の一部で、 V_{AB} に関していえば瞬時値は大きいのが平均すると殆んど零になっていることがわかる。

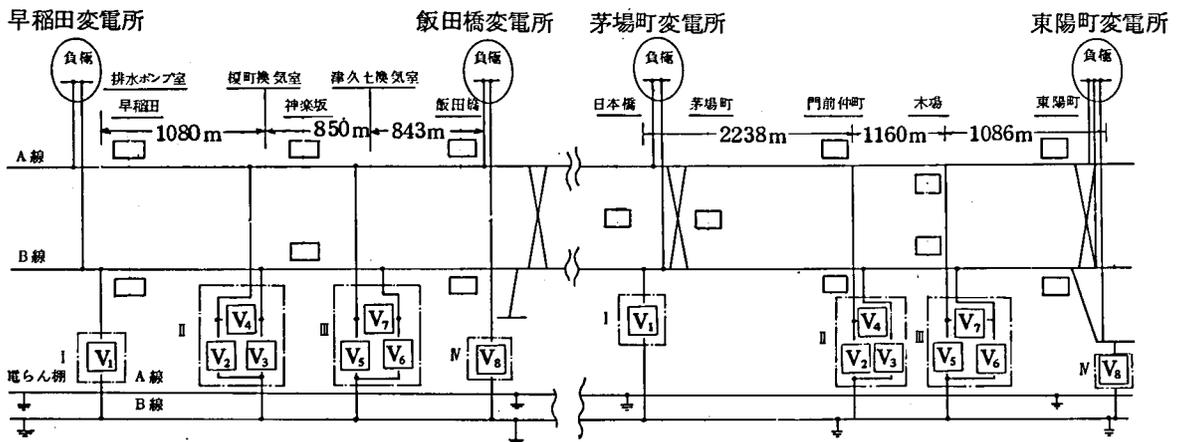


図-3.3 東京9号線第1次測定位置図

表一3.2 東京5号線早稲田～東陽町間レール電圧(第1次測定結果)

単位(V)

測定場所	線別	測定日時	正最大電圧	負最大電圧	平均電圧	
					記録計	電量計
早稲田	B線	45年1月22日 11時～45年1月24日 10時	72	32	+ 3.8	+ 2.5
榎木町	B線	" 12 ~ " 10	97	40	+ 4.5	+ 3.0
"	A線	" 12 ~ " 10	95	42	+ 3.6	+ 3.0
津久土	B線	" 13 ~ " 10	108	38	+ 5.0	+ 2.4
"	A線	" 13 ~ " 10	87	37	+ 0.5	+ 0.5
飯田橋(交)	B線	" 14 ~ " 11	72	52	- 1.4	- 0.4
茅場町(交)	B線	45年1月19日 15 ~ 45年1月21日 11時	75	35	+ 6.3	+ 6.0
門前仲町	B線	" 15 ~ " 10	130	36	+12.3	+11.3
"	A線	" 15 ~ " 10	130	35	+14.1	+10.5
木場	B線	" 12 ~ " 10	104	37	+10.3	+10.2
"	A線	" 13 ~ " 10	90	31	+ 8.13	+10.5
東陽町	B線	" 11 ~ " 11	70	35	+ 4.5	+ 5.5

表一3.3 東京5号線全変電所レール電圧(第2次測定結果)

単位(V)

変電所	測定日時	正最大電圧	負最大電圧	平均電圧	
				記録計	電量計
中野	45年4月7日 13時40分～14時00分	31	10	+ 7	+ 3.0
早稲田	" 12 # 47 # ~ 13 # 07 #	47	20	+ 5	+ 3.0
飯田橋	" 11 # 35 # ~ 11 # 55 #	74	28	+ 5	+ 1.7
茅場町	" 10 # 51 # ~ 11 # 11 #	56	29	+12	+ 6.5
東陽町	" 10 # 37 # ~ 11 # 06 #	30	8	+ 5.5	+ 3.6
葛西	" 11 # 28 # ~ 11 # 48 #	48	35	+ 0.5	- 0.4
行徳	" 13 # 15 # ~ 13 # 35 #	50	40	0	+ 0.6
西船橋	" 14 # 05 # ~ 14 # 25 #	32	42	- 7	- 2.3

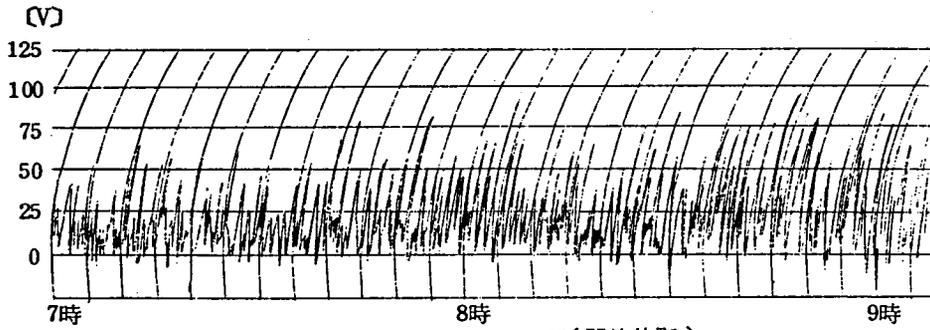


図-3.4 A線レール電圧(門前仲町)

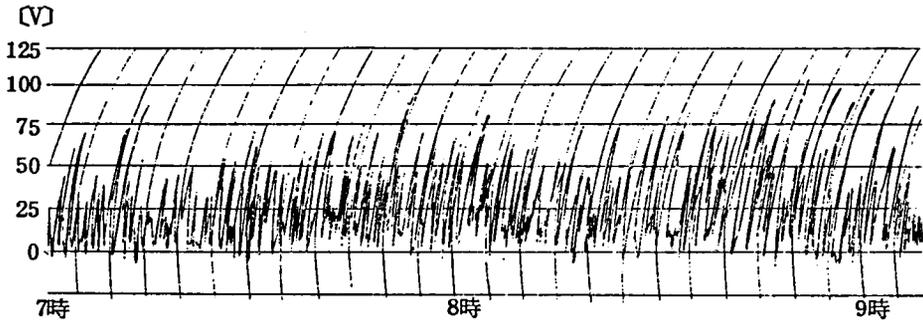


図-3.5 B線レール電圧(門前仲町)

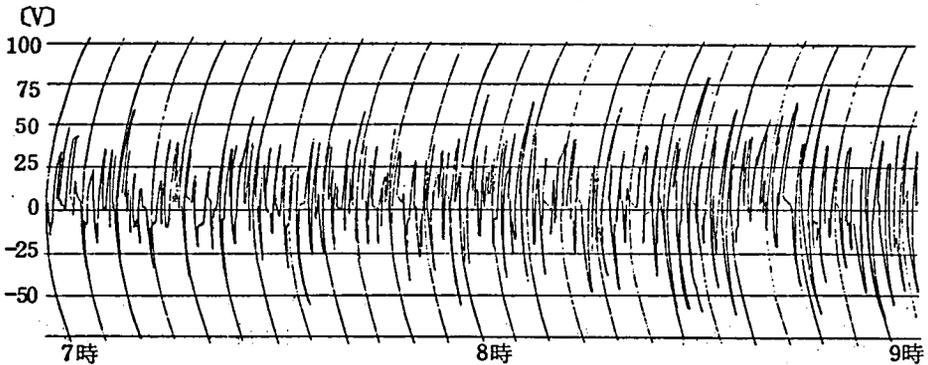


図-3.6 A線-B線間電位差(門前仲町)

次いで第2次測定では、5号線全線8箇所の変電所位置でレール電圧の平均値を求めて距離の分布を検討するために、記録電圧計(東亜電波製EPR-2T)を用いてその地点におけるレール電圧の動向をそれぞれ約20分間予備測定したうえ、2昼夜にわたり水銀電量計を接続している。

表-3.3は5号線全変電所レール電圧の測定結果である。

この結果、やはりシールド形トンネルの区間がある茅場町～東陽町間のレール電圧が大地に対して正でその値が大きいこと、それのみならず地下鉄5号線全体として路線の中央部で変電所を含めてレール電圧が高く、この現象は地上の鉄道と相互に乗り入れる地下鉄に特徴的と考えてよいかどうかという問題を提起した。

そこで第3次測定としては、各変電所における整流器の運転台数を変更してその負荷分担を変え、茅場町～東陽町間の特に高いレール電圧がどの程度低下するかを測定するとともに、5号線同様直流1500V 架空単線式の相互乗り入れ形地下鉄である2号線と、直流600V 第三軌条式の独立形地下鉄である3号線においても全線にわたりレール電圧を測定して線路の接続関係がレール電圧の距離的分布に如何に関係するかを比較検討することにした。この結果は項を改めて述べる。

負荷分担の変更によるレール電圧への影響は、表-3.4のとおり、茅場町～東陽町間で約2(V)の低下が見られ、この時各変電所の電力量は、表-3.5に示すように、茅場町、東陽町両変電所でそれぞれ17%、10%増加し、葛西変電所が36%減少、飯田橋、行徳の両変電所は殆んど変化していない。なお、路線の両端、中野および西船橋における国鉄との融通電力量も併記しておく。

第1～3次測定の結果は一括して図-3.7に示す。

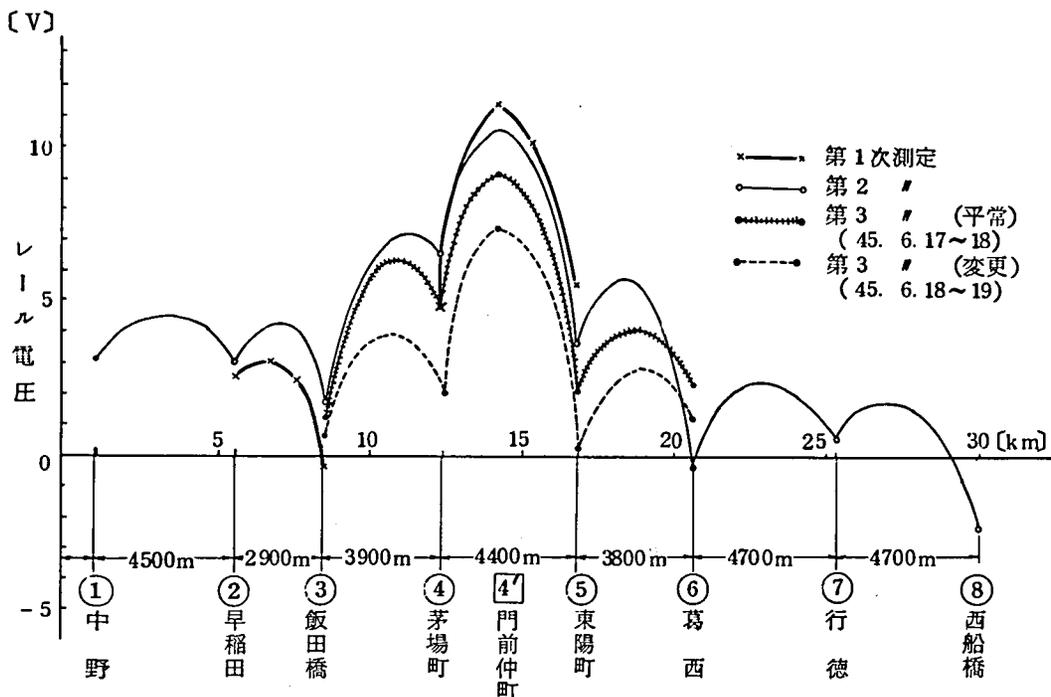


図-3.7 東京5号線レール電圧分布

表-3.4 東京5号線飯田橋～葛西間レール電圧(第3次測定結果)

単位〔V〕

測定場所	負荷分担変更	測定日時	正最大電圧	負最大電圧	平均電圧	
					記録計	電量計
飯田橋(交)	前	45. 6.17 ~ 45. 6.18 10時35分 ~ 13時30分	70	44	+ 2	+ 1.1
	後	45. 6.18 ~ 45. 6.19 13時30分 ~ 13時57分	70	48	+ 1	+ 0.6
茅場町(交)	前	45. 6.17 ~ 45. 6.18 11時07分 ~ 13時30分	75	30	+ 6	+ 4.8
	後	45. 6.18 ~ 45. 6.19 13時30分 ~ 14時23分	50	32	+ 4	+ 2.0
門前仲町	前	45. 6.17 ~ 45. 6.18 11時30分 ~ 13時30分	105	15	+ 13	+ 10.0
	後	45. 6.18 ~ 45. 6.19 13時30分 ~ 14時44分	103	15	+ 10	+ 8.3
東陽町(交)	前	45. 6.17 ~ 45. 6.18 12時55分 ~ 13時30分	34	19	+ 3	+ 2.0
	後	45. 6.18 ~ 45. 6.19 13時30分 ~ 15時04分	28	19	0	+ 0.2
葛西(交)	前	45. 6.17 ~ 45. 6.18 13時30分 ~ 13時30分	70	37	- 3	- 2.3
	後	45. 6.18 ~ 45. 6.19 13時30分 ~ 15時45分	70	18	+ 2	+ 1.2

表-3.5 東京5号線飯田橋、茅場町、東陽町、葛西、行徳各変電所のき電
電力量および中野、西船橋での融通電力量(第3次測定)

単位〔kWh〕

負荷分担変更	測定日時	飯田橋	茅場町	東陽町	葛西	行徳	中野	西船橋
前	(A) 45. 6.17 13時30分 45. 6.18 13時30分	32,560	34,390	40,840	30,340	22,200	⊖ 3,300	⊕ 600
後	(B) 45. 6.18 13時30分 45. 6.19 13時30分	31,520	40,080	44,900	19,420	23,000	⊖ 3,000	⊖ 100
	(A) / (B)	0.97	1.17	1.10	0.64	1.04	(注) ⊕ 営団→国鉄 ⊖ 国鉄→営団	

3.2.3 2号線および3号線における測定

この測定も、5号線の第3次測定に際して、第2次測定と同様、はじめに記録計で約20分予備測定してから、水銀電量計による一昼夜測定として実施した。

2号線レール電圧の距離的分布は5号線のそれと類似しており、やはり路線の中央部、東銀座変電所～飯倉変電所間で+8.8(V)以上の高い値になる傾向がみられる。

これに対して、3号線のレール電圧はほぼ規則的に正負を繰り返す正常なパターンで、変電所から離れた終端駅の浅草を除いて、大体平均した値となっている。

両線の24時間平均レール電圧の距離的分布は図-3.8と図-3.9に示す。

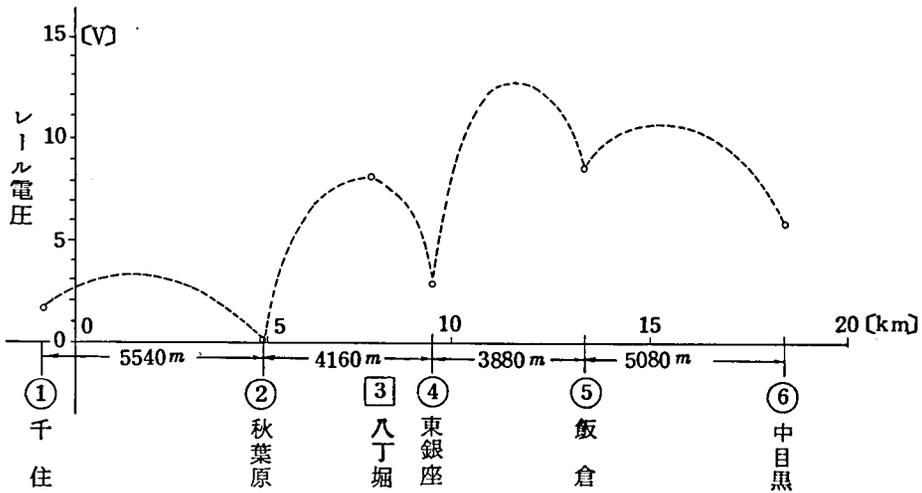


図-3.8 東京2号線レール電圧分布

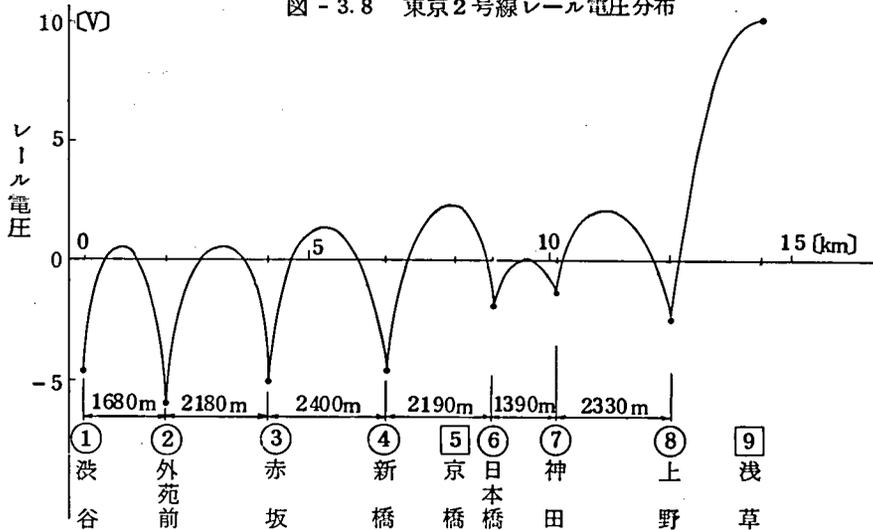


図-3.9 東京3号線レール電圧分布

3.2.4 4号線における測定

「独立形地下鉄」の場合の追試として、4号線においてもインピーダンス・ポンド中性点と大地（電らん棚）間の電位差を記録電圧計で20分間予備測定した後、水銀電量計で1昼夜測定している。

各地点におけるレール電圧測定の結果、24時間平均レール電圧が最も高いのはお茶ノ水駅付近で+12.3(V)、最低は霞ヶ関変電所下の-5.2(V)であり、レール電圧の距離的分布は、この路線の場合図-3.10に示すように、路線の中央部が低くなるパターンを示している。御茶ノ水は変電所間隔が特に長い後楽園～大手町間のほぼ中央に位置し、その高いレール電圧は変電所のき電距離から説明できる。また、路線中央部でレール電圧が全般に押し下げられているのは、路線中央部に位置する変電所の負荷分担が大きいためと考えられる。このことは、表-3.6に示す各変電所の電車用電力の使用実績からも理解できるが、後程、項を改めて論じることとする。

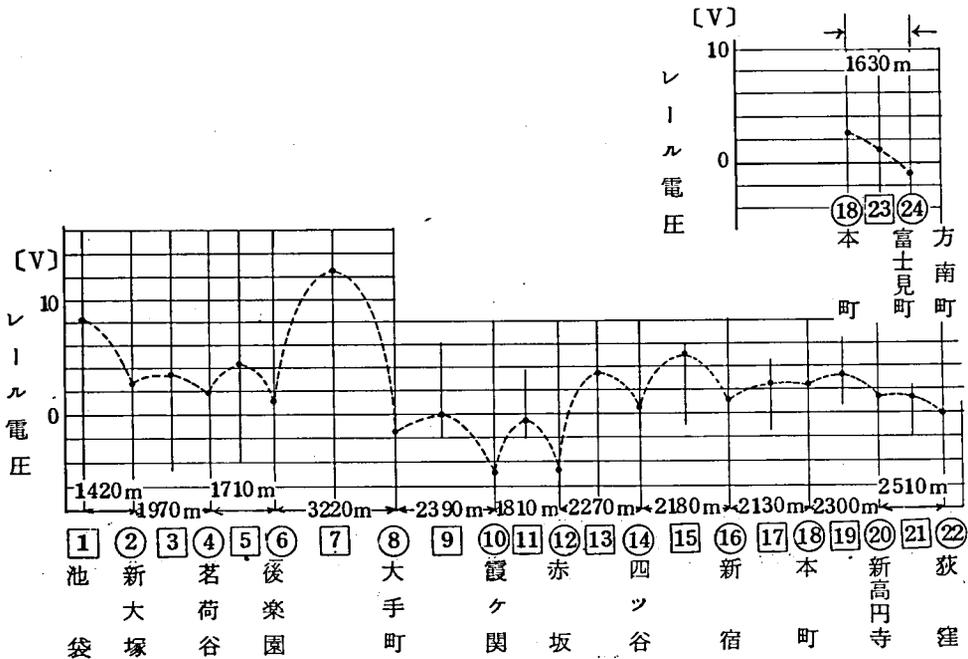


図-3.10 東京4号線レール電圧分布

表-3.6 東京4号線各変電所の電车用電力使用実績
(45年10月~45年12月)

変電所	負荷 分担距離	電 車 用 電 力 使 用 実 績			
		45. 10. 21	45. 11. 18	45. 12. 16	3ヶ月平均
	[km]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]
新大塚	2.331	25,640	24,800	24,760	25,066
茗荷谷	1.84	16,260	14,300	14,640	15,066
後楽園	2.465	24,510	25,110	25,310	24,976
大手町	2.805	26,600	24,800	20,800	24,066
霞ヶ関	2.1	27,400	27,700	30,950	28,683
赤坂	2.04	20,665	20,940	22,015	21,266
四ツ谷	2.225	20,900	19,200	19,300	19,800
新宿	2.155	20,100	19,300	18,700	19,366
本町	3.724	13,380	9,580	12,570	11,843
新高円寺	2.405	10,300	11,380	11,300	10,993
荻窪	1.698	10,500	10,300	9,500	10,100
富士見町	1.64	9,900	11,100	10,400	10,466
計	[km] 27.428	[kWh] 226,155	[kWh] 218,510	[kWh] 220,245	[kWh] 221,591

3.2.5 1号線および6号線における測定

いずれも直流1500V架空単線式であるが、一方は「乗り入れ形地下鉄」である1号線と、他方は乗り入れ形として計画されたが現在は未だ「独立形地下鉄」である6号線のレール電圧を、レール・大地間電位差を4号記録電圧計で24時間連続記録することにより、比較検討した。

1号線における瞬間最大電圧は東銀座の+106[V]であり、一昼夜平均の最大は泉岳寺の+25[V]で、やはり路線中央部の電圧が高くなっている。この路線では、分岐線が泉岳寺から品川を経て地上の京浜電鉄線に接続しており、変電所からの電距離が長い地上線末端の高いレール電圧が、地下鉄のレール電圧を持ち上げた形態として理解することができる。図-3.11に全線のレール電圧分布を示す。

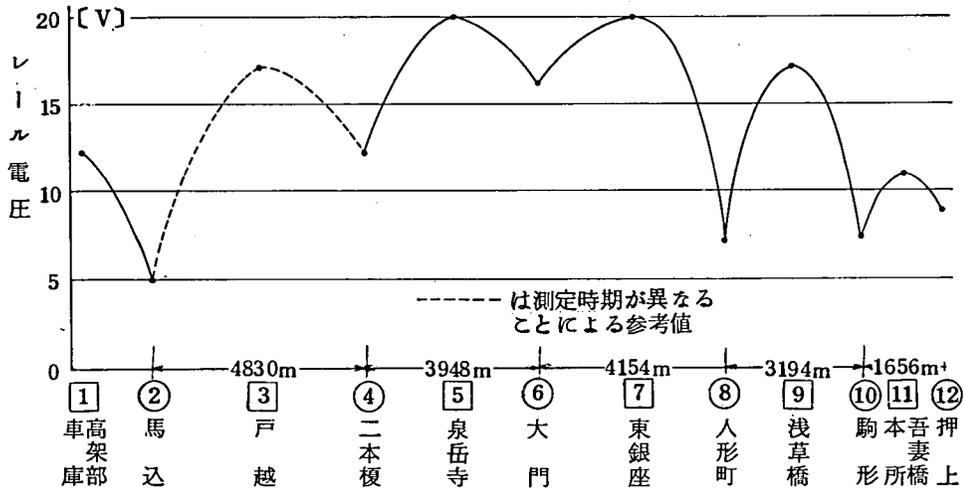


図 - 3. 11 東京1号線レール電圧分布

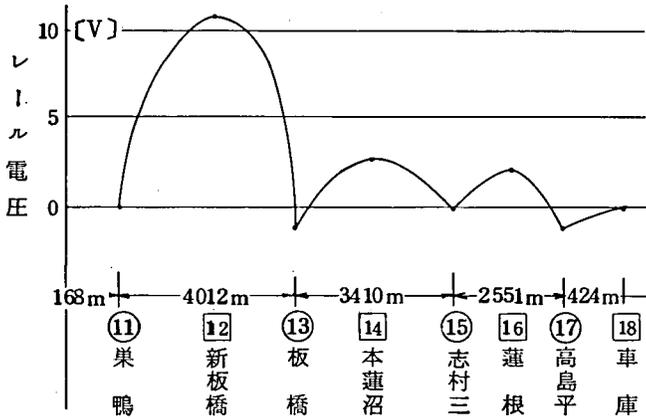


図 - 3. 12
東京6号線
レール電圧分布(1)

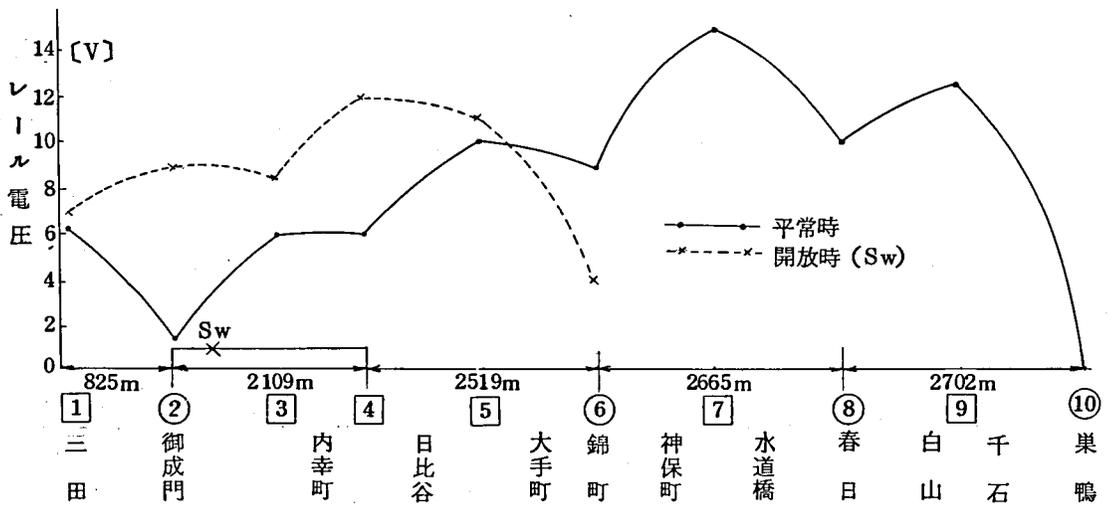


図 - 3. 13 東京6号線レール電圧分布(2)

6号線の場合、現状は「独立形地下鉄」であって他鉄道との相互乗入れは実施していないが、路線の北西端に約3kmの地上高架区間があり、第1期開通区間では高島平～巣鴨間約10kmのほぼ1/2を占めている。図-3.12にその平均電圧の距離的分布を示す。図に見られるように、この路線では地上部分側とくらべて地下部分側のレール電圧が高く、実際、新板橋は比較的変電所間隔の長い区間の中間に位置するとはいえ、瞬時最大電圧で+51(V)、一昼夜平均電圧で+11(V)を記録していた。さらに、その後延長された巣鴨～三田間約10kmのレール電圧を図-3.13に示すが、この測定では当該区間のレール電圧はすべて正で、負の領域が見当らない。このことは地上部分と地下部分で何らかの条件が相違することを示唆しているといえよう。また、志村車庫のレール電圧が線路の末端であるにもかかわらず丁度0(V)であるが、これは同所で人工地盤の造成工事が施行されていたので、偶々レールの一部が接地状態になっていたと推定される。

3.2.6 9号線における測定

9号線は、国鉄常磐線および小田急電鉄線との相互乗り入れを前提に直流1500V 架空単線式で計画され、地下は剛体単線式である。昭和44年12月の北千住～大手町間開通に際しては全線地下鉄の「独立形地下鉄」として先ず単独で列車の運転を開始し、その後大手町～霞ヶ関間を延長するとともに、綾瀬～北千住間の地上線の開通を待って昭和46年4月から常磐線と相互に直通列車の運転を実施した。現在は、さらに代々木公園まで延長されているが、小田急線とは未だ接続されるに至っていない。

このような過程においてレール電圧の推移を調査し、「乗り入れ形地下鉄」のレール電圧の諸特性を解明するために、

- (1) 綾瀬において地下鉄レールと国鉄レールが接続されない時点と接続された時点
- (2) 列車の相互乗り入れに伴ない並列き電が開始された時点
- (3) 地下鉄綾瀬変電所と国鉄金町変電所で整流器用変圧器のタップを調整して両変電所の負荷分担が変更された時

の3回にわたりレール電圧の測定を実施した。

ここではとりあえず(1)の測定についてレール電圧の距離的分布の観点からのみ記載し、それに対する地上線接続の影響は、(2)および(3)の問題とともに、後刻、項を改めて検討することにする。

測定は、両線の接続駅綾瀬において図-3.14に示すように開閉器と計器を配線し、開閉器Swを開いた状態と閉じた状態にして、いずれの場合にも同図に記入してある①~⑦の測定点で、レール（インピーダンス・ボンド中性点）と大地（電らん棚または鉄柱のアース）間の電位差を、記録電圧計で20分間、6号水銀電量計で一昼夜にわたり記録する方法によった。また日を改めて、開閉器Swの「入」、「切」を10分毎に1時間にわたって繰り返して、①と⑤を除く5箇所の測定点にEPR形記録電圧計を配置して同時測定することも行なっている。これらの測定記録から平均値を求めて同線におけるレール電圧の距離の分布を描くと図-3.15が得られる。両線の接続により地下鉄レール電圧が14~12[V]上昇することがわかる。

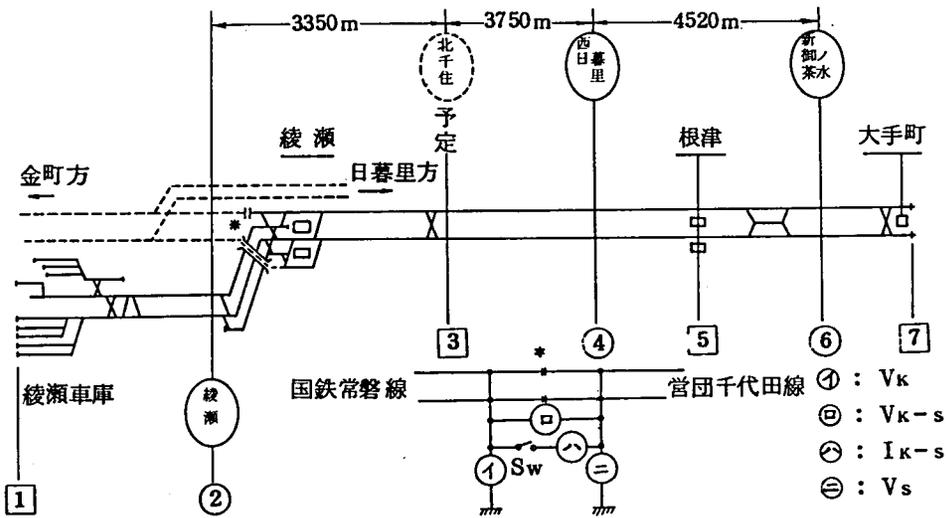


図-3.14. 東京9号線レール電圧測定位置および測定方法

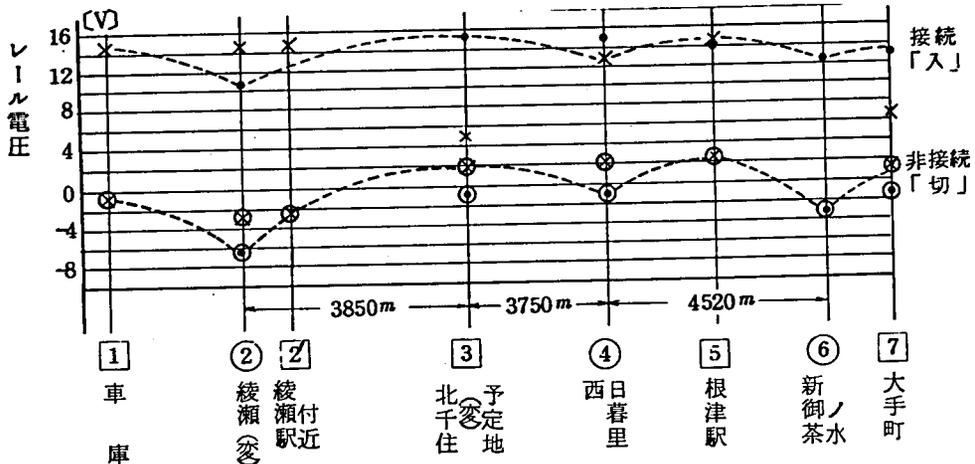


図-3.15 東京9号線レール電圧分布

3.3 大阪地下鉄および神戸地下鉄におけるレール電圧

3.3.1 線路の接続条件とレール電圧、両地下鉄の選定

前節に述べた東京地下鉄におけるレール電圧の測定結果では、その24時間平均値の距離的分布の形態が「乗り入れ形地下鉄」と「独立形地下鉄」とに大きく分類され、「乗り入れ形地下鉄」のレール電圧は全面的に高く、特に両方向乗り入れの場合、路線中央部で昂上することが明らかである。

筆者は、この現象を、特定の地上線に乗り入れている地下鉄の二、三の路線に特徴的というよりはむしろ、地上と地下で線路条件や運転条件が異なり、変電所の負荷分担も相違している郊外電鉄と線路を接続し、直通運転を実施している地下鉄に一般的な現象であると考えて、さらに研究を進めることにした。

現在、わが国で地下鉄が存在する都市は、東京、大阪、名古屋、神戸、札幌、および横浜の6都市である。この他に、郊外電鉄の都市内地下区間として、東京に京成、京王、小田急、さらに国鉄新総武線の4線区、名古屋に近鉄、名鉄の2線区、京都に阪急、奈良に近鉄の各1線区ずつ、大阪に阪神、京阪、近鉄の3線区、そして神戸に阪神と神戸電鉄線の2線区がある。

「乗り入れ形地下鉄」のレール電圧の特性を、「独立形地下鉄」のそれと比較して研究しようとする場合、できればこれら両方式の地下鉄が存在し、それもある程度ネットワークを形成していることが望ましい。また、郊外電鉄の地下区間は、それ自体「乗り入れ形地下鉄」ではあるが、路線長が短かく、変電所配置や電区間の関係からも、地下電気鉄道としての要件を欠くものが多い。

上記6地下鉄のうち、名古屋と横浜はいずれも「独立形地下鉄」であり、札幌は特殊方式のため所謂レールが使用されていないので、電気方式が単線式でレールが帰線として使用されており「乗り入れ形地下鉄」のある地下鉄は、東京の他は大阪と神戸である。

そこでこれら地下鉄当局にも、筆者らが東京で実施したと同一の基準でレール電圧の測定を依頼し、送付された各測定点の記録紙から路線毎にレール電圧の距離的分布を描くとともに、その結果を体系的に分析整理した。

3.3.2 大阪地下鉄の路線概要

大阪の地下鉄は、昭和8年5月梅田～心斎橋間3.1kmに始まり、その後順次建設が進められて、現在までに6路線70.2kmがペーターゼン形路線網を形成しており、すべて大阪市交通局によって運営されている。図-3.16 および表-3.7にその概要を示す。

電気方式は、1号線から5号線までが直流750V第三軌条式、6号線が直流1500V架空単線式（地下駅構内では剛体電車線を使用）で、1号線は北大阪急行電鉄と、6号線は阪急京都線と相互乗り入れをしている。直流750V第三軌条式の路線は、回送連絡線の接続関係から、1号線（御堂筋線）と3号線（四ツ橋線）、2号線（谷町線）と4号線（中央線）と5号線（千日前線）の2群にわかれ、さらに1号線（御堂筋線）と北急線は、レールはつながっているが第三軌条は区分されている。また6号線（堺筋線）と阪急線は、レール、電車線ともつながっている。

なお、この他に、阪神電鉄線が梅田へ0.5km、京阪電鉄線が淀屋橋へ1.8km、近鉄線が難波へ2.3kmの地下線（電気方式は直流1500V架空単線式、京阪のみ同600Vで剛体電車線を使用）により、市の中心部に入っているが、これらの路線はいずれも地下鉄路線網から全く独立している。

3.3.3 大阪地下鉄各線のレール電圧

大阪地下鉄各路線においても、図-3.16の線路略図に記入してある各地点で、記録電圧計を用いてレール電圧が測定された。その記録紙から各測定点における1日の平均

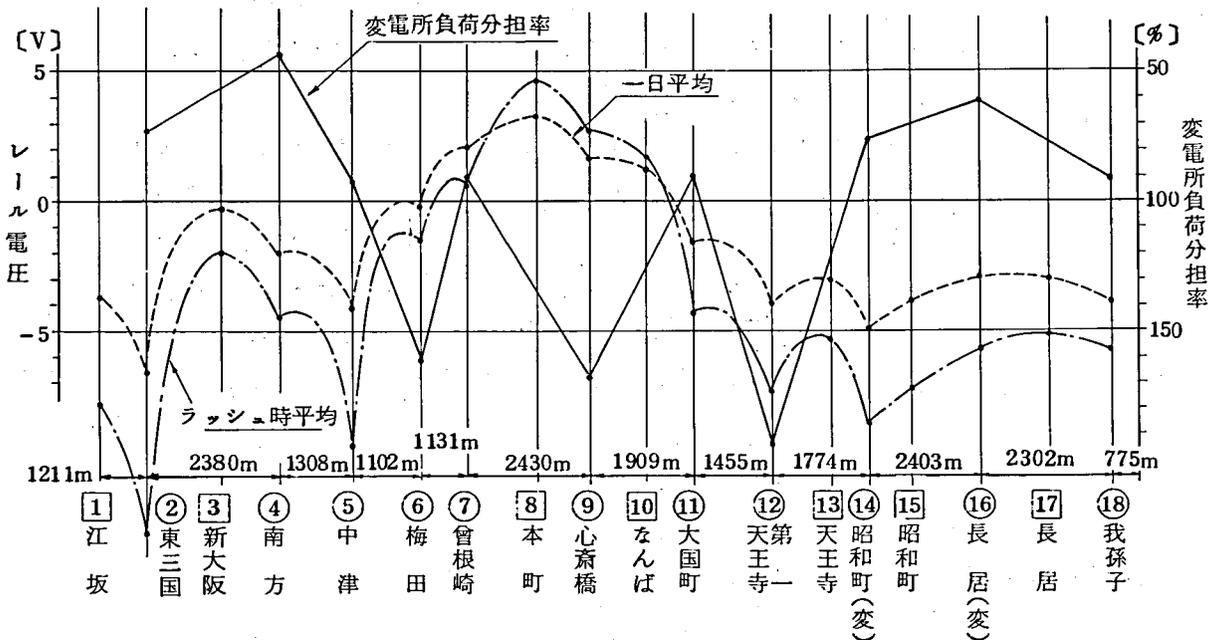


図-3.17 大阪1号線レール電圧分布

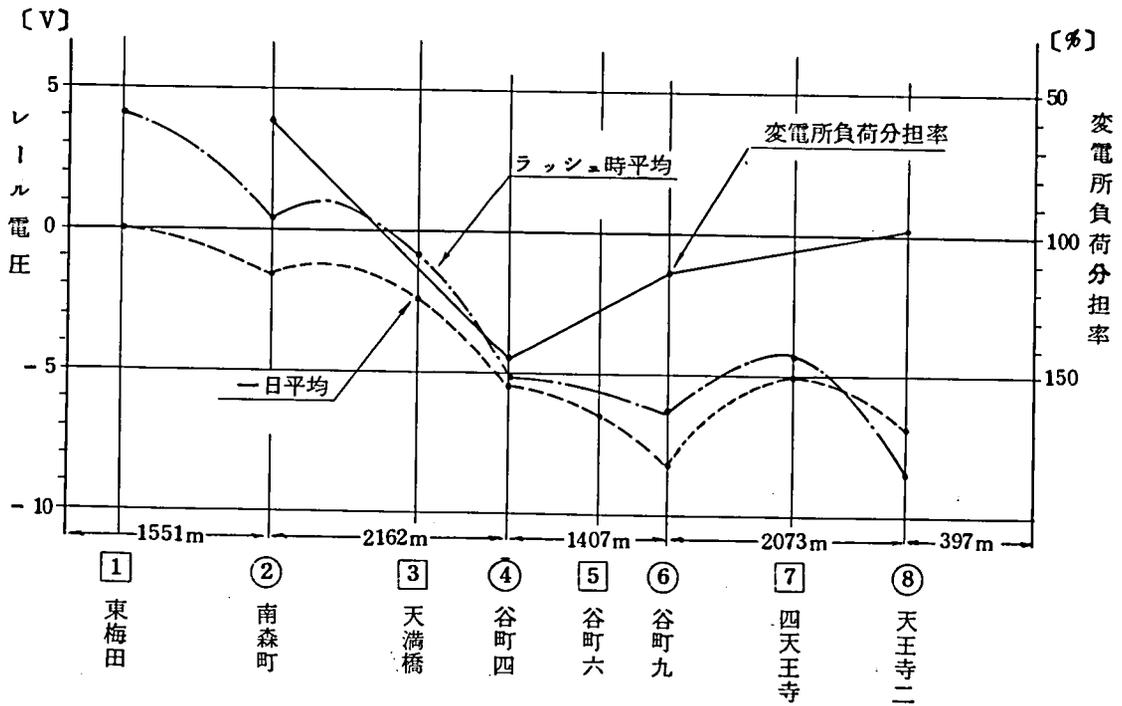


図-3.18 大阪2号線レール電圧分布

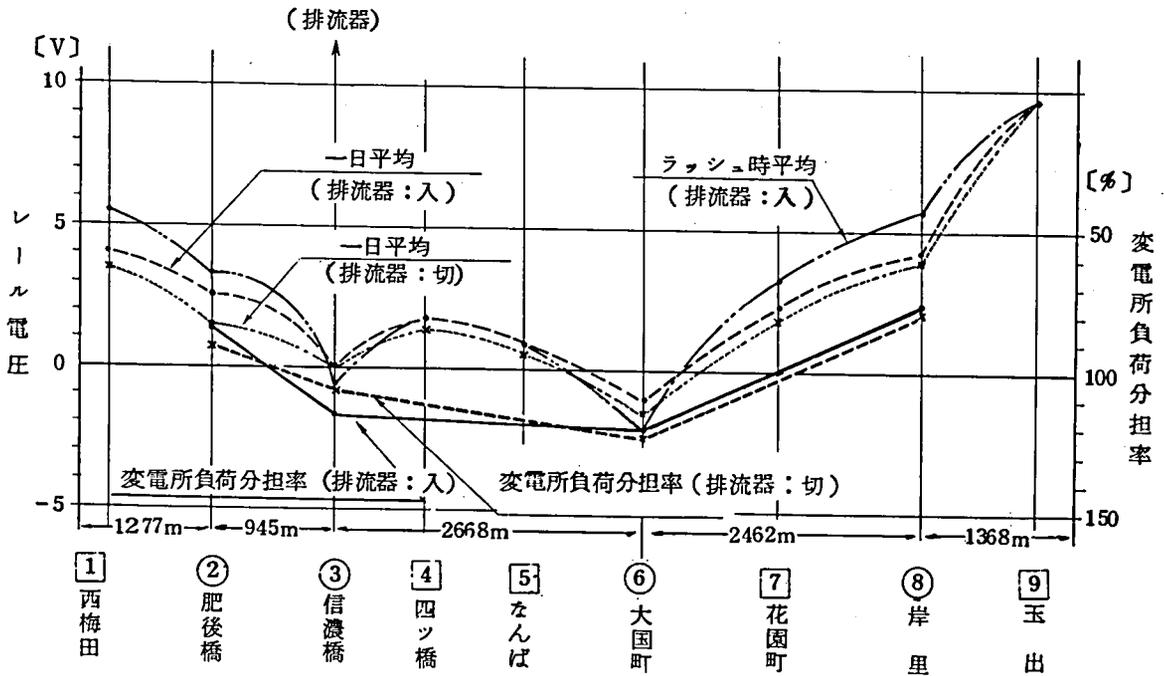


図-3.19 大阪3号線レール電圧分布

レール電圧を大略読み取り、またこれらの測定日にほぼ対応した期間の、地下鉄各線変電所における電車用電力量の使用実績から各線各変電所の負荷分担率を求めて、レール電圧の距離的分布とともにグラフに表現すると、図-3.17、図-3.18、図-3.19、図-3.20、図-3.21、および図-3.22の如くなる。この場合も、一部の線区を除き、負荷分担率の小さい変電所でレール電圧上昇の傾向がみられる。なお、地下鉄各線は相互に接続されて路線網を形成しているので、そのレール電圧分布は、それぞれの路線を単独に検討するとともに、他路線との関係についても考える必要がある。

