

腐食環境下で機能維持可能な メタボリズムRC柱構造の開発

上田 知弥¹・植村 佳大²・高橋 良和³

¹学生会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)
E-mail: ueda.tomoya.83a@st.kyoto-u.ac.jp (Corresponding Author)

²正会員 京都大学助教 工学研究科 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)
E-mail: uemura.keita.3n@kyoto-u.ac.jp

³正会員 京都大学教授 工学研究科 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)
E-mail: takahashi.yoshikazu.4v@kyoto-u.ac.jp

現行の維持管理方策では、腐食が重度な場合、鉄筋の取替を含む大規模更新を行う。一方で、柱では支保工の設置等が必要となり容易には実施できない。そこで本研究では、軸力支持下での腐食鉄筋取替を容易にすることで、腐食環境下で構造物の機能維持を可能とするRC柱の開発を目指す。提案構造は、腐食を許容し腐食ひび割れ顕在時に取替が可能な可換部と、可換部取替時に軸力を支持する永続部からなり、供用しながら腐食鉄筋の取替が可能である。軸力支持下での取替実験及び正負交番載荷実験の結果、腐食の有無に依らず軸力支持下で鉄筋取替ができ、取替が復元力特性に影響を与えないことを確認した。また、取替時の永続部可換部間の付着の有無による影響を検証し、せん断ひび割れ抑制の観点から永続部可換部間の付着確保が望ましいことが分かった。

Key Words : RC column, corrosion, metabolism, replacement, cyclic loading

1. 背景

2015年9月、国際連合において「持続可能な開発のための2030アジェンダ」が採択され¹⁾、このアジェンダ内に記載されている持続可能な開発目標(SDGs, Sustainable Development Goals)は、持続可能な社会の実現のために達成すべき国際目標である。インフラストラクチャーは社会の中で重要な役割を果たしていることから、これらの適切な維持管理は持続可能な開発において不可欠であり、ゆえにSDGsにおいてもインフラストラクチャーの維持管理が複数の項目で取り上げられている。

土木分野もSDGsに貢献していくことが求められる中で、構造物の維持管理は特に重要な項目である。現在日本では、高度経済成長期以降に作られた大量の土木構造物が更新の段階に来ており、鉄筋コンクリート(以下RC)構造物の経年劣化による性能低下が懸念されている。飛来塩分や路面凍結防止剤の塩分によって引き起こされる塩害は、構造物の維持管理上の課題の一つである。塩害が発生するとRC内部の鉄筋腐食が進行し耐荷性能の低下が起きるため対策が必要であり、現在に至るまで様々な補修工法の研究がなされてきた。濱田ら²⁾は表面保護

工法を施したコンクリート供試体に対し、15年間の暴露試験を行ったほか、守分ら³⁾による実構造物への表面保護工法の適用事例に対する検討を行い、15年間の暴露期間中、塩分の遮断性能が十分に保たれたことを示した。山本ら⁴⁾は従来の電気防食工法より施工性の高い陽極板方式の電気防食工法を提案しており、屋外暴露供試体への暴露実験及び実構造物への試験施工の結果、鉄筋防食の効果、電気防食装置の施工性、耐久性に問題がないことを示した。宮口⁵⁾は、断面修復工法に対し、施工後の再腐食を防止する断面修復材の検討を行い、断面修復材に塩素固定材を練り込んだモルタルを使用することで鉄筋の再腐食を抑制できることを示した。なお、これらの事例はすべて力学的性能の回復は目的としておらず、あくまで鉄筋腐食を防止するための補修工法である。

一方で、鉄筋腐食が重度の場合、鉄筋の取替を同時に行い力学的性能の回復を図ることがある。川西ら⁶⁾は、塩害が著しく進行した栈橋構造物の床版下面及び壁面に対して鉄筋の取替を伴う断面修復工法を行い、その適用性を検討した。関口ら⁷⁾は凍結防止剤により塩害が発生した実橋梁のRC床版に対して損傷度評価を行い、取替工事の事例を紹介した。このように、コンクリート床版

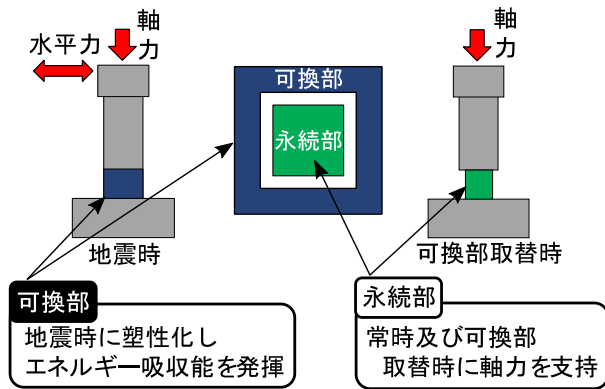


図-1 メタボリズム耐震橋脚構造

に代表される上部構造が塩害により劣化した際は、断面修復や床板架け替えによる性能更新が実施されており、施工時は交通規制を行うことで交通量に及ぼす影響を最小化している。

しかし、特に柱構造は死荷重を軸力で支持する必要があるため、鉄筋の取替を伴う大規模更新を行う場合、橋梁を通行止めにする、あるいは支保工の設置や工事区間の分割などの対策が必要となる。これらを実施する場合、前者では床板への施工に比べて交通量の大幅な低下を招き、後者では施工期間が長期化することから社会へ与える影響が大きいと考えられるため、そのような大規模更新が不要な維持管理戦略が理想と言える。これを実現するためには高度な維持管理が必要となるが、開発途上国においてはこのような維持管理を行える技術者が不足していると考えられる。また、先進国においても少子高齢化による働き手の減少により、今後そのような技術者が不足する可能性がある。従って、柱構造に対して、高度な維持管理技術が不要、かつ社会への影響が小さい維持管理方策の開発が求められているといえる。

他方で、地震時の復旧性向上の観点から、軸力支持下での鉄筋取替を可能とする柱構造がいくつか提案されている。Chengら⁹⁾は、RC橋脚に対し、地震時に損傷した鉄筋の取替とFRPによる補修法を提案している。しかしながら、彼らの検討では、鉄筋取替は軸力を除荷した状態で行われており、軸力支持下での鉄筋取替は実証されていない。また、藤倉ら⁹⁾はレベル2地震動により損傷した橋脚の塑性ヒンジ部の取替が可能な構造の開発に向けて、実験的検討を実施している。その中で、軸力支持下での塑性ヒンジ部の撤去には成功したものの、過大な残留変位の影響で再打設は行っておらず、柱の性能回復の観点で課題が残されている。