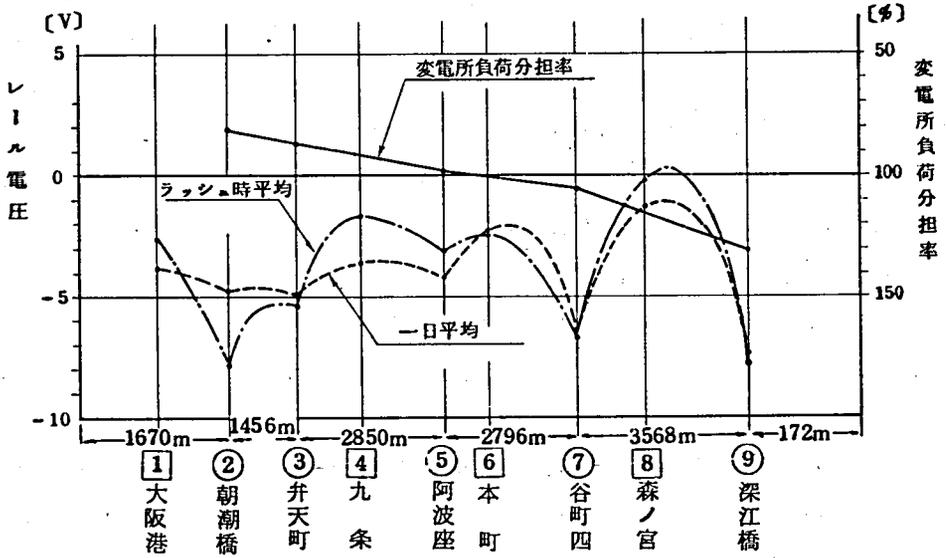


図-3.20 大阪4号線レール電圧分布

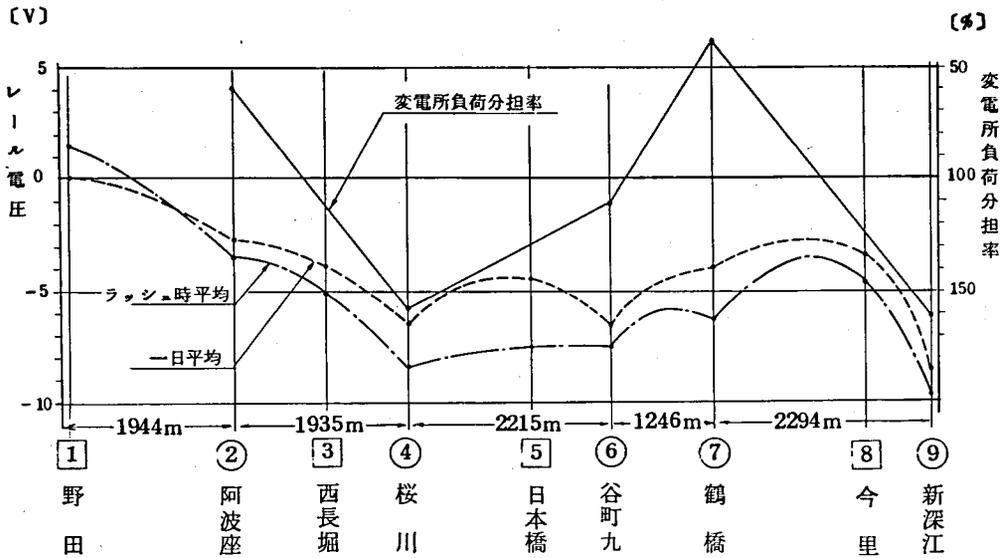


図-3.21 大阪5号線レール電圧分布

例えば、1号線と3号線はほぼ南北に平行して走り、大国町で接続されていて、1号線の我孫子車庫を共用しているが、レール電圧の分布は図に見るように対称的で、1号線では路線の中央部が高く両側が低くて負になり、3号線では中央部が低く両側が高く正になっている。これを変電所の負荷分担だけから単純に考察すると、3号線については負荷分担率とレール電圧とが一致した傾向を示すが、1号線では全く逆の関係になって説明がつかない。また、2号線と4号線は谷町4丁目で、4号線と5号線は阿波座で、5号線と2号線は谷町9丁目で接続されており、2号線と5号線の列車も上記地点の連絡線を経由して4号線の森ノ宮車庫から入出庫しているが、これら路線のレール電圧の分布状態を見ると、3線とも路線の片側が低く、またほぼ全線が負となっている。互に平行関係にある区間で4号線と5号線のレール電圧を比較してみると、その高低が両線で逆位相になっているようにも見える。変電所負荷分担率との関係はおおよそ理解できるが、レール電圧が大部分負という現象をこれから説明することはできない。一般に、電気鉄道線路上の一地点に電車負荷が存在すると、その地点でレール電圧が正となり、その電車負荷にき電する変電所以遠では負値となる。そして、レール漏れ抵抗が全線すべて一様ならば、レール電圧の距離的分布を示すグラフ上において、レール電圧の曲線が囲む面積は正側と負側が相等しい筈である。ところがこの場合、正領域が極めて小さいということは、正值を示す地点すなわち森ノ宮車庫付近のレールが極めて低い抵抗値で接地された状態にあると考えなければならない。実際、車庫構内ではレールが構築物等を介して不用意に接地された状態になっていることが多い。今一つの考えられる

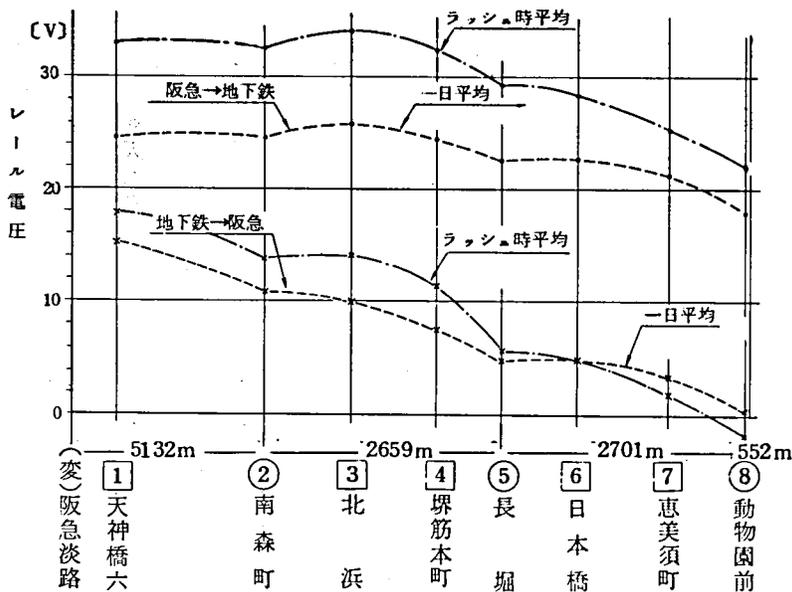


図 - 3.22 大阪6号線レール電圧分布

理由は測定上の問題である。2路線が交差点で連絡線を経由して結ばれている場合、その4方向にのびる線路のうち1線のレール電圧に着目すると、正值は当然その線区の列車起動時に現われているが、負値は他の3方向にのびる各線上の列車の影響がすべて現われるので、他線である2方向の線路上の列車による負値まで含めた一昼夜平均値は、当然の結果として負の勝ったデータとなるというものである。なお、これら各線は開通初期から「女」字形の路線網を形成していたのではなく、各線が単独の路線であった時期があり、その頃に測定されたレール電圧をみると図-3.23の如く正常な分布である⁽¹⁷⁾。

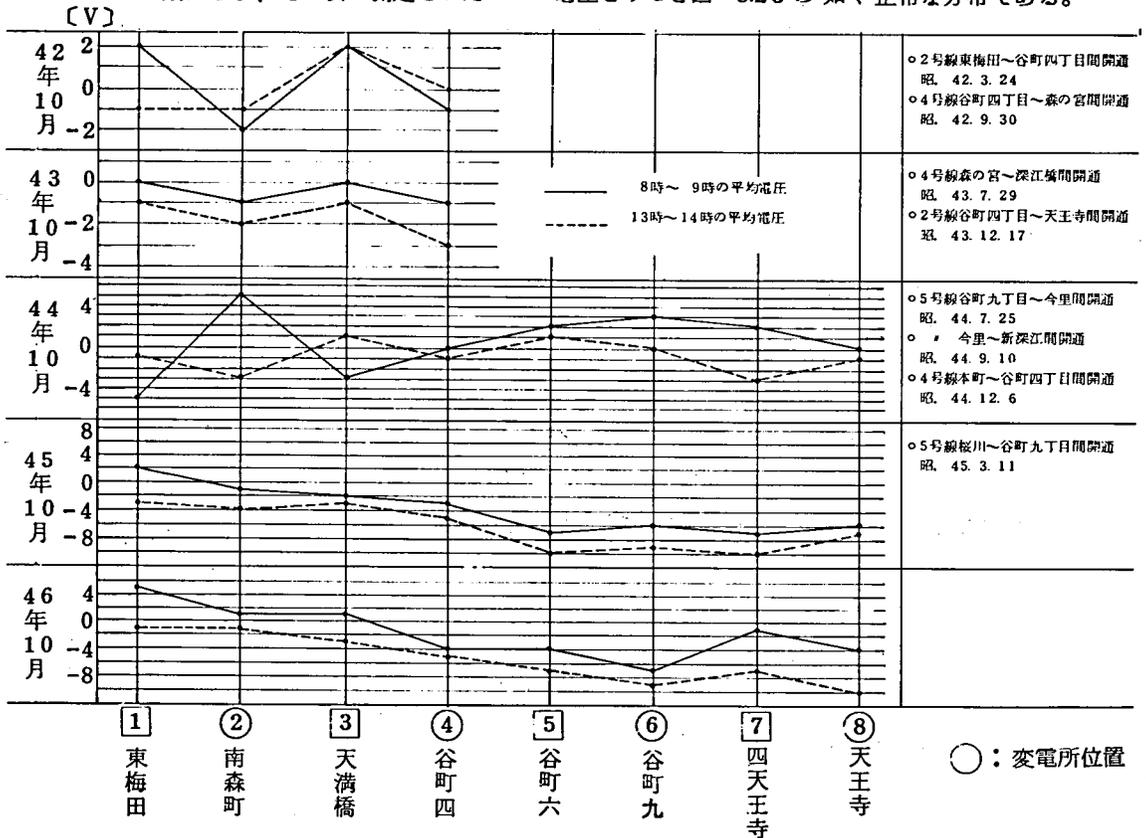


図-3.23 大阪2号線における年度別レール電圧分布の推移

6号線の場合は阪急京都線と相互乗入れが実施されていて、両線間に電力の融通があり、そのため地上線から地下線へ電力が供給される状態では、レール電圧が全線正で著しく高くなっている。また、そのレール電圧は、両線の接続点から地下鉄側の路線終端に向って一方的に傾斜しており、地下鉄側から逆に電力を供給する状態にすると全体として低減はされるが、距離的分布の傾向自体は変わらない。地上線終端部の高いレール電圧が地下線内に波及していると考えられる。図-3.22でこの二つの場合を比較できる。

3.3.4 神戸地下鉄の路線概要

神戸の地下鉄は、従来市内に分散していた私鉄4路線の終端駅を相互に接続することにより、都市高速鉄道としての一完した機能を発揮させるべく、昭和33年10月、神戸市と関係4私鉄が設立した神戸高速鉄道によって運営されている。この地下鉄は、トンネルや線路などの鉄道施設を保有し、電鉄用変電所から直流1500Vを架空単線式（トンネル内では一部剛体電車線を使用）で自線に供給するとともに、各駅において運輸営業業務を行なっているが、列車運転業務は相互に乗り入れる関係電鉄が行なうことになっていて、自社車両を持たない。路線は阪急神戸線と阪神電鉄線を山陽電鉄線に結びつける東西線7.2km、神戸電鉄線が乗り入れる南北線0.4kmがあり、いずれも、昭和43年4月に開通している。また、昭和45年3月から、神戸市交通局単独の地下鉄西神線、山手線、東部線および海岸線の建設ないしその準備も進められている。

表-3.8と図-3.24により路線の概要を示す。(端末に付図・付表としてある。)

3.3.5 神戸高速東西線のレール電圧

神戸地下鉄におけるレール電圧の測定は、3方向の「乗り入れ形地下鉄」である神戸高速東西線で記録電圧計を用いて実施された。東西線は、山陽方向の西代線、阪急方向の三宮線、および阪神方向の元町線から成り、線路は高速神戸駅で、き電関係は高速相生橋変電所で結ばれている。測定記録から各地点のレール電圧の平均値を求め、各変電所を電力量から計算した負荷分担率とともにグラフに表わすと図-3.25が得られる。図において、レール電圧、負荷分担率いずれのグラフも相生橋変電所の位置で不連続になっているが、これは3線の測定が休日をはさんで3日にわたったためで、換言すれば日によって、特に平日と休日とではこの程度の変動があり得るということもできよう。

レール電圧の24時間平均値の距離的分布は、他都市の「乗り入れ形地下鉄」に見られるように地下鉄線内が若干高くなっていて、丁度相生橋変電所で3線のレール電圧曲線をつまみ上げた形になっているが、これは同線に乗り入れている3私鉄の変電所と地下鉄の相生橋変電所の負荷分担率で説明ができる。

なお、本論文では、変電所の負荷分担率を、その路線全体に供給された全電力量のうち、当該変電所がその路線の変電所相互間隔からどれだけ分担供給すべきかという電力量と、実際に供給した電力量の比率と定義し、供給を分担すべき電力量は、総き電力量を路線巨長で除して軒当りの電力量を求め、これに負荷分担距離（隣接する変電所までの距離の $\frac{1}{2}$ としている）を乗じることにより算出している。

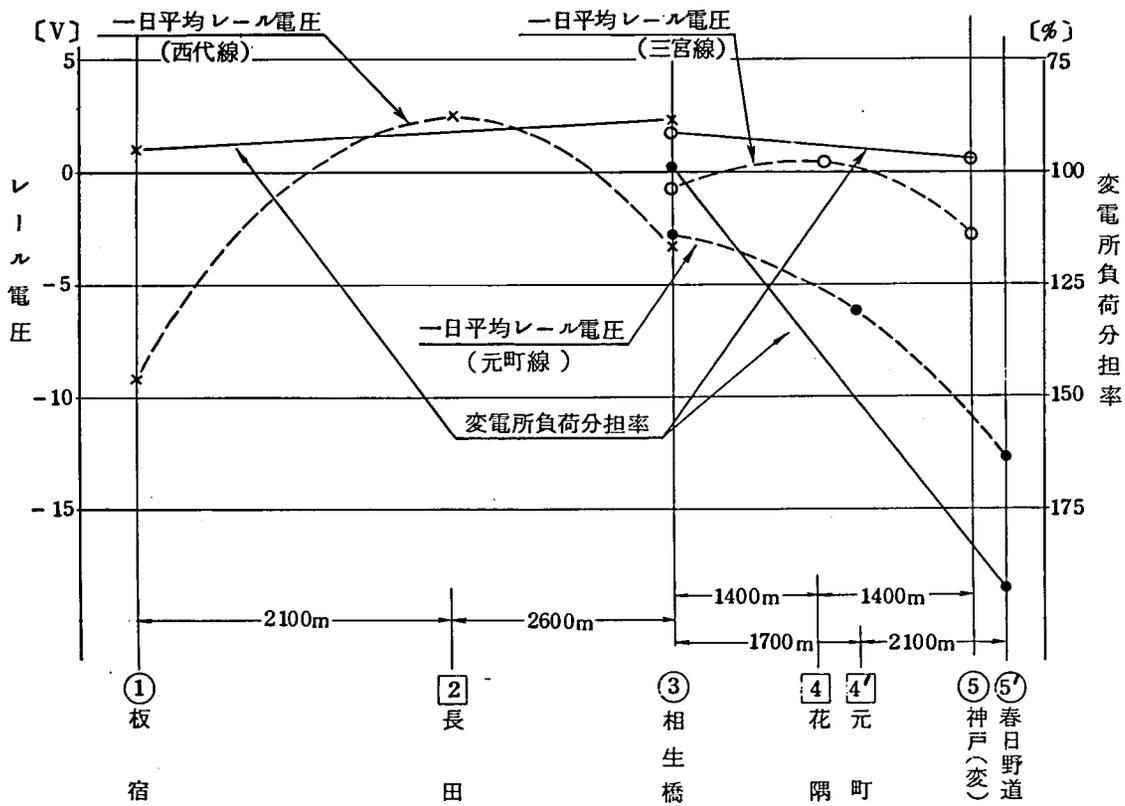


図 - 3.25 神戸高速東西線レール電圧

3.4 漏れ抵抗とその測定

3.4.1 漏れ抵抗値に対する考え方

従来、測定されて来たレールの漏れ抵抗値は、軌道構造の相違や道床の乾湿状態、対象とする区間の選び方とその測定方法によって相当な範囲に分散している。

地下鉄の場合、新線の開通に際して定電流試験を実施し、レールの漏れ抵抗を測定しているが、この方法ではき電変電所の負荷分担を考慮して変電所間隔の半分すなわち1～2 (km) の軌道を対象として測定するため、可成り長区間にわたる巨視的な平均値となってしまう。

一般に電食の発生は、レール電圧が高く、かつ漏れ抵抗が特に低い箇所において顕著であることから、その箇所での漏れ抵抗を論じるためには、総合的な値でなく局所的な値を測定すべきである。しかしレールは機械的にも電氣的にも連続体であり、レールを1本づつ取り外すことはレール交換作業時に限られるから、比較的容易に区分するには、軌道回路毎にその境界でインピーダンス・ボンドの中性点を分離するしかない。

以下、これらの方法による漏れ抵抗測定の実際を述べ、その結果得られた測定値を比較検討することにする。

3.4.2 定電流試験における漏れ抵抗測定

一般に帰線回路の特性を求める場合、実際の電車負荷をかけたのでは、その位置や電流値が時間とともに変化するため、一定電流を一定回路で通電する定電流試験が実施せられる。試験は新線の開通時、電気運転設備の完成時に行なわれるのが普通で、既営業線で行なう場合は終電車後になる。対象とする区間長は1～40(km)で、単一負荷回路で行なわれることが多く、図-3.26の(イ)が基本回路であるが、実際には安全抵抗Rを挿入する位置で、低圧路面軌道の場合は(ロ)、高圧高速鉄道の場合は(ハ)、(ニ)のような⁽³⁾。電気鉄道側での測定項目は、帰線電圧降下、帰線抵抗、漏れ抵抗などである。なお、同図(ホ)の回路によれば、試験電流がすべて漏れ電流にな

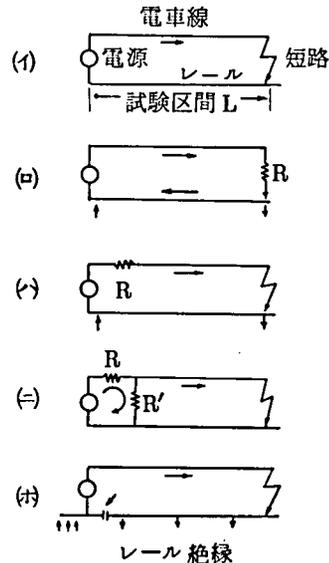


図-3.26 定電流試験回路

るから、比較的小さい電流で、漏れ抵抗を

$$\omega = \frac{V}{I} \dots\dots\dots (3.2)$$

この際 V は、測定区間の始端、中間、終端の値の平均値を用いるのがよい。

東京地下鉄 9 号線の北千住変電所新設に際しても、同線の綾瀬起点 1 K 474 M (綾瀬変電所と北千住変電所のほぼ中間) の地点から町屋駅付近に至る区間でレールの漏れ抵抗が測定された。すなわち、区間の両端でインピーダンス・ボンドの中性線を取り外し、図 - 3.27 に示す測定回路を構成して、電車線を正および負とした場合の漏れ電流 A_1 レール・大地間電位差 V_2 と V_4 、ならびにレール間電位差 V_3 を測定した。表 - 3.9 にその結果を、表 - 3.10 に杆当りに換算した漏れ抵抗値を示す。なお、1K474M 地点から北千住変電所間は大部分が地上の高架線であり、北千住変電所から町屋間はすべて地下線であって、漏れ抵抗値が 1 桁相違している。

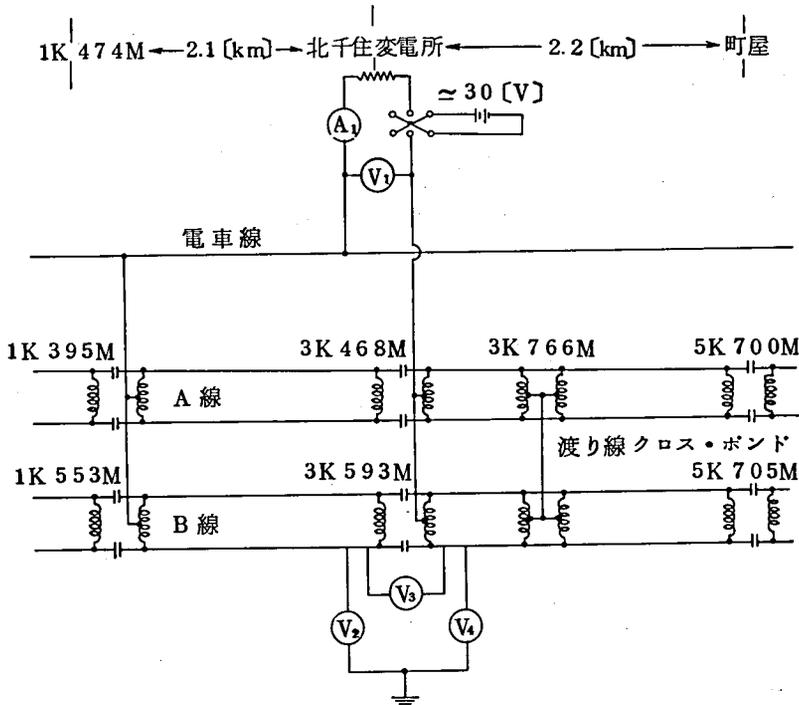


図 - 3.27 東京 9 号線漏れ電流試験測定回路

3.4.3 短いレールの漏れ抵抗

東京地下鉄 5 号線の木場駅付近および木場～東陽町間で、電食が発生してレール交換が施行されることになった箇所において、レール 1 本当たりの漏れ抵抗を測定した。

表-3.9 東京9号線における漏れ電流試験測定結果

		漏れ電流 A ₁ [A]	電 圧 V ₁ [V]	大地間 電位差 V ₂ [V]	レール間 電位差 V ₃ [V]	大地間 電位差 V ₄ [V]	V ₂ /A ₁ [Ω]	V ₄ /A ₁ [Ω]
A 線 側	電 車 線 ブ ラ ス	1.46	24.2	22.0	24.3	0.96	15.1	0.65
	電 車 線 マ イ ナ ス	1.56	24.1	22.5	23.5	1.13	14.4	0.72
	変 化 量 の 平 均	1.51	24.2	22.3	23.9	1.03	14.8	0.68
B 線 側	電 車 線 ブ ラ ス	1.46	24.2	23.2	24.3	1.5	15.9	1.03
	電 車 線 マ イ ナ ス	1.56	24.1	23.0	24.0	1.1	14.7	0.71
	変 化 量 の 平 均	1.51	24.2	23.1	24.2	1.3	15.3	0.87

表-3.10 東京9号線1K474M～町屋間漏れ抵抗

		1K474M～ 北千住変電所間	北千住変電所 ～町屋間
距離 [km]		2.1	2.2
漏れ 抵抗 [Ωkm]	A線側	30.4	1.5
	B線側	31.5	1.9
備 考		地 上	地 下

図-3.28 に示すように、更新されるレール(B)と(C)を、その両端の帰線ボンドと継目板を取り外してレール(A)と(D)から切り離し、レール(B)と(C)の間には軌条絶縁があるので、これを仮に接続してレール(B)+(C)として置き、先ずレール(A)との間で漏れ抵抗R₁を測定した。次にレール(B)と(C)との間の仮設接続線を取り外してレール(B)とレール(A)間についての漏れ抵抗R₂を測定し、さらにレール(C)とレール(A)間のR₃、レール(C)とレール(B)間のR₄も測定した。同様にして、レール(B)と(C)を新品に交換した後

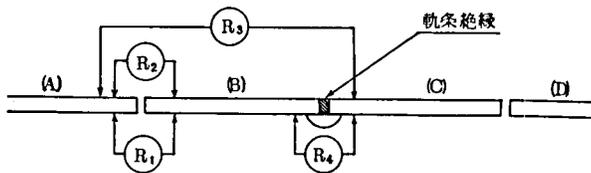


図-3.28 短いレールの漏れ抵抗測定方法

の測定も実施している。この場合、締結装置は清掃のみで更新していない。表-3.11にこれらの結果をまとめておくが、木場～東陽町間の湿潤箇所は、木場の乾燥箇所と比較して、漏れ抵

抗が1/10から1/100になっている。レールの交換効果は、締結装置が更新されない限り、殆んど認められない。

表 - 3.11 短いレールの漏れ抵抗

乾 湿 状 態	測 定 場 所	測 定 項 目	レ ー ル の 長 さ {m}	レール交換前		レール交換後	
				測 定 値 {Ω}	レール1本 1 杆 当 り 漏 れ 抵 抗 {Ω}	測 定 値 {Ω}	レール1本 1 杆 当 り 漏 れ 抵 抗 {Ω}
乾 燥	木 場	R ₁	36.6	350	12.8	300	11.0
		R ₂	11.6	500	5.8	310	3.6
		R ₃	25.0	>1000	>25	>1000	>25
		R ₄		>1000		>1000	
湿 潤	木場～ 東陽町間	R ₁	49.0	2.5	0.12	7.2	0.35
		R ₂	24.0	18.0	0.43	20.6	0.49
		R ₃	25.0	7.7	0.19	9.7	0.24
		R ₄		21.0		35.0	

表 - 3.12 水をかけた場合の
短いレールの漏れ抵抗

測定 場所	測定 項目	レール の長さ {m}	測定値 {Ω}	レール1本、 1 杆 当 り 漏 れ 抵 抗 {Ω}
木場	R ₁	36.6	140	5.1
	R ₂	11.6	130	1.5

また、木場ではレールを交換した後、更新したレール(B)'の締結装置21箇所全部に水道水をかけて、漏れ抵抗R₁、R₂を測定することも行なっているが、表-3.12に示す如く、約1/2に減少している。

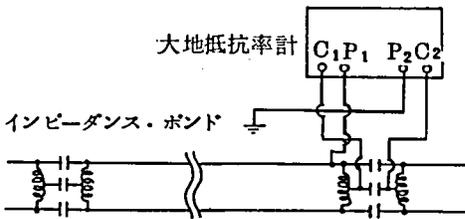
なお、これらの測定は、すべてL-9形接地抵抗計を用いる方法によった。

3.4.4 軌道回路毎の漏れ抵抗測定

レール漏れ抵抗の測定にあたっては、その測定区間長が可及的に短いことが望まれるが、地下鉄の場合、信号設備のインピーダンス・ボンダで絶縁区分されている1軌道回路約50～250[m]の軌道が、実用的に測定し得る最小単位となり、次の二つ測定方法が考えられる。

一つは、L-10形大地抵抗率計を用いる方法である。図-3.29のように、その電流

端子 C_1 、 C_2 をインピーダンス・ポンドの中性点に、電圧端子 P_1 を被測定側のレールにそれぞれ接続し、 P_2 を接地することによって $0.3 \sim 300 [\Omega]$ の抵抗を直読する。この際、



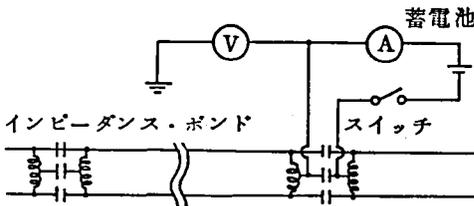
P_2 の接地点位置によりレールからその地点までの抵抗値が測定されるから、レールの漏れ抵抗を構成している締結装置、台板、枕木、道床、路盤の各部分毎に、その分担している漏れ抵抗を知ることができる。

図 - 3.29 大地抵抗率計による測定回路

他の一つは、対地電圧が V_0 のレールを比較的低い抵抗で接地した場合、接地電流 I が流れ、レール電圧が V_s になったとすると、その点から見たレールの見かけの接地抵抗 R が、

$$R = \frac{V_0 - V_s}{I} \dots\dots\dots (3.3)$$

として表わされることを利用するものである。図-3.30のように、インピーダンス・ポンドの中性点に蓄電池と電流計を直列に



接続し、被測定側軌道回路の中性点と大地間に電圧計を接続する。こうして人工的にレール電圧を与え、隣接した軌道回路を接地体として、スイッチで直流を入り切りした際の電圧計の振れ ΔV と電流計の読み A から $R = \Delta V / A$ を得る。

図 - 3.30 電圧計、電流計による測定回路

3.4.5 漏れ抵抗の測定値

レールの漏れ抵抗は、すでに述べたように、軌道の構造や乾湿状態によることはもちろん、測定方法の如何や対象とする区間の選び方によっても、測定値が異っている。

現在までに、各種の測定方法、種々の測定区間長で得られた地下鉄レールの漏れ抵抗値を表-3.13に整理しておく。

一般の専用軌道では、抵抗の高い木枕木が漏れ抵抗の大部分を負担しており、また清浄な状態にある砕石道床の抵抗も極めて高いが、併用軌道の場合にはレールが道路面下に埋った形となるため、漏れ抵抗が1桁は低下する。さらに、コンクリート枕木は内部に鉄筋を持ち、コンクリート自身の抵抗も低いので絶縁性が殆んどなく、コンクリート

道床の抵抗も同様に低い。このことから、コンクリートの枕木や台板を用いてレールをコンクリート道床に直結する構造が多い地下鉄の軌道ではレール漏れ抵抗が低いことが理解できる。

表- 3.13 地下鉄レール漏れ抵抗測定結果

測定対象レール長	測定路線	測定値 〔 $\Omega \cdot \text{km}$ 〕	備 考
1.0～4.5〔km〕	東京1号線	0.16～34.6	駅部コンクリート道床、コンクリート枕木、中間部碎石道床
	〃 2 〃	1.9～10.9	コンクリート道床、コンクリートブロック
	〃 3 〃	0.3～9.3	コンクリートおよび碎石道床
	〃 4 〃	0.8～20.3	〃
	〃 5 〃	2.5～35.4	(地下部)コンクリート道床、コンクリートブロック
		13.2～29.7	(地上部)碎石道床、コンクリート枕木
	〃 6 〃	2.6～46.4	駅部コンクリート道床、コンクリート枕木、中間部碎石道床
	〃 9 〃	1.0～4.6	コンクリート道床、コンクリートブロック
0.4～1.2〔km〕	大阪1号線	高く測定不能	碎石道床、木枕木
	〃 3 〃	2.97～28.8	コンクリートおよび碎石道床
	〃 5 〃	644～57.2	〃
	〃 6 〃	4.47～15.8	コンクリート道床
11.6～49.0〔m〕	東京5号線	3.6～25.0	コンクリート道床の乾燥区間
		0.12～0.49	〃 湿潤区間

地下鉄でも、地上の高架部分や大阪地下鉄各線のように乾燥した碎石道床の区間では、漏れ抵抗が数十〔 $\Omega \cdot \text{km}$ 〕もあるが、一般には数〔 $\Omega \cdot \text{km}$ 〕で、漏水などで湿潤な状態にあるコンクリート道床区間においてはさらに1桁小さくなる。地上の複線専用軌道の漏れ抵抗の平均値が1〔 $\Omega \cdot \text{km}$ 〕程度であることを考えると、地下線が地上線と電氣的に接続されている場合には、その路線全体のうち特に地下線から電流が流出し易いといえる。したがって地下鉄では漏水防止に努め、レール締結装置も電氣的絶縁に留意した構造とするとともに、軌道を清浄な状態に保守し、その絶縁耐力を維持する必要がある。

第 4 章 レール電圧の距離的分布の解析

4.1 レールを流れる電流と電圧の一般式

本章では、電車線が単線式である電気鉄道の帰線路すなわち軌道を、全線均一なレール導体抵抗 r [Ω/km] とレール漏れ抵抗 ω [$\Omega \cdot \text{km}$] を持った分布定数回路とし、電車負荷は十分に多数存在して帰線路の負荷電流が線路終端から電変電所に向って直線的に増加するものとして、先ずレールを流れる電流と電圧の一般式をみちびく。次にそれを用いて、負荷条件などを変えた場合のレール電圧を計算し、各線で測定されたレール電圧の24時間平均値の距離的分布の解析を行うことにする。

線路の終端を座標の原点にとり、任意の地点 x においてレールを流れる電流を i [A]、電圧を e [V] とすれば、

レールの微小部分 dx 中の電圧降下は、

$$\frac{de}{dx} = -i \cdot r \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

一方、その間における電流の増加は、

$$\frac{di}{dx} = -\frac{e}{\omega} \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

両式から、

$$\frac{d^2i}{dx^2} - \frac{r}{\omega} \cdot i = 0 \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

この式の一般解は、

$$i = A \cdot \epsilon^{\alpha x} + B \cdot \epsilon^{-\alpha x} \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

ここで、

$$\alpha = \sqrt{\frac{r}{\omega}} \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

線路単位長当りの負荷電流を i_0 [A/km]、線路の全長を L [km] とすれば、

電変電所の全負荷電流 I_0 [A] は、当然、

$$I_0 = i_0 \cdot L \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

さて、線路の終端 $x = 0$ では電流 $i = 0$ の条件から、

$$A = -B$$

一方、線路の始端 $x = L$ では電流 $i = i_0 L$ であるから、

$$A \varepsilon^{\alpha L} + B \varepsilon^{-\alpha L} = i_0 L$$

両式から

$$A = \frac{i_0 L}{\varepsilon^{\alpha L} - \varepsilon^{-\alpha L}}$$

したがって

$$\begin{aligned} i &= \frac{i_0 L}{\varepsilon^{\alpha L} - \varepsilon^{-\alpha L}} \cdot (\varepsilon^{\alpha x} - \varepsilon^{-\alpha x}) \\ &= \frac{i_0 L}{\sinh \alpha L} \cdot \sinh \alpha x \dots\dots\dots (4.7) \end{aligned}$$

これが任意の地点 x におけるレール電流の式である。

また、その任意地点での負荷電流と上記のレールを流れる電流の差が、その地点における漏れ電流になっている筈であるから、

$$\begin{aligned} i_l &= i_0 \cdot x - i \\ &= i_0 \cdot x - \frac{i_0 L}{\sinh \alpha L} \cdot \sinh \alpha x \dots\dots\dots (4.8) \end{aligned}$$

漏れ電流が最大になる地点は、

$$\frac{di_l}{dx} = i_0 - \frac{i_0 \alpha L}{\sinh \alpha L} \cdot \cosh \alpha x = 0$$

を解いて、

$$x = \frac{1}{\alpha} \cosh^{-1} \frac{\sinh \alpha L}{\alpha L} \dots\dots\dots (4.9)$$

ここが所謂中性点である。

そしてこの地点における最大漏れ電流は、

$$\begin{aligned} i_l &= i_0 \cdot \frac{1}{\alpha} \cosh^{-1} \frac{\sinh \alpha L}{\alpha L} \\ &\quad - \frac{i_0 L}{\sinh \alpha L} \cdot \sqrt{\frac{\sinh^2 \alpha L}{\alpha^2 L^2}} \dots\dots\dots (4.10) \end{aligned}$$

一方、漏れ抵抗と漏れ電流から、

$$e = \omega \cdot \frac{di_l}{dx}$$

$$= i_0 \cdot \omega \left(1 - \frac{\alpha L}{\sinh \alpha L} \cdot \cosh \alpha x \right) \dots \dots \dots (4.11)$$

これが任意の地点 x におけるレール電圧の式となる。

そこで、線路の終端においては $x=0$ において、

$$e_{x=0} = i_0 \cdot \omega \left(1 - \frac{\alpha L}{\sinh \alpha L} \right)$$

変電所の位置では $x=L$ において、

$$e_{x=L} = i_0 \cdot \omega \left(1 - \frac{\alpha L}{\tanh \alpha L} \right)$$

帰線の全電圧降下は両式の差として、

$$V = e_{x=0} - e_{x=L}$$

$$= i_0 \cdot \omega \left(\frac{\alpha L}{\tanh \alpha L} - \frac{\alpha L}{\sinh \alpha L} \right)$$

$$= \omega \cdot \alpha \cdot I_0 \left(\frac{1}{\tanh \alpha L} - \frac{1}{\sinh \alpha L} \right)$$

$$= r \cdot I_0 \left(\frac{\alpha L}{\tanh \alpha L} - \frac{\alpha L}{\sinh \alpha L} \right) \dots \dots \dots (4.12)$$

ただし、ここで

$$r = \omega \cdot \alpha = \omega \cdot \sqrt{\frac{r}{\omega}} = \sqrt{\omega \cdot r} \dots \dots \dots (4.13)$$

これはレールの特性抵抗である。

なお、以上の式をグラフで表現すると図-4.1のようになり、全負荷電流 $i_0 x$ とレール電流 i 、漏れ電流 i_l の関係、およびレール電圧 e の分布状態が示される⁽³⁾。図中、点Nは中性点であって、この地点ではレール電圧が $e=0$ 、漏れ電流 i_l は式(4.10)で表わされる最大値をとる。また、レール漏れ抵抗を全線一様としているから、レール電圧曲線が囲む正負の面積、すなわち $NOe_{x=0}$ と $NLe_{x=L}$ は当然等しい。

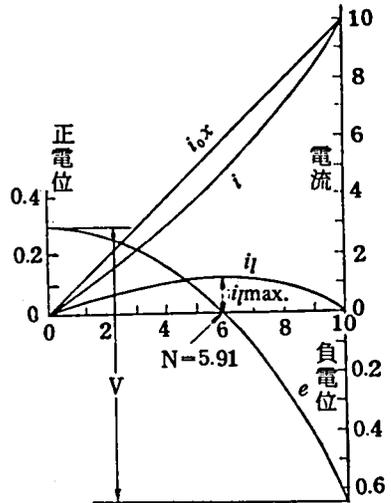


図-4.1 全負荷電流、レール電流、漏れ電流とレール電圧

4.2 負荷条件などを変えた場合のレール電圧

レール電圧の距離的分布が、き電距離の長短、負荷分担の不均衡、排流器等による接地などによってどのような変化をするか、計算を簡単にするため二、三の数値を大略仮定して、それらのグラフを描いてみた。

(1) 負荷が均一に分布している基本的な場合

レール抵抗： $r = 0.015 [\Omega/\text{km}]$

レール漏れ抵抗： $\omega = 1.0 [\Omega \cdot \text{km}]$

したがって漏れ係数は、

$$\alpha = \sqrt{\frac{r}{\omega}} = 0.122 [\Omega]$$

き電距離： $L = 5 [\text{km}]$

単位長当りの負荷電流

$$: i_0 = 200 [\text{A}/\text{km}]$$

したがって全負荷電流は、

$$I_0 = i_0 \cdot L = 1000 [\text{A}]$$

と仮定して、

レール電圧を式(4.11)の

$$e = i_0 \cdot \omega \left(1 - \frac{\alpha L}{\sinh \alpha L} \cosh \alpha x \right)$$

の式で計算すると、図-4.2のようになる。

(2) き電距離すなわち変電所間隔に長短がある場合

軌道単位長当りの負荷電流は同一で、

$$: i_0 = 200 [\text{A}]$$

き電距離が、

$$\text{第1区間} : 2L_1 = 10 [\text{km}]$$

$$\text{第2区間} : 2L_2 = 4 [\text{km}]$$

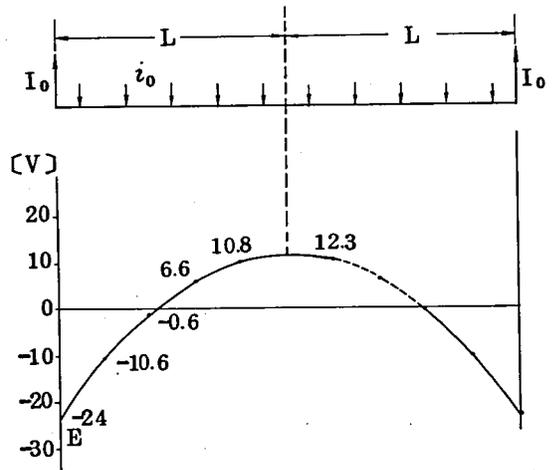


図-4.2 負荷が均一に分布している場合

と異なる場合を考え、それぞれのき電区間に対するレール電圧を図示すると、図-4.3の実線の如くなる。

実際には境界の変電所で両区間のレール電圧は相等しい筈であり、境界条件を入れて複雑な計算をするまでもなく、図の点線のように、一方のレール電圧が持ち上げられ、他方のレール電圧が押し下げられることが理解できる。

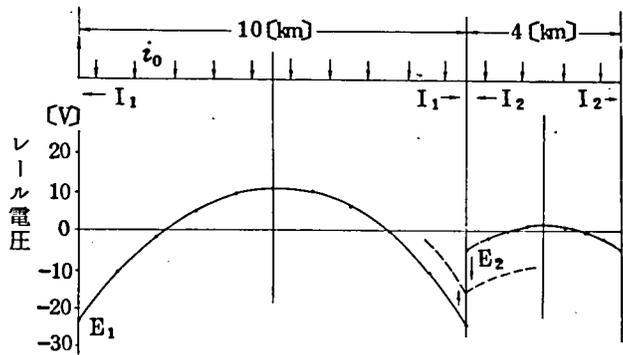


図-4.3 き電距離に長短がある場合

この現象は、電気運転設備の設計基準が異なる二路線を接続して直通列車を運転する場合に生じるが、一路線内であっても現実の変電所間隔は必ずしも均等になってはいないから、程度の差こそあれ、各変電所の位置で見られることになる。

しかし、地下鉄と他鉄道との接続の場合、一般に変電所間隔が短いのは地下鉄の方であるから、接続点に変電所が存在する場合には、この考え方が地下鉄レール電圧の上昇を説明することにはならない。

(3) き電区間毎に負荷が異なる場合

変電所間隔は同一であっても、き電区間毎の負荷に軽重があると、境界の変電所の位置では前述の(2)と同様の現象が生じることになる。

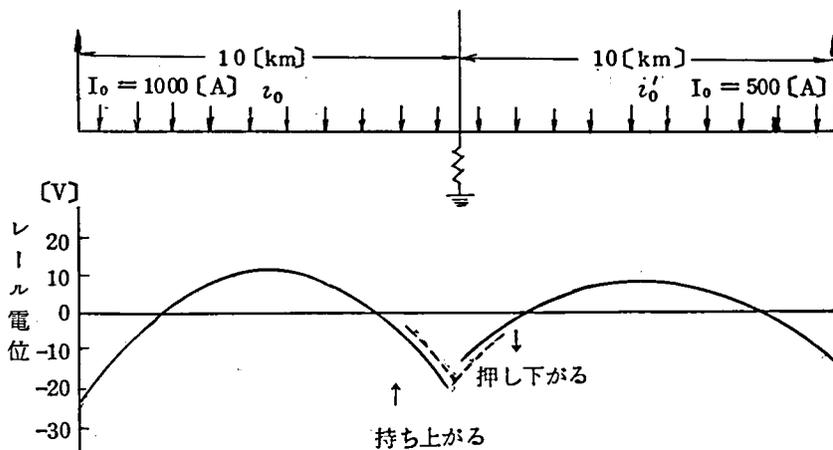


図-4.4 き電区間毎に負荷が異なる場合

図-4.4は、

両区間とも $2L = 10$ [km]
一方は $i_{01} = 200$ [A/km]
すなわち $I_1 = 1000$ [A]
他方は $i_{02} = 100$ [A/km]
すなわち $I_2 = 500$ [A]

とした場合である。

(4) 変電所でレールが接地されている場合

たとえば埋設管を変電所で帰線に排流接続した場合、レールは低抵抗で接地された状態になり、当然その電位に変化をきたす。

式(4.4)のレール電流の一般式

$$i = A\epsilon^{\alpha x} + B\epsilon^{-\alpha x} \text{ において、}$$

$x = 0$ で $i = 0$ の条件から

$$A = -B$$

もしレールが完全に接地されているとすると、

$$x = L \text{ で } e = 0$$

また、

$$\begin{aligned} i_0 &= \frac{di}{dx} \\ &= \alpha A \epsilon^{\alpha x} - \alpha B \epsilon^{-\alpha x} \end{aligned}$$

これらの関係から、

$$A = \frac{i_0}{\alpha (\epsilon^{\alpha L} + \epsilon^{-\alpha L})}$$

よって、

$$i = \frac{i_0}{\alpha \cosh \alpha L} \sinh \alpha x \dots\dots\dots (4.14)$$

これがこの場合のレール電流である。

したがって任意の点における漏れ電流は、

$$i_l = i_0 \cdot x - \frac{i_0}{\alpha \cosh \alpha L} \sinh \alpha x \dots\dots\dots (4.15)$$

この式で、

$$\frac{di_l}{dx} = 0$$

と置いて漏れ電流が最大となる点を求めると、当然ながら $x = L$ 、すなわち変電所の位置である。

その大きさは、

$$i_l = i_0 \left(L - \frac{\tanh \alpha L}{\alpha} \right) \dots\dots\dots (4.16)$$

一方、レール電圧の式は、

$$\begin{aligned} e &= \omega \cdot \frac{di_l}{dx} \\ &= i_0 \cdot \omega \left(1 - \frac{\cosh \alpha x}{\cosh \alpha L} \right) \dots\dots\dots (4.17) \end{aligned}$$

線路の終端 $x = 0$ では、

$$e = i_0 \cdot \omega \left(1 - \frac{1}{\cosh \alpha L} \right) \dots\dots\dots (4.18)$$

そしてこの場合には、これがそのまま 帰線中の全電圧降下ということになる。

以上要するに、変電所でレールを接地すると、レール電流は減少し、漏れ電流が増加する。変電所におけるレールの電位は当然負から零になり、帰線中の全電圧降下は減少しても線路の終端すなわち変電所から遠く離れた $x = 0$ 付近でレールの電位は上昇する。

実際には埋設管もある程度の接地抵抗を有し、さらに排流回路の抵抗も加わるから、電位が e である A 点のレールを接地抵抗 R_2 を介して接地した場合の電位 e' を考えて、

$$e' = e \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \dots\dots\dots (4.19)$$

なお、 R_1 は A 点から見たレールの接地抵抗であって、

$$R_1 = \sqrt{r \cdot \omega} \cdot \coth \alpha L \dots\dots\dots (4.20)$$

ここでレールが十分に長ければ、

$$L \rightarrow \infty \text{で } \coth \alpha L \rightarrow 1$$

また、A点から両側にのびているものとすれば、抵抗は並列になって、

$$R_1 = \frac{1}{2} \sqrt{r \cdot \omega} \dots\dots\dots (4.21)$$

この場合、レールの電位の変化分は、

$$\begin{aligned} v_0 &= e - e' \\ &= e \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \dots\dots\dots (4.22) \end{aligned}$$

で表われ、 $V = v_0 \cdot e^{-\alpha x}$ によって減衰はするが、レールに沿って無限に影響を及ぼす。

したがって、接地後のレール電圧は従来のレール電圧にこの電圧を重畳したものになり、この分だけ上昇することになる。

図-4.5は、

$$\left. \begin{array}{l} \text{レール抵抗: } r = 0.015 \text{ } [\Omega/\text{km}] \\ \text{漏れ抵抗: } \omega = 1.0 \text{ } [\Omega \cdot \text{km}] \end{array} \right\} \therefore R_1 = 0.061 \text{ } [\Omega]$$

のレールを、A点において、接地抵抗: $R_2 = 0.02 \text{ } [\Omega]$ で接地した場合を示している。

地上の鉄道のレール電圧は、このように排流の影響で上昇していることが多いので、これに接続する地下鉄のレール電圧も当然その影響を受けるのである。

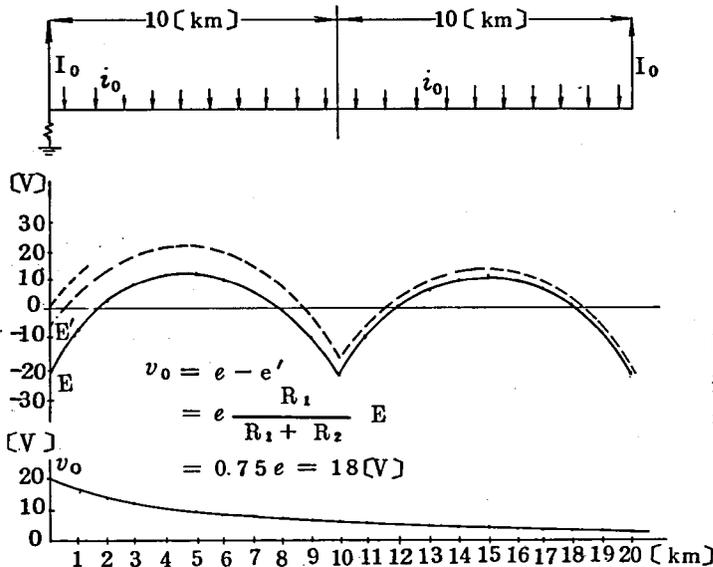


図-4.5
変電所でレールが
接地されている場合

(5) 変電所負荷分担の不均衡

たとえば電線の条数や容量に大差があり、並列電している二変電所の負荷分担が平衡していない場合や、一方の変電所の電圧が高く、他方のそれが低い場合には、負荷分担の分岐点を境にしてその左側のレール電圧が高くなり、右側にもその影響が波及する。

図-4.6 にその一例を示す。

地下鉄が地上の鉄道に乗り入れる場合、接続点における地上線のレール電圧が図の左側のように高いと、右側の地下鉄のレール電圧は地上線のレール電圧の近くにまで引き上げられ、それから右方向へは地下鉄の線路定数により減衰している。したがって現実のレール電圧は、前項(4)の場合と同様、この地上線の影響に地下鉄本来のレール電圧を重畳したものになる。もし、地上の鉄道に排流器が接続されていると、地上線のレール電圧は前項(4)に述べたような理由で、図の点線に示すような状態にまで上昇しているから、その影響はさらに大きい。

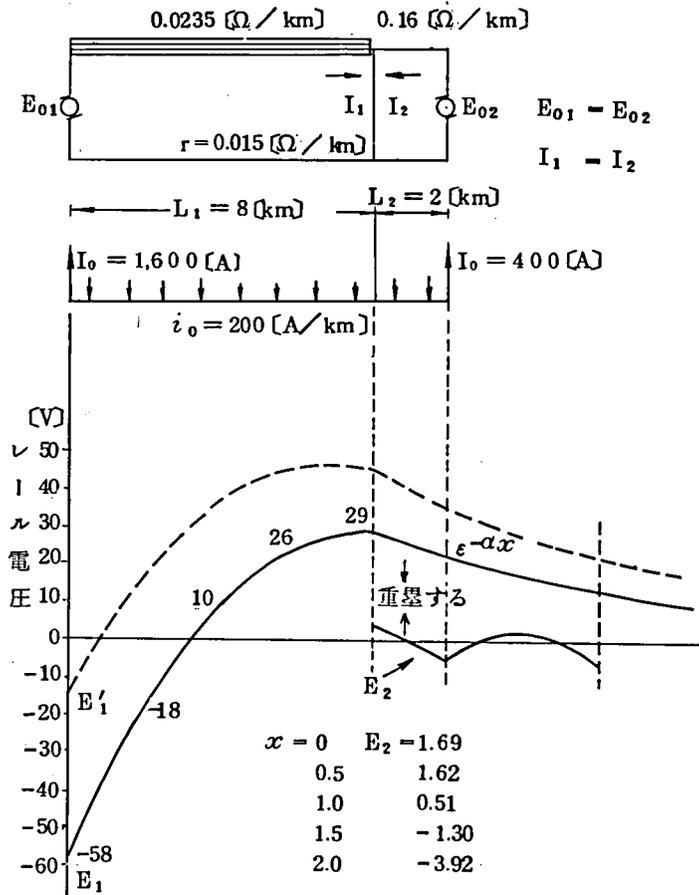


図-4.6 変電所負荷分担の不均衡

(6) 漏れ抵抗など線路条件の不均一

地下鉄と地上の一般電気鉄道が並列き電され、相互に直通運転を実施している場合、負荷条件、き電条件、線路条件などは当然両者間で相違しており、とりわけ同一き電区間内に地上線と地下線が存在する場合には、線路の途中で軌道構造したがって電気定数に変化し、漏れ電流の大きさと分布が異ってくるから、レール電圧の距離的分布も、その運転系統を全線一様な路線として計算した結果とは形状を異にした特性を示す。

一般に地下鉄の場合、列車単位が大きく運転間隔が短いので、重軌条が使用され、帰線の電氣的抵抗すなわちレール抵抗は一般の電気鉄道に比して小さいが、トンネル内の軌道構造がコンクリート直結道床であることや、漏水による湿潤な環境条件のために漏れ抵抗も1桁小さくなる。

この関係は、併用、専用両軌道の関係に類似しており、併用軌道のレール抵抗を 0.011 [Ω/km]と専用軌道の $1/2$ にし、漏れ抵抗を 0.1 [$\Omega \cdot \text{km}$]と専用軌道の $1/10$ にした計算例がすでに発表されているので、⁽²⁶⁾ ここではその中から代表例をいくつか選び、図-4.7に一括して掲げて参考にしたい。

図から明らかなように、漏れ抵抗が低い軌道の存在によって、漏れ電流が増加するのは当然であるが、とりわけ、負き電点側の軌道の漏れ抵抗が低い場合、最大漏れ電流が大きくなる。帰線中の全電圧降下は、しかし、この場合の方が小さいのである。

レール電圧 e の距離的分布も、中性点が移動する結果、零線との間に囲む正負の面積が著しく不均等になる。この面積比は軌道の漏れ抵抗 ω の比になっている筈で、レールからの流出入電流密度 e/ω としてグラフを描けば、如何なる場合においても正負の面積が等しくなる。

以上要するに、変電所付近で漏れ抵抗が小さいと漏れ電流が大きくなるので、地下鉄と一般の電気鉄道が接続される場合、付近のレール漏れ抵抗が低い地下鉄の変電所が、地上線にもき電することになるような状態は好ましくないといえる。

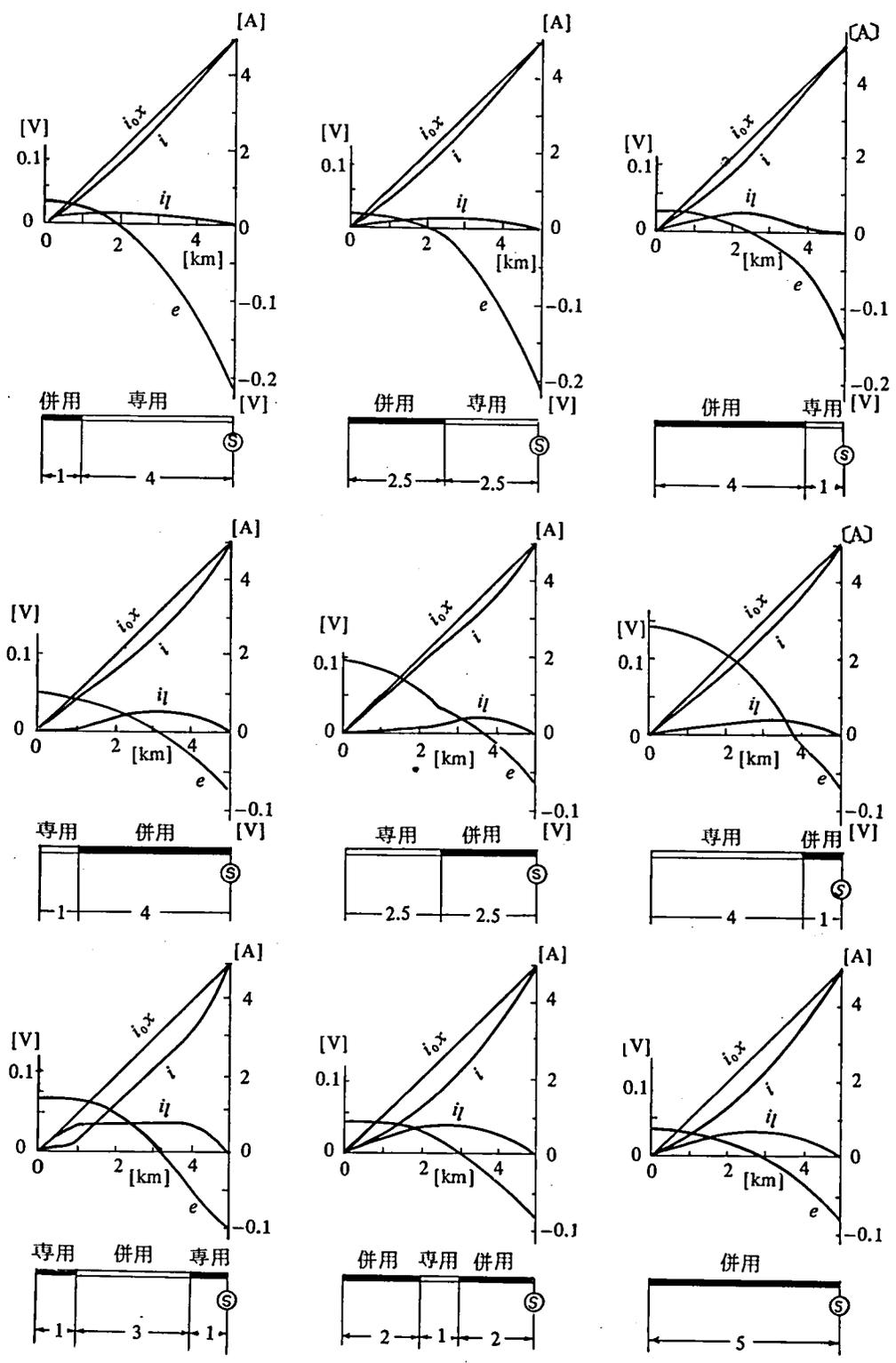


図-4.7 異種軌道を併用した場合の電流、電圧

4.3 各線で測定されたレール電圧の検討

4.3.1 き電距離と帰線全電圧降下

並列運転状態にある変電所の負荷分担が相互に平衡していれば、レール電圧の距離的分布は先に述べた理論計算に従う筈であり、実際はき電距離に長短があるから区間毎のレール電圧最大値、最小値には異同があっても、その区間のレール中の帰線全電圧降下を求めれば、式(4.12)で計算した値とほぼ一致している。換言すれば、測定値が計算値から大きくはずれている場合には、その区間の負荷条件が均一分布負荷という仮定を甚だしく逸脱した状態にあるか、線路構造が全線一様でなく、漏れ抵抗などの線路定数に著しい地域の変動があると考えなければならない。

図-4.8および図-4.9に、東京および大阪の地下鉄各線におけるレール電圧の測定結果から求めた帰線全電圧降下を示す。測定から得られた値が負荷電流密度を仮定して計算した理論値からはずれて説明が困難な線区では、レール電圧の距離的分布の形状にすでに問題の存在が予見されているようである。これらの問題は次項以下で検討することにする。

4.3.2 変電所の負荷分担

変電所の負荷が小さいと、その負き電点レール電圧が上昇する傾向にあることは既に述べた。複数の変電所が並列き電している場合、負荷分担の小さい変電所は、自身の負き電点レール電圧が比較的が高いのみならず、その結果として、隣接区間のレール電圧を持ち上げることになる。その上、隣接変電所が強力で、その本来の分担区間を越えて延長き電をしているような場合には、き電距離が長くなるから当然レール中の全電圧降下も大きくなり、結果的にその区間のレール電圧をさらに一層上昇させるものと理解できる。

変電所の負荷分担とレール電圧の距離的分布の関係は各路線毎に検討済であるが、ここでは関係が最もよく説明できる東京地下鉄4号線の例をとり上げ、各変電所の負き電点における平均レール電圧と電車用電力使用実績、ならびに当該線区の全電力使用実績を距離当りに配分した値で各変電所の電力使用実績を再評価して得た分担率の三者を、互に対照できるようにして図-4.10に示しておく。

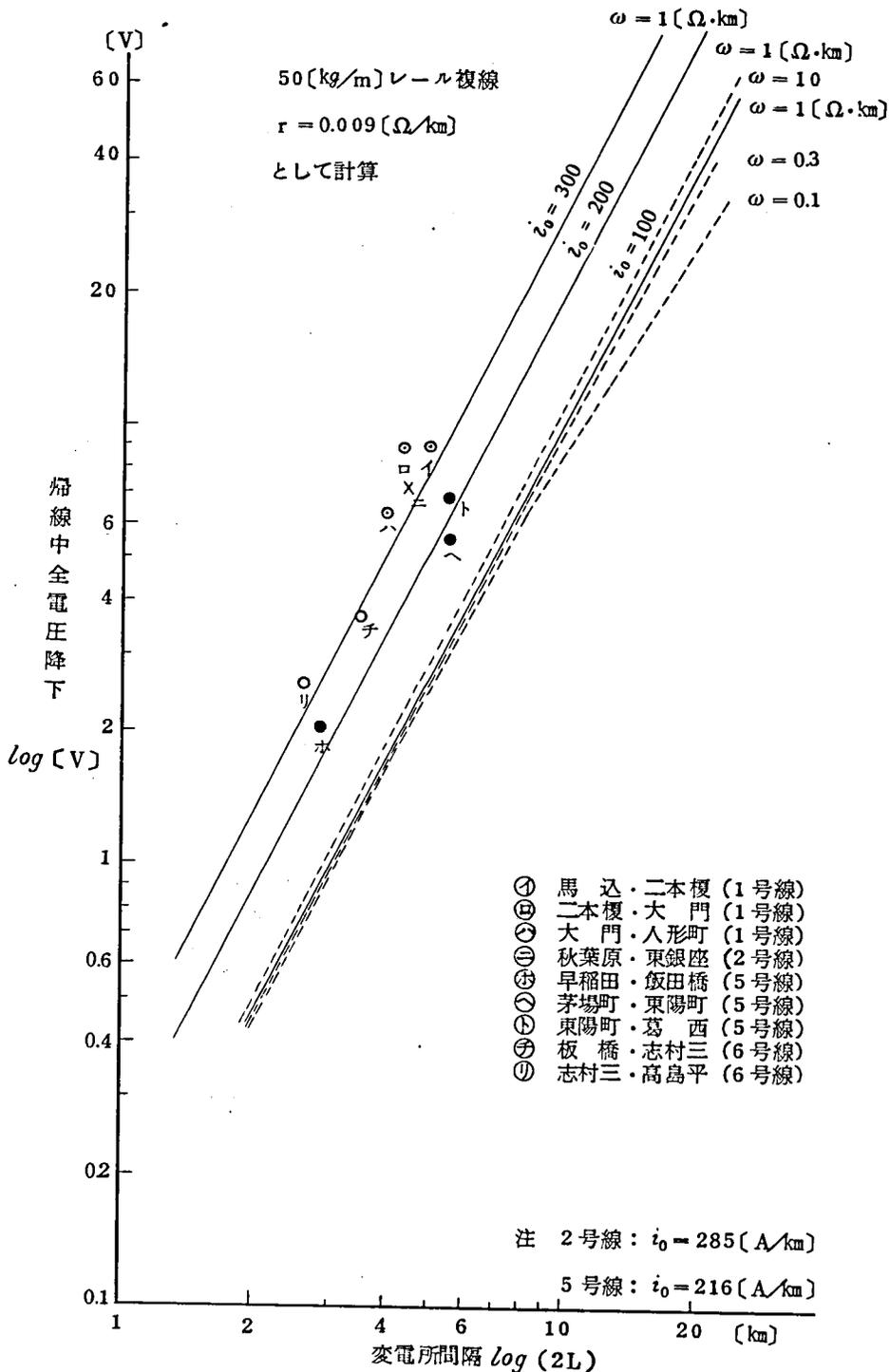


図 - 4.8 変電所隔と帰線中全電圧降下
 (東京地下鉄の場合)

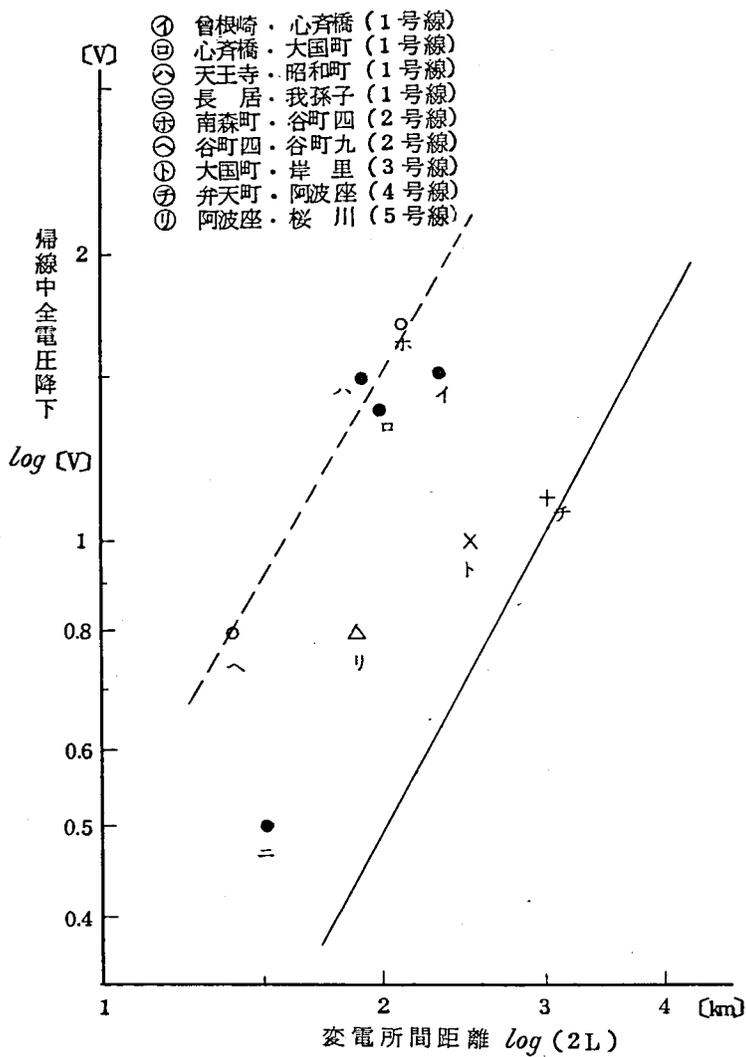


図 - 4.9 変電所間隔と帰線中全電圧降下
 (大阪地下鉄の場合)

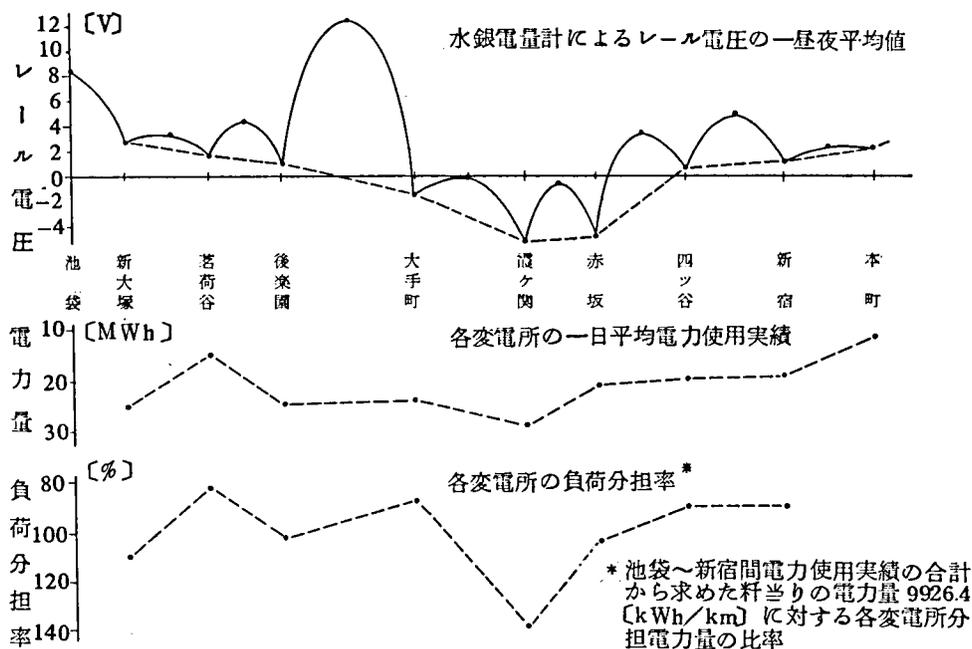


図 - 4.10 変電所負荷分担とレール電圧平均値との対照

4.3.3 地上線、地下線間に融通電力がある場合

地上の一般電気鉄道と並列き電を実施している「乗り入れ形地下鉄」において、地上線から地下線へ巨視的に電力が供給されている状態にあると、地下線区間全体がその変電所群も含めて、地上線をき電変電所と見なした場合のき電区間となり、接続点すなわち見かけ上のき電点から十分に離れた地下線内では、そのレール電圧が上昇するという理論が成り立つ。

もし地下線が、その線路の両端で地上線に接続し、全体として電力の供給を受けるような状態におかれているならば、所謂「乗り入れ形地下鉄」の路線中央部でレール電圧が高くなる現象になると考えられる。

ここでは、この問題が最初に提起された東京地下鉄5号線の場合について、二、三の数値を仮定して計算した検討結果を、図 - 4.11 と図 - 4.12 を用いて説明することにする。

この計算は二つの部分から構成されている。

すなわち、先ず両側の地上線である国鉄から、結果的に $i_0 = 10$ [A/km] の割合で地下鉄がき電されていると仮定する。これは電力量に換算すると、路線の片側半分につき

$15\text{km} \times 10 \text{ A/km} \times 1.5\text{kV} \times 24\text{h} = 5400$ [kWh] となるから、
 融通電力量としては妥当な数値である。

この i_0 を用いて、式 (4.11)、すなわち

$$e = i_0 \cdot \omega \left(1 - \frac{\alpha L}{\sinh \alpha L} \cosh \alpha x \right)$$

を計算する。

ここでレール抵抗としては 50 [kg/m] レールの複線区間として

$$r = 0.008 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

漏れ抵抗は、路線全体としては高架区間もあり比較的高くみて

$$\omega = 2 \text{ } [\Omega \cdot \text{km}]$$

したがって、

$$\alpha = \sqrt{\frac{r}{\omega}} = 0.0632 \text{ } [\text{km}^{-1}]$$

なお、線路長は路線全長の半分として、

$$L = 15 \text{ } [\text{km}]$$

レール電圧の距離的分布は中央点に関し左右対称としてある。さらに、ここで計算した地下鉄のレール電圧 e は、国鉄との接続点で、その接地効果により押し上げられるから、

$$e' = e \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \dots\dots\dots (4.23)$$

の式によって修正しておかなければならない。

ここで R_1 は地下鉄線 $L = 15$ [km] 間の接地抵抗であって

$$\begin{aligned} R_1 &= \sqrt{r_1 \cdot \omega_1} \cdot \cosh \alpha L \\ &= 0.171 \text{ } [\Omega] \end{aligned}$$

また R_2 は国鉄線を無限長とした場合の接地抵抗であって、レール抵抗と漏れ抵抗には、

$$r_2 = 0.022 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$\omega_2 = 1 \text{ } [\Omega \cdot \text{km}]$$

という専用軌道の代表的な値を採用し、

$$R_2 = \sqrt{r_2 \cdot \omega_2}$$

$$= 0.047 [\Omega]$$

と計算してある。

表 - 4.1 平均レール電圧の分布曲線の計算

変電所 料程 [km]	中野 1.1	早稲田 5.6	飯田橋 8.5	茅場町 12.4	東陽町 16.8	葛西 20.6	行徳 25.3	西船橋 30.0						
変電所間隔 L [km]	4.51		2.90		3.86		4.45		3.80		4.65		4.76	
負荷分担中央点 までの距離	1.1 2.25	2.25 1.45	1.45 1.93	1.93 2.23	2.23 1.90	1.90 2.33	2.33 2.38	2.38 1.0						
負荷分担距離	3.35	3.70	3.38	4.16	4.13	4.23	4.71	3.38						
平均電流 i_0 [A]	144	190	303	308	287	214	136	320						
r [Ω /km]	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01						
ω [$\Omega \cdot$ km]	1.2	1.3	1.3	0.5	0.8	3.5	6.0	5.3						
$\alpha = \sqrt{\frac{r}{\omega}}$	0.091	0.088	0.088	0.142	0.111	0.054	0.041	0.425						
$V = \frac{1}{2} i_0 r L^2$	0.85 3.58	4.8 2.0	3.18 5.65	5.75 7.7	7.2 5.15	3.85 5.35	3.52 3.67	9.2 1.6						
中間: $e_{x=0}$	0.28 1.2	1.6 0.67	1.06 1.85	1.92 2.57	2.4 1.72	1.28 1.78	1.17 1.22	3.06 0.53						
変電所: $e_{x=L}$	-0.56-2.4	-3.2 -1.3	-2.12 -3.7	-3.83-5.14	-4.8 3.44	2.56 3.56	-2.34-2.44	-6.12-1.06						

一方、地下鉄自身の変電所出力による地下鉄線内のレール電圧は、表 - 4.1 に示すように、各変電所の電区間毎に実績から割り出した平均電流 i_0 [A/km] を用い、便宜上、

$$V = \frac{1}{2} \cdot i_0 \cdot r \cdot L^2 \dots\dots\dots (4.24)$$

で計算した区間毎の全電圧降下を 1 : 2 に鞍分して変電所中間点のレール電圧 $e_{x=0}$ と負き電点のレール電圧 $e_{x=L}$ とし、区間毎の境界点では両側の計算値の平均をとることにして、その距離の分布の概形を描いてある。この作業過程を図 - 4.11 に示す。

このようにして求めた地下鉄自身のレール電圧を、先に計算した国鉄からの融通電力によるレール電圧に重畳すれば図 - 4.12 が得られる。

そしてこの図を、先に、同線における実際の測定結果をもとにして描いた図 - 3.7 と比較してみると、レール電圧の距離的分布形状が大体において良く一致しており、この考え方の妥当性が証明される。

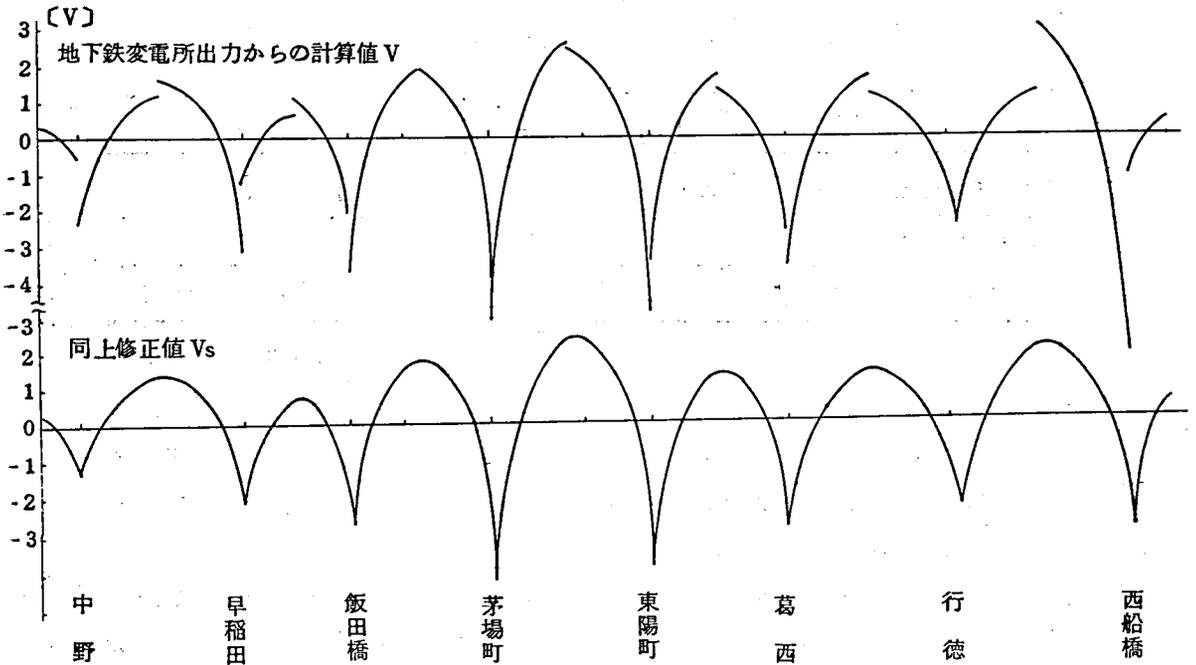
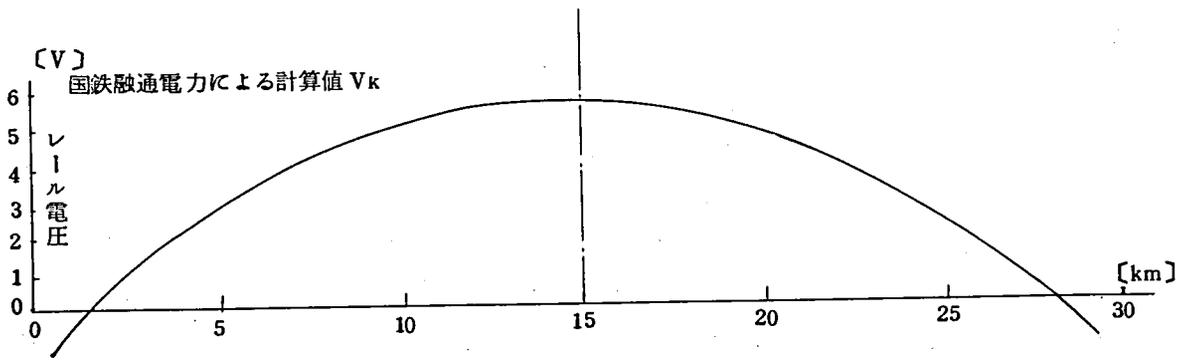