そのような中、著者らは、既往の研究により耐震性能の新陳代謝を目指すメタボリズム耐震橋脚構造を提案している^{10), 11), 12)}。この柱構造は、軸力支持下で部材取替を行うことで耐震性能の更新を図るものであり、過去の実験的検討により、軸力支持下で部材が取替可能であるこ

と及び取替により耐震性能が更新できることが確認されている。そこで本研究では、部材の取替が可能であるメタボリズム耐震橋脚構造の考えを柱構造の維持管理方策に応用し、軸力支持下で腐食鉄筋を取替可能とする柱構造の開発を目指す。

2. 提案構造

(1) メタボリズム構造の維持管理方策への応用

著者ら^{10), 11), 12)}が提案したメタボリズム耐震橋脚構造の概要を図-1に示す。メタボリズム耐震橋脚構造は地震発生時に塑性化することでエネルギー吸収性能を発揮する可換部と、可換部の取替時に軸力を支持する永続部から成る機能分離式の柱構造である。可換部の取替により耐震性能の更新が可能となる。

一方、維持管理において塩害の原因物質となる水や酸素、塩化物イオンは通常外部から浸透するため、断面外縁部がその影響を受けやすいと予想される。この特徴は取替場所が予め決まっているメタボリズム構造に適しており、腐食劣化が予想される箇所の取替を前提で柱構造の設計を行うことで、取替による性能回復、更新を望むことができる。よって本研究では、耐震性能を担保し腐食劣化時に取替をすることで性能更新を行う可換部と、取替時にも存続し死荷重支持機能を担保する永続部からなるメタボリズムRC柱構造(以下、提案構造)を提案し、その実現可能性を検証する。

(2) 提案構造と持続可能性

持続可能な社会の実現において、構造物の長期利用は不可欠である。しかし、現行の設計基準では塩害による鉄筋腐食の発生を全く許容していない。この状況を実現するためには高度なメンテナンスを行う必要があるが、1.で述べたように開発途上国ではそのような技術者が不足している。エポキシ鉄筋などを用いて腐食しにくい構造物を作ることも考えられるが、材料が高価であるため開発途上国では導入することが難しい。以上より、提案構造は、高度なメンテナンスの実施や高価な材料の使用に代わる、新たな構造物の維持管理法を考えるものである。

土木構造物は50年、100年といった長期的な供用を前提として設計されており、実際に供用開始から50年以上経過している土木構造物は数多存在する。このような構造物の長期供用は資源節約の点からは優れているが、建設当時の技術水準が後世に取り残されているともいえる。技術革新は日々行われており、最新の技術を反映させながら変化に適応していくことも持続可能性を考える上で

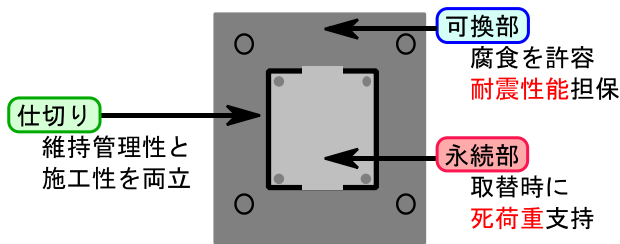


図-2 提案構造の概略図

必要である。提案構造は、取替時の可換部の設計により、建設時と同等まで性能回復をするだけでなく、最新技術を導入することで性能向上を図ることも出来る。また、可換部取替を中期的なスパンで行うことにより、技術者の実践の場を作ることにもつながり、技術の伝承にも貢献できる。

(3) 提案構造の特徴

提案構造の概略図を図-2に示す。腐食による劣化が進行しやすい外縁部を可換部、腐食の影響を受けにくい柱中心部を永続部とする。可換部軸方向鉄筋の腐食劣化が顕在化した際は、腐食した軸方向鉄筋も含め可換部を撤去し、再度可換部を設置することで性能の回復、更新を図る。永続部については、可換部の取替作業時に死荷重を支持する性能を要求する。

a) 可換部取替を行うタイミング

この構造において重要となるのは可換部取替のタイミングである。塩害は発生すると急速に進行することから、コンクリート標準示方書[設計編]¹³⁾では、鋼材位置の塩化物イオン濃度が腐食発生限界塩化物イオン濃度になるタイミングを限界状態として照査を行っている。つまり、現行の構造物は設計段階においては供用期間中の鋼材腐食を許容していない。しかし、Maら¹⁴⁾によると、腐食による質量減少率5%では耐力に大きな影響がないとしている。よって、本提案構造では可換部の軸方向鉄筋の腐食を許容する。一方で、鉄筋腐食の進行に伴い表面に腐食ひび割れが現れると、ひび割れから水や空気が侵入しやすくなり、腐食による劣化が加速するため注意が必要である。さらに、力学的観点では問題がない場合でも、腐食ひび割れや錆汁による外観の悪化が利用者に不安感を与える場合があり、その心理的影響を考慮する必要性が示唆されている¹⁵⁾。

以上のことを踏まえ、提案構造では、腐食の進行及び利用者への心理的影響を考慮して、可換部取替を行うタイミングは「表面に腐食ひび割れが目視で観察されたとき」を基本とする。これにより、腐食ひび割れが表面に現れるまでは高度なメンテナンスを必要としない構造が実現可能となる。

なお、腐食ひび割れ発生時の平均質量減少率の予測式

が複数提案されており、これらはかぶり厚やコンクリートの水セメント比をパラメータとしている¹⁶⁾¹⁷⁾。よって、腐食ひび割れ発生時の腐食量が平均質量減少率5%を下回るようにかぶり厚及び水セメント比を設計することで、耐力の大幅な低下を招く前に取替を実施できるようになる。

b) 従来構造物の更新と提案構造の更新の違い

続いて、維持管理における、従来構造物に対する大規模更新と提案構造に対する更新の違いを図-3に示す。ここで挙げる大規模更新は、1.で述べたような柱の取替を想定している。現状、柱の取替の施工事例は極めて少ないが、今後構造物の老朽化が進むにつれ必要になると予想される。図-3(a)のように鉄筋の取替を伴う大規模更新は、作業時に軸力支持性能・耐震性能が著しく低下することから、容易には行うことが出来ない。一方で、提案構造では、取替作業時にも軸力支持性能を維持できるように永続部の設計を行う。設計段階から取替時を見据えた安全設計がなされるため、腐食が顕在化した際は迅速に部材取替の判断を下すことが可能となる。これにより、支保工等の設置をすることなく軸力支持下で施工を開始できるため、工期短縮が実現される。また、永続部にL1地震動などの最低限の耐震性能を持たせる設計にすることで、部材取替の判断をより積極的に行うことが可能になる。以上より、提案構造では供用しながら施工を行うことが可能であり橋梁の交通量を減らす必要が無くなるため(図-3(b))、社会へ与える影響を小さくできると考えられる。