図-4.11 東京5号線レール電圧計算過程

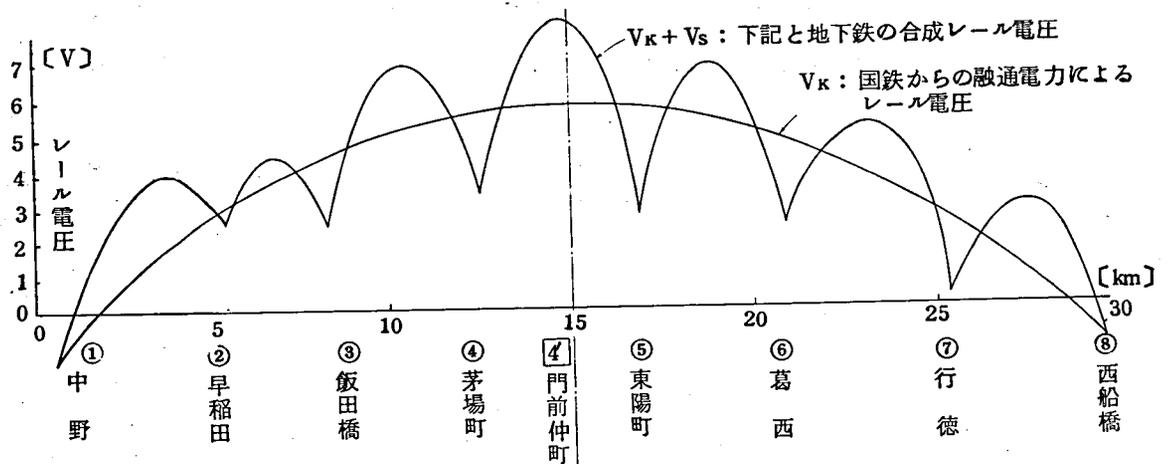


図-4.12 東京5号線レール電圧分布想定図

同様にして、東武、東急両線と相互乗り入れする東京地下鉄2号線の場合も、表-4.2のように、東武から地下鉄へ融通電力1880〔kWh〕と東急からの融通電力1410〔kWh〕の和3290〔kWh〕が地下鉄北千住～中目黒間20〔km〕に均等に分布するものと仮定すると $i_0 = 4.6$ 〔A/km〕となり、この数値をベースにして各変電所き電区間毎のレール電圧を計算すると、南千住が約2〔V〕、飯倉、中目黒が約7〔V〕となって、図-3.8の実測結果をよく説明することができる。

表-4.2 東京2号線電鉄用電力量(45-6-17)

変電所	(東武)	千住	秋葉原	東銀座	飯倉	中目黒	(東急)
杆程(千住起点)		-0.200	5.340	9.496	13.373	18.450	
変電所間隔〔km〕	5.54 4.16 3.88 5.08						
負荷電力〔kWh/日〕	1880→	37280 (39160)	55600	36590	38430	20520 (21930)	←1410

()内は融通電力量を含む

4.3.4 地上線の高いレール電圧が地下線に波及する場合

「乗り入れ形地下鉄」においては、地上線と地下線の間、たとえ融通電力が無い状態、すなわち並列き電が行なわれていない場合であっても、線路は当然のことながら接続されているのであるから、地上線のレール電圧の影響は避けられない。

接続点における地上線のレール電圧は、一般にき電変電所から遠く離れていることもあって高く、一方、レールの漏れ抵抗は地下線の方が小さくても、線路延長がはるかに長い地上線の方が全体としてのレールの接地抵抗が小さい。そこで、これに接続された地下線のレール電圧は、地上線の高いレール電圧とその接地効果によって、地上線レール電圧と同程度にまで上昇し、この影響が地下線内をその線路定数にしたがって減衰しても他端まで及ぶことになる。

実際、東京地下鉄9号線では、当初単独で部分開通して以来国鉄常磐線と相互直通運転するに至る各段階において各種の測定が行なわれており、両線を接続すると地下鉄のレール電圧が上昇すること、国鉄側変電所の負荷分担を増すとこの傾向がさらに増大することが確認されている。表-4.3、表-4.4および表-4.5は直通開始に先立って実施した測定結果で、これによると両線レール間の電位差は最大124〔V〕、平均233〔V〕と国鉄側が高く、国鉄から地下鉄に流入する電流は最大400〔A〕、一昼夜平均で70〔A〕となっている。図-4.13～図-4.16に記録紙の一部を示しておく。また、図-4.17と図-4.18は両線のレールを分離あるいは接続した場合のX-Y記録計による測定記録で、

表-4.3 千代田線、常磐線のレール電圧および相互間の電圧

45.12.8 12.9 時間	千代田線レール電圧			常磐線~千代田線間電圧			常磐線レール電圧		
	V _s [V]			V _{K-S} [V]			V _K [V]		
時間	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均
13~14	27	0	10	76	-20	18	80	0	26
15	26	-1	7	85	-12	24	87	5	28
16	0	-5	-1	86	-5	22	76	0	25
17	10	-15	-3	81	-8	21	81	0	20
18	0	-13	-6	90	-3	28	85	-1	24
19	3	-13	-4	104	-7	26	92	-2	26
20	0	-11	-5	85	-5	24	81	-5	23
21	3	-8	-25	75	0	25	73	3	25
22	2	-8	-2	77	0	24	81	2	26
23	0	-11	-3	75	3	23	72	8	26
24	0	-11	-4	75	7	26	73	10	25
1	0	-7	-2	71	5	20	65	8	20
2	0	0	0	68	-4	18	60	-2	17
3	0	0	0	27	-3	7	28	0	10
4	0	0	0	40	0	9	41	2	12
5	0	-3	0	57	5	19	57	7	20
6	2	-7	-2	70	-3	26	71	9	24
7	1	-10	-25	100	7	35	94	8	32
8	14	0	-6	124	5	35	118	0	34
9	-2	-15	-6	85	-2	35	104	0	33
10	7	-13	-3	インク切れ			93	-1	30
11	0	0	0				78	-2	22
12	1	-1	0				83	0	22
13	0	0	0				82	3	25
14	2	-2	0				80	2	25
1 昼夜	27	-15	-1.4	124	-20	+23.3	118	-5	+24

表 - 4.4 千代田線レール電圧
(常磐線と接続)

12.9 ~12.10 時間	レール電圧 [V]		
	最大	最小	平均
14~15	28	3	18
16	29	3	19
17	30	2	15
18	78	1	22
19	85	3	22
20	57	3	18
21	66	4	17
22	63	8	19
23	54	9	20
24	50	8	18
1	46	5	15
2	50	7	13
3	35	4	11
4	23	3	8
5	42	10	17
6	60	8	19
7	70	12	24
8	93	4	30
9	88	0	27
10	65	3	23
11	95	4	24
12	72	6	26
13	71	7	24
(12.9)(12.10) 14 13	95	0	19.5

表 - 4.5 流出入電流
(常磐線→千代田線を⊕とする)

12.9 ~12.10 時間	流出入電流 [A]		
	最大	最小	平均
14~15	>350	0	160
16	>350	25	130
17	390	20	100
18	400	20	120
19	315	30	100
20	190	20	60
21	230	10	60
22	340	0	80
23	300	0	80
24	260	10	70
1	230	0	40
2	0	0	0
3	0	0	0
(12.9)(12.10) 14~ 3	400	0	70

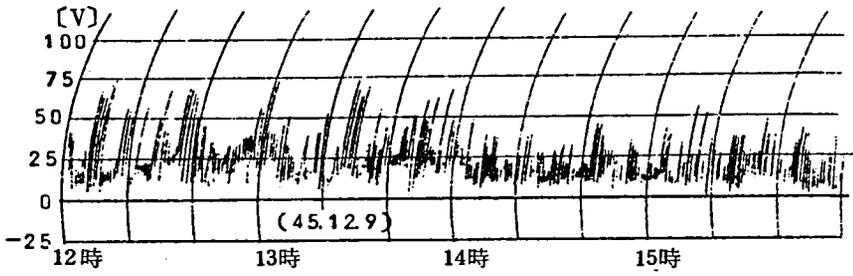


図-4.13 国鉄(常磐線)レール電圧 V_k

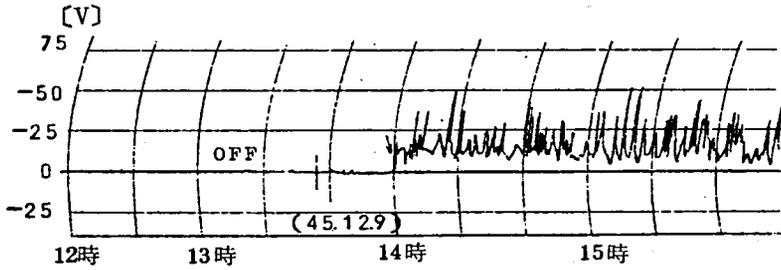


図-4.14 地下鉄9号線(千代田線)レール電圧 V_s

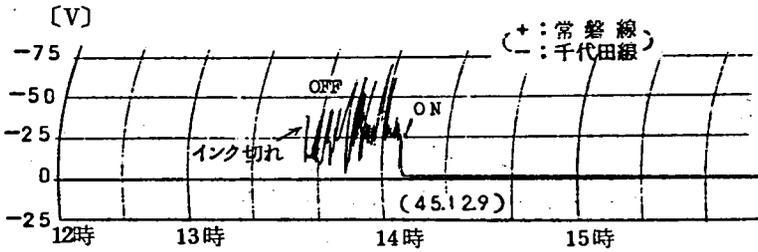


図-4.15 常磐線~千代田線レール電位差 V_k-s

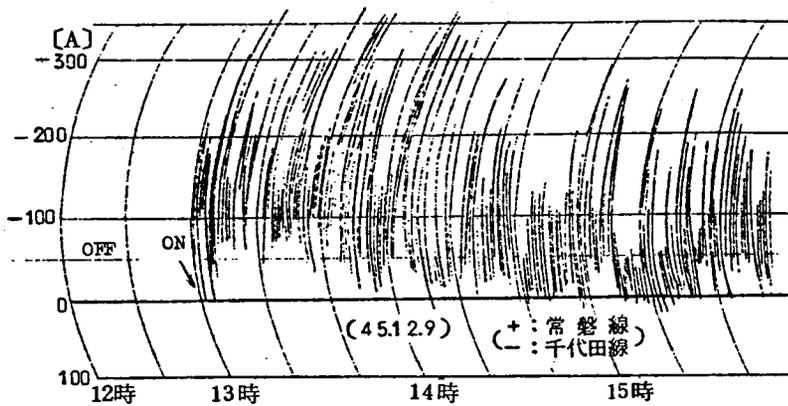


図-4.16 常磐線~千代田線間レール電流 I_{k-s}

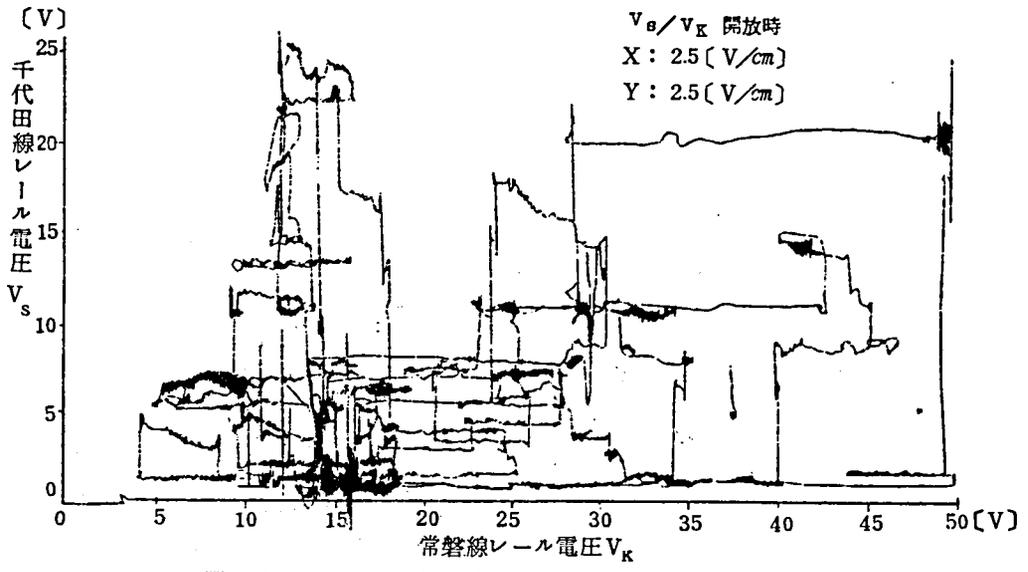


図 - 4.17 レールを切り離した場合の V_s と V_k の関係

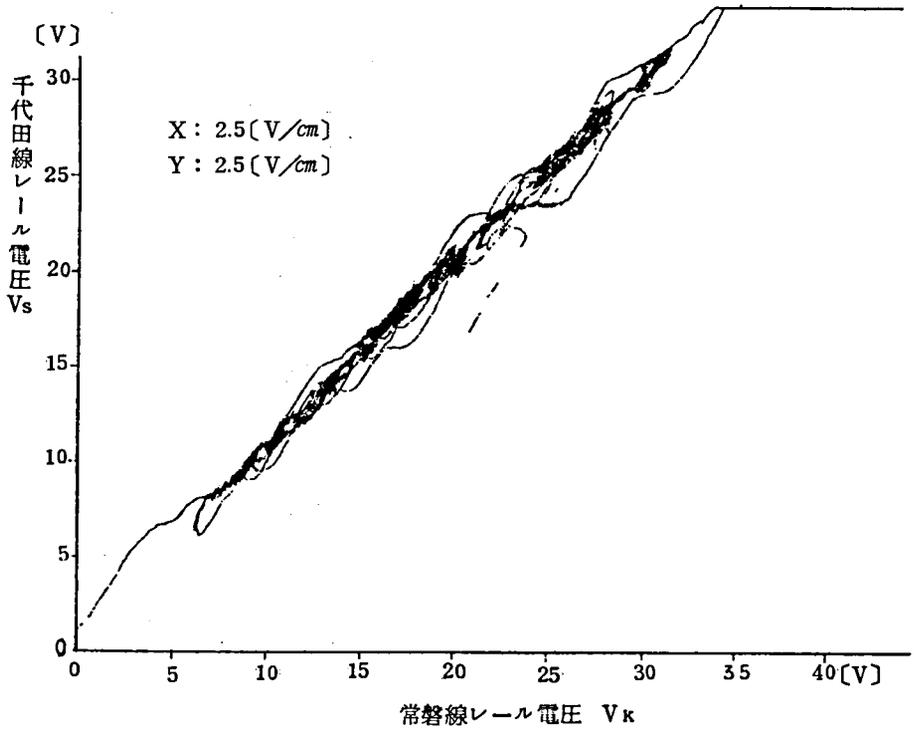


図 - 4.18 レールを接続した場合の V_s と V_k の関係

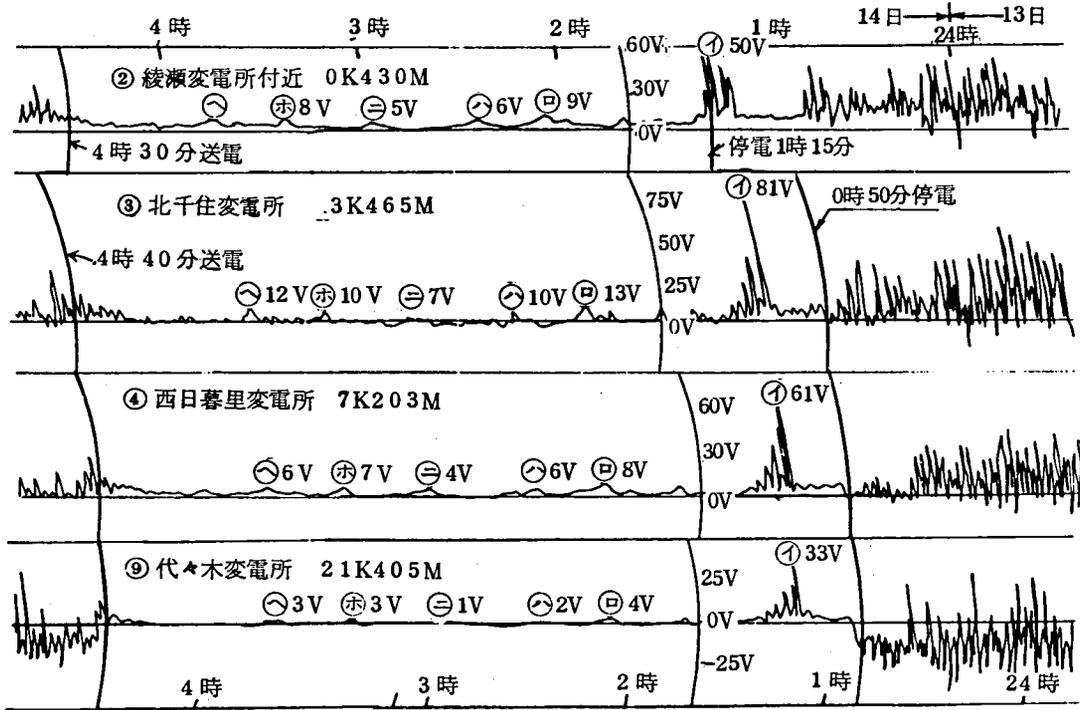


図 - 4.19 東京 9号線各変電所レール電圧記録 (地下鉄線内き電停止)

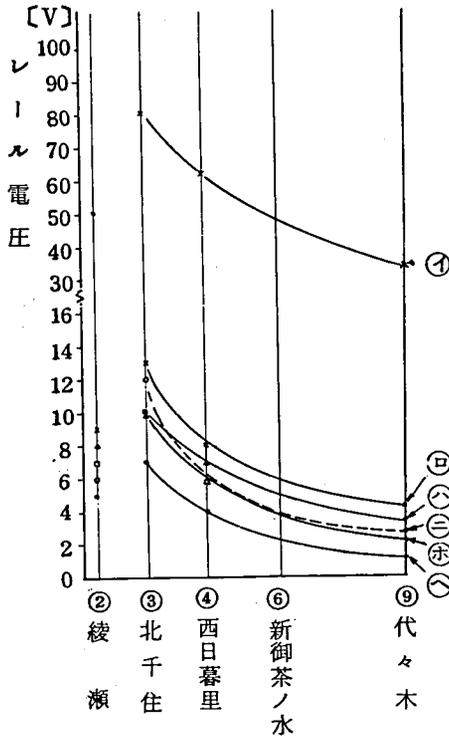


図 - 4.17 は分離状態での両線のレール電圧 $V_k - V_s$ の関係であって、両者間には相関関係が認められないが、接続すると図 - 4.18 のように全く同一の変化をするようになる。特に地下鉄線内がき電停止した状態で測定された図 - 4.19 の記録とそれらを整理した図 - 4.20 では、国鉄のレール電圧が地下鉄のレール電圧に与えている影響が極めて明白である。

図 - 4.20 千代田線における常磐線レール電圧の減衰状況

そこで、接続点における国鉄のレール電圧 V_0 が、地下鉄線内に波及する状態の一例を、
 仮りに $V_0 = 10$ [V] として計算してみると、図-4.21 の V_K のような曲線が得られる。
 すなわち、

$$V_K = V_0 \frac{\cosh \alpha (L - x)}{\cosh \alpha L} \dots\dots\dots (4.25)$$

の式で、地下鉄千代田線のレール抵抗は 50 [kg/m] レールを使用した複線であるから

$$r = 0.008 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

一方、同線の漏れ抵抗は、全体としては良好な道床状態にあるとして

$$\omega = 1.5 \text{ } [\Omega \cdot \text{km}]$$

したがって、線路定数を

$$\alpha = \sqrt{\frac{r}{\omega}} = 0.075 \text{ } [\text{km}^{-1}]$$

として計算してある。

なお、線路長は $L = 22.92$ [km] である。

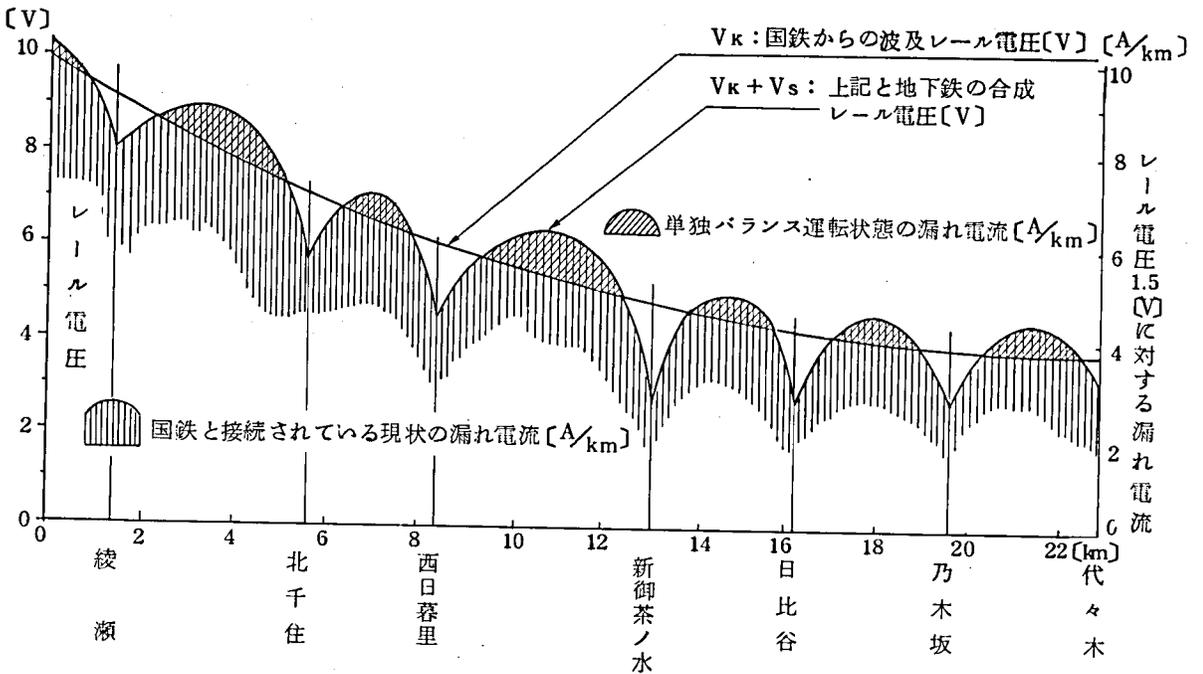


図 - 4.21 東京 9 号線レール電圧および漏れ電流分布想定図

次に、地下鉄線内の7変電所の電車用電力の合計を実績から求め、この区間に均一に分布するものとして秆当りの負荷電流を算出した後、この数値によって各変電所の電区域毎にレール電圧を計算すると、図-4.21の V_s の曲線になる。

なお、この路線の秆当りの平均負荷電流としては、

48. 10. 21 の実績で、

$$\text{全線：149920 [kWh] \quad 1[km] 当り：6201 [kWh] \quad \therefore i_0 = 172 [A/km]$$

48. 10. 14 の実績で、

$$\text{全線：159450 [kWh] \quad 1[km] 当り：6596 [kWh] \quad \therefore i_0 = 183 [A/km]$$

48. 11. 18 の実績で、

$$\text{全線：168040 [kWh] \quad 1[km] 当り：6951 [kWh] \quad \therefore i_0 = 193 [A/km]$$

となるので、平均的な値として183 [A/km] を採用している。

このようにして計算した V_s を V_k に重畳したものが、図-4.21の V_k+V_s 曲線である(27)

実際には、地下鉄線内の漏れ抵抗は漏水等によって部分的に0.1 [$\Omega \cdot km$]程度に低下しているから V_k 曲線の減衰状況はもっと急峻であろうし、また当該路線では電力回生制動が行なわれており、その結果レールを流れる電流も変電所の負荷実績から計算した値より当然増加しているであろうから、 V_k+V_s の極大値、極小値はさらに大きくなる。故にこの曲線はこの路線のレール電圧の傾向をよく表わしていると考えてよい。

このような作図によって大阪地下鉄6号線の場合も、全く同様に説明できる。

東京地下鉄1号線の場合には、地下線の線路が途中から分岐してその先に地上線が接続する形態であるが考え方は同じである。本線(地下線)は、レール抵抗を r_k [Ω/km]、漏れ抵抗を ω_s [$\Omega \cdot km$]とし、線路長を分岐点から左方へ L_{s1} [km]、右方へ L_{s2} [km]としておく。分岐線(接続点までの地下線若干を含む地上線)は、それぞれを r_k [Ω/km]、 ω_k [$\Omega \cdot km$]とし、線路長を十分長いとして $L_k = \infty$ とする。

分岐点で本線と分岐線が分離している状態で、両線のレール電圧 V_{so} [V]、 V_{ko} [V]は、当然のことながら $V_{so} < V_{ko}$ となっている。

両線を接続すると

$$I_{k-s} = \frac{V_{ko} - V_{so}}{R_1 + R_2} \dots\dots\dots (4.26)$$

の電流が流れ、本線のレール電圧は $I_{k-s} \cdot R_1$ [V] 上昇し、分岐線のレール電圧は $I_{k-s} \cdot R_2$ [V] 低下して、両者相等しくなる。なおここで、 R_1 は分岐点から見た地下線の接地抵抗であり、 R_2 は同じく地上線のそれであって、

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{R_1} &= \frac{1}{\sqrt{r_1 \cdot \omega_1} \cdot \coth \alpha L_{S1}} + \frac{1}{\sqrt{r_1 \cdot \omega_1} \cdot \coth \alpha L_{S2}} \\ R_2 &= \sqrt{r_2 \cdot \omega_2} \end{aligned} \right\} (4.27)$$

さて、地上線の高いレール電圧による地下線レール電圧の上昇は、分岐点から左方へは、

$$V_{K1} = I_{K-S} \cdot R_1 \frac{\cosh \alpha (L_{S1} - x)}{\cosh \alpha \cdot L_{S1}} \dots\dots\dots (4.28)$$

分岐点から右方へは、

$$V_{K2} = I_{K-S} \cdot R_1 \frac{\cosh \alpha (L_{S2} - x)}{\cosh \alpha \cdot L_{S2}} \dots\dots\dots (4.29)$$

もちろん、

$$\alpha = \sqrt{\frac{r_1}{\omega_1}} \dots\dots\dots (4.30)$$

によって波及する。

したがって実際のレール電圧は、地下鉄自身のレール電圧 V_s をこれらの重畳した $V_{K1} + V_s$ 、もしくは $V_{K2} + V_s$ になるわけである。このことは、同線で実測されたレール電圧の距離的分布曲線である前章の図 - 3.11 や、ここに図 - 4.22 として示す地上線の終夜運転による地下鉄レール電圧への影響曲線の傾向を良く説明している。

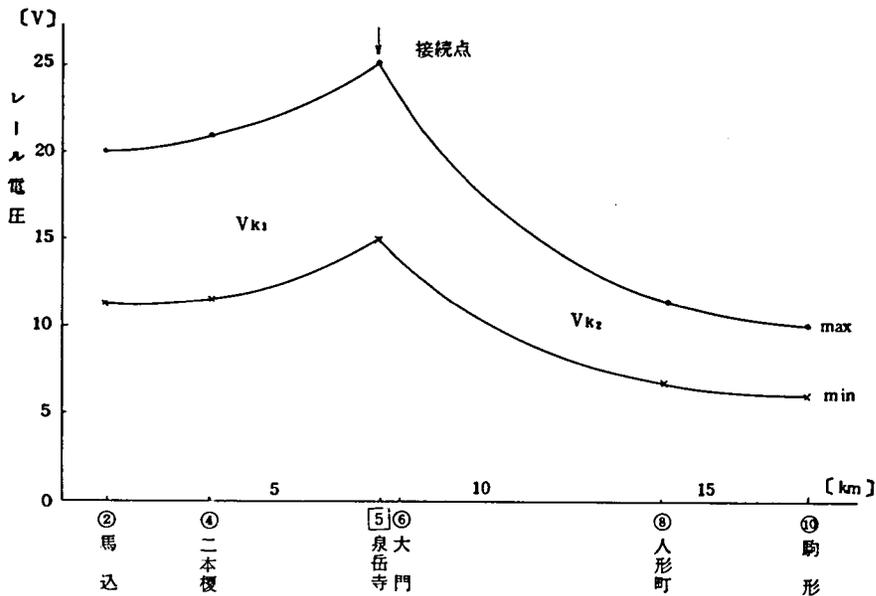


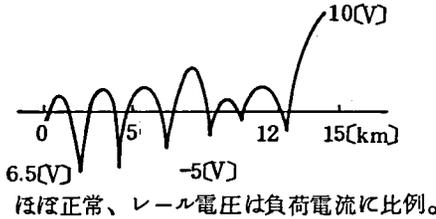
図 - 4.22 地上線の地下線への影響曲線 (その2)

4.4 総括

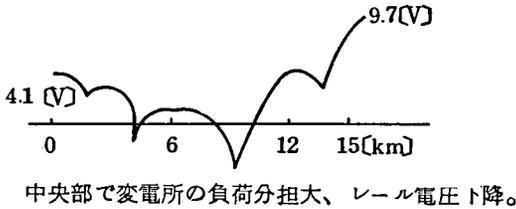
4.4.1 レール電圧の距離的分布形態

レール電圧を把握することは防食管理の基礎である。地下鉄が独立した路線である場合と

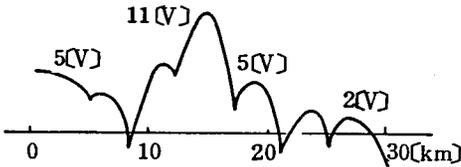
(イ) 独立形地下鉄 (600V)



(ロ) 独立形地下鉄 (750V)

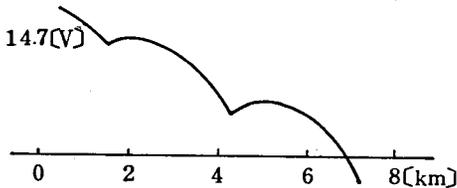


(ハ) 乗り入れ形地下鉄 (1500V)



中央部で変電所負荷分担小：レール電圧上昇。
他線レール電圧の影響 左端レール電圧持ち上り。
他線より融通電力：左端で流入、右端で流出。

(ニ) 乗り入れ形地下鉄 (1500V) 左側で乗り入れ



他線レール電圧の影響：レール電圧片持ち上り。
他線より融通電力流入：レール電圧全般に上昇。

地上の電鉄と接続して相互に乗り入れる路線である場合を比較するため、東京はもとより「乗り入れ形」の地下鉄のある大阪、神戸の地下鉄当局にも各路線のレール電圧測定を依頼し、その結果を体系的に整理したところ、図-4.23に示すようにレール電圧平均値の距離的分布状況が4種類に大別された。

「独立形」の地下鉄では、変電所中間が正で高く、変電所付近が負で大きい、ほぼ教科書どおりの分布(イ)を描くが、路線中央部の特定変電所の負荷分担率が大きいと、その付近のレール電圧が押し下げられ、路線全体として中央部が下った(ロ)の分布になる。また、数ある路線のなかには、レール電圧が正領域あるいは負領域だけの路線もあるが、多数の路線が何箇所かで接続して一つの路線網を形成している場合には、その路線網を全体として考えてみなければならぬ。

地上の電鉄と相互直通運転を実施している「乗り入れ形」地下鉄では、路線中央部のレール電圧が変電所を含めて全般に高くなる両方向乗り入

図-4.23 レール電圧平均値の分布状況

れ接続の場合(+)と、接続点のレール電圧が高く、そこから地下鉄線の他端へ向ってレール電圧が全体に傾斜している片方向乗り入れ接続の場合(-)がある。いずれも地下鉄自身の変電所の負荷分担によるほか、その地下鉄の両端に接続している地上の電鉄から地下鉄側へ融通電力が供給されることで、地下鉄区間が全体として一つのき電区間のような結果になり、そのレール電圧が路線中央部で上昇するのが前者であり、地上の電鉄線終端部の高いレール電圧によって接続した地下鉄のレール電圧が引き上げられ、その影響が地下鉄線内を減衰するが他端にまで及ぶのが後者であると考えられる。

4.4.2 レール電圧および漏れ電流分布の要因

レール電圧の高低、したがって漏れ電流の多少に影響を与える項目を、負荷電流密度、き電距離、漏れ抵抗という内部要因、変電所負荷分担、さらに他線との接続および融通電力の流入という外部要因に整理すると表-4.6のようにまとめることができる。

表-4.6 レール電圧および漏れ電流の多少に影響を与える各種要因

	要 因	レール電圧 (V, e_0, e_L) [*]	漏れ電流の総量 (I_f)	該 当 路 線
内部 要因	i_0 が大	1 乗に比例	1 乗に比例	東京 3 号線、東京 4 号線
	Lが大	1.5~2.0 乗に比例	2.5~3.0 乗に比例	東京 6 号線
	き電端付近の ω が小	e_0 正小、 e_L 負大	やや大きくなる	東京 6 号線、大阪 2 号線 大阪 4 号線、大阪 5 号線
外部 要因	変電所の 負荷分担大	e_L 負大、V 大	実質上、Lが大で I_f も大	東京 1 号線、東京 2 号線 東京 3 号線、東京 4 号線 大阪 2 号線、大阪 3 号線 大阪 4 号線、大阪 5 号線 神戸東西線
	他線レールとの 接続	他線の e_0 と R に支配されて大きく変る		東京 1 号線、東京 9 号線 大阪 6 号線
	他線より 融通電力が流入	V 大、奥へ波及	長回路となり、 L 大で I_f も大	東京 2 号線、東京 5 号線 大阪 6 号線

* (注) V : 全電圧降下

e_0 : $x=0$ (き電端) のレール電圧

e_L : $x=L$ (変電所出口) のレール電圧

第5章 地下鉄構築物の電気的特性

5.1 構築物電氣的測定の目的

地下鉄トンネルを構成している鉄骨もしくは鉄筋コンクリート構築物について、その電氣的連続性、電位変化のレール電圧との相関性、自然電位と分極特性の諸測定を実施し、さらに周囲土壌の電気抵抗なども測定することにより、レールからの漏れ電流の経路としての構築物がどのような電氣的特性を持ち、構築物に及ぼしている漏れ電流の影響がどの位かを知らるとともに、構築物内部の電気化学的な状態および構築物周囲の腐食環境も把握して、地下鉄構築物内部における電食の可能性を外部から電氣的に診断する方法を確立しようとするのが、筆者のこの研究に対する考え方である。

本章では、鉄骨構造を併用した鉄筋コンクリート箱形トンネルの区間として東京地下鉄3号線三越前駅付近、通常の鉄筋コンクリート箱形トンネルの区間として同線新橋～虎ノ門間と外苑前駅および同4号線の東京駅、鉄筋コンクリート・セグメントを用いたシールド形トンネル区間として同5号線の木場～東陽町間の各箇所を選び、それぞれ実施した構築物の電氣的測定について、その結果を先ず個々の測定地点ごとに検討し、その後、各測定項目ごとに総括して記述する。

5.2 鉄骨・鉄筋コンクリート箱形トンネルの場合

5.2.1 三越前駅における測定

東京地下鉄3号線（銀座線）の三越前駅付近のトンネル構築物はエレクション・メンバーを使用した鉄骨構造で、鉄骨と鉄骨の間の側壁は鉄筋コンクリートである。地下鉄トンネルおよび駅の冷房化工事に際して、冷凍機室新設のため側壁の一部が取り壊された機会に、鉄骨相互間および鉄骨と鉄筋間の抵抗を測定して構築物の電氣的連続性を、鉄骨もしくは鉄筋の電位を測定してその構築物の電気化学的な状態とそれに対する漏れ電流の影響を調査することにした。

(1) 鉄骨相互間および鉄骨と鉄筋間の抵抗

地下駅の中二階部では、化粧板がなく露出していて測定可能な鉄骨をA線側B線側各7本（1A、1B……、7A、7B）選び、その相互間抵抗を、そのうちの1本（5B）を基準にして測定している。

図-5.1にそれらの関係位置を示す。

駅間のトンネル内部では、日本橋～三越前間の中央柱11本（No.44～No.54）について

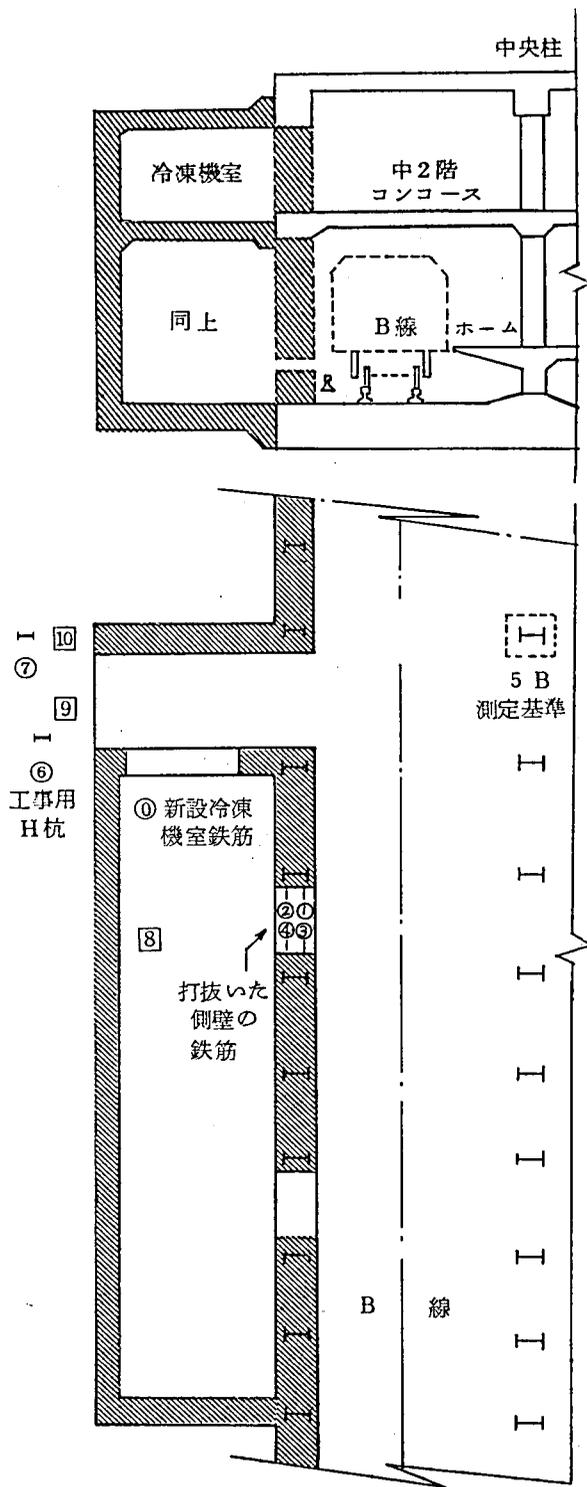


図 - 5.1 三越前駅の鉄骨鉄筋測定位置

同様な関係で測定した。

なお、新設される冷凍機室の外側に工事に際して打ち込まれたH杭(図-5.1の⑥、⑦)と中二階の基準鉄骨(5B)間の抵抗も測定してある。

次に鉄骨と鉄筋間の抵抗は、前記冷凍機室内の新設鉄筋(図-5.1の⑧)と5B間および取り壊したトンネル壁の鉄筋と5Bの間で測定した。

その結果、駅中二階の鉄骨1A、1B、……、7A、7Bと5B間の抵抗は、いずれの場合も零であり、また、日本橋～三越前駅間トンネル内中央柱No.44、……、No.54までの各隣接した鉄骨相互間抵抗も零であった。また、H杭⑥、⑦と5B間の抵抗は、どちらも $0.002(\Omega)$ である。

鉄骨と鉄筋間の抵抗は、冷凍機室内の新設鉄筋⑧と駅中二階鉄骨5Bの間が $0.045(\Omega)$ 、従来はトンネル道側壁であった箇所を工事に際して打ち抜いた結果露出することになった鉄筋計45本と、基準鉄骨柱5Bとの間の抵抗が、最低 $0.1(\Omega)$ から最高 $3000(\Omega)$ であった。

なお、これらの測定にはL-9形接地抵抗計(四電極式に改造)、 $1000(\Omega)$ 以上にはテスターを用いている。

(2) 鉄骨および鉄筋の電位

飽和硫酸銅電極を基準として、冷凍機室内の鉄筋⑧、工事用H杭⑥および⑦の電位を、電子式記録計(EPR-2T)により測定している。なお電極の位置は、図-5.1に

示すように、冷凍機室内の水溜り⑧、H杭⑥と⑦の中間の土中⑨、ならびにH杭⑦の外側の土壁の中⑩の3箇所である。

また、取り壊した壁の鉄筋については、それぞれの鉄筋の基部に硫酸銅電極を置いて測定している。

その結果、鉄骨5B、⑥、⑦および鉄筋の硫酸銅電極⑧、⑨、⑩に対する電位は、-260から-700[mV]の範囲に、また、側壁鉄筋の、その根元に置かれた電極に対しての電位は、-270から-440[mV]の範囲にあった。

鉄骨、鉄筋の電位は、同一の硫酸銅電極に対してはほぼ同様の数値を示しているが、同一鉄筋でも電極の位置が⑧、⑨、⑩と変わると、別の値となる。このことは、電極⑧は冷凍機室コンクリート床の溜り水の中にあつて、これによる電位 -270[mV] がコンクリート中の鉄の電位を示しているのに対し、⑨、⑩は構築外の土壌中にあり、土中の鉄の自然電位を示していると説明できる。また、⑨と⑩とで約150[mV]の差があるのは、土中の局部電流による電位差と考えられる。

(3) 土壌抵抗

土壌杖を用いて測定した構築物周辺の土壌抵抗率は、冷凍機室内の水溜り中⑧の位置、電極深さ 65[cm]で900[Ω・cm]、構築外の土壌中⑥杭の脇、電極深さ 80[cm]で2000[Ω・cm]、同じく⑦杭の脇、電極深さ 50[cm]で1200[Ω・cm]である。

(4) 総合判定

鉄骨およびH杭相互間の電気抵抗は極めて低く、三越前駅中二階部の14本とトンネル内の11本の鉄骨構造は、電氣的にも一体の状態と思われる。

鉄骨と鉄筋間の抵抗は、新設建造物の鉄筋の中に⑩のような抵抗値の低いものもあるが、従来側壁であった部分の鉄筋では0.1～3000[Ω]と極めて広い範囲に分布しており、鉄筋と鉄骨との電氣的結びつきは、まちまちであるといえる。

鉄骨・鉄筋の電位は、構築内の電極に対して -260から-350[mV]、構築外の電極に対して -540から-700[mV]であり、側壁の鉄筋電位は、その根元の電極に対しておおよそ -350[mV]程度である。

鉄筋の電位とレール電圧の関係は、X-Y記録計を用いても明白な相関が認められず、このことは、レールからの漏れ電流による影響がこの付近ではあまり大きくないことを意味している。

5.2.2 新橋～虎ノ門間における測定

東京地下鉄3号線（銀座線）では、同線渋谷起点6K 135M付近（新橋～虎ノ門間）で同

6号線（都営線）が交差することになり、その既設トンネル下床部に6号線工事用のH杭を通すための孔があげられた。そこでこの機会を利用して、鉄筋コンクリート箱形トンネルの鉄筋相互間の抵抗、レール電圧と鉄筋電位の関係、ならびに構築物周辺の腐蝕環境の指標としての土壌抵抗を測定し、レールからの漏れ電流とその構築物に対する影響を推定する資料を得ることとした。

(1) 鉄筋相互間の抵抗

新橋付近における測定箇所には、図-5.2に示す如く、工事用のH杭を通すための孔2H、4Hがトンネル下床にあげられていた。2Hの場合には、鉄筋①～⑥が切断端を上方に曲げられて突き出ており、4Hの孔には水がたまっていたが、その底ではトンネル外の土壌に接することができた。OHは工事に当って構築を補強するために増設されたH鋼柱であり、 K_1, \dots, K_4 は、測定のためにトンネル側壁を研って露出させた鉄筋である。これら相互間の抵抗をL-10形抵抗計で測定している。

その測定結果は、ここでも種々の値を示している。すなわち、トンネル側壁の鉄筋K相互間は $0 \sim 0.35 \Omega$ 、トンネル下床の鉄筋の場合にはOHと①～⑥間が $0.35 \sim 35 \Omega$ で、電気的に導通状態のものもあれば数 Ω から数十 Ω のものもある。

(2) 鉄筋電位およびレール電圧との関係

飽和硫酸銅電極を2Hの孔の底に置き、各鉄筋の電位を電子式記録計で測定した。

図-5.3は鉄筋2H-5の電位をB線のレール電圧と同時に測定した記録であり、とくに零電位消去装置（イレーサ）を用いて自然電位を打消し、目盛巾を拡大した記録も示しておく。

この図からも明らかなように、この付近の鉄筋の電位にはレール電圧との関係が予想される。

この関係を定量的に把握するために、

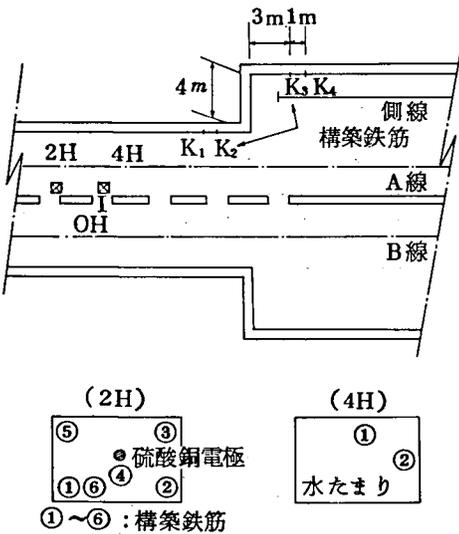


図-5.2 新橋付近の鉄筋抵抗電位測定位置

「電食係数」 a を次のように定義して、

$$a = \frac{\text{鉄筋電位の変化分 } \Delta E_k}{\text{レール電圧の変化分 } \Delta V_R} \times 100 [\%] \dots\dots\dots (5.1)$$

これを計算すると、表-5.1のようになる。

このように、当所の鉄筋電位はレール電圧の影響を受けていて、約250[mV]変化しており、レール電圧との関係を示す電食係数はいずれも0.4~0.7[%]、その自然電位は大体-500から-550[mV]である。

(3) 土 壤 抵 抗

構築周囲の土壌抵抗率は、2 Hおよび4 Hの孔の底で土壌杖を用いて測定した。なお4 Hでは、溜り水の抵抗率も測定している。そしてその結果、2 Hの土壌抵抗率は $\rho = 94 [\Omega \cdot \text{cm}]$ (電極深さ55[cm])、4 Hの溜り水は $\rho = 290 [\Omega \cdot \text{cm}]$ (同50[cm])、底の泥は $\rho = 75 [\Omega \cdot \text{cm}]$ (同75[cm])の値を得ている。

(4) 綜 合 判 定

以上の測定から、この付近のトンネル構築鉄筋は、抵抗はばらばらであっても電位的には一体であり、漏れ電流がレールから道床を通過して構築経路で流出しているばかりでなく、周囲の土壌抵抗が極めて低くて腐食環境が悪いので、電食に対する注意が必要であるといえる。

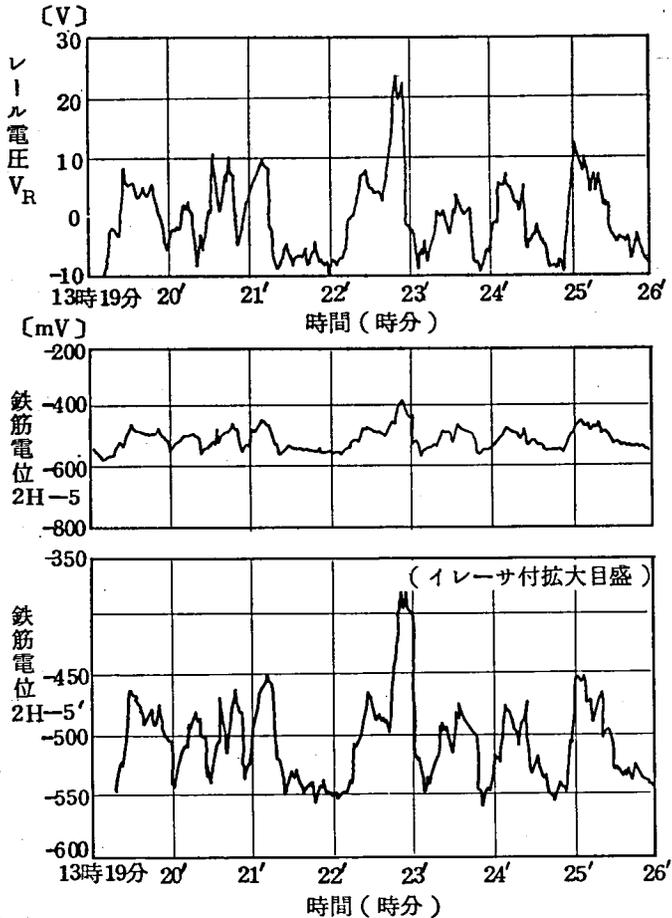


図 - 5.3 新橋付近のレール電圧と鉄筋電位

表 - 5.1 新橋付近の鉄筋の電位
(飽和硫酸銅電極基準)

鉄筋	変化巾 [mV]	平均[mV]	電食係数 [%]
1	-320 ~ -420	-360	0.4
2	-320 ~ -460	-400	0.5
3	-440 ~ -560	-520	0.4
4	-480 ~ -580	-520	0.5
5	-370 ~ -590	-520	0.5
6	-440 ~ -570	-510	0.5
K ₁	-440 ~ -580	-510	0.4
K ₂	-420 ~ -600	-520	0.4
K ₃	-460 ~ -650	-560	0.7
K ₄	-420 ~ -670	-560	0.6

5.2.3 東京駅における測定

地下鉄4号線(丸ノ内線)の東京駅でも、国鉄新総武線の地下駅建設工事に際して、地下鉄構築物の一部が露出する期間があったので、同様の測定を行ない、地下鉄トンネルの電食に関する資料を収集した。

図 - 5.4 に測定位置を示す。

(1) 鉄筋相互間の抵抗

コンクリート内部の鉄筋の腐食状態を調査するために試料を採取した孔BおよびCと、側壁を研って鉄筋を露出させた箇所AおよびDで、鉄筋相互間の抵抗を測定した。計器は、AとDにおける測定にはテスターを、A、B、C、D間の測定にはL-10形大地抵抗率計を用いている。

その結果、BとCではBに40[Ω]、Cに4[Ω]程度のものが一部あるほか、0.1[Ω]台の導通状態であり、AとDではいずれも0[Ω]の導通状態であったが、Dの一部に10~30[Ω]のものがあった。

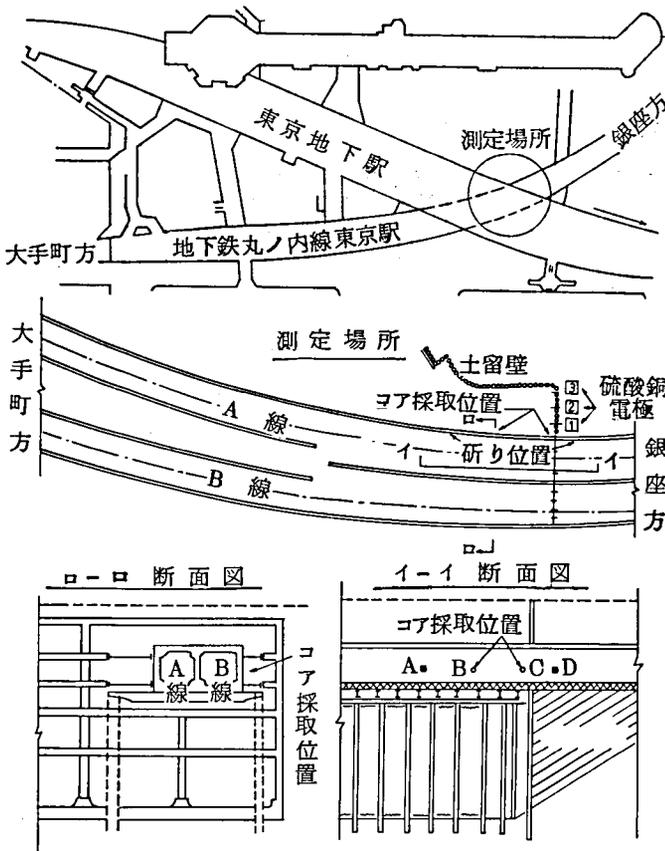


図 - 5.4 東京駅付近測定位置図

(2) 鉄筋の電位と大地中の電位分布

露出した地下鉄構築物が工事区域の終端で再び土中に入る箇所に飽和硫酸銅電極を置き、図-5.5のようにして、電極位置①～③に対する鉄筋A～Dの電位を測定した結果、-480から-550[mV]の値を得ている。

なお、④の場合には、電極が地下鉄トンネル内のコンクリート道床上に置かれたため、これに対する値は-120から-165[mV]となっている。

大地中の電位分布をみるために、これら①、②、③、④という電極間の自然電位差を求めると、図-5.6のように、当然、土中の①、②、③間は少なく、トンネル構築物の内外では①、④間が340[mV]と大きくなっている。

(3) レール電圧との関係

鉄筋電位および大地間電位差と、同時に記録した測定点側の軌道A線のレール電圧を比較検討してみると、当所の場合、図-5.7および図-5.8のように、その関係が明瞭でない。零電位消去装置（イレサ）により目盛を拡大しても鉄筋電位は1[mV]以内の変化であり、大地中の電位勾配 V_{1-3} に関しても、レール電圧の変化40[V]に対する V_{1-3} の変化は約1[mV]すなわち0.025[%]程度の影響に過ぎない。

(4) 総合判定

鉄筋の電位は若干卑であるが、レール電圧との相関、大地中の電位勾配からみて、漏れ電流が構築物を通過して外部に流出する程度は極めて小さいと判断される。

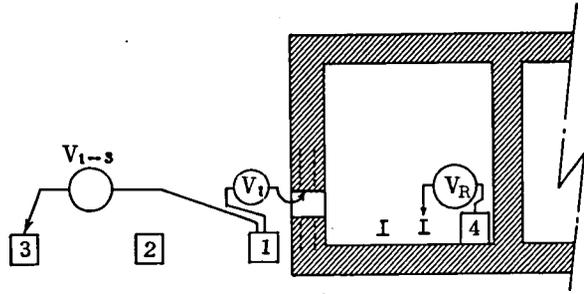


図-5.5 東京駅の鉄筋電位測定

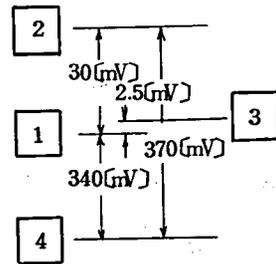


図-5.6 硫酸銅電極間自然電位差

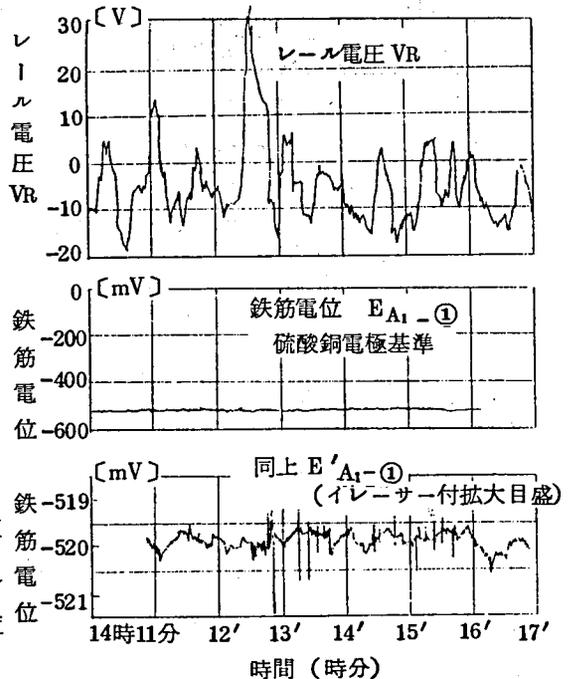


図-5.7 レール電圧と鉄筋電位（東京駅）

5.2.4 外苑前駅における測定

東京地下鉄11号線の建設工事にもない、構築の一部を取り壊した同3号線（銀座線）の外苑前駅においても、鉄筋コンクリートコアを採取してその腐食状況を調査するとともに、調査箇所^⑧に露出した鉄筋を利用して、その付近の構築鉄筋の電気的特性測定を実施した。図-5.9にその測定位置を示す。

(1) 鉄筋相互間の抵抗

構築物鉄筋の電気的連続性を抵抗値として測定する方法は種々考えられるが、この付近では、地下鉄構築物に隣接して建築中の建造物鉄骨が最も低い接地抵抗体と考えられたので、この鉄骨に対する構築鉄筋の抵抗を4電極式大地抵抗率測定器で測定している。その結果は、低いもので約2〔Ω〕、高いものは300〔Ω〕

以上もあり、鉄筋の電気的つながり状態は、他所と同様、まちまちであるといわねばならない。

(2) 鉄筋電位およびレール電圧

構築鉄筋とその付近の大地中に置いた飽和硫酸銅電極間の電位差を電子式記録計EPR-2 Tで測定すると同時に、B線のレール電圧も記録した。

図-5.10は、Na 1孔の奥の土壤中に挿入した硫酸銅電極による鉄筋の電位で、自然電位が-520〔mV〕程度、レール電圧による変化率すなわち電食係数は10〔mV〕/20〔mV〕=0.05〔%〕である。

なお、この付近のレール電圧は、測定時間中（平日13.00～17.00）+17から-15〔V〕程度で変動しているため、一昼夜では+20から-20〔V〕と推定され、平均値は若干負側と思われる。

(3) 土壌抵抗

工事のために構築が取り壊され土壌が積み上げられていた箇所^⑧、^⑨、^⑩と、鉄筋コンクリート試料を採取したNa 2およびNa 5の孔の外側の土壌の抵抗率を、土壌杖を用いて測定している。結果は4000～5000〔Ω・cm〕で、腐食環境としては悪い状態とはいえない。

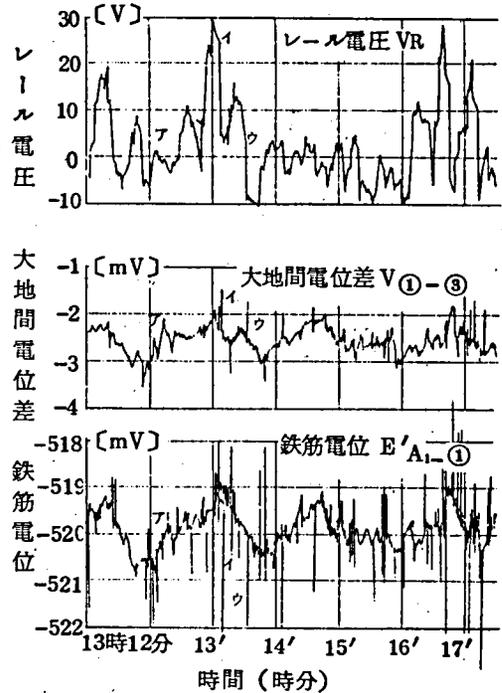


図-5.8 レール電圧、大地間電位差および鉄筋電位（東京駅）

(4) 総合判定

当所の場合、レール電圧の平均値は零ないし若干負側であり、鉄筋電位のレール電圧との関係も電食係数が 0.05 から 0.07 圏と小さくて、電食の傾向は極めて少ないと思われる。

しかし、その自然電位が -500mV 程度でコンクリート中の鉄の電位としては卑の値を示していることから、この構築物中の鉄筋には何らかの腐食が進行しているものと判定される。

鉄筋の電位測定結果と鉄筋コンクリート試料の腐食調査結果との対応は次章で論じる。

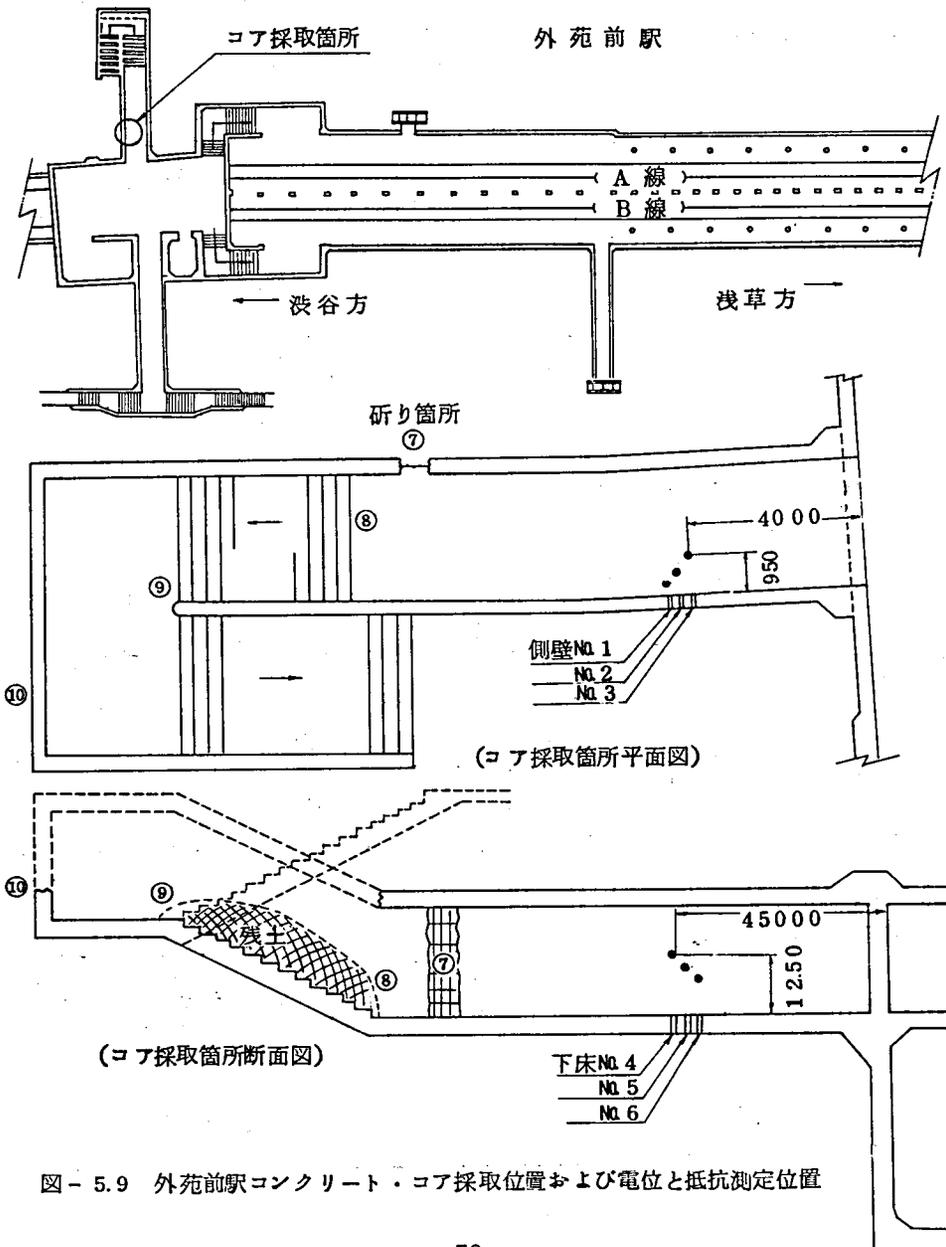


図 - 5.9 外苑前駅コンクリート・コア採取位置および電位と抵抗測定位置

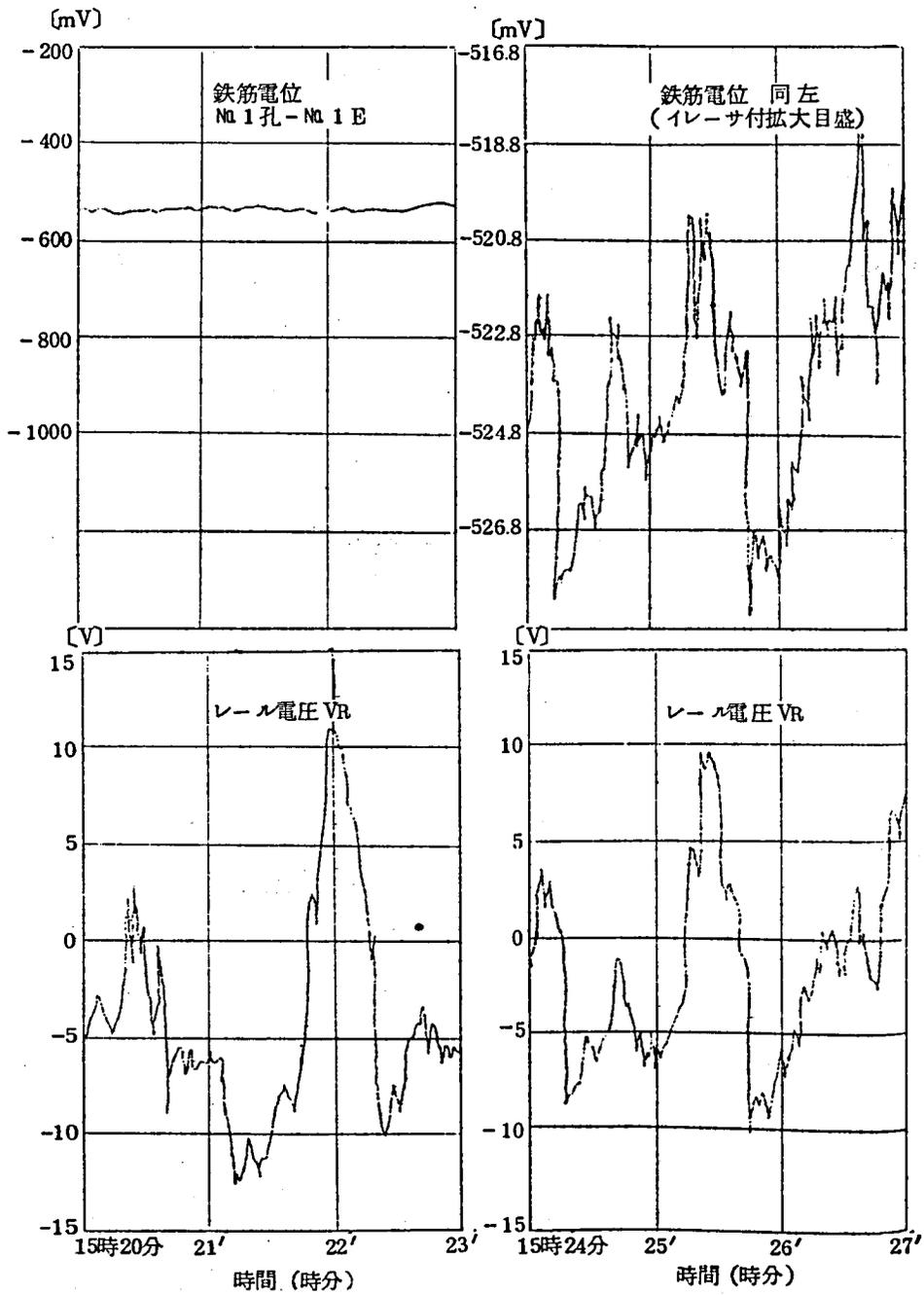


図-5.10 レール電圧と鉄筋電位(外苑前駅No.1孔)

5.3 鉄筋コンクリート・セグメントによるシールド形トンネルの場合

5.3.1 シールド形トンネルにおける電食の特殊性

東京地下鉄5号線（東西線）の門前仲町から東陽町まで約1.8[km]はシールド工法により建設された区間の一つであり、鉄筋コンクリート・セグメントを用いているが、セグメント継手目地の防水に一応成功したので、二次巻が施工されていない。しかしシールド形トンネルの完全な漏水止は構造上困難とされており、江東零メートル地帯特有の塩分を含む地下水とも関連して漏水区間のレールなどに電食によると思われる腐食を認めるに至った。そこでこれらの腐食が構築物鉄筋などにも及ぶか否か、特にシールド形トンネルの場合は部分的な破壊が即全体の破壊につながることもあって、この付近における漏れ電流の実態と構築物の電気的特性から電食の可能性を体系的に調査、研究することにした。

5.3.2 セグメントの電気的連続性

シールド形トンネルは巾80[cm]の環の連続体で、環は8枚のセグメントから組立てられており、セグメントの標準寸法は、長さ318[cm]巾80[cm]厚さ12[cm]（リブの部分は30[cm]）で、 $\phi 9$ 、 $\phi 13$ 、 $\phi 16$ の鉄筋が入っている。鉄筋表面のコンクリート被りは13~16[mm]と薄い。

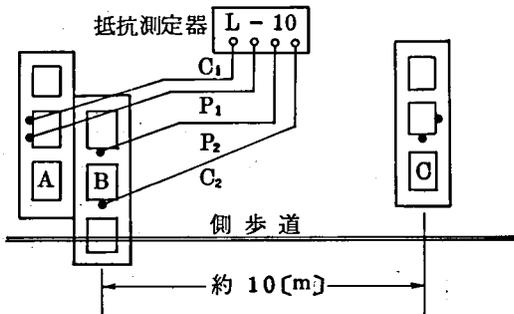


図-5.11 セグメント相互抵抗測定図

セグメント相互間の電気的連続性は、図-5.11に示すように、隣接したAとB、および約10[m]離隔したCの計3枚のセグメントを選び、それぞれの鉄筋から端子2本を別々に引き出して、先ず2端子間の導通を確認することにより同一セグメント内の鉄筋同士が電気的につながっていることを確認してからA、B、およびC相互間の抵抗を測定するという方法で調査した。その結果、ほぼ3~16[Ω]の値を得ている。

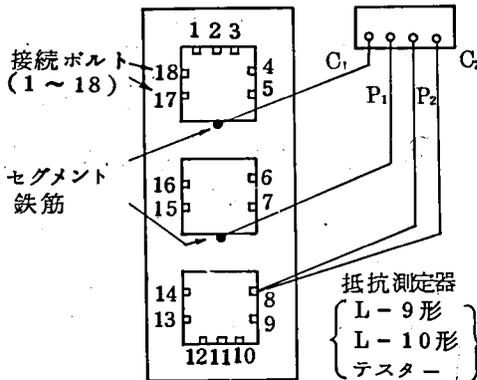


図-5.12

セグメント鉄筋とボルト間抵抗測定図

また、セグメント同志の機械的つながりはセグメント1枚当り18本の接続ボルトで確保されているので、セグメント内の鉄筋とこれらボルト間の電氣的導通関係を、別途、図-5.12の回路で抵抗値として測定したところ、1[Ω]~150[kΩ]と非常に広い範囲にあることが判明した。

このうち、測定値が1[Ω]のものは1例しかなく、これはボルトと鉄筋が接触しているものと思われるので例外とすると、他は10[Ω]台の低抵抗群、100[Ω]台の中抵抗群、および1[kΩ]以上の高抵抗群に分けられる。ここで、低抵抗群は大部分、電らん棚や側歩道を同時に取り付けているボルトであり、そのために抵抗が低くなっているものと思われる。したがって、セグメント自身は互に電氣的独立と考えてよく、接続ボルトと鉄筋の接触は一般的には問題とならない。しかし、時には電らん棚や側歩道を介して結ばれることもあり、全体としてセグメント相互間抵抗が10[Ω]台に測定されるのは理解できる。

5.3.3 電らん棚および側歩道を流れる漏れ電流

地下鉄トンネル内には連続した金属体として電らん棚があり、当該シールド区間には側歩道もある。これらはいずれもアングル鋼を主体として組み立てられており、漏れ電流の通路となり得る。一連の電らん棚は各駅の電気機器室で接地されているが、側歩道は信号機器や昇降階段設置のためH₃が25[m]毎、H₂が50[m]毎、H₁とH₄が350[m]毎に区切られており、また脚部が道床コンクリート内に埋込まれているだけで特に接地工事はなされていない。

まず、シールド形トンネルにおいて電らん棚を流れる漏れ電流を測定するために、一連の

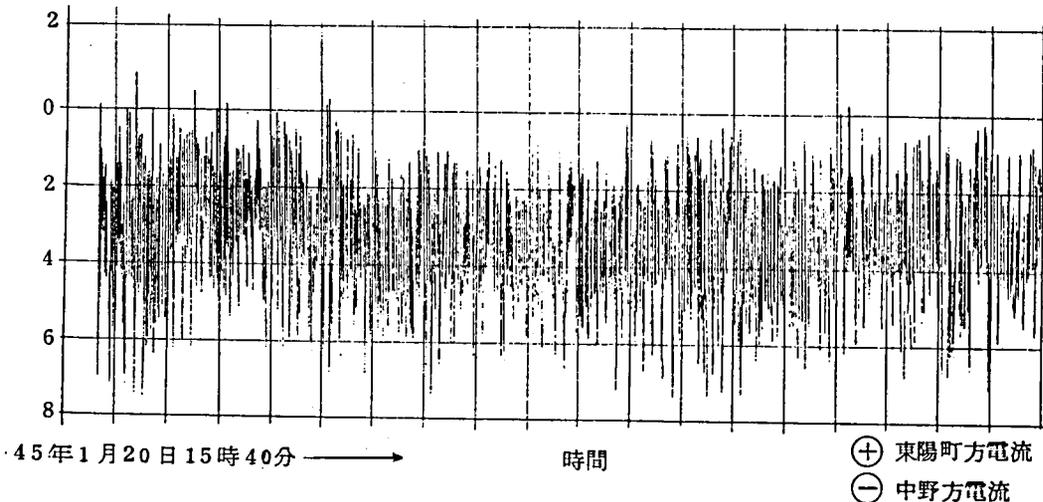


図-5.13 電らん棚を流れる電流(東京5号線木場~東陽町間)

電らん棚を電氣的に連結している接続線ははずし、その間に分流器100[mV] / 10[A]を挿入して記録電圧計で記録した。木場駅端における記録は、図-5.13に示すように、最大10[A]、平均3[A]であるが、測定場所が異るとその大きさと方向も異なり、一定していない。

一方、比較のために測定した鉄筋コンクリート箱形トンネル区間の同線神楽坂駅では、+0.3から-0.3[A]と極めて小さい。

側歩道を通る漏れ電流も同様の方法で測定しているが、同じ場所の電らん棚を通る電流にくらべて1桁小さく、方向もやはり不定である。また、他の回路の入切による影響もほとんど見られなかった。

したがって、シールド形トンネル内では、これらの構造物がそのセグメントに付帯した接地体の役目を果たし、セグメントからの漏れ電流が多い箇所での電流を受け入れて、少し離れたセグメントにまた戻しているものと思われる。

なお、接地抵抗は、電らん棚が0.2～0.3[Ω]側歩道が1.0～3.9[Ω]である。

5.3.4 電位測定

測定は東陽町駅から木場方向の単線2本並列シールド形トンネルのA線内1箇所とB線内2箇所を主として行ない、木場駅から門前仲町方向のA線内でも1箇所実施している。

測定点A₀ : A線14K686M トンネル内乾燥状態

測定点A₁ : A線15K990M トンネル内乾燥状態

測定点B₁ : B線15K990M 同上(但し、以前は湿潤状態)

測定点B₂ : B線15K912M トンネル内湿潤状態

これらいずれの測定点においても、図-5.14に記入してある如く、円周方向にS₁、S₂、S₃、S₄の4枚のセグメントを選び、さらに30[m]離れた箇所のセグメントS₅とともにコンクリートを研って鉄筋の一部を露出させている。なお、各セグメントの中央部に設けられている裏込め注入孔を利用して標準電極E_i等がセグメント外側の土壤中に挿入されているが、測定点A₀では軌道中央で道床下方向にあけられた点検孔に入れることができた。

さらに東陽町駅では、鉄筋コンクリート箱形トンネルの構築をプラットホーム端の線路脇で研って鉄筋K(K')を出し、また通風孔を經由して駅出入口外側の地表に電極E_iを設置している。

(1) セグメント電位

図-5.14および図-5.15に示すように、セグメントの鉄筋S_iと裏込め注入孔に挿入した飽和硫酸銅電極E_i(i=1, 2, 3, 4)との間に電子式記録電圧計を入れ、セグメント対地電

圧 V_{SE} を測定すると同時に、A線またはB線とアース間にも計器を接続してレール電圧 V_R も記録する。そしてセグメント電位がレール電圧の影響をどの程度受けているかを見るために、零電位消去装置（イレサ）で自然電位を打ち消し、セグメント電位とレール電圧との関係を、電子式X-Y記録計でX軸に V_R を、Y軸に V_{SE} を加えて図示せしめた。

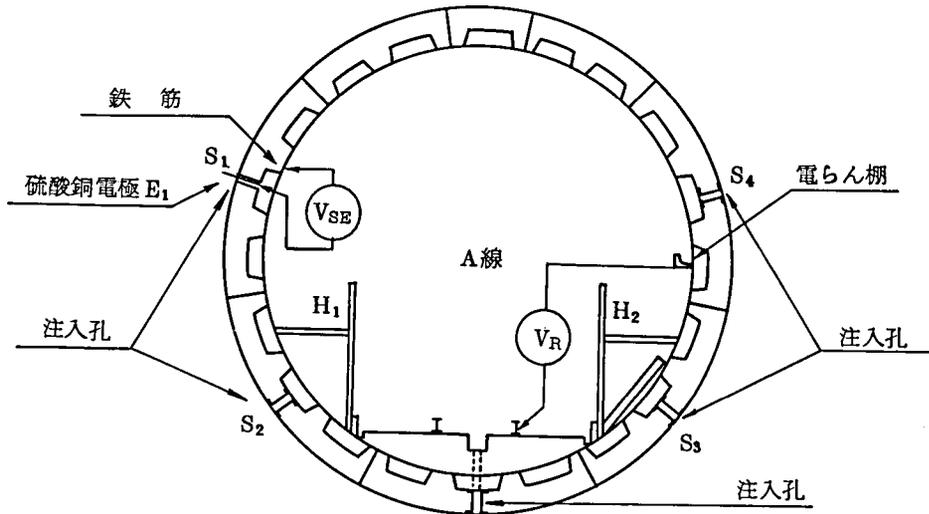


図 - 5.14 東陽町付近セグメント測定位置

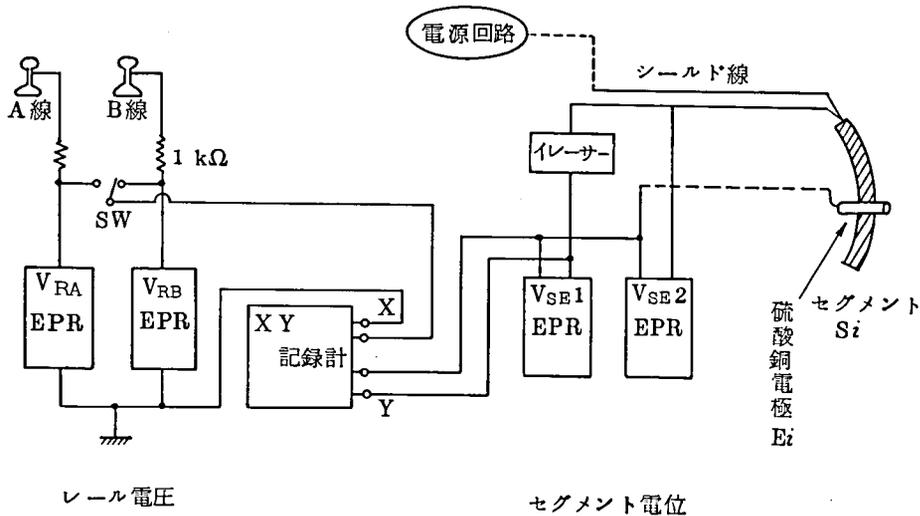


図 - 5.15 セグメント電位とレール電圧相関測定回路

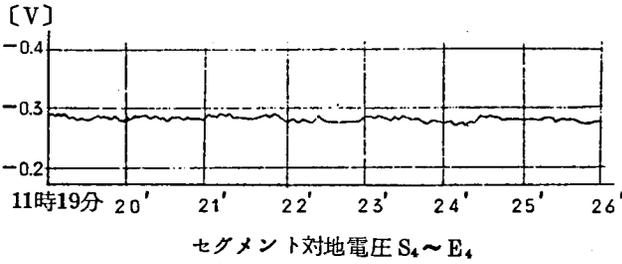
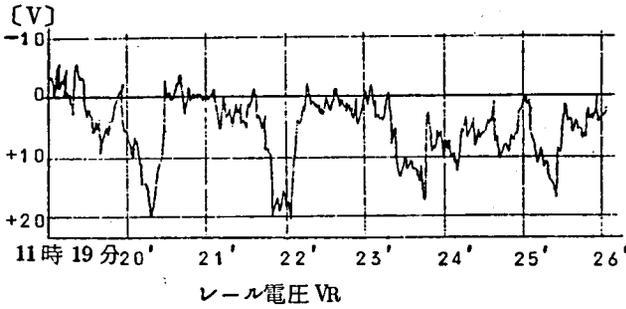