1.で述べたような従来の維持管理方策は、鉄筋腐食の発生及び進行の抑制を目的としており、構造物の劣化防止をするだけである。よって、構造物の性能は建設時がピークであり、その後向上させることはできない。一方で、提案構造では、更新する度に建設時と同等の性能に戻すことが可能となるとともに、技術進歩があった場合には、更新時にその技術を反映することで建設時以上の性能を確保することも可能となる。従って、提案構造は、従来の維持管理方策と異なったアプローチをしており、新たな維持管理方策の一つになりうるといえる。

(4) 永続部の設計

可換部取替の際、軸力を永続部のみで支持する必要がある。設計時には、可換部取替のタイミングで軸力により永続部が座屈しないよう照査を行う必要がある。ここでは式(1)に示すオイラー座屈の式を用いて荷重の照査を行う。

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_k^2} \quad (1)$$

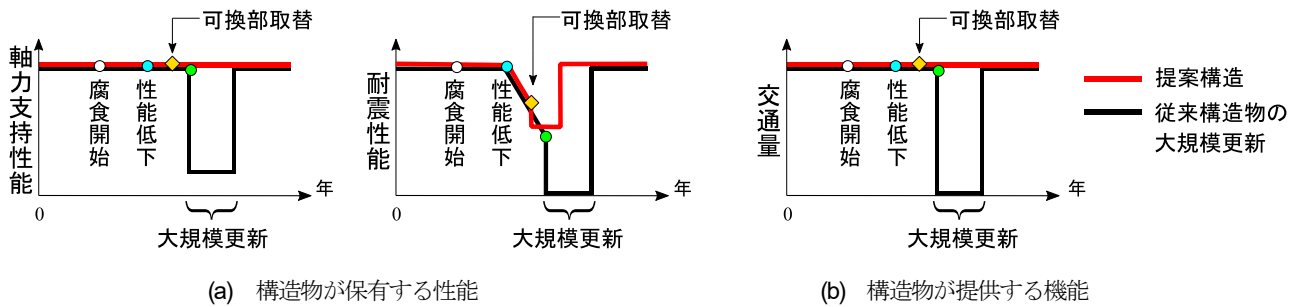


図-3 大規模更新と提案構造の更新による構造物性能及び機能の違い

ここに、 P_{cr} は座屈荷重、 E はヤング係数、 I は断面二次モーメント、 L_k は座屈長さである。

また、軸力の偏心に備え永続部に引張鉄筋を導入するが、永続部は取替後も継続して利用するため永続部の鉄筋腐食は許容できない。そこで、永続部の引張鉄筋については式(2)に示す塩化物イオン濃度の照査式を用いて、想定される供用年数に対し、その期間中に鋼材位置の塩化物イオン濃度が腐食発生限界塩化物イオン濃度を超えないよう適切にかぶりを設計する¹⁸⁾。

$$C(x, t) = \gamma_{cl} \cdot \left[C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) \right\} \right] \quad (2)$$

ここに、 $C(x, t)$ はコンクリート表面からの深さ x mm、時刻 t 年における塩化物イオン濃度、 C_0 はコンクリート表面の塩化物イオン濃度、 D_{ap} は塩化物イオンのみかけの設計拡散係数、 erf は誤差関数、 γ_{cl} は予測の精度に対する安全係数である。

なお、永続部のみの状態に対して最低限の耐震性能を求める場合、導入する引張鉄筋の材料特性や径を適切に選択、配置することで確保するものとする。

(5) 可換性と維持管理性の両立

取替時の施工性を考慮すると、永続部と可換部は分離していることが望ましい。著者ら^{10), 11), 12)}が検討したメタボリズム構造も、永続部と可換部の間には空隙が存在するアンボンド型となっている。しかし、その空隙は水や空気を通り道、あるいはたまり場となり、鋼材腐食や中性化などを促進する要因となるため、維持管理性を考慮する場合、永続部と可換部は一体型となることが望ましい。

そこで提案構造では、可換性と維持管理性を両立するため、永続部と可換部の境界に、仕切りを配置し、仕切りを埋めたまま打設を行うこととする(図-2)。この際、仕切りを間隔を空けて配置することで永続部と可換部が連続となる領域を確保し、通常時は永続部と可換部が一体型として挙動し、取替時には仕切りを導入した部分が不連続になることで施工性が向上することを期待する。

3. 実験方法

(1) 本実験の目的

本研究では、実験的検討により提案構造の実現可能性を検証する。具体的には、軸力支持下での可換部取替実験及び正負交番載荷実験を通じて、永続部のみの軸力支持下で可換部の取替が可能であること及び取替作業が耐震性能に与える影響について検討する。また、可換部の軸方向鉄筋腐食の有無による違い及び可換部の付着性状の違いが耐震性能に与える影響について検討する。

なお、実際の橋脚では、地盤からの水分供給に伴い、塩化物イオンや低pHの水が供給され、橋脚の根本部で腐食が発生した事例が報告されている¹⁹⁾。あるいは桁端部の伸縮装置の近くで、伸縮装置から柱座部への漏水が発生し凍結防止剤の塩分が集中する事例がある²⁰⁾。これらのように、特定の環境下においては局所的な腐食が発生する可能性もある。そのような場合は、腐食箇所のみを取替えることで性能の更新を図ることができ、本構造は将来的には局所的な取替を可能とすることが望ましい。しかし、本研究では提案構造における軸力支持下での鉄筋の取替可能性及び取替による復元力特性への影響に焦点を当てるため、取替による影響が一番大きくなると考えられる、可換部軸方向鉄筋をすべて取替える状況を想定した実験を行うこととする。

(2) 実験供試体概要

柱を模擬するためPC鋼棒(C種1号、 $\phi 13$)を用いて軸力を載荷したRC梁供試体を計4体作成し実験を行う。なお、PC鋼棒は断面中央に配置したシース管内部に挿入することでアンボンド化している。今回の実験供試体の寸法を図-4に示す。本構造では、中心に位置する100 mm×100 mmの領域を永続部、全断面における永続部以外の箇所を可換部と呼ぶ。取替を行う供試体に関しては、取替前後で断面は同じとしている。今回は電食による腐食模擬を行っており、腐食進行の形態が暴露による腐食とは異なるため引張鉄筋のかぶりについては具体的な計算は行っていない。また、永続部には偏心に備え引張鉄筋を配置したが、本供試体での要求性能はあくまで軸力支持性

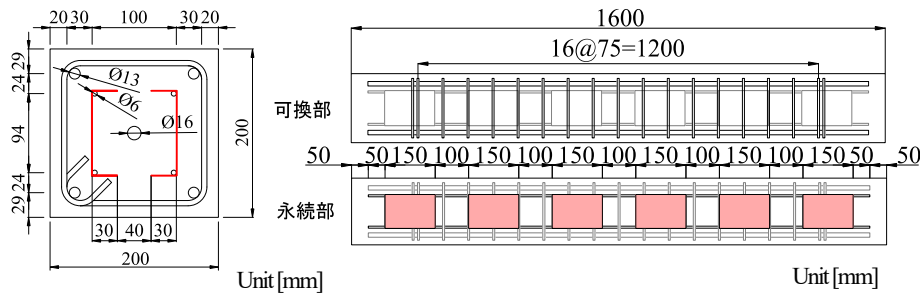


図4 供試体の断面図及び側面図〔標準型のみ鋼板(色付部)無し〕



図5 仕切りの鋼板

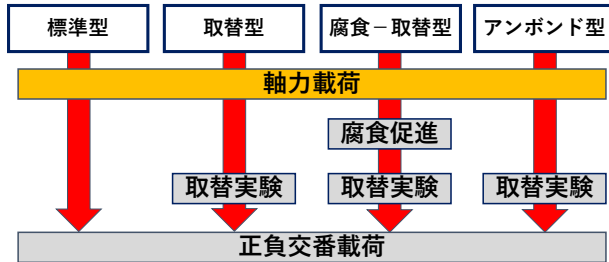


図6 実験の流れ



図7 アンボンド型のシート及び端部処理

能のみとし、L1地震動等への抵抗性は要求しないこととした。

永続部と可換部の仕切りについては、厚さ0.8 mmの鋼板(図-5)を導入し、間隔を空けて配置することで、打設時に永続部にまでコンクリートが流れ込むように、また耐力に影響が出ないように配慮した。

また、用意した供試体は、標準型、取替型、腐食-取替型、アンボンド型の4体である。各供試体の実験の流れを図-6に示す。すべての供試体に対し、軸力の荷重及び正負交番荷重実験を行う。標準型は軸力荷重後に正負交番荷重を実施した。標準型を除く3供試体はすべて軸力荷重を行ったのち腐食促進または取替実験を行った。正負交番荷重実験は取替実験を行った後に実施した。

以下各供試体について述べる。取替型供試体は、可換部の取替実験を行う供試体である。腐食-取替型供試体は、可換部の軸方向鉄筋の腐食促進を行い、腐食終了後に可換部の取替実験を行う供試体である。標準型と取替型の違いが取替の有無であることから、これらを比較することで、永続部で軸力を支持したまま取替を行うことによる影響を考察する。また、腐食-取替型と取替型の違いが腐食の有無であることから、これらを比較することで、腐食が発生した状態で可換部の取替を行うことによる影響を考察する。なお、2.(3) a)で述べたように、本提案構造は目視により腐食ひび割れが発生したタイミングでの取替実施を想定しているが、本実験では、平均質量減少率5%を超えた危険側においても施工が実施できることを確認するため、腐食-取替型の腐食量の目安は平均質量減少率6.0%に設定した。アンボンド型供試体は、永続部と可換部の付着を完全に切った供試体である。これにより、永続部と可換部の付着の有無による影響を

考察する。アンボンド型供試体は、初めに永続部のみ打設し、軸力を荷重する。取替時は可換部の鉄筋を組む前に永続部にビニールシートを巻くことで、永続部と可換部の付着を完全に切り再打設を行った。ただし、梁全体としては永続部と可換部が一体となって挙動するよう、端部のみ付着を許容した(図-7)。

(3) 実験概要

a) 軸力荷重

すべての供試体に対し、PC鋼棒を用いてポストテンション方式で軸力を荷重した。荷重軸力は全断面に対して1.0 MPaとなる40 kNとし、継続的に軸力を計測するためロードセルを入れた状態で荷重を行った。アンボンド型は永続部にのみ荷重を行い、荷重する軸力は他3供試体と同様に40 kNとした。

b) 腐食促進

定電流電源により鉄筋を強制的にアノード溶解させる電食法を用いて、腐食-取替型の可換部軸方向鉄筋の腐食促進を行った。腐食促進の概略図を図-8に示す。供試体上面と下面にそれぞれ電解質溶液(3% NaCl溶液)を浸したシートを銅板で挟み、可換部の軸方向鉄筋をアノード、銅板をカソードとした上で電流密度200 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、電流値0.21 Aの直流電流を印加し、ファラデー則により腐食期間を設定した。また、腐食を許容するのは可換部の軸方向鉄筋のみであり永続部の軸方向鉄筋は腐食促進を避ける必要がある。そこで上側の可換部軸方向鉄筋2本は上面の銅板、下側の可換部軸方向鉄筋2本は下側の銅板との間で回路が形成されるようにし、永続部軸方向鉄筋が回路の一部とならないように配慮した。

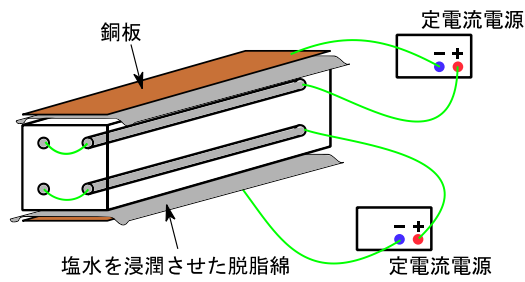


図-8 電食の概略図


(a) 切れ込みを入れる様子 (b) チッパーではつる様子
図-9 取替実験の様子


図-10 荷重システム

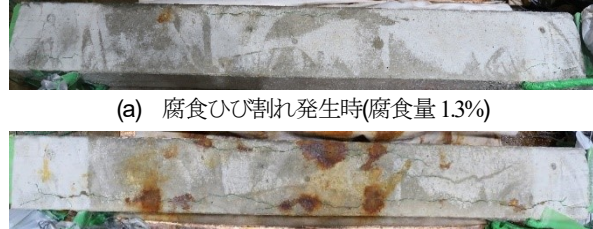

(a) 腐食ひび割れ発生時(腐食量1.3%) (b) 腐食促進終了時(腐食量5.7%)
図-11 腐食-取替型供試体の外観及びひび割れ性状

表-1 コンクリートの材料試験結果

	圧縮強度 $[\text{N}/\text{mm}^2]$	
供試体種別	永続部	可換部
標準型	35.0	
取替型	35.0	41.6
腐食-取替型	37.4	46.9
アンボンド型	37.4	49.1