図-5.16 セグメント対地電圧 V_{SE} と
レール電圧 V_R の同時記録 (B_1 地点)

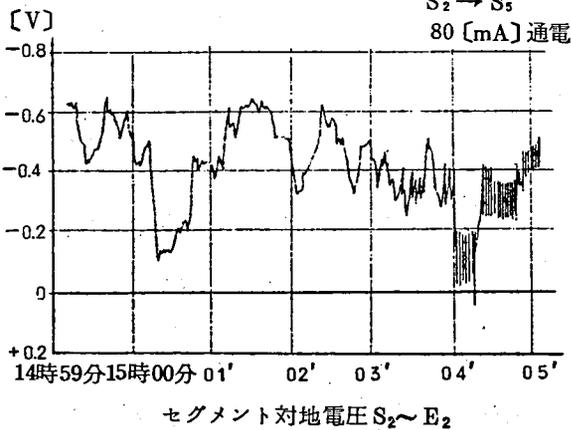
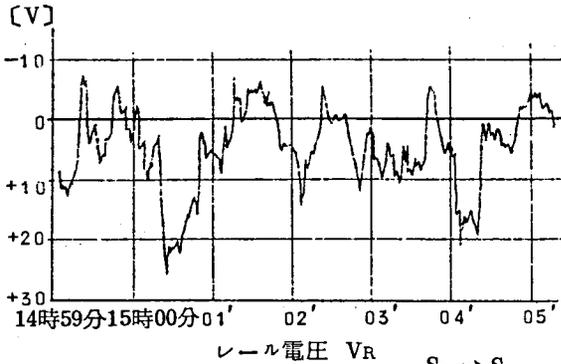


図-5.17 セグメント対地電圧 V_{SE} と
レール電圧 V_R の同時記録 (B_2 地点)

図-5.16 は B_1-S_4 セグメントの V_{SE} と V_R の同時記録で、 V_R は -5 から 20 [V] の間で時間的に変動しているが、 V_{SE} はこの場合 -0.28 [V] すなわち -280 [mV] 付近ではほぼ一定であり、レール電圧の影響が殆んど見られない例である。これに対し、図-5.17 は B_2-S_2 セグメントの場合であって、 V_R は前者同様 -8 から 25 [V] の変化をしているが、 V_{SE} も -0.1 から -0.65 [V] と大きく変化し、かつその間に関係の存在が予見される。また、図-5.18 は A_1-S_3 セグメントの X-Y 記録で、 V_R と V_{SE} はほぼ直線関係にあることがわかる。

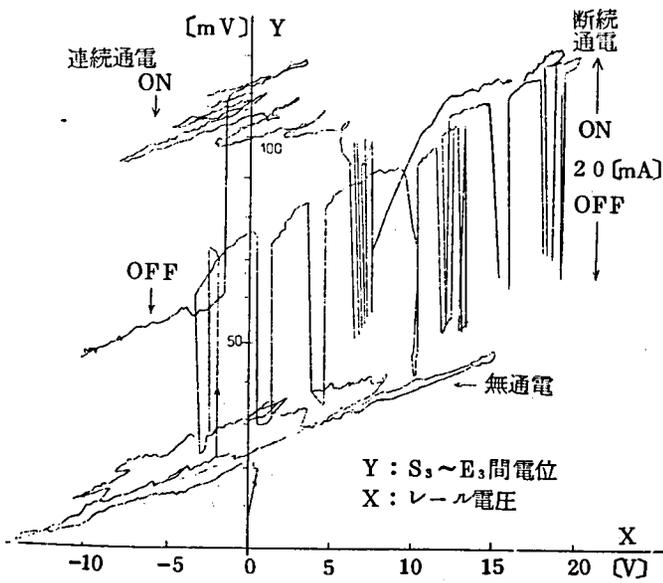


図 - 5.18 通電による $A_1 \sim S_3$ セグメントの電位とレール電圧の関係 (X-Y 記録計)

一般に両者の関係を、
 $V_{SE} = a \cdot V_R + b \dots (5.2)$
と表現すると、 a はレール電圧がセグメント電位に影響する程度を示す係数であって、本論文では「電食係数」と呼ぶことにしている。 V_R の変化 $10[V]$ に対する V_{SE} の変化を $[mV]$ 単位で表わすと、 $-185 \sim 450$ である。また b は図 - 5.16 の $-280 [mV]$ に相当し、レール電圧に関係なく存在する自然電位であって、この測定では -160 から $-700 [mV]$ であった。

(2) セグメント間電位差

シールド形トンネルの鉄筋コンクリート・セグメントは互に電氣的に不連続であり、相互

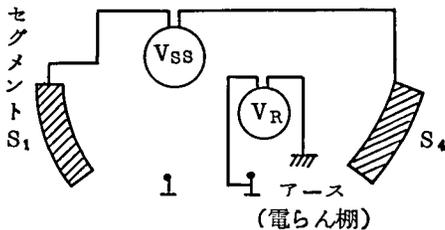


図 - 5.19 セグメント間電位差測定略図

間には電位差 V_{SS} が存在する。

そこで、図 - 5.19 のように、セグメント間に電子式記録電圧計 (EPR-2T) を入れ、またレール電圧 V_R も測定して同時記録すると、 V_{SS} にも、レール電圧に関係しない静的部分 b と、関係する動的部分 $a \cdot V_R$ があることがはっきりする。

測定の結果、 b が大きいものは測定点 B_1 の $S_3 \sim S_1$ 間の $-450 [mV]$ 、 $S_2 \sim S_4$ 間の $400 [mV]$ などであり、 a が大きいのは測定点 B_2 の各セグメント間で $380 \sim 450$ であり、他の箇所はこれより一桁小さい。

(3) 大地間電位差

シールド形トンネルの周囲土壌中の電位勾配によって、漏れ電流の動向を知るためには、
 図-5.20の如く、セグメントの裏込め注入孔から外部の土中に突き出した硫酸銅電極同志間の

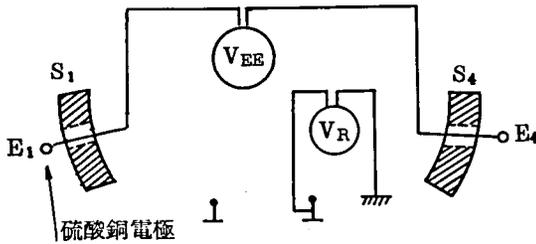


図-5.20 大地間電位差測定略図

電位差 V_{EE} を測定して、大地間電位差とした。また、先に述べたように、東陽町駅の通風孔を經由して地表の硫酸銅電極との間も測定している。

なお、測定の詳細は前二項と同様で、レール電圧との同時測定を行ない、静的電位差と動的電位差に分けて解析した。結果、 b は $0 \sim 100$ [mV]、

a は大部分が $2.5 \sim 30$ の範囲内にあるが測定点 B_2 のみ $220 \sim 250$ ときわだって大きい。このことから、 B_2 地点外側の電位勾配が大きいこと、すなわち、 B_2 地点で電流が大地へ大きく流出していることが判明した。

(4) 流出電流

図-5.21のようにセグメント S_i ($i=1, 2, 3, 4$) についてセグメント電位 V_{SE} を(1)項と同様に測定記録しながら、若干離れて位置するセグメント S_j との間に電流 I を流し、それによる V_{SE} の変化から流出電流を推定計算した。

$A_1 - S_3$ セグメントの図-5.18の例では、 $I = 20$ [mA]の通電によって V_{SE} が約 50

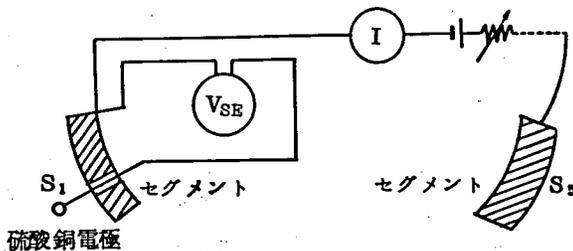


図-5.21 流出電流測定略図

[mV]上昇しており、上昇分 1 [mV] 当りでは $P = 0.4$ [mA] になる。一方、同図の無通電時の記録から、この地点におけるレール電圧 V_R がセグメント電位 V_{SE} に関する程度は、 V_R の 10 [V] 上昇に対し

V_{SE} は 15.5 [mV] の上昇、すなわち $a = 15.5$ [mV] / 10 [V] である。そこで逆に、セグメント電位 V_{SE} を 15.5 [mV] 上昇させるというレール電圧 V_R の 10 [V] と等効果を電流 Q を計算すると

$$20\text{mA} \times (15.5\text{mV}/50\text{mV}) = 6.2\text{mA}$$

となる。このことから、測定点 A₁ のセグメント S₃ を通してトンネル外に流出する電流はレール電圧10[V]当り6.2[mA]であると推定することができる。

一般には、通電により VSE を1[mV]変化させるに要する電流 P を求め、これに V_R が 10[V] 変化した時の VSE の変化分 a を乗ずれば、流出電流 Q が求められる。

$$P \text{ [mA/mV]} \times a \text{ [mV/10V]} = Q \text{ [mA/10V]} \dots\dots\dots (5.3)$$

各測定点の各セグメントについてこの値を計算したのが表-5.2である。

表-5.2 セグメントよりの流出電流計算

測定地点	セグメント	P 通電変化 [mA/mV]	a レール電圧10[V]に 対するセグメント 電位変化 [mV]	Q = P × a レール電圧 10 [V] に対する セグメントからの流出電流 [mA]
A ₀	S ₁	0.34	5.0	1.7
	S ₂	0.47	4.7	2.2
	S ₃	0.45	5.0	2.25
	S ₄	0.43	2.2	0.95
A ₁	S ₁	0.33	1.0	0.33
	S ₂	0.6	11.0	6.6
	S ₃	0.4	15.5	6.2
	S ₄	0.14	6.0	0.84
B ₁	S ₁	0.1	0.8	0.08
	S ₂	0.17	8.5	1.45
	S ₃	0.36	3.3	1.2
	S ₄	0.15	8.0	1.2
B ₂	S ₁	0.33	28	9.2
	S ₂	0.5	160	80.0
	S ₃	0.4	220	88.0
	S ₄	0.8	5	4.0

(5) 土壤抵抗

シールド形トンネル構築物周辺の土壤の抵抗率を知るために、各セグメントの中央にある裏込め注入孔から土壤杖をセグメント裏の土壤中に挿入して1200～6800〔Ω・cm〕の測定値を得ている。

しかし土壤抵抗が1200〔Ω・cm〕などの低い注入孔は数箇所、平均すると2600〔Ω・cm〕程度による。

(6) セグメントの接地抵抗

セグメントの接地抵抗は次に述べる三つの方法で求めた。表-5.3はそれらの値の一らん表である。

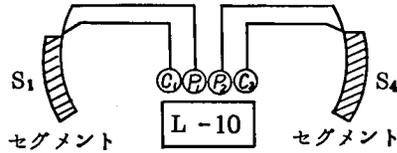


図-5.22 セグメントの相互間抵抗測定

1) セグメントの相互間抵抗から

求める方法

L-10 形大地抵抗率測定器を用い、図-5.22 のようにして、 r_{1-4} などのセグメント相互間抵抗を測定し、次の連立方程式を解いて、 r_1 など個々のセグメントの接地抵抗を求めている。

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= \frac{1}{2} (r_{1-4} + r_{4-5} + r_{5-1}) - r_{4-5} \\ r_4 &= \frac{1}{2} (r_{1-4} + r_{4-5} + r_{5-1}) - r_{5-1} \\ r_5 &= \frac{1}{2} (r_{1-4} + r_{4-5} + r_{5-1}) - r_{1-4} \\ r_2 &= r_{2-5} - r_5 \\ r_3 &= r_{3-5} - r_5 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.4)$$

なお、この場合、 r_1 、 r_4 、 r_5 を選んだのは、なるべく離れたセグメント間を測定して、接近効果を少なくしようとしたためである。

2) 直流通電による電位変化から求める方法

先に(4)で述べたように、図-5.21 の回路でセグメント電位 VSE を測定し、遠方のセグメント S_5 を対極として通電した場合の通電電流 ΔI_s による電位の変化分 ΔVSE を得て、

$$r = \Delta VSE / \Delta I_s \dots\dots\dots (5.5)$$

の式で、セグメント S_1 の接地抵抗 r_1 などを求める。

3) 土壤抵抗から求める方法

(5)で測定して得たセグメント外側の土壤の抵抗率 ρ と、セグメントの接地面積から近似

計算する。すなわち、セグメントの背面積 $S \div 24000$ [cm]に等しい背面積を持つ半球の半径 $R \div 87.5$ [cm] を求め、半球の接地抵抗の式を適用して

$$r = \frac{\rho}{2\pi} \cdot \frac{1}{R} \div 0.0018\rho \dots\dots\dots(5.6)$$

から計算する。

表-5.3 コンクリートセグメント接地抵抗 単位〔Ω〕

	(1) セグメント相 互間抵抗よ りの測定値 (45. 6.18)	(2) 直流通電よ りの測定値 (45. 6.18)	(2) 直流通電よ りの測定値 (46.12.14)	(3) 土壌抵抗よ りの計算値 (45. 6.18)	平均値
A ₀ -S ₁	4.1	7.9	—	3.6	3.2
-S ₂	3.7	2.1	—	4.3	3.4
-S ₃	2.6	2.2	—	2.2	2.3
-S ₄	3.1	2.3	—	4.0	3.1
A ₁ -S ₁	4.0	3.0	5.1	9.5	5.4
-S ₂	2.0	1.7	2.8	3.6	2.5
-S ₃	2.2	2.5	2.4	4.0	2.8
-S ₄	6.5	7.3	7.8	9.5	7.8
B ₁ -S ₁	10.4	10.0	9.2	12.4	10.5
-S ₂	6.3	6.0	6.0	4.3	5.7
-S ₃	2.8	2.8	2.0	4.2	3.0
-S ₄	4.1	6.5	5.2	5.1	5.2
B ₂ -S ₁	3.2	3.0	3.8	2.9	3.2
-S ₂	1.8	2.0	2.5	4.3	2.7
-S ₃	2.6	2.5	3.1	4.2	3.1
-S ₄	1.5	1.3	1.6	2.7	1.8

表からも明らかなように、いずれの方法によっても、ほぼ同じ接地抵抗値が得られている。そこで、三方法により得た値を平均して各セグメントの接地抵抗とすると1.8~10.5〔Ω〕

となるが、このばらつきは主としてセグメント側の土壌抵抗の差によるものと思われる。なお、16個のセグメント全部を平均した接地抵抗値は4.1Ωである。

5.3.5 通電分極試験

セグメント鉄筋の通電試験は、5.3.4の(4)、(6)の2)項にも述べているが、この節では、±200[mA]を三角波(立上り1分、立下り1分、停止2分)状と矩形波(2分通電、2分停止)状に通電にして、セグメントに正電圧をかける陽分極試験と、逆に負電圧をかける陰分極試験の結果を記す。なお、通電および測定回路は図-5.23のとおりである。

図-5.24の(1)から(3)は測定された電位の一例であって、このようにセグメント電位は分極により電流波形とは異なった形となっている。この通電による電位の変化分は、矩形波の場合、図に記入したように、電流変化に直ちに対応して変化する通電変化電圧(イロ、ハニ、ホへ、トチなどの部分)、一定電流通電時に分極作用により変化する分極変化電圧(ロハ、ヘトの部分)、および通電をやめてもあとに残っている残留電圧(ニホ、チリの部分)に分けて考える。分極変化電圧、残留電圧はともにセグメント鉄筋の電気化学的性質を示しており、コンクリートの中性化や亀裂などによって鉄筋表面の不働態が失われると、これらの値が小くなる。図-5.25に通電によるセグメント電位の各変化をまとめておく。

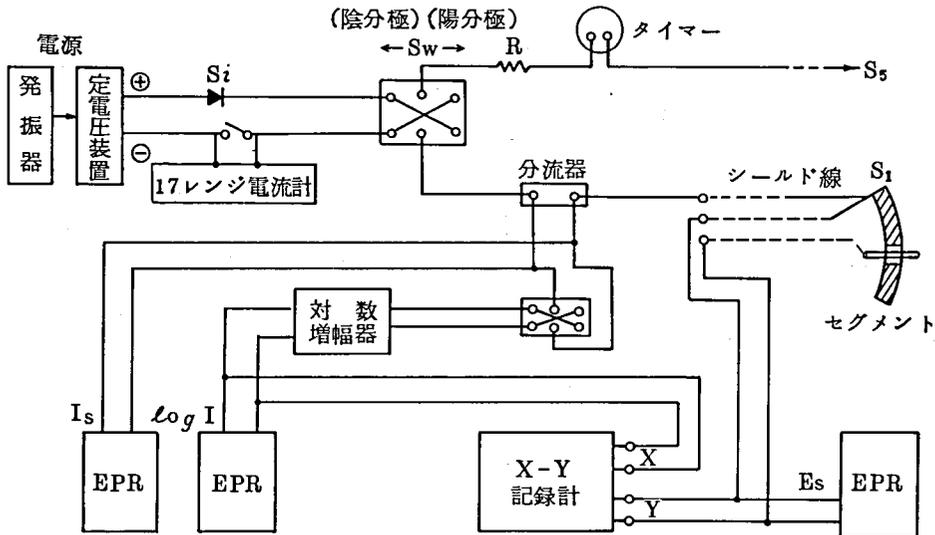


図-5.23 通電分極試験回路図

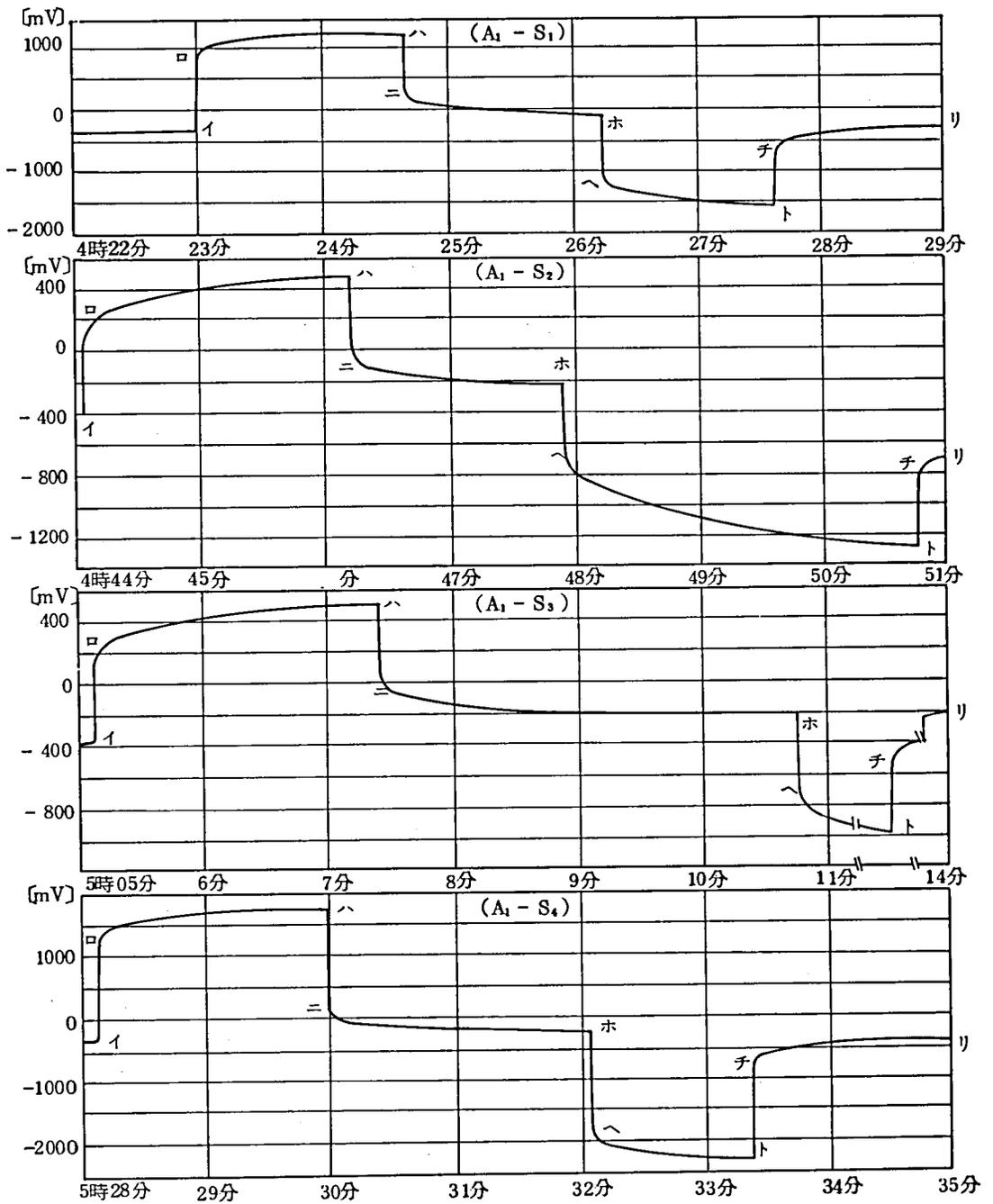


図-5.24 セグメント分極電位波形(1)

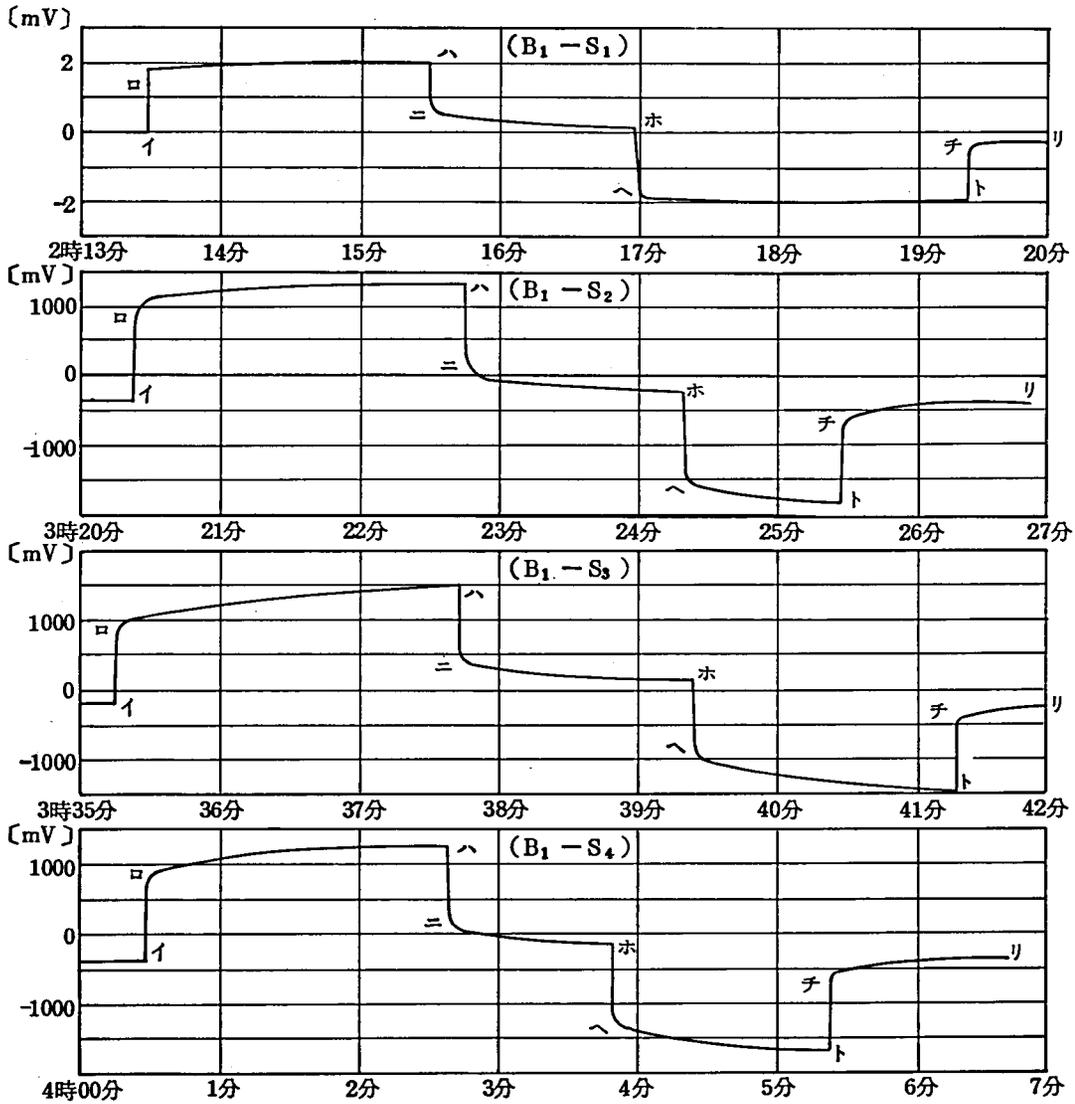


図 - 5.24 セグメント分極電位波形(2)

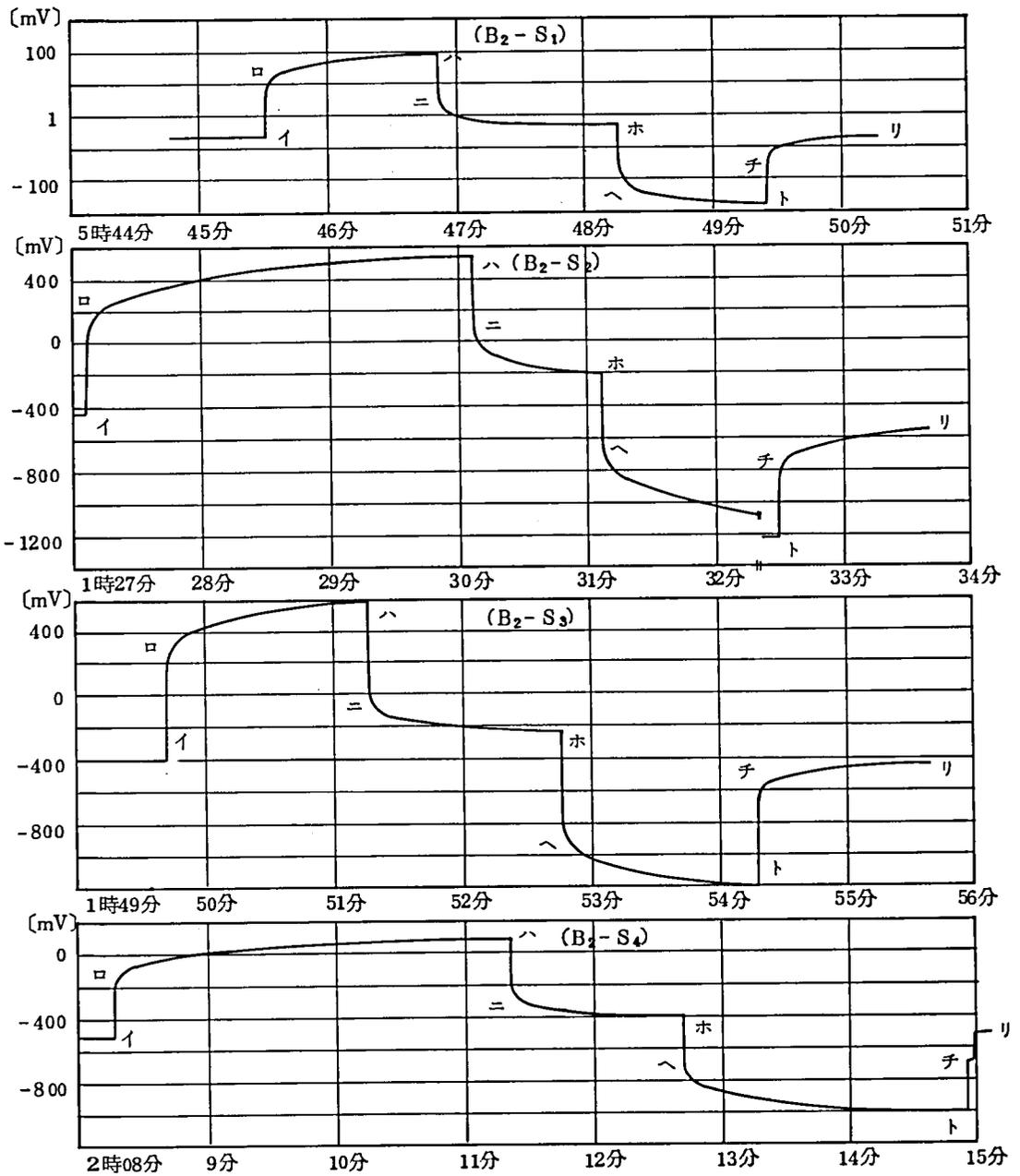


図-5.24 セグメント分極電位波形(3)

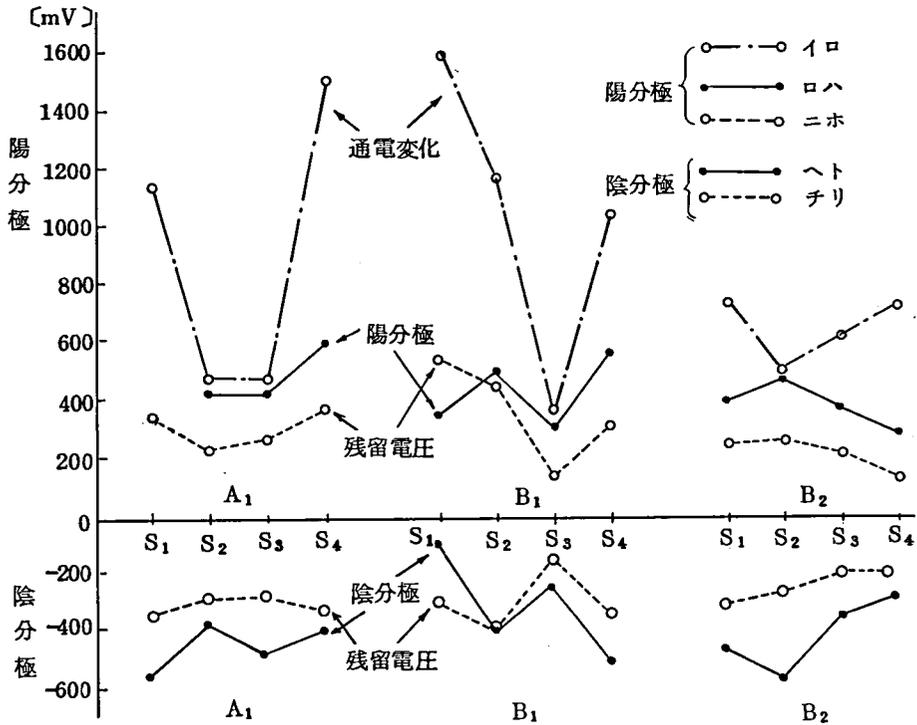


図 - 5.25 通電によるセグメント電位の変化

5.3.6 セグメント電食の可能性

ツールド形トンネルの鉄筋コンクリート・セグメントの場合、セグメント内の鉄筋は電気的につながっているが、セグメント相互間は独立で、セグメントの取り付け接続ボルトを介してのつながりも問題にする程のものではない。その接地抵抗の範囲は $1.8 \sim 10.5 [\Omega]$ 、平均 $4.1 [\Omega]$ である。

また、セグメントには電らん棚や側歩道など金属体の構造物が取り付けられているものもあり、従来これらの構造物が電気的にボンドの機能を果たすものと思われていたが、測定の結果、場所により電流の大きさのみならずその方向も変わり、これらの構造物は局所的な漏れ電流を拾っているに過ぎない。したがって、この区間では、漏れ電流の総量よりも、局所的な漏れ電流密度が防食管理上重要であると考えらる。

セグメント電位、セグメント間電位差、大地間電位差、いずれの測定によっても、トンネル内が湿潤な状態にある測定点 B_2 の下部セグメント S_2 および S_3 では、レール電圧との関連を示す電食係数 a が大きく、局所的に大きな漏れ電流があることを示している。

セグメントの自然電位 b の値は一定していないが、通常コンクリート中の鉄の電位とされ

ている $-200[\mu\text{V}]$ より著しくはなれたものもあり、 $-500[\mu\text{V}]$ より卑な値を示したものにはA₁地点のS₂、S₃、B₁地点のS₂、S₃、B₂地点のS₂、S₄、S₅がある。これらも大部分がシールド・トンネルの下部に位置するセグメントで、現在は乾燥状態であっても、かって湿潤な状態の時期があり、その間に電食がある程度進行したものと判定される。

シールドの下部セグメントが要注意であることは、流出電流の計算からも結論でき、特に湿潤箇所の底部からの流出電流は他に比べて一段と多い。

さらに通電分極試験の結果でも、B₁-S₃、B₂-S₃、B₂-S₄のセグメントは、分極変化電圧の値が小さく、残留電圧も $200[\mu\text{V}]$ 未満で、鉄筋表面の不動態が失われていると考えざるを得ない。

以上をまとめると、自然腐食や電食の可能性のあるセグメントはB₁-S₃、B₂-S₂、B₂-S₃、B₂-S₄であり、特に注意を要するセグメントはB₂-S₃であるといえる。

5.4 総括

5.4.1 構築物の電気的連続性

地下鉄構築物が漏れ電流の経路として電気的に連続であるか否かを知ることは、地下鉄における電食を論じ、適切な電食防止対策を進める上で、極めて重要である。

鉄骨構造の場合には、駅中二階部もトンネル内の中央柱も鉄骨同志の相互間抵抗値が零で、電気的に連続一体の状態にある。測定は一線一駅でしか実施していないが、このことは構造上当然のこととして結論できる。

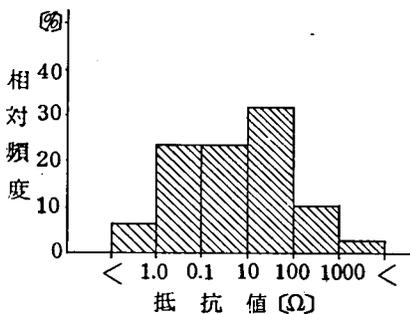


図-5.26 構築鉄筋抵抗分布図
(三越前駅、新橋付近、東京駅 計68本)

鉄筋コンクリート構築物では、測定された鉄筋68本の抵抗値が図-5.26のように広い範囲に分布しているが、表-5.4から鉄骨と鉄筋間の抵抗と考えられる三越前駅の分を別にして考えると、 $0.1[\Omega]$ 以上 $1.0[\Omega]$ 未満が最頻値となり、あるものは比較的つながった系と考えてよいようである。

シールド形トンネルの鉄筋コンクリート・セグメントは個々に独立である。セグメント内の鉄筋同志は電気的につながっているが、セグメントを互に接続するボルトと内部の鉄筋間の平均的な電気抵抗値は $100[\Omega]$ 台で、ボルトを介してのつながりは問題にならない。ただ、電らん棚や側歩道など部分的に連続した金属構築物を取り付けられているものもあり、全体としてのセグメント相互間抵抗は $10[\Omega]$ 台の測定値となる。

表 - 5.4 構築鉄筋の相互間抵抗値

抵抗値 [Ω] 場所	0~0.1 未満	0.1~1.0 未満	1~10 未満	10~100 未満	100~1000 未満	1000 以上	計
三越前駅		5	11	19	7	2	44
同上 新設冷凍機室	1						1
新橋付近	4	3	2	2			11
東京駅		8	3	1			12
計	5	16	16	22	7	2	68
頻度 [%]	7.3	23.5	23.5	32.4	10.3	3.0	100

以上を総括すると、前二者の場合は電気的連続状態にあり、電気鉄道沿線の地中埋設金属体と同様に、レール電圧の分布と漏れ電流の総量が、後者電気的に不連続であって、軌道材料の場合と同じく、漏れ電流密度すなわちレール対地電圧をその地点における漏れ抵抗で除した個々の漏れ電流値が防食管理上重要であるといえる。

5.4.2 自然電位

箱形トンネル構築の鉄筋の自然電位は、飽和硫酸銅電極基準で電子式記録電圧計（EPR-2T）を用いて測定した結果、トンネル内のコンクリート道床上の電極に対して-120から-165[mV]と-270から-440[mV]で、-160[mV]および-350[mV]付近の値が多く、トンネル構築外の土壤中の電極に対しては-480から-700[mV]で、-550[mV]付近の値が多かった。

シールド形トンネルのセグメントの鉄筋の場合、裏込め注入孔に挿入した電極に対しては-100から-740[mV]の値が測定されている。

一般に、コンクリート中の鉄筋の電位は、コンクリートが健全であれば-200[mV]から-300[mV]を示すのが普通であり、特に-500[mV]より卑な値を示すような場所では、鉄筋を被覆しているコンクリートが既に中性化しているか、細かい亀裂が入って鉄筋の一部が露出し腐食状態にあるものと診断される。

このような場所では鉄筋表面の不動態が失われているから電食の要注意箇所として監視し、電食が発生する条件を極力排除する必要がある。

5.4.3 電食係数

鉄筋電位 V_{SE} がレール電圧 V_R により変化する割合、すなわち電食係数 $a = \Delta V_{SE} / \Delta V_R$ を X-Y 記録計で測定して計算すると、箱形トンネルの区間では、新橋付近に 0.4 ~ 0.7 [%] の場所があったほか殆んど零で、両者の間に明らかな相関は認められない。

しかし、シールド形トンネルのセグメントの中には 2.2 図のものもあり、特に湿潤箇所ではトンネルの底部に位置するセグメントは、レールからの漏れ電流の影響を受けていることが明らかである。

地下埋設金属体に電気防食を実施する場合、防食用陽極から防護対象物に向かって流れる電流によって大地中に電位勾配が生じ、そこに他の埋設金属体があると防食電流の一部が分流することになる。そこで、こちらの埋設金属体が電食してしまうことにならないように、一応 50 [mV] の値をもって干渉の許容限界値としている。

したがって、この許容値を準用し、レール電圧は普通 50 [V] 程度であることを考えると、

$$a = 50 [\text{mV}] / 50 [\text{V}] = 0.1 [\%]$$

を超える場所では電食に対して配慮する必要があるといえよう。

5.4.4 分極残留電圧

シールド形トンネルの鉄筋コンクリート・セグメントに対しては、遠方のセグメントを対極として電流 ± 200 [mA] を三角波状および矩形波状に通電し、陽分極、陰分極の試験を試みた。

この試験においても、自然電位の測定同様、鉄筋の防食状態すなわち鉄筋を被覆しているコンクリートの状態の良否を判定しようとするものである。この試験の結果、電流を切った後の分極残留電圧が 200 [mV] 未満で、コンクリートの中性化や亀裂によって内部鉄筋の不働態化がそこなわれていると考えられたセグメントは、すべて先きの自然電位測定でも要注意とされていたもので、そのうち電位が特に卑であるものが検出されている。

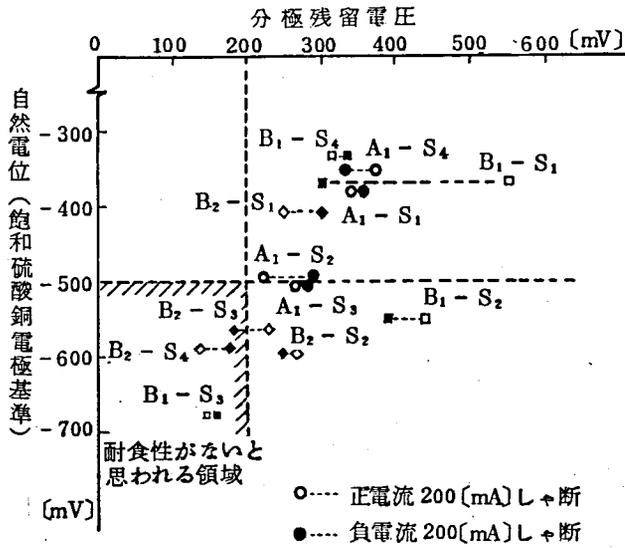


図 - 5.27 セグメントの自然電位と分極残留電圧

したがって両者の関係は図 - 5.27 のようにまとめられ、図中、「耐食性がないと思われる領域」に位置するものには電食の可能性はある。さらに、これらセグメント自身の電気化学的条件に、漏れ電流の条件を電食係数として考えあわせると、表 - 5.5 に示す判定表が得られ、外部から内部状態をほぼ完全に診断できる。