表-2 鉄筋の材料試験結果

	使用場所と用途	規格	材質	降伏強度 $[\text{N}/\text{mm}^2]$	弾性係数 $[\text{N}/\text{mm}^2]$
D-13(a)	標準型の可換部軸方向鉄筋	D-13	SD-345	384.3	1.68×10^5
D-13(b)	標準型以外の可換部軸方向鉄筋	D-13	SD-345	392.1	1.65×10^5
D6	すべての帯鉄筋及び永続部軸方向鉄筋	D-6	SD-345	373.6	1.90×10^5

c) 取替実験

取替実験は、可換部の撤去と再打設を指し、取替型及び腐食-取替型供試体に対して実施した。可換部の撤去は、コンクリートカッターとチッパーを用いた。その際、図-9のように、永続部に到達しない深さの切れ込みをコンクリートカッターで入れ、可換部をチッパーではつった。なお、この間も軸力は荷重し続けている。可換部撤去後、可換部の軸方向鉄筋及び帯鉄筋を再度配筋し、打設を行った。

d) 正負交番荷重実験

荷重システムを図-10に示す。等曲げ区間300 mm、せん断スパン530 mmの2点荷重装置を用いて正負交番荷重実験を行った。荷重パターンは正負交番変位漸増方式で行い、基準振幅(4 mm)の整数倍の変位を繰り返し回数1回で荷重した。

計測データは、荷重荷重、梁中央部の変位、PC鋼棒の軸力、軸方向鉄筋及び帯鉄筋のひずみである。

(4) 使用材料

表-1に本実験で使用了コンクリートの材料試験結果、

表-2に鉄筋の材料試験結果を示す。材料試験結果は、それぞれ試験片3つの平均値を記載している。

4. 腐食促進及び取替実験の結果

(1) 腐食促進

腐食ひび割れ発生時及び腐食促進終了後の腐食-取替型供試体の外観及びひび割れ状況を図-11に示す。腐食ひび割れ発生時の鉄筋腐食量の推定値は平均質量減少率1.3%であり、平均質量減少率5%よりも小さくなっている。腐食促進終了後の腐食-取替型供試体の軸方向鉄筋については、取替実験の際に取り出した後で、10%クエン酸水素二アンモニウム水溶液(60℃)に24時間浸潤させて腐食生成物を除去し、腐食量を測定した。測定結果は平均質量減少率5.7%であった。

(2) 取替実験

可換部撤去終了後の取替型、腐食-取替型の写真を図-12に示す。また、取替作業時の取替型の軸力の推移を



(a) 取替型



(b) 腐食-取替型

図-12 可換部撤去終了後の型供試体

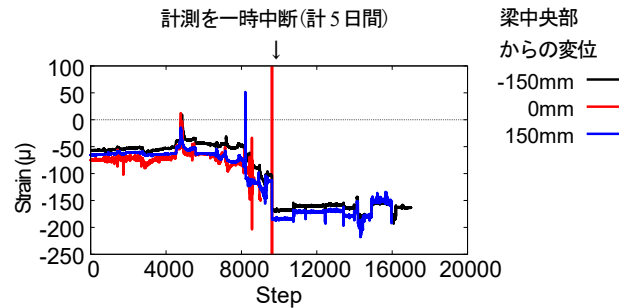


図-14 取替型の可換部撤去時の永続部軸方向鉄筋ひずみの推移

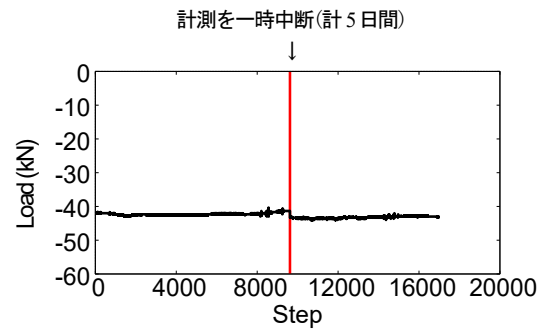


図-13 取替型の可換部撤去時の軸力推移



図-15 鋼板位置でのはつり作業の様子

図-13に、取替型の永続部の軸方向鉄筋ひずみの推移を図-14に示す。これにより、可換部撤去時に軸力が維持され、永続部に軸力が移行していることが分かる。永続部の軸方向鉄筋ひずみの理論値は、全断面で軸力40 kNを支持している場合 $35 \mu\epsilon$ 、永続部のみで軸力40 kNを支持している場合 $143 \mu\epsilon$ となり、可換部の撤去前後で $108 \mu\epsilon$ 増加する。図-14のひずみ増分の平均値は $116 \mu\epsilon$ であることから、本実験で計測された永続部軸方向鉄筋のひずみ変化は概ね理論値と一致している。このことから、作用軸力が永続部に伝達していることが分かり、永続部のみで軸力を支持したまま可換部の撤去が可能であることを確認できた。

また、図-15に示すように鋼板位置では可換部コンクリートと鋼板が外れやすく、鋼板が無い位置に比べ容易に可換部が取り外せたことから、はつり作業の効率化がなされたことが確認できた。また、鋼板を目印にすることで、はつり作業時の永続部への損傷防止もなされている。よって、可換部と永続部との境界に配置した鋼板に一定の効果があることが確認できた。

以上より、永続部と可換部との縁を切らずとも、可換部の軸方向鉄筋の取替が可能であることが示された。

5. 正負交番載荷実験の結果と考察

(1) 荷重-変位関係

実験で得られた各供試体の荷重-変位関係を図-16に

示す。ここで、アクチュエータがRC梁を押しているときの荷重及び変位を正、引いているときの荷重及び変位を負として示す。また、腐食-取替型の実験の際、使用したアクチュエータの変位計の接続不良のため $+1 \delta_y$ 載荷時の荷重データが取れておらず、腐食-取替型の荷重-変位関係は $-1 \delta_y$ からの記載である。

今回、すべての供試体において、曲げ破壊の挙動が得られた。初めに可換部の取替そのものが復元力特性に与えた影響について考察する。

取替型及び腐食-取替型では、仕切りの鋼板がない場所で可換部と永続部の付着がなされていることから標準型と同様の復元力特性を示すことが期待された。しかし、図-16の標準型と取替型、腐食-取替型の荷重-変位関係を比較すると、各変位での最大荷重が一部異なることが分かる。また、各供試体において、同一振幅での荷重の値が正負で異なっている。以下、これらの要因について考察する。

まず、正負交番載荷実験終了後に供試体をコンクリートカッターで切断し断面を確認したところ(図-17)、載荷方向に対して図心のずれが確認され、これが復元力特性の正負の違いに影響を与えたと考えられる。また、標準型は全断面に軸力が載荷されているのに対し、取替型及び腐食-取替型では、永続部にのみ軸力が載荷されており、実験開始時の初期軸力の作用性状が異なっている。その他にも復元力特性の違いが出た要因として、取替前後で材料特性が変化したこと、仕切りの鋼板の有無など

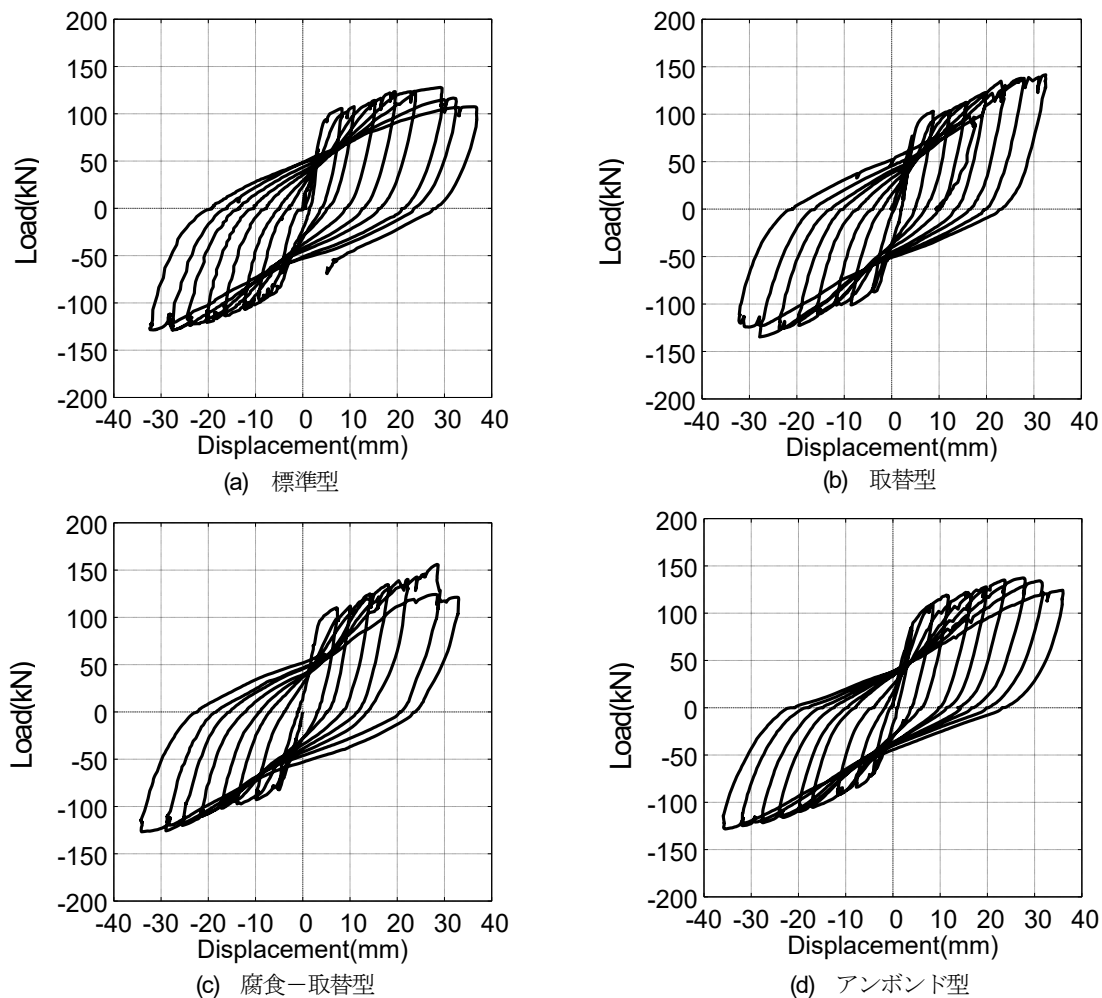


図-16 各供試体の荷重-変位関係

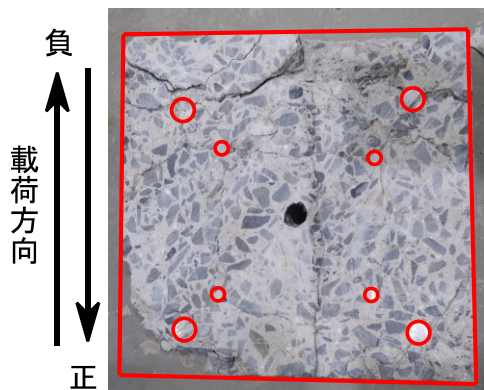


図-17 腐食-取替型の等曲げ区間断面

が考えられる。そこで、5.(2)にてプッシュオーバー解析を実施し、各実験供試体の復元力特性について検討した。また、図-16の荷重-変位関係より、各供試体で明確な二次剛性が発現していることが分かる。これは供試体変位の増大に伴い鉄筋が軸方向に塑性化した際、PC鋼棒を留めるナットにより軸方向の変形が拘束されていることで、PC鋼棒による軸力が増大したためであると考えられる。実際、図-18の軸力-供試体変位関係から変位の増大に伴い軸力が増加していることが確認でき、軸

力増大に伴い断面耐力が増加したことで二次剛性が発現したと考えられる。さらに、供試体間での軸力のばらつきも確認できる。5.(2)のプッシュオーバー解析では、各供試体ごとの軸力の増大を反映して解析を実施している。なお、二次剛性の大きさは供試体間で異なっているものの、実際の柱構造では死荷重による軸力は一定であり、二次剛性は発現しないと考えられる。

続いて、可換部と永続部の付着の有無が復元力特性に与えた影響を考察する。標準型とアンボンド型の荷重-変位関係を比較すると、アンボンド型の履歴ループで囲まれた面積が小さくなっていることが分かる。この要因に関しては5.(3)にて詳細に述べる。

(2) 各供試体間で復元力特性に差異が見られた要因について

各供試体間で復元力特性に差異が見られた要因について検討するため、実験供試体を対象としたファイバーモデルによる解析を実施した。図-19に各供試体のモデル化した断面を、図-20に解析モデルの全体図を示す。なお、取替型及び腐食-取替型のモデル(図-19(b))では、永続部と可換部で材料特性を変化させているものの、永