表 - 5.5 セグメントの電食判定表

セグメント	自然電位		分極残留電圧			電食係数		
	測定値 [-mV]	判定	陽分極 [mV]	陰分極 [mV]	判定	45. 6. 18 [%]	46. 12. 13 [%]	判定
A ₁ - S ₁	290~380		350	350		+0.01	-0.0025	
S ₂	380~540	×	220	290		+0.11	-0.0088	△
S ₃	320~520	×	260	280		+0.155	-0.010	△
S ₄	340~360		370	330		+0.060	-0.005	
B ₁ - S ₁	100~390		550	300		+0.008	+0.005	
S ₂	300~590	×	440	390		+0.085	+0.005	
S ₃	660~740	×	150	150	×	+0.033	-0.018	
S ₄	280~350		310	330		+0.08	+0.003	
B ₂ - S ₁	300~400		250	300		+0.28	+0.077	△
S ₂	400~600	×	260	250		+1.6	+0.8	×
S ₃	200~680	×	230	190	×	+2.2	+0.52	×
S ₄	440~590	×	140	180	×	+0.05	-0.063	

第6章 鉄筋コンクリート試料の電食調査

6.1 鉄筋コンクリートの電食調査

地下鉄コンクリート構築物中の鉄筋について、その自然電位、レール電圧との関連における電位、および通電試験による分極残留電圧に着目し、内部の腐食環境を外部からの電気計測的診断により把握して電食の可能性を論ずる方法については既に述べた。

一方地下鉄の構築物は改良工事等に際して部分的に取り壊わされることがあるので、その機会を利用すれば、構築物から鉄筋コンクリート試料を採取し、その試料自体の電気化学的な調査によって電食ないし腐食発生の有無を直接判定することも可能である。

そこで筆者は、これら二つの測定・調査が、もし同一箇所で行なわれれば、外部から電氣的にとらえられた構築全体の内部像と、部分的ではあるにせよ現実の鉄筋コンクリートの電食状況とを照合して、電気計測的診断の妥当性が検証できるとともに、その付近における構築鉄筋の電食の可能性もより高い精度で推論することができると考えて、表記調査を実施することにした。

本章では、トンネル構築数箇所から実際に試料を採取して行なわれたコンクリート中性化の測定、コンクリート中における鉄筋の腐食度および構築物が接する土壌中の塩化物イオンの濃度の測定⁽¹⁾をもとに、上記観点に立った考察を進める。

6.2 コンクリートの中性化と鉄筋の電食環境

コンクリートは、健全な状態にあると、セメント硬化時の水和反応によって生じた水酸化カルシウムのために、pH12以上の高いアルカリ性を呈し、鉄筋の表面は保護被膜が形成されて不動態化しているため、鉄筋は安定な防食条件のもとにある。ところが、年月が経過すると、コンクリート中の水酸化カルシウムが大気中の二酸化炭素と結合して炭酸カルシウムに変じ、コンクリートが漸時アルカリ性を失なって表面から中性化していく結果、内部の鉄筋に対する防食条件もくずれてくることになる。

実際、構築物鉄筋の電位には、鉄の不動態電位から腐食電位まで種々の値が測定されているが、腐食電位を示すものは、すでにコンクリートの中性化などで一部の不動態が破れ、電食の起り易い部分が存在しているということであろう。そこでフェノールフタレンの1%エチルアルコール溶液噴霧による赤色呈色反応法を用い、構築物の表面から内部に向かって進行した中性化の深さを、表-6.1に示す箇所で行なわれた採取した円筒状試料の側面に沿って測定した結果と、電位測定による電食環境の推定結果を対照してみた。

表-6.1 コンクリートコア試料の概要

試料	採取場所	寸法〔mm〕	経過年数
1	4号線東京駅側壁下方 池袋起点より8K831M A線	φ150×490	昭32.12 開通 昭46.12 採取
2	同上 池袋起点より8K826M A線	φ150×510	14年経過
3	3号線三越前駅冷凍機室側壁下方 渋谷起点より9K338M B線	φ150×420	昭7.1 開通 昭46.12 採取
4	同上 渋谷起点より9K326M B線	φ150×450	40年経過
5	3号線新橋～虎ノ門間下床 渋谷起点より6K136M B線	φ150×410	昭14.1 開通 昭47.1 採取
6	同上 渋谷起点より6K141M B線	φ150×410	33年経過
7	5号線木場～東陽町間セグメント 中野起点より15K828M B線 (リング 692)	φ30×120	昭42.9 開通 昭47.3 採取 5年経過
8	同上 中野起点より15K990M B線 (リング 898)	φ30×120	
9	同上 中野起点より15K912M B線 (リング 799)	φ30×120	
10	3号線外苑前駅通路 側壁	φ150×450	昭13.11 開通 昭49.2 採取
11	同上 下床	φ150×320	36年経過

(1) 東京駅側壁

試料-1および2は、地下鉄トンネル壁の内側すなわち列車が運行されている線の表面から、それぞれ16~20[mm]と13[mm]の深さまで中性化しており、年間1[mm]程度の中性化進行速度であるが、ポルトランド・セメントを用いた普通の陸上コンクリート構築物で2[mm/年]という値と比較すると軽微である。

この付近の鉄筋電位は飽和硫酸銅電極基準で-480 [mV]から-550 [mV]であり、コンクリートの中性化や細かい亀裂によって不働態化が破られた鉄筋があると、-500 [mV]より卑な値が測定されるということとほぼ符合している。

(2) 三越前駅側壁

試料-3および4は、いずれも深さ方向に対して不均一に中性化が進行しており、フェノールフタレン呈色反応において非中性化部に現われる赤色も全般に弱い。

一方鉄筋の電位は、構築内のコンクリート床上の硫酸銅電極に対しては-270 [mV]から-350 [mV]、構築外の土壌中の電極に対しては-540[mV]から-700 [mV]である。

(3) 新橋・虎ノ門間下床

試料5および6は、試料の全深さに及ぶ中性化が認められたが、内部を破碎すると中性化が及んでいない部分もあり、このような不均一な中性化は施工の不適正または環境条件の不規則性によるものと考えられる。

ここでは、鉄筋の自然電位が-500 [mV]から-550 [mV]の値を示しているが、試料の状態からも当然の値といえよう。

(4) 木場・東陽町間セグメント

試料7、8および9は、施工後あまり年数が経過していないので、中性化を認める状態には至っていない。

(5) 外苑前駅通路下床

試料10および11いずれも中性化の進行は認められず、コンクリートは健全な状態を保っていた。

しかし内部の鉄筋が交差している箇所では、鉄線による結合部にコンクリートの打ち込みが不十分なために生じた空隙が数箇所存在しており、鉄筋および鉄線は局部電池作用により可成りの腐食をひき起して、表面に赤錆を生成していた。

すなわち、当所の地下鉄構築物について行なわれた電氣的測定による診断の結果、レール電圧、電食係数ならびに周囲土壌の抵抗率などから、当所の場合には電食される傾向が極めて少ないにもかかわらず、鉄筋電位が-500 [mV]程度とコンクリート中の鉄の電位としては卑な値を示していたのは、このためと考えられる。

6.3 塩化物イオンの浸透と鉄筋の電食環境

コンクリートが中性化していなくとも、コンクリート中に塩化物イオンが浸透することによって鉄筋の不働態が局部的に破壊され、孔食状の腐食を生じることがある。

木場～東陽町間のセグメントでは、コンクリートの中性化がまだ認められていないにもかかわらず、鉄筋の自然電位が -500 [mV]より卑な値を示すものがあり、また分極通電試験の結果でも残留電圧が 200 [mV]未満で、鉄筋表面の耐食性が失われていると思われるものが測定されているが、これらは外部からコンクリート中に浸透した塩化物イオンによって内部の腐食環境が悪化しているためと考えてよい。

(1) コンクリート中における軟鋼の腐食度

実際、各箇所採取したコンクリートおよび土壌の抽出液のpHと抵抗率を、ガラス電極pH計、コールラウシュ・ブリッジで、その中における軟鋼の腐食度を秤量によって測定した結果を、表-6.2について検討してみると次のように見える。

東京駅でコンクリートの中性化が進行している部分の試料では、当然抽出液のpHが1.0程度に低下しており、軟鋼が局部的に腐食状態になって 5.1 [$\text{mg}/\text{dm}^2 \cdot \text{day}$]と可成り大きい腐食度を示している。

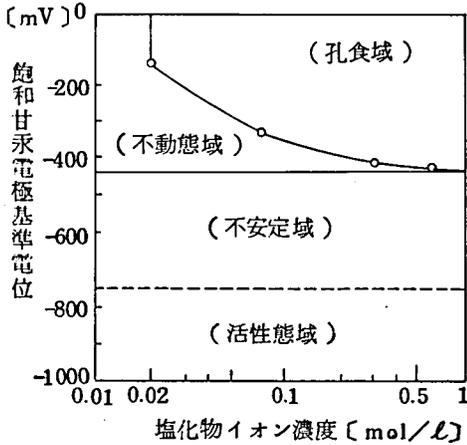
中性化がまだ進行していない東陽町の試料でも孔食が発生している。これはすでに塩化物イオンの浸透があったためと思われる。何故なら、木場～東陽町間トンネル中の漏水には海水の混入による塩化物イオン存在が認められているし、同所の土壌試料抽出液中では軟鋼が全面的に腐食して 1.5 [$\text{mg}/\text{dm}^2 \cdot \text{day}$]程度の腐食度になっているからである。

表-6.2 抽出液の特性と軟鋼の腐食度

試料		抽出液の特性		腐食度 (mdd)
		pH	抵抗率 [$\Omega \cdot \text{cm}$]	
コン ク リ ー ト 試 料	1-1 (東京駅側壁中性化部)	10.5	778	5.1 局部腐食
	1-2 (同上 非中性化部)	13.2	178	0 腐食なし
	3 (三越前駅側壁)	13.1	384	0 "
	5 (新橋～虎ノ門間下床)	12.9	595	0 "
	7-1 (木場～東陽町セグメント)	13.2	150	0 "
	8-1 (同上)	13.1	151	0 ビット数点
	土 壌 試 料	7-2 (同上)	9.6	485
8-2 (同上)		9.3	415	1.6 "

(2) 土壌中の塩化物イオン濃度

鉄筋コンクリートの中に浸透した塩化物イオンの濃度がセメント量に対し重量で0.4〔%〕を越え、鉄筋の腐食は著しくなるといわれ、飽和水酸化カルシウム溶液中の軟鋼を用いて



実験的にシミュレートした孔食発生限界の塩化物イオン濃度は0.02〔mol/l〕とされている。飽和甘永電極を基準にした電位と塩化物イオン濃度からみた腐食環境を図-6.1に示す。¹⁷⁾

木場～東陽町間のシールドトンネルセグメントから採取したコンクリート試料では、抽出液による腐食試験の結果、孔食が数点認められているが、腐食度は未だ零である。

図-6.1 塩化物イオン濃度と軟鋼の腐食形態

表-6.3 土壌中の塩化物イオン濃度

試料番号	Cl/50g土壌〔mg〕	Cl濃度〔wt%〕
7-2	44.2	0.09
7-3	68.8	0.14
8-2	47.0	0.09
8-3	58.9	0.12
9-2	45.9	0.09

しかし当該セグメントに接する土壌の抽出液中における腐食傾向は顕著であり、採取した土壌試料について塩化銀法により定量した塩化物イオン濃度は表-6.3に見られる如く約0.1〔%〕である。したがって、今後土壌からコンクリート中への塩化物イオンの浸透が増大するならば、コンクリートの被り厚さが比較的うすいセグメントの鉄筋は、腐食が発生し得る環境に置かれる

ことになり、電位測定の結果ならびにセグメント電位とレール電圧の相関を示す電食係数が大きいことをあわせ考えるとき、電食の懸念があるといわなければならない。

6.4 総括

以上各例のように、各地区で採取された鉄筋コンクリート試料の電食調査によって、前章で述べた構築鉄筋の電位測定は、構築物内部の腐食状況を外部から診断し、地下鉄トンネルの電食を監視するために、極めて有力な方法であることが実証された。

第7章 コンクリート中の鉄筋への電流流入実験

7.1 鉄筋コンクリートの電食と模擬実験の目的

シート形トンネルのコンクリート・セグメントを経由してトンネル外の大地へ流出する電流は、セグメントの鉄筋に定電流を印加した際の鉄筋の電位上昇（通電試験）およびレール電圧と鉄筋電位の相関（電食係数）から、レール電圧が 10 [V] のときでセグメント 1 枚につき最大 88 [mA] に達するという計算を先きに示した。

ところが、この電流がすべてセグメントの鉄筋を流れるのかコンクリート中を素通りするのかが問題である。レールからの漏れ電流は先ずセグメントの軌道側の鉄筋に流入し大地側の鉄筋から流出するという考え方に立つならば、腐食効率 100% のとき 1 年間で 0.8 [mm] の鉄筋が電食されることになり、他方、コンクリート中のみを流れて鉄筋には流入しないと考えれば、鉄筋に電食は発生しないことになる。

表-7.1 コンクリートの配合と吸水率・抵抗率

配合割合	吸水率	抵抗率
セメント : 砂 : 砂利	[%]	[Ωcm]
1 : 3 : 6	4.9	8,000
1 : 2 : 4	6.2	5,160
1 : 3 : 0	13.9	4,720
1 : 2 : 0	16.1	3,790

一般にコンクリートは、表-7.1 に見るように、普通の土壌にくらべて湿潤状態における電気抵抗が低く、コンクリート構造物がしめっていると電流がかなり流れ易い。⁽³⁾ 鉄筋コンクリートで電流が鉄筋に流入することになると、コンクリートの劣化および鉄筋の電食によってその強度に影響を及ぼし、亀裂、崩壊につながる。すなわち、鉄筋に電流が流入する場合には、当然、鉄筋は電氣的に防食されるが、周囲のコン

クリートが軟化して付着力が減少するという陰極効果が現われる。陰極効果による軟化は鉄筋に接する面から 6 mm の範囲内に生じるとされ、鋼表面の電位傾度は 4 [V/cm] で、⁽²⁸⁾ 付着力を失わない電流密度は 200 [mA/m²] 以下、コンクリートが崩壊するのは 2000 [mA/m²] 以上といわれる。⁽²⁹⁾ 一方、鉄筋から電流が流出する箇所では陽極効果が生じ、鉄は電食して第二水酸化鉄になる結果 2.2 倍の体積に膨張するので、⁽²⁸⁾ 鉄筋に沿ってコンクリートに亀裂が走り、やがて破壊をひきおこすに至る。コンクリート中の許容電位勾配は 2 [V/cm] までとされているが、⁽³⁾ これ以上では流出電流の増加により周囲温度も 40°C を超え、反応が促進されて陽極効果が急激に進行するという理由からである。

そこで筆者は、鉄筋コンクリート・セグメントの電食の危険性を論じるためには、セグメントを通過する電流の経路を明確にしておくべきであると考え、コンクリート中の鉄筋への

迷走電流の流入を室内実験で確かめることを計画した。

実物のセグメントは、条件の設定、試料としての加工および測定に不便であり、また室内実験には大きすぎるので、電解液に鉄材を浸漬する方法によってコンクリート中の鉄筋を模擬することにした。先ず飽和水酸化カルシウム溶液中の軟鋼についての予備実験を行ない、実験装置と実験条件の設定方法に関する見通しを得て、各種水溶液中の軟鋼棒および不銹鋼棒を試料とした本実験に進むとともに、小形のコンクリート模形による実験もあわせ行なっている。

本章では、これら一連の実験における各種水溶液中の試料の挙動を考察し、鉄筋に電流が流入する条件、すなわちセグメントの鉄筋が電食する条件を検討する。

7.2 電位の設定に関する諸問題

外部からの原因で鉄筋コンクリート内に電界が生じた場合、どの程度の電流が鉄筋を流れるかを模擬実験するためには、先ず、鉄筋に相当する試料の配置方法、その電位設定範囲、短絡電流の大きさと経時変化などを知る必要がある。

そこで、飽和水酸化カルシウム水溶液を充たした電解槽を用い、両端面に、白金板を陽極、軟鋼板を陰極とする通電電極を、その中間に試料として軟鋼丸棒2本を配置して、図-7.1のような実験装置を組み立て、図-7.2の回路による測定を実施した。

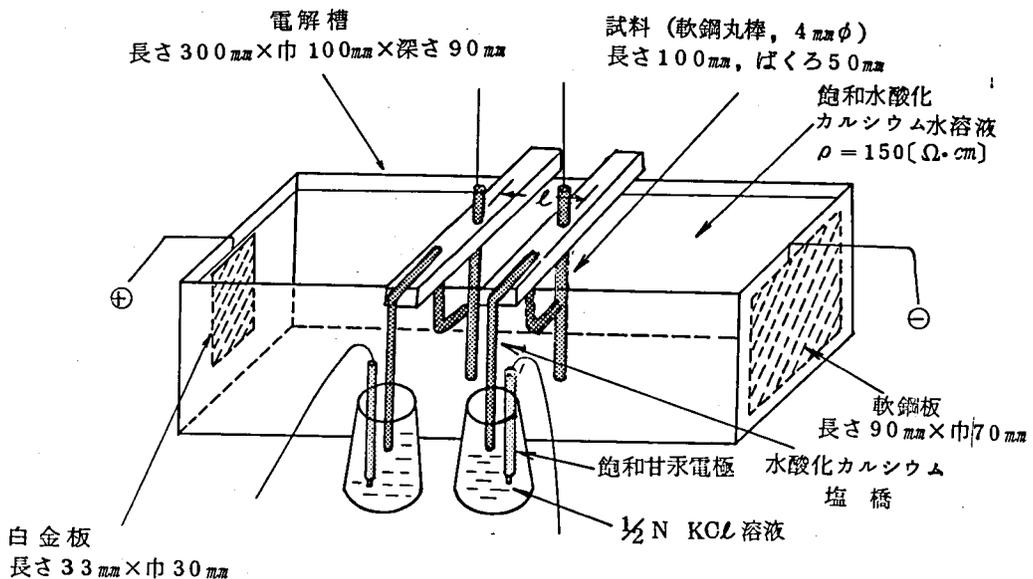


図-7.1 実験装置

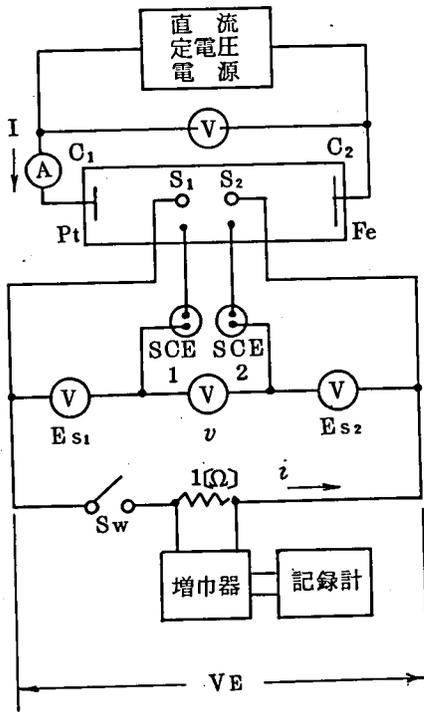


図 - 7.2 測定回路

測定は、スイッチ Sw 開放の状態
 で定電圧直流電源から通電電極 C_1 、 C_2
 間に電流 I を流して、試料 S_1 、 S_2
 間に電位差を設定し、その後 Sw を閉じ
 た際に流れる短絡電流 i を、分流抵抗
 $1(\Omega)$ による電圧降下として増巾記録す
 る。

なお、試料の電位 E_{s1} および E_{s2} は
 通常不安定で、試料間電位差 V_E を直
 接かつ適宜に設定することが容易でな
 いため、電位的に塩橋で結ばれた飽和
 甘汞電極 SCE₁ および SCE₂ 間の電
 位差 v で設定することになっている。(1)

(1) 試料間隔と電極間抵抗

表 - 7.1 にまとめたように、一般に電極間抵抗は電極としての試料間隔 l が大きくなる程
 増大しており、特に試料 S_1 と S_2 の間の抵抗は両試料間の間隔の平方根にほぼ比例してい
 る。

$l=30\text{ mm}$					$l=50\text{ mm}$				
	S_1	S_2	C_1	C_2		S_1	S_2	C_1	C_2
S_1		24	41	39	S_1		28	39	41
S_2			46	32	S_2			48	31
C_1				60	C_1				60
C_2					C_2				

$l=70\text{ mm}$					$l=100\text{ mm}$				
	S_1	S_2	C_1	C_2		S_1	S_2	C_1	C_2
S_1		32	37	42	S_1		37	37	44
S_2			50	30	S_2			52	28
C_1				60	C_1				60
C_2					C_2				

表 - 7.1 試料間隔と電極間抵抗 単位(Ω)

(2) 電位の設定に関する問題

印加電圧 V と設定電圧 v の関係は、図 - 7.3 上半のように、

$$V \approx 2.2 [V]$$

$$v \leq 0.1 [V]$$

の電圧が小さい部分を除いては比例関係にあり、試料間隔 l が小さい程同一の設定電圧を得るに要する印加電圧が大きくなる。

また同図下半のように通電電流 I との関係は完全な直線関係にあり、試料間隔が小さい程同一通電電流による設定電圧は小さくなることわかる。そして、通電電流一定の場合、設定電圧は試料間隔にほぼ比例しているといえる。

(3) 電位設定後の短絡電流

電位を設定した後、Sw を閉じると、短絡直後は大きな電流が流れるが、時間とともに減少する。図 - 7.4 の上半には短絡直後の電流を、下半には2分後の電流を、それぞれ設定電圧を横軸にとって表わしてある。

設定電圧が 0.5 [V] 以下では、試料間隔の如何を問わず、短絡電流の増加は極めて少ないが、それ以上になると、試料間隔が小さい程小さい設定電圧から電流が増加しはじめる。試料間隔

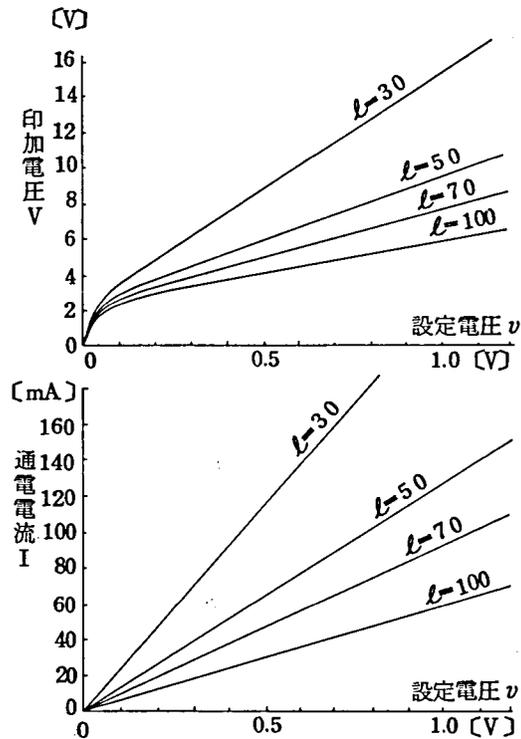


図 - 7.3 設定電圧と印加電圧および通電電流の関係

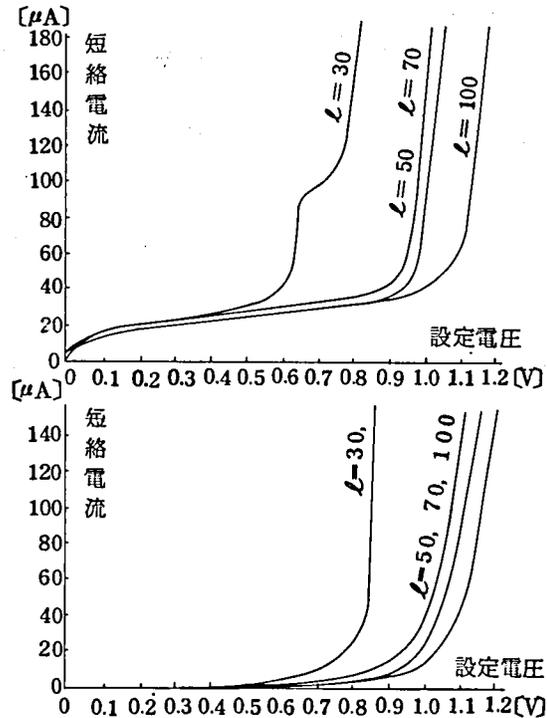


図 - 7.4 設定電圧と短絡電流

が100[mV]の場合には設定電圧1[V]付近から短絡電流が急激な立ち上りを見せている。これは逆にいうと、電位差1[V]以下ならば短絡しても殆んど流れないということである。また、設定電圧を一定としてみれば、試料の間隔すなわち電極間隔が小さい程短絡電流は大きくなる。

(4) 試料の電位

飽和甘汞電極を基準にして測定された開放時と短絡2分後の試料の電位は、図-7.5の上と下に対比してある。図で、 E_{s1} は流入側となる試料 S_1 の電位、 E_{s2} は流出側となる試料 S_2 の電位であり、電位設定後短絡すると、上図の E_{s1} 、 E_{s2} はそれぞれ下図の E_{s1} 、 E_{s2} へと時間的に推移するが、ここでは E_{s1} よりも E_{s2} の変化の方が大きい。すなわち分極が大きい。

また、電流を流さなければ試料の電位はいずれも-200[mV]（飽和甘汞電極基準）であり、これは飽和水酸化カルシウム溶液中の軟鋼、すなわち、コンクリート中の鉄筋に相当する電位を示しているということ、そして通電すると陰極となる流入側試料の電位 E_{s1} は-600[mV]に、陽極となる流出側試料の電位 E_{s2} は+600[mV]に達するということもわかる。

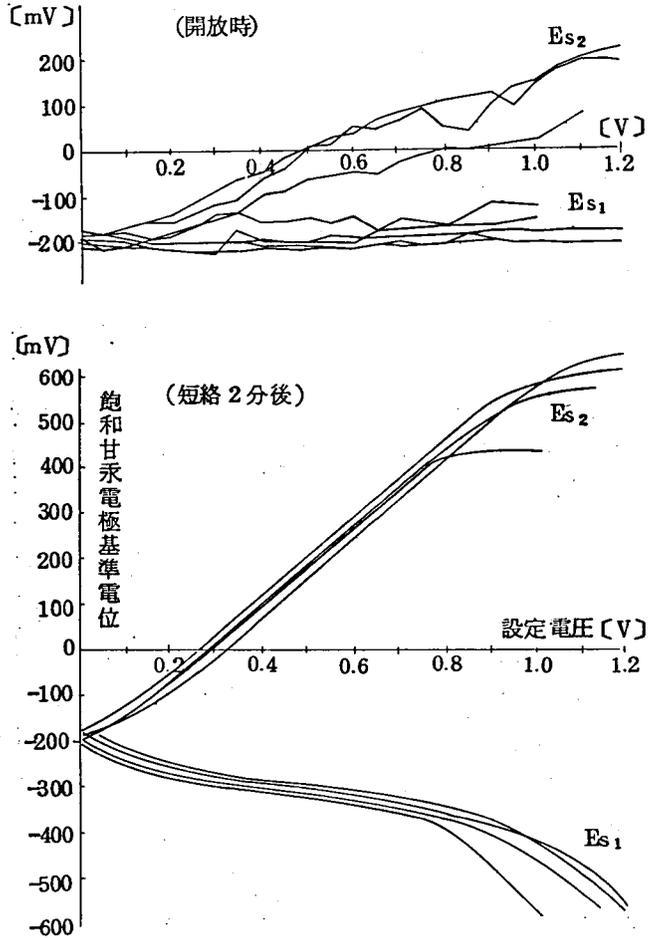


図-7.5 試料の電位

7.3 電解液中の軟鋼およびコンクリート模形

水酸化カルシウム水溶液でコンクリート中の条件を模擬する場合、 $\text{pH}12$ の環境条件と $5000(\Omega\cdot\text{cm})$ の抵抗率とを同時に実現することは困難であるので、 $\text{pH}12$ の電解液を水酸化カルシウムの飽和に近い水溶液とし(抵抗率は $140(\Omega\cdot\text{cm})$)、 $5000(\Omega\cdot\text{cm})$ の電解液は 0.01% 食塩水として別途準備することにした。さらに、化学的には中性で抵抗率が $150(\Omega\cdot\text{cm})$ の 0.4% 食塩水も用意してある。

鉄筋に相当する試料としては、普通の軟鋼棒 JIS G 3101 (1970) SS-41、および食塩水中でも不動態の条件が設定できる 18-8 ステンレス鋼 JIS G 4303 (1972) SUS 304を用い、鉄筋が腐食した状態および腐食していない状態を代表させている。

図-7.6 に実験用水槽の諸元を示す。(17)

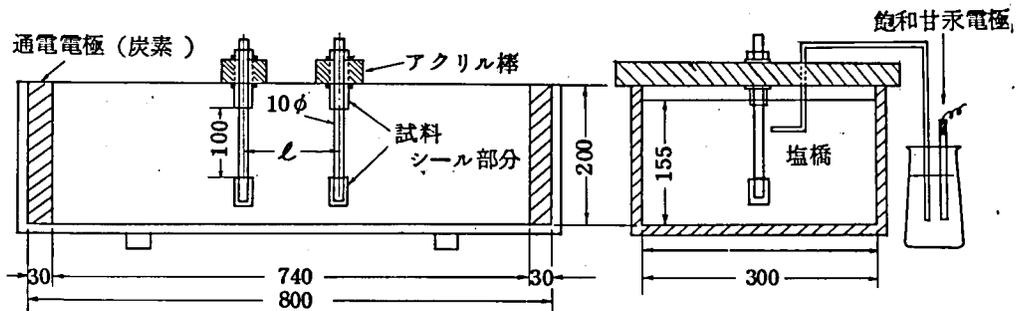


図-7.6 実験用水槽

なお、電解液中の軟鋼による実験から現実の鉄筋コンクリート構造物中に起きる電気化学現象を推論するに先き立ち、電解液中とコンクリート中とで軟鋼の挙動に如何なる差異があるかを解明する目的で、鋼棒を入れた簡単なコンクリート模形を製作し、この模形に電流を通過させた時の鋼棒に流出入する電流も測定することにした。

模形は、セメント：砂：砂利の比率が $1:2.5:4$ のコンクリートで、長さ 290mm ×巾 90mm ×高さ 100mm のブロックを製作し、その中央部に、長さ 100mm ×直径 4mm の鋼棒4本を図-7.7に示すように埋め込んだものである。(17)各鋼棒からはあらかじめリード線が出され、また、ブロックの中央部で2対の鋼棒の中間箇所には電位測定用の塩橋を挿入するための孔があけてある。なお、実験に使用したコンクリートの抵抗率は $7000\sim 9000(\Omega\cdot\text{cm})$ と測定されている。

このブロックは図-7.8のように水槽に横たえ、その上面まで丁度水溶液を充たして、水槽の両端に設置した炭素電極で通電することにした。この方法によれば、通電電流のすべてがコンクリート・ブロックを通過するようになっている。

では、普通の水道水を用いた場合と 0.01% 食塩水溶液 (抵抗率約 $5000 \text{ } (\Omega \cdot \text{cm})$) の場合の 2通りを準備した。

いずれの場合も、試料鋼棒間における電位差の設定、短絡回路の構成、および電位の測定等の方法は、前節 7.2 と全く同様である。

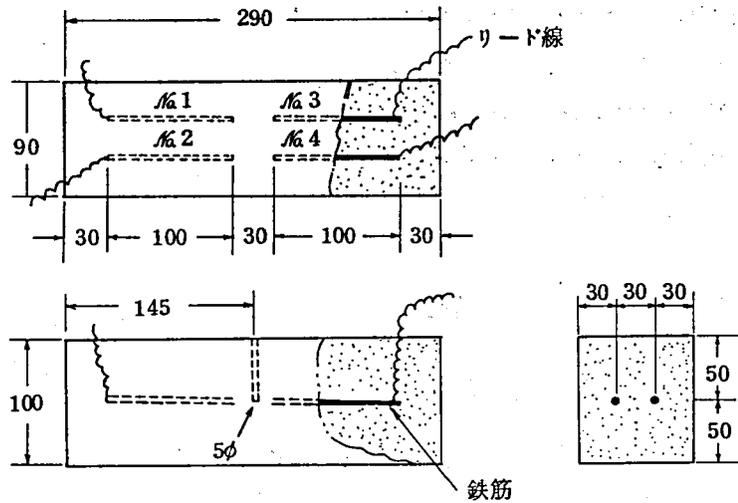


図-7.7 コンクリート模形製作図

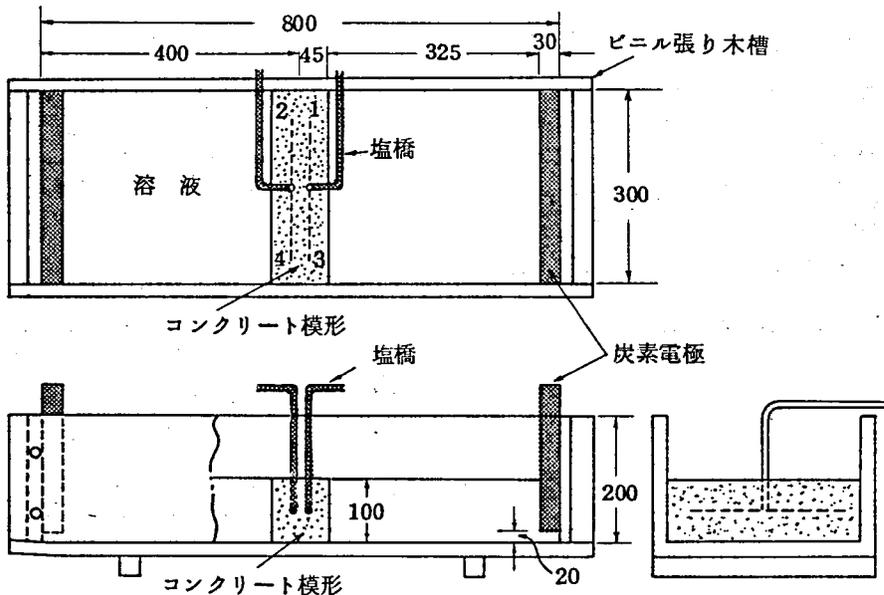


図-7.8 水槽内のコンクリート模形配置図

(1) 短絡電流密度と電流比

短絡電流の試料表面に対する密度 (= 短絡電流密度) と、短絡電流の通電電流に対する比率 (= 電流比) を実験結果から計算し、横軸に設定電圧をとって、短絡電流密度との関係を表わすと図-7.9、電流比との関係を [mA/m²] 描くと図-7.10と図-7.11が得られる。

先ず試料の短絡電流すなわち鉄筋に流入する電流と設定電圧の関係をみると、不動態化する試料の場合には設定電圧が300[mV]まで殆んど流れず、500乃至700[mV]付近から急激に増大している。一方、不動態化しない試料では設定電圧100[mV]程度で既に可成りの電流が流れている。

設定電圧を増すと、短絡電流密度が増加するのは当然であるが、電流比も増大し、その傾向は不動態化しやすい試料ほど顕著である。0.01%食塩水溶液中の軟鋼の場合には設定電圧を変えても電流比はあまり変化しない。

このことは、試料が不動態化していると、設定電圧が低い間は容易に分極して電流が流れ難い状態にあるが、設定電圧がある値に達すると電解がおきて電流が流れ始めるからである。

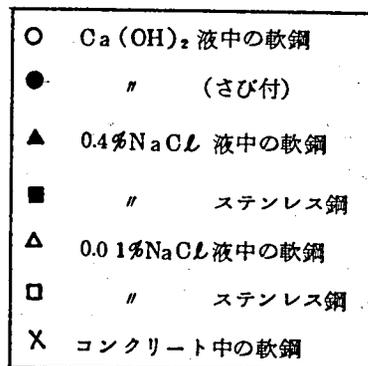
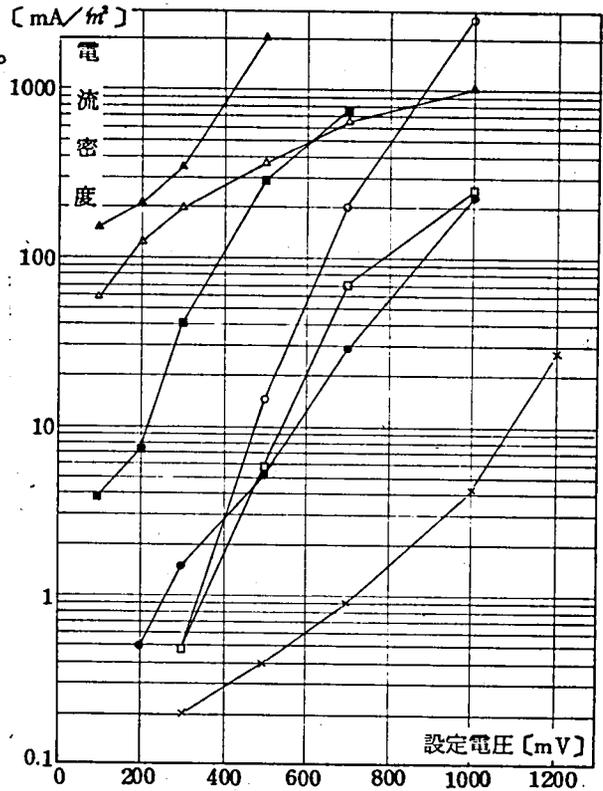


図-7.9 設定電圧と電流密度

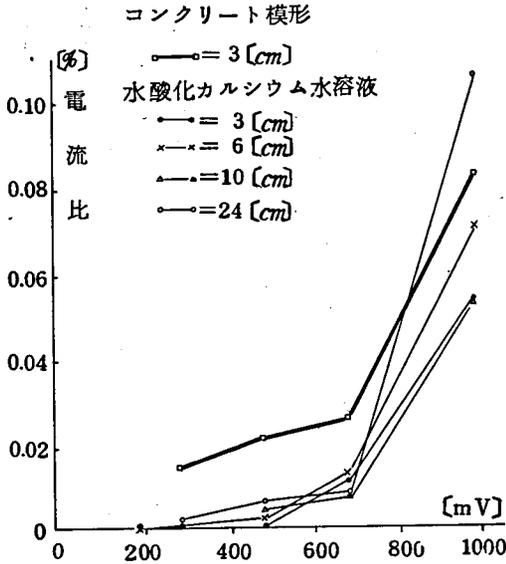


図 - 7.10 設定電圧と電流比の関係
(コンクリート模形)

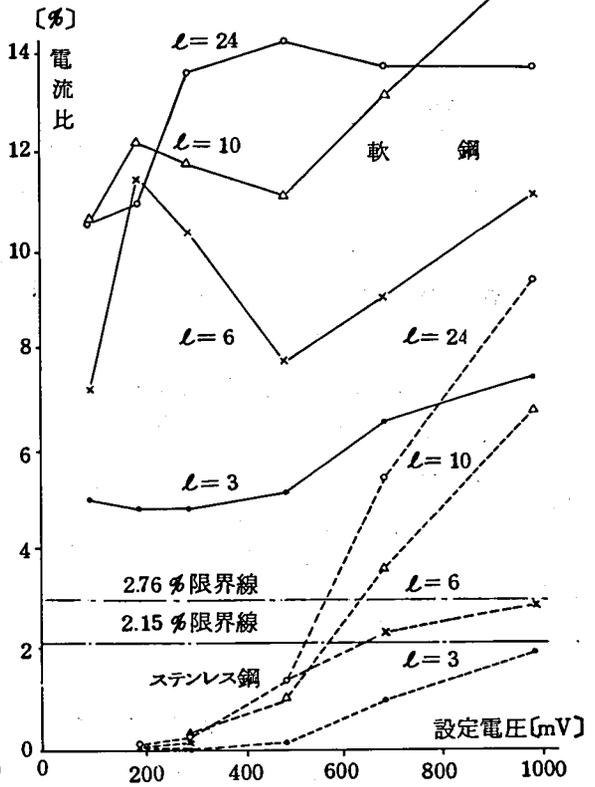


図 - 7.11 設定電圧と電流比の関係
(0.01%食塩水溶液)

次に電流比と試料1本の断面積が全電流線断面積に占める割合との関係を考える。電流比がこの値より大きいということは、試料が存在すると電流がそれに集中すること、すなわちコンクリート中に鉄筋があれば電流は鉄筋を流れるということになる。水槽実験の試料ではこの値が2.15[%]、コンクリート模形実験の試料では2.76[%]と計算されるから、0.01%食塩水溶液中の軟鋼の場合と、同液中のステンレス鋼で設定電圧が高い場合には、この条件を満たすことになる。