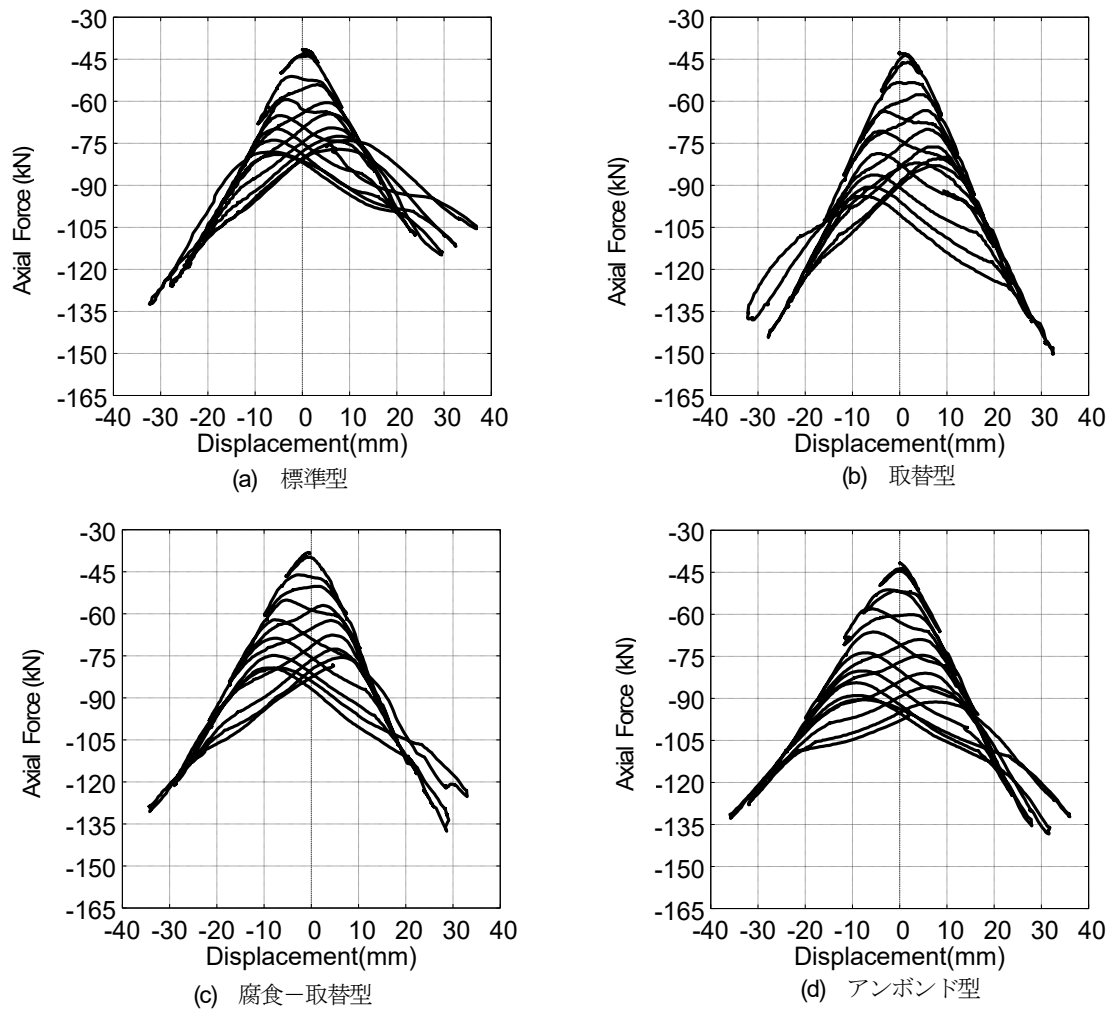


図-18 各供試体の軸力-供試体変位関係

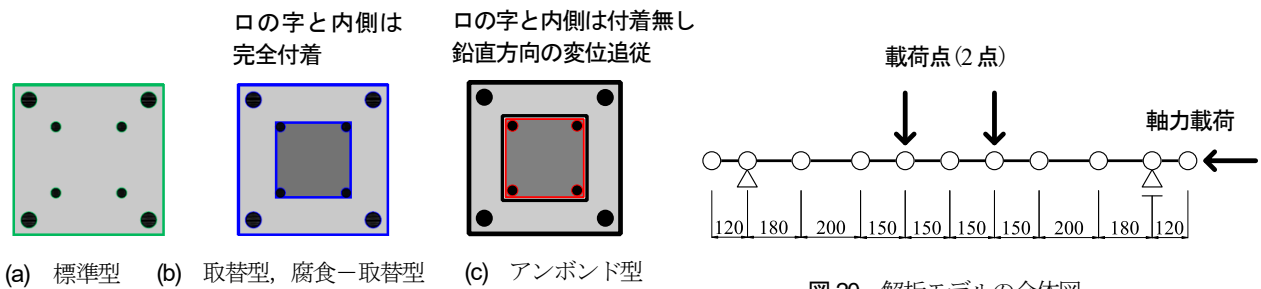


図-19 各モデルの断面形状

続部と可換部の付着を考慮し、一体型の断面としてモデル化している。アンボンド型のモデル(図-19(c))では、可換部を口の字型、永続部を可換部の空隙と同じ大きさの正方形断面とした2部材を用いる。可換部と永続部は別々の梁として挙動させるが、各節点で鉛直方向の追従をさせることでモデル化を行った。すべてのモデルにおいて材料特性は、実験で得られたものを使用している。支点及び载荷点については、実験供試体と同じ位置に設定し、端のノードに水平方向の力を与えることで軸力载荷を表した。

また、5.(1)で述べた標準型とその他の供試体での初期軸力の作用性状の違いについては、植村・高橋²¹⁾がRC巻き立て補強を行った中実断面RC柱の解析的検討にて、全断面に軸力を付加した場合と、あと施工を考慮して軸力付加後にRC巻き立て部を取り付けた場合の荷重-変位関係の差が小さいことを示している。本実験では植村・高橋の検討より軸力比が低いため、全断面に軸力を付加した解析結果が、永続部のみに軸力载荷した後可換部を取り付けた解析結果と概ね同様の結果になると想定し、全断面に初期軸力が作用しているとしてモデル化を