(2) 試料の本数と短絡電流

試料の本数を増せば、全短絡電流は増加するが試料1本当りの電流は減少する筈である。ところが、水酸化カルシウム水溶液を用いた実験では、試料の本数を増しても1本当りの短絡電流が減少せず、0.01%食塩水溶液の場合のみ少し小さくなった。このことは、試料表面が不動態化する水酸化カルシウム水溶液中では試料間の短絡電流の変動の方が干渉よりも大きいということである。実際のコンクリート・セグメントでは鉄筋の間隔が10[cm]程度であり、巾30[cm]の水槽中で試料を1本から3本にしても短絡電流が殆んど変わらないことから、流入側、流出側各1本の試料によって実験した結果で、コンクリート中の鉄筋の挙動を大概

類推してよいと結論できる。

7.4 総 括

コンクリート中の鉄筋の挙動は、水酸化カルシウム水溶液中の軟鋼、もしくは0.01%食塩水溶液中のステンレス鋼に類似していることが、鉄筋コンクリート模形による実験結果との照合によって明らかになったので、コンクリート中の鉄筋が電食する条件は以下のようにまとめることができよう。(17)

- (1) 不働態化している状態の鉄筋に流入出する電流は、コンクリート中に生じる電位差が300[mV]に達するまでは極めて小さく、500[mV]ないし700[mV]になってはじめて急激に増大する。したがって、鉄筋が良質のコンクリートで完全に被覆されていて不働態化の状態が保たれていれば、300[mV]以下の電位差では電食の懸念はないものと考えられる。
- (2) しかしコンクリートの中酸化や塩化物イオンの侵入などで鉄筋表面の不働態化が破られた状態では、コンクリート中の電位差がたとえ低くても、その電位差に比例した電流が流入出し、電食が発生することになる。この場合には、鉄筋に流入出する電流の全迷走電流に対する比率が最悪の条件で40~50[%]にも達すると推定される。
- (3) コンクリート中に電位勾配が生じた場合に鉄筋へ流入する電流の大きさは、コンクリート中の鉄筋の分極特性とコンクリートの抵抗率から推測できる。しかし現実の構築物の場合には、鉄筋の分極特性を正確に測定することが困難である。

第 8 章 地下電気鉄道の電食に関する総合的考察

8.1 電食の予知と監視を目的とした調査方法

以上の研究から筆者は、地下電気鉄道における電食の可能性を予知し、電食の監視を確実にを行うための調査の方法と事項を、次のように体系づける。

8.1.1 レール電圧の距離的分布形態の把握

電食に関する調査の最も基本的事項であるレールからの漏れ電流 I_l を把握するということは、その地点における漏れ抵抗 ω を一定と考えれば、レール電圧 V_R を把握するということである。

レール電圧 V_R の 24 時間平均値の距離的分布形態は、地下鉄線路の接続関係、変電所の負荷分担関係から 4 種に大別できる。

- (1) 地下鉄線路が「独立形」で、各変電所の負荷分担が均衡している場合は、正負が平均した正常な距離的分布となる。
- (2) 負荷分担に軽重があると、レール電圧が持ち上げられ、あるいは押し下げられる。
- (3) 地下鉄線路が「乗り入れ形」の場合には、当該地下鉄変電所の負荷分担のみならず、その地下鉄に接続している地上の電鉄から地下鉄側へ融通電力が供給されるような状態にあると、地下鉄内のレール電圧が上昇する。地上の電鉄側から見て、地下鉄線路全体が等価的に一つの電区間となるからであり、線路が両端で接続されていると、地下鉄線路の中央部でレール電圧が変電所を含めて全体に高くなる。
- (4) また相互乗入地点においては、地上線レール電圧が線路末端のため上昇していることが多く、それに接続する地下鉄のレール電圧は引き上げられることになる。地下鉄が一路線で短いに対して地上線の線路延長は比較的長く、局所的なレール漏れ抵抗は地下鉄が小さくても全体としてのレール接地抵抗は地上線の方が小さいからである。その結果、線路が一端で接続されている地下鉄では、地上線レール電圧の影響が地下鉄線内を減衰はしても他端まで及ぶことになりレール電圧は一方的に傾斜した距離的分布となる。

したがって、これらいずれかの理由でレール電圧が特に高くなっている区間は、すでに原因者としての電食の可能性を持っていると考えるのである。

8.1.2 構築物内部状態の電気的診断

地下鉄構築物が漏れ電流の経路として電気的に連続であるか否かを知ることは、地下鉄における電食を論じるために極めて重要である。

鉄骨および鉄筋コンクリート箱形トンネルは電気的に連続体であり、鉄筋コンクリート・セグメントを用いたシールド形トンネルは不連続である。

先ず、鉄筋の自然電位を外部から測定し、不働態電位にあるか腐食電位にあるかによって、コンクリート内部の鉄筋の状態を診断する。 $-200\sim-300(\text{mV})$ ならば健全であり、 $-500(\text{mV})$ より卑な値では電食され得る要注意箇所である。

また、レール電圧 V_R と鉄筋電位 E_s がどれ位関係し合っているかを電食係数、すなわち $a = \Delta E_s / \Delta V_R$ という概念でとらえる。この値が $0.1(\%)$ を超える場所では電食に対する配慮が必要である。

さらに通電分極試験によっても、鉄筋に対するコンクリートの保護能力が判定される。分極残留電圧が $200(\text{mV})$ 未満では防食状態を期待できない。

これら電気計測的手法による内部状態の診断方法の妥当性は、試料を実地に採取して電気化学的に電食を調査した結果およびコンクリート中の鉄筋への電流流入実験によって裏づけられている。

実際、地下鉄構築物の鉄筋の電位を測定してみると、鉄の不働態電位から腐食電位まで種々の値を示している。腐食電位を示すものは、すでに一部鉄筋の不働態が破壊されていて、電食が発生し易い部分の存在が示されているわけで、この場合には鉄筋コンクリート内部にマクロ腐食電池が成立しており、このための電流も流れていると考えられる。このマクロ腐食電池の駆動電圧は最高 $500(\text{mV})$ 程度であって、漏れ電流の流入方向によってはこの活動を抑制することもあるが、促進する方向に流れると鉄筋の腐食が急激に進行することになるのは言を待たない。

8.2 地下鉄における電食を支配する要因

電食の調査方法の体系化とともに地下電気鉄道の電食を支配する要因も次の2項目にまとめることができる。

8.2.1 電食するものとしての地下鉄

一つは地下鉄自身の電食者たる条件であって、当然のことながら、レールからの漏れ電流が大きいこと、換言すれば、レール電圧が大きく、漏れ抵抗が小さいことである。とりわけ軌道材料や電気的不連続状態にあるシールド形トンネルの鉄筋コンクリート・セグメントの電食には、特定箇所における局所的な漏れ電流の大きさ、すなわち、その地点におけるレール電圧 e [V] をその地点における漏れ抵抗 ω [$\Omega \cdot \text{km}$] で除して得られる漏れ電流密度 $i_l = e/\omega$ [A/km] が重要な意味を持つ。また、電氣的に連続した状態にある箱形トンネルのコンクリート構築物鉄筋の場合には、漏れ電流密度 i_l [A/km] を関係地域におけるレール電圧の正あるいは負の全領域について積分して得た漏れ電流の総量——これは均一分布負荷計算の場合のレール電圧の中性点における最大漏れ電流 $i_{l,max}$ [A] に相当する——が重要である。

8.2.2 電食されるものとしての地下鉄

他の一つは被電食者としての地下鉄構築物の防禦条件である。鉄筋を被覆しているコンクリートの状態が悪いこと、すなわち不完全な被覆、亀裂の存在、中性化、塩化物イオンの侵入などによって鉄筋表面の不働態が破壊されていることは致命的であるといわねばならない。そして、このことの故に、鉄筋の電位測定など、構築物内部の状態を外部から電氣的に診断する一連の方法の確立は、その意義が大きい。

8.3 地下鉄における電食を防止するための提言

したがって、このような要因が存在する路線においては、以下に列挙する電食防止対策のうち、その路線のその場所に適した方法を、実現可能なものから実施することが望まれる。

- (1-1) 変電所の増設、可能ならば各駅毎のユニット変電設備として変電所間隔を極力短縮し、レール電圧の低減と漏れ電流の抑制をはかる。何故ならレール中の全電圧降下 V は変電所き電距離 L の約2乗に、分布負荷としての最大漏れ電流 $i_{l,max}$ は同じく2.5乗から3.0乗にほぼ比例しているからである。

各変電所の負荷分担は、レール電圧が零または若干負になるように調整しておく。

- (1-2) 「乗り入れ形」地下鉄の場合には、地上線から地下線へ常時融通電力が流入することがないように変電所設備を設計し、き電電圧を運用する。

理想的には、地上地下両線の接続点近くに変電所を設置して、そのレール電圧も零または若干負になるようにしておきたい。

(1-2') さらに、地上地下接続点近傍の地上部線路に軌条絶縁を設け、直通列車の通過時のみ短絡とし、他の大部分の時間は両線間を絶縁状態とするか、または地下線から地上線向きの導通状態にして、地上線終端部の高いレール電圧が地下線に入らないような設備とすることも望まれる。なお、この際、帰線側のみを絶縁することは、電車線側から流入した電流の帰路が断られて電流は大地帰路を通り、かえってレール電圧を上昇させることが考えられるので、できれば電車線側と帰線側の両者を共に開閉することにした方が、現実に並列き電を実施している2変電所間でこれを行うには、保守上も保安上も多くの問題があり、⁽³⁾ 実用に耐え得る開閉装置の設計および軌道回路との連動制御方式の検討とともに別途研究する必要がある。

(1-3) レール締結装置の絶縁耐力を強化するとともに、トンネル内の漏水防止と道床の清浄化に留意し、レール漏れ抵抗を常に高く保持する。そのためには定期的に漏れ抵抗が測定され、従来より著しく低下している時は直ちに締結装置の洗滌や更替作業が施行されるように監視警報装置を設置する。実際には、測定用のレールと締結装置を本線軌道脇に設備して本線レールの漏れ抵抗の減少をシミュレートする方法や、各種の電量計を応用した漏れ電流警報装置などが考えられる。

(2-1) 鉄筋コンクリート構造物の側においては、鉄筋および鉄筋緊縛鉄線のコンクリート被覆を完全にして、コンクリート中の鉄を常時不働態の状態に保つことに留意する。

(2-2) 前記(1)の各条件をみたすことが困難で、電食の可能性が予見される箇所では、コンクリートの鉄筋保護能力ないし鉄筋の腐食環境の良否を鉄筋の電位測定で診断する。

第 9 章 結 論

以上述べて来た「地下電気鉄道の電食に関する研究」を、筆者は次のように要約して結論としたい。

第1章では、地下電気鉄道を今後の都市交通の主体として位置づけ、その電食に関する研究の必要性を論じるとともに、電食の原因者であると同時に被害者でもあるという地下鉄の特殊性から、本研究の目的とその方針を明確にした。

なお同時に、近年の大都市交通需要に対応して、都市近郊の電気鉄道と線路を接続し相互直通運転を行う地下鉄のレール電圧の特性、工事中の路面確保、既設路線や地下埋設物との関係で、従来の開削式工法にかわりシールド工法によって建設されることが多くなった地下鉄構築物の電気的連続性についても、問題の存在を示唆した。

第2章では、電気鉄道一般の電気方式、電車線路、電極性など電力供給方法に関する諸問題を電食との関連において考察し、電食防止という観点からは、地下鉄を含めて今日の電気鉄道の方式そのものが、本来的に多くの問題を内蔵していることを指摘した。

第3章では、電食に関する調査と研究の最も基本的な項目である漏れ電流の分布状況の把握は、すなわちレール電圧の特性を把握することであると論述し、地下鉄各線のレール電圧を実地に測定することによって、地下鉄が独立した路線である場合と、地上の電気鉄道に線路を接続して乗り入れている場合の相違点を、レール電圧の24時間平均値の距離の分布状態で説明した。

第4章では、測定された各線のレール電圧を解析し、レール電圧平均値の分布曲線を、正常形、負荷分担不均衡形、融通電力流入形、電圧波及形の4類形に分類整理した。さらにレール電圧分布を規定する要因として、負荷電流、電距離、漏れ抵抗をあげ、変電所の負荷分担、融通電力、他線との接続という3条件と合わせて分析検討した。

第5章では、先ず地下鉄トンネル構築物の電気的連続性を測定して、鉄筋コンクリート箱形トンネルは電気的に連続体であり漏れ電流の総量が、コンクリート・セグメントを用いたシールド形トンネルは不連続体で漏れ電流密度が、電食上重要であることを明らかにした。

次にコンクリート内部の鉄筋電位を外部から測定することにより、自然電位が飽和硫酸銅電極基準で -500 [mV] より卑、通電試験の分極残留電圧が 200 [mV]未滿、そしてレールからの漏れ電流の影響を示す電食係数が 0.1 (%)以上という基準によって、電食の可能性を診断できることを示した。

第6章では現実の地下鉄構築物から採取した鉄筋コンクリート試料について、コンクリートの中性化、抽出液の腐食度、周囲土壌中の塩化物イオンを測定した結果と、先に実施した外部から

の鉄筋電位測定による内部状態の診断結果を対照して、その妥当性を裏付けた。

第7章では、鉄筋コンクリートの電食について考察し、飽和水酸化カルシウム水溶液中の軟鋼とコンクリート模形により、コンクリート中の鉄筋への電流流入を実験することを考えた。不働態化している鉄筋には電流が殆んど流入しないが、コンクリートの中性化などで不働態が破壊されると、電位差が300[mV]以下でも電流が流れ、鉄筋が電食する条件を確認することができた。

第8章では、本研究の成果を総括し、あわせて地下鉄の防食設計と防食管理のために考慮すべき事項を提言している。

すなわち、地下電気鉄道における電食の可能性予知と電食監視の方法は、

- 1) 先ず、当該路線の線路条件と運転条件、換言すれば、線路の接続条件と変電所の負荷条件との関連においてレール電圧の24時間平均値の距離的分布形態を把握する。
- 2) そしてその結果、電食の可能性が大きい箇所においては、鉄筋コンクリート試料の採取によるコンクリートの中性化、鉄筋の腐食度の調査を併用するまでもなく、地下鉄構築物の非破壊的電食検査方法である構築鉄筋の電位測定により、内部腐食環境を外部から随時監視する。

さらに地下電気鉄道設備の新規計画に際して考慮すべき事項は、例えばユニット変電所方式の採用などにより、また各変電所の負荷分担を適正化しておくことによって、電距離の短縮すなわち帰線抵抗の低下と負荷電流の抑制をはかるとともに、軌道がトンネル内の漏水で湿潤化することがないように、またレール締結部の沿面絶縁距離が充分確保されるような設計として、レール漏れ抵抗を高く保持することである。なお、地上線から地下線への電流流入、電圧波及を阻止するためには、並列き電の開閉装置と帰線レールの絶縁区分装置の実用的な開発が望まれる。

電気鉄道と電食の問題は、古くて新しい問題である。その研究はすでに電気鉄道の誕生と時を同じくして始められている。しかしその後直流式電気鉄道が、とりわけ大都市とその周辺において目ざましい発展をとげ、一方、電食される可能性のある施設もその地域で特に著しく増加した結果、電食研究の必要性が一層認識されているのが今日である。そして地下鉄道が、従来の路面鉄道にかわり、大都市交通体系の根幹になりつつある丁度その時、本研究によって地下電気鉄道における電食の総合的な解明がなされ、電食の予知から監視に至る調査方法の一体系を確立することができたと思う。

謝

辞

本論文を作成するに際しての御懇切なる御教示はもとより、常日頃、種々御指導御鞭達をお願い致して居ります京都大学教授 大谷泰之博士に、心から感謝するものであります。また研究のまとめ方、論文の構成に関しまして、有意義な御助言をいただきました京都大学教授板谷良平博士、同助教授 野口 透博士に厚く御礼申し上げます。

そして、そもそも筆者に本研究の機会を与えていただきました帝都高速度交通営団の関係上司の方々、本研究を遂行するにあたり何かと御高配いただきました鉄道電化協会の方々、貴重な御討論と有益な示唆を数多くいただきました地下鉄防食委員会の委員長服部定一博士ならびに委員各位、とりわけ鉄筋コンクリート試料の調査に関しての金属材料技術研究所小林豊治氏、模擬実験に関しての元鉄道技術研究所滝原幹夫氏、レール電圧に関しての元鉄道技術研究所星野九平氏と元神奈川大学 岩佐 茂作博士、さらに測定全般にわたる鉄道技術研究所 大境 彰氏、西山 巽氏、内藤 甲子郎氏、そして大阪市交通局古屋幸彦氏、東京都交通局藤井満明氏、交通営団小坂昭男氏、服部輝夫氏、紺野正一氏はじめ多くの方々の御好意と御協力に対しまして、ここに深く感謝の意を表します。

また最後に、筆者がこの論文をまとめあげることができましたことを、今日まで終始お力添えいただいたすべての方々に感謝致します。

文 献

- (1) Comité International des Métropolitains : Les Métros dans le Monde, R.A.T.P. Direction des Etudes Générales (1974)
- (2) 帝都高速度交通営団企画調査室 : 調査統計月報 No 329 (昭50-1)
- (3) 電食防止研究委員会 : 電食・土壌腐食ハンドブック、電気学会 (1966)
- (4) L.H. West *et al.* : "Problems Associated with Rapid Transit Systems", Pipe Line News, Oct. 1968
- (5) A.A. Spirin *et al.* : 3rd Int. Cong. Met. Cor. 1966 Moscow
- (6) L.P. Sudrabin : "Corrosion Prevention of the Boston Callahan Tunnel", Material Protection, Nov. 1967
- (7) 坂田 : 地下鉄構築物 (名古屋市東山線) の電食調査、電気学会、電鉄・ケーブル小委員会 (46-1-13)
- (8) 地下鉄防食委員会 : シールド形ずい道の防食調査研究(I)、鉄道電化協会、昭45
- (9) 星野、大境 : 鉄道線路の電気防食について、防食技術 Vol. 12 No.5
- (10) 滝原、大境 : レールの電食防止設備について、電気鉄道 Vol. 17 No.11
- (11) D.F. Griffin : "Corrosion of Reinforced Concrete in Marine Environments", Material Protection, Nov. 1965
- (12) R.F. Stratfull : "How Chlorides Affect Concrete Used with Reinforcing Steel", Material Protection, Mar. 1968
- (13) D.A. Hausmann : "Criteria for Cathodic Protection of Steel in Concrete Structures", Material Protection, Oct. 1969
- (14) 地下鉄防食委員会 : シールド形ずい道の防食調査研究(II)、鉄道電化協会、昭46
- (15) 山田、小山、小坂、服部、紺野 : 地下鉄のレール電圧と構築鉄筋の電位について、昭48
電気学会全国大会 887
- (16) 小山、服部 : 地下鉄構築防食管理のための調査研究、電気鉄道 Vol. 27 No.11
- (17) 地下鉄防食委員会 : シールド形ずい道の防食調査研究(III)、鉄道電化協会、昭47
- (18) S.P. Ewing : Corrosion Handbook p.602 (1948)
- (19) 五十嵐、伊東、小山、山田 : 電路設備概要、帝都高速度交通営団 (昭43-5)
- (20) 小田、小山 : 剛体電車線の現状とその考え方、電気鉄道 Vol. 22 No.6
- (21) 小田、河辺、小山、中尾、紺野 : 剛体電車線の集電速度向上試験について、昭46

電気四学会連合大会 224

- (22) 小山：北歐の都市高速鉄道について、電気鉄道 Vol. 21 Nos. 5, 6
- (23) H.C.P. Havers: Underground Railways of the World, London 1966
- (24) F. Schütz, H. Berglund, H. von Heland: Technical Description of the Stockholm Underground Railway 1964, Stockholm
- (25) Д. Б. Ломазов: О Выборе Полярности Контактного провода метрополитена, Электричество No. 4 1962
- (26) 服部、星野：軌条漏洩電流に関する数値計算、鉄技研報 Vol. 4 No.1
- (27) 地下鉄防食設備委員会：地下鉄トンネルの電食監視設備と防食設備の研究(I)、鉄道電化協会、昭 49
- (28) E.B. Rosa *et al.*: Techn. Paper of NBS, 18
- (29) G. Mole: The British Elec. & Allied Ind. Res. Assoc. Report O/T3
- (30) 地下鉄防食設備委員会：地下鉄トンネルの電食監視設備と防食設備の研究(II)、鉄道電化協会、昭 50

ヨーロッパ州

付表-1 世界各都市の地下鉄概要(その1)

国名 都市(地下鉄線別)	人口 [百万人]	開通初年	路線数	路線長	駅数	平均駅間距離 [m]	車両数	車体巾 [m]	電車線電圧 (*第三軌条) (†第四軌条)	軌間 [mm]	年間輸送人員 [百万人]	年間輸送人員 [百万人]	年間消費電力量 [百万kWh]	備考
ドイツ連邦共和国														
BERLIN(西)	2.1(V)	1902	8	88.9	108	797	819	2.30/2.65	* 780	1435	275	55.1	120.4	
HANBURG	2.5(ZD)	1912	3	91.3	79	1,075	855	2.50	* 750	1435	187.1	54.3	86.9	
MÜNCHEN	2.1(ZD)	1971	2	13.5	17	826	108	2.90	* 750	1435	42.6	8.6	49.2	
NÜRNBERG	0.6(V)	1972	1	5.6	9	700	28	2.90	* 750	1435	-	0.4	-	
ドイツ民主共和国														
BERLIN(東)	1.6(A)	1902	2	15.8	23	772	306	2.30/2.62	* 825	1435	61	-	-	
オーストリー														
WIEN(Stadtbahn)	1.6(V)	1898	1	26.8	25	950	328	2.24	750	1435	67.9	18.2	16.4	
WIEN(U-Bahn)	"	-	3	25.3	30	774	128	2.80	* 750	1435	-	-	-	工事中
ベルギー														
BRUXELLES	1.1(ZD)	-	1	10.3	18	600	90	2.70	* 750	1435	-	-	-	工事中
スペイン														
MADRID	3(A)	1919	6	47.5	82	550	579	2.38	600	1445	484	63.1	175	
BARCELONA(Metropolitano)	2.8(A)	1924	4	34	52	667	300	2.49/3.14	1,200/*1,500	1435/1676	239.1	24.5	73.1	
BARCELONA(Sarriá)	"	1929	1	7.1	12	790	34	2.70	1 300	1435	26.5	-	-	郊外電鉄の地下区間
フィンランド														
HELSINKI	0.7(A)	-	2	38	-	1,100	-	3.20	* 750	1524	-	-	-	工事中
フランス														
PARIS(Métro urbain)	8.1(ZD)	1900	16	175.2	345	538	3,372	2.40/2.48	* 750/†750	1440	1,097.3	177.3	481.5	一部ゴムタイヤ式
PARIS(Métro régional)	"	1938	3	74.9	51	1,560	469	2.91/3.04	1,500	1435	133.8	30	127.4	
LYON	1.2(ZD)	-	2	11.9	16	675	63	2.89	† 750	-	-	-	-	ゴムタイヤ式、工事中
MARSEILLE	1(ZD)	-	1	9	12	800	63	2.60	† 750	-	-	-	-	ゴムタイヤ式、工事中
イギリス														
LONDON	7.4(A)	1863	8	382.9	248	1,300	4,368	2.59/2.95	† 600	1435	644	340	619	
GLASGOW	1.9(A)	1897	1	10.5	15	700	43	2.34	* 600	1219	13.9	1.9	5.6	
ギリシャ														
ATHÍNAI	2.5(A)	1925	1	25.7	20	1,350	135	2.70/2.86	* 600	1435	93.2	12.7	22.6	
ハンガリー														
BUDAPEST(Földalatti)	2(V)	1896	1	4	11	400	10	-	550	1435	108	6.7	-	市街電鉄の地下区間
BUDAPEST(Métro)	"	1970	1	10.1	11	1,010	100	2.67	* 825	1435	-	-	-	
イタリア														
ROMA	3(V)	1955	1	11	11	1,100	40	3.04	1,500	1435	25.1	3.5	16.5	
MILANO	1.7(V)	1964	2	34.2	43	593/1,497	224	2.85	† 750/1,500	1435	134	16.7	65	
ノルウェー														
OSLO(Sporveier)	0.5(V)	1966	1	28.2	35	815	135	3.20	* 750	1435	31.1	7.6	29.6	
OSLO(Holmenkolbanen)	0.5(V)	1933	1	2.3	3	770	-	-	600	1435	-	-	-	郊外電鉄の地下区間
オランダ														
AMSTERDAM	0.9(A)	-	1	18	19	700/1,000	-	3	* 750	1435	-	-	-	工事中
ROTTERDAM	1(A)	1968	1	7.6	8	1,100	86	2.68	* 750	1435	29	3.5	14.2	
ポルトガル														
LISBOA	0.8(V)	1959	1	12	20	630	84	2.70	* 750	1435	77.8	5.7	31.6	
スウェーデン														
STOCKHOLM	1.5(A)	1950	2	70.7	74	1,000	787	2.80	* 650	1435	162	50.3	150	
チェコスロバキア														
PRAHA	1.1(V)	1974	1	6.7	9	835	50	2.71	* 750	1435	-	-	-	
トルコ														
İSTANBUL	2.5(V)	1875	1	0.6	2	600	2	2.50	-	-	5.5	0.07	-	地下索道式
ソ連														
МОСКВА	7.4(V)	1935	8	148.6	96	1,650	1,800	2.70	* 825	1524	1,841	-	-	
ЛЕНИНГРАД	3.9(A)	1955	3	44.7	29	1,720	247	2.70	* 825	1524	503	-	-	
КИЕВ	1.7(V)	1960	1	18.2	14	1,400	146	2.70	* 825	1524	189	-	-	
ТБИЛИСИ	0.9(V)	1965	1	12.6	11	1,260	-	2.70	* 825	1524	102.3	-	-	
БАКУ	1.3(V)	1967	2	16.4	10	1,800	-	2.70	* 825	1524	91.6	-	-	
ХАРЬКОВ	1.2(V)	-	1	10.4	8	1,480	-	2.70	-	1524	-	-	-	工事中
ТАШКЕНТ	1.5(V)	-	1	12.2	9	1,500	-	2.70	-	1524	-	-	-	工事中

アメリカ州

付表-1 世界各都市の地下鉄概要(その2)

国名 都市(地下鉄線別)	人口 [百万人]	開通初年	路線数	路線長	駅数	平均駅間距離 [km]	車両数	車体巾 [m]	電車線電圧 (* 第三軌条) († 第四軌条)	軌間 [mm]	年間輸送人員 [百万人]	年間輸送人員 [百万人]	年間消費電力量 [百万 kWh]	備考
アルゼンチン BUENOS-AIRES	7.2(A)	1913	5	34	57	600	402	2.60/3.15	* 600/1,100/1,500	1435	261.1	24.5	59.6	
ブラジル RIO DE JANEIRO	4.5	-	1	9	12	750	144	3.17	* 750	-	-	-	-	工事中
SAO PAULO	9 (A)	-	1	21.4	23	900	198	3.17	* 750	-	-	-	-	工事中
カナダ TORONTO	2.2(A)	1954	2	42.6	49	700	410	3.15	* 600	1473	170.4	42.1	145	
MONTREAL	2.1(ZD)	1966	3	25.6	28	853	336	2.51	† 750	-	129.1	28.8	85.9	ゴム・タイヤ式
チリ SANTIAGO	3.4	-	2	26.3	35	740	195	2.60	† 750	-	-	-	-	ゴム・タイヤ式 工事中
アメリカ NEW YORK (NYCTA)	16.6(A)	1868	3	372.9	462	800	6,700	2.68/3.05	* 625	1435	1,122.5	530.9	1,838.9	
NEW YORK (PATH)	"	1908	1	22.4	13	2,115	298	2.71/2.86	* 650	1435	30	14.3	72	
CHICAGO	6 (A)	1892	4	143	154	1,100	1,099	2.84	* 600	1435	103.5	81.8	240.5	
PHILADELPHIA (SEPTA)	3.8(A)	1907	2	39.4	53	740	490	2.76/3.12	* 600	1435/1581	101.3	14	74.8	
PHILADELPHIA (PATCO)	"	1969	1	23.3	12	2,120	75	3.05	* 600	1435	10.5	-	-	
BOSTON	2.7(ZD)	1901	3	48	48	975/1,400	353	2.60/3.15	* 600/600	1435	95	14	-	
CLEVELAND	2 (A)	1955	1	30.5	17	1,900	118	3.18	* 600	1435	12.7	6.9	-	
SAN FRANCISCO	4.6(A)	1972	1	121	34	3,700	450	3.20	* 1,000	1676	7	-	-	限定供用中
WASHINGTON	2.8(A)	-	3	157	86	-	556	3.05	* 1,000	1435	-	-	-	工事中
メキシコ MEXICO	8.6(A)	1969	3	40.8	48	830	537	2.50	† 750	-	437	59.3	252	ゴム・タイヤ式

大洋州

オーストラリア SYDNEY	2.9(V)	1927	2	7	6	1,100	-	-	1,500	1435	-	-	-	郊外電鉄の地下線
MELBOURNE	2.6(V)	-	1	5	5	1,200	-	-	1,500	1600	-	-	-	工事中

アジア州

中華人民共和国 北京	7 (V)	1971	1	23	16	1,530	-	-	* -	1435	-	-	-	
朝鮮民主主義人民共和国 平壤		1973	1	-	6	-	-	-	* -	1435	-	-	-	
大韓民国 서울	9.1(A)	1974	1	9.5	9	1,190	60	3.20	1,500	1435	-	-	-	
イスラエル HAIFA	0.3(V)	1959	1	1.8	6	350	4	2.40	-	-	6	0.3	-	地下索道式
日本 東京(帝都高速度交通営団)	11.6(A)	1927	6	123.9	115	840/1,600	1,497	2.55/2.80	* 600/1,500	1067/1435	1,414	147.5	442	
東京(東京都交通局)	"	1960	2	39.3	42	983	308	2.80	1,500	1067/1435	278.2	34.4	-	
大阪	7.6(A)	1933	6	70.2	67	1,000	634	2.84/2.89	* 750/1,500	1435	736.9	56.4	156.6	
名古屋	2 (V)	1957	3	38.1	42	951	371	2.51	* 600	1435	257.7	33.5	82	
神戸	1.3(V)	1968	2	7.6	10	840	-	-	1,500	1067/1435	90	5.3	-	
札幌	1 (V)	1971	1	12.6	14	900	108	3.00	† 750	-	98.4	7.2	-	ゴム・タイヤ式
横浜	2 (V)	1972	1	5.7	6	1,140	27	2.78	* 750	1435	9.8	1.7	-	

V: 行政区域
A: 都市圏
ZD: 運輸区域

文献(1)、(2)より筆者作成

付表 - 2

表 - 3.1 東京地下鉄

号線	路線名	路線長	区 間	軌間 [mm]	電車線方式	電圧 [V]	地 上 部	相互乗入
1	都 営 線	18.3	西馬込・押 上	1435	架空電車線	1500	—	京成電鉄線
1	同分岐線	1.2	泉岳寺・品 川	1435	架空電車線	1500	品川付近	京浜電鉄線
2	日比谷線	20.3	北千住・中目黒	1067	架空/剛体電車線	1500	北千住・南千住 および中目黒付近	東武/東急線
3	銀座線	14.3	渋谷・浅 草	1435	第三軌条	600	渋谷付近	—
4	丸ノ内線	24.2	池 袋・荻 窪	1435	第三軌条	600	途中4区間	—
4	同分岐線	3.2	中野坂上・方南町	1435	第三軌条	600	—	—
5	東 西 線	30.8	中 野・西船橋	1067	架空/剛体電車線	1500	葛西・西船橋間	中央/総武線
6	都 営 線	21.0	高島平・三 田	1067	架空電車線	1500	高島平・志村三間	—
8	有楽町線	10.2	池 袋・銀座一	1067	架空/剛体電車線	1500	—	—
9	千代田線	20.9	綾瀬・代々木公園	1067	架空/剛体電車線	1500	綾瀬付近	常磐線

付表-3

表-3.7 大阪地下鉄

号線	路線名	路線杆	区 間	軌間 (mm)	電車線方式	電圧 (V)	地 上 部	相互乗入
1	御堂筋線	19.5	江坂・我孫子	1435	第三軌条	750	江坂・南方間	北急線
2	谷町線	10.4	都島・天王寺	1435	第三軌条	750	—	—
3	四ツ橋線	11.4	西梅田・住之江公園	1435	第三軌条	750	—	—
4	中央線	12.3	大阪港・深江橋	1435	第三軌条	750	大阪港九条間	—
5	千日前線	9.6	野田阪神・新深江	1435	第三軌条	750	—	—
6	堺筋線	7.0	天神橋六・動物園	1435	架空/剛体電車線	1500	—	阪急線

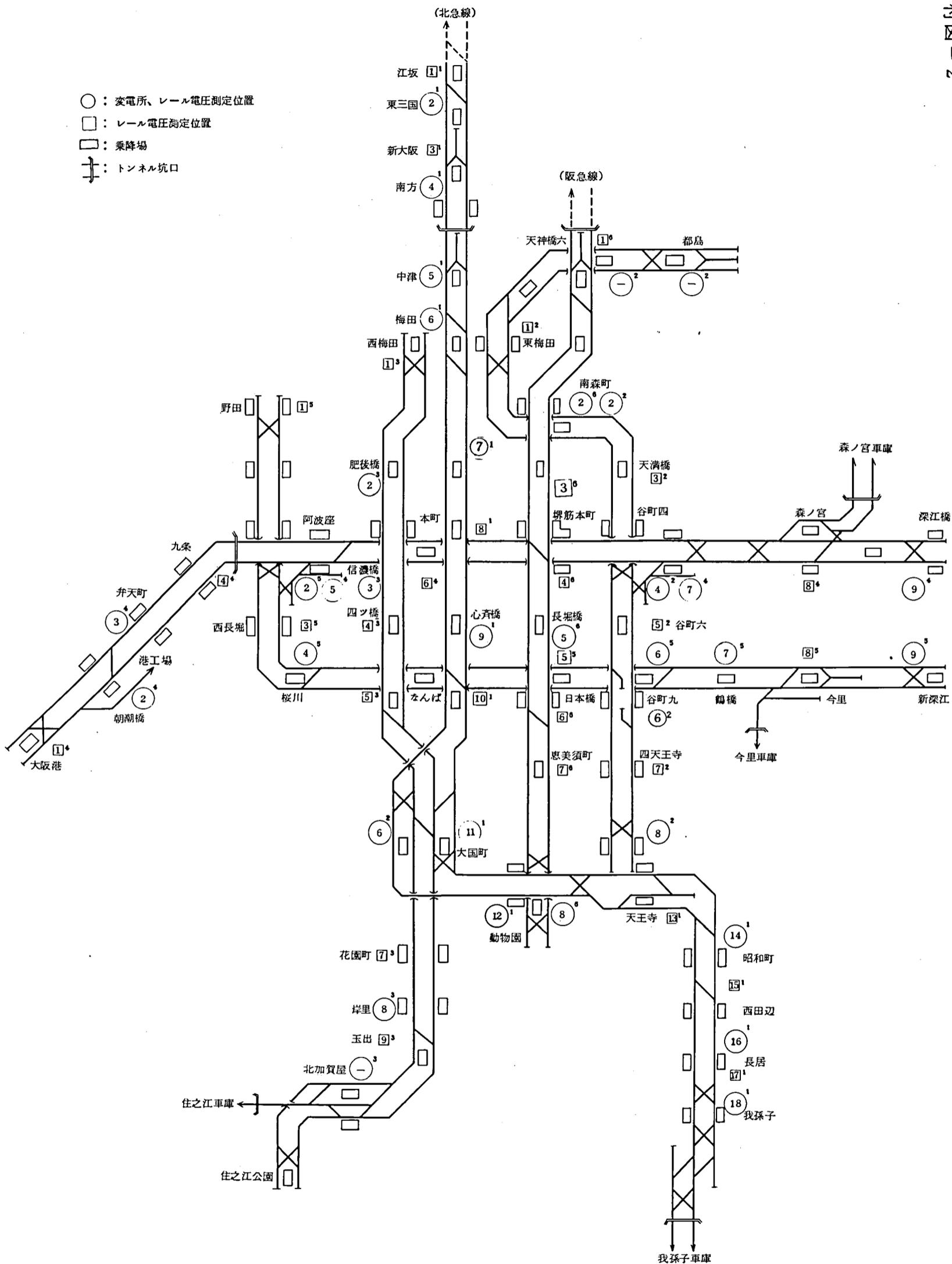


図 - 3.16 大阪地下鉄線路配線略図 (レール電圧測定位置)

付表 - 4

表 - 3.8 神戸地下鉄

号線	路線名	路線杆	区 間	軌間 (mm)	電車線方式	電圧 (V)	地 上 部	相互乗入
-	東西線	5.7	阪急三宮・西代	1435	架空/剛体電車線	1500	三宮/西代付近	阪急/山陽 電鉄線
-	同分岐線	1.5	元町・高速神戸	1435	架空/剛体電車線	1500	-	阪神線
-	南北線	0.4	湊川・新開地	1067	架空電車線	1500	-	神戸電鉄線

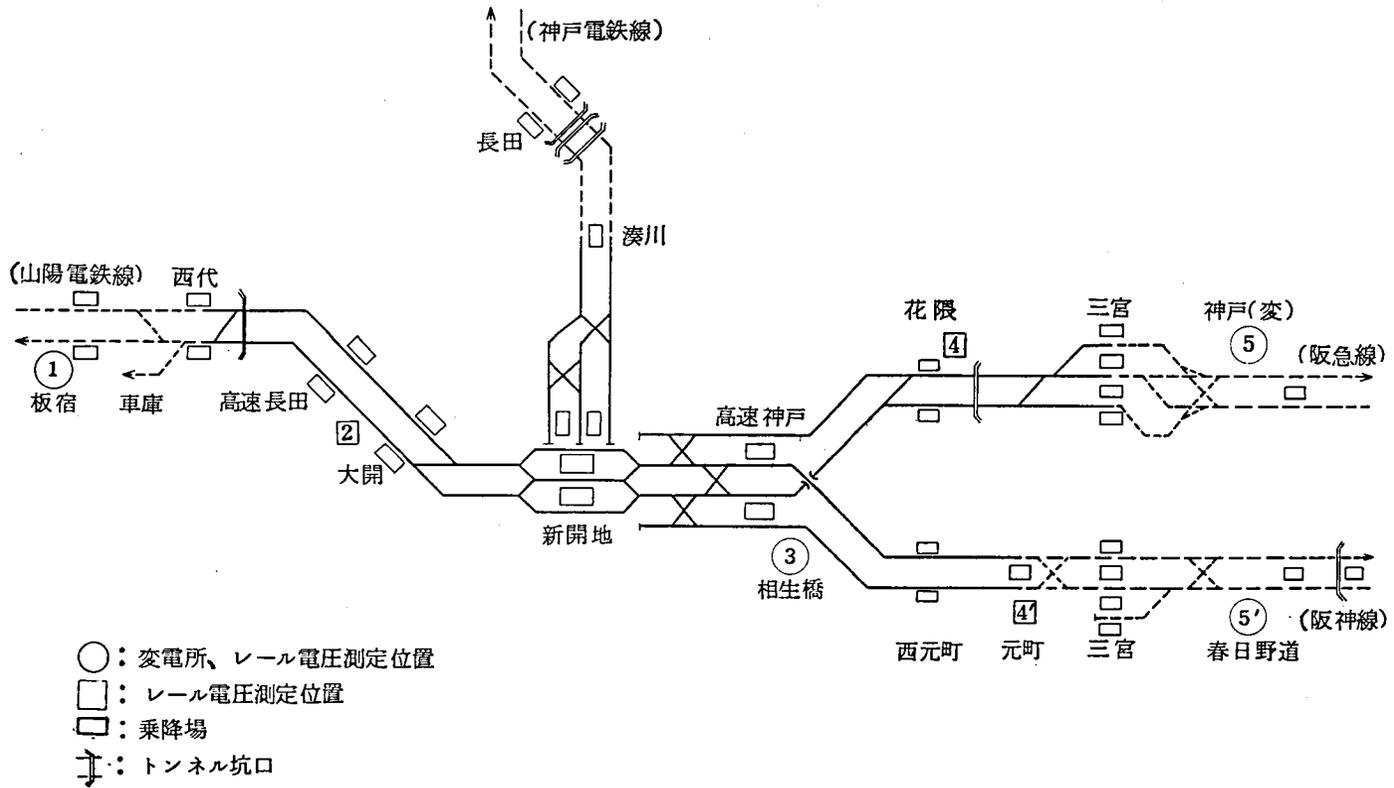


図 - 3.24 神戸地下鉄線路配線略図 (レール電圧測定位置)

実地調査、作図：筆者