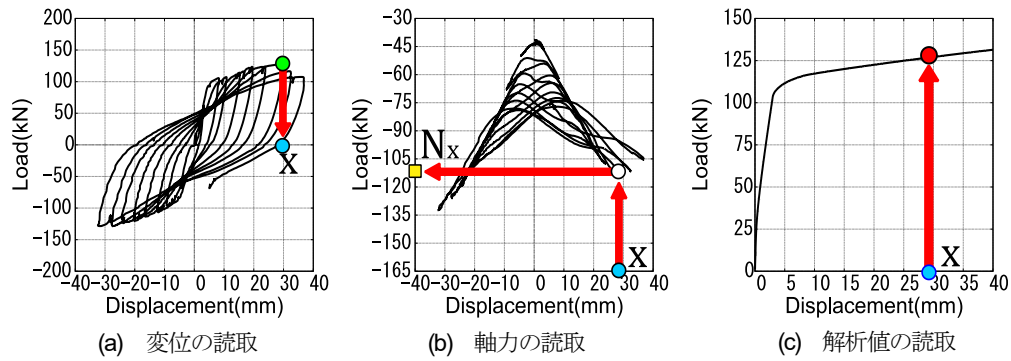


図-21 軸力の変化を模擬した解析の手順

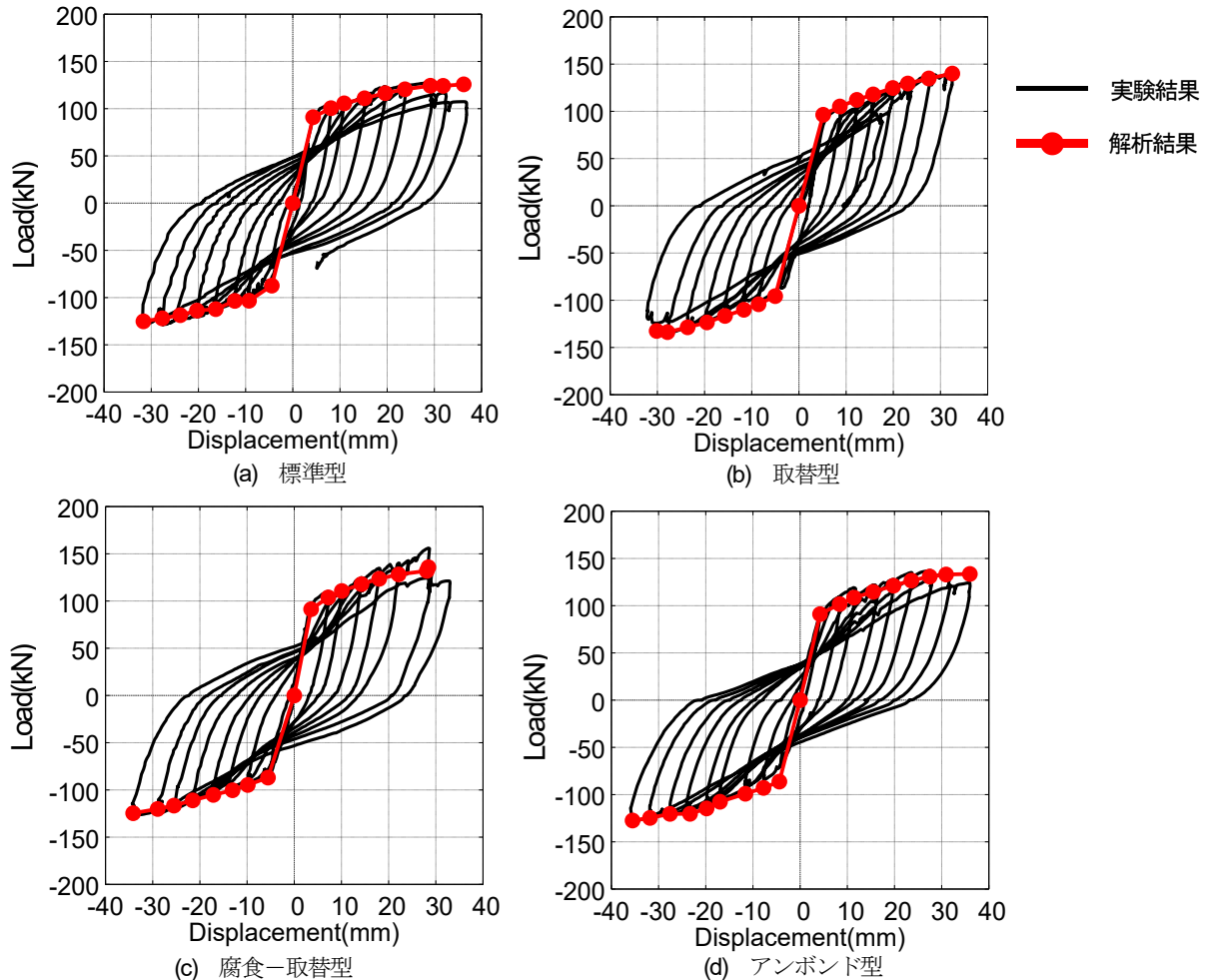


図-22 各供試体の実験結果と解析結果の比較

行った。すなわち、本節では各供試体間に差異を与えると考えられる要因の中で、鉄筋かぶり及び材料特性の差異のみをモデルに反映させた。これにより各供試体間での鉄筋かぶりと材料特性の差異が、復元力特性に与えた影響に焦点を当てた検討を行った。

また、5.(1)で述べたように、载荷に伴いPC鋼棒による軸力の増加が見られた。軸力増大に伴い、供試体の耐力は増加するが、供試体間で軸力増加の度合いが異なる。そこで、本検討では、実験で見られた载荷に伴うそれぞれの供試体の軸力増大を模擬するため、図-21に示す解

析手順を取った。まず、各サイクルの最大荷重点の変位 x を読み取る(図-21(a))。次に、軸力-変位関係より当該変位時の軸力を読み取る(図-21(b))。続いて、読み取った軸力を载荷したRC梁のプッシュオーバー解析を行い、変位 x での荷重を読み取る。これらの手順を降伏点及び $+2\delta_y$ 以降のサイクルで行った。

解析結果を図-22に示す。図より各供試体で実験結果を十分に再現できていることが分かる。また、それぞれの二次剛性が再現できていることから、各供試体の軸力の増大が反映できていることが分かる。その結果、本実

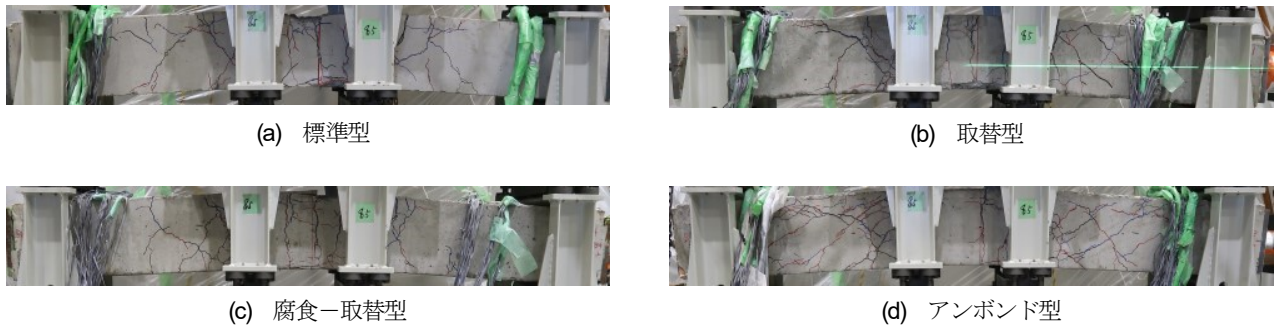


図-23 終局時の各供試体の載荷側面の様子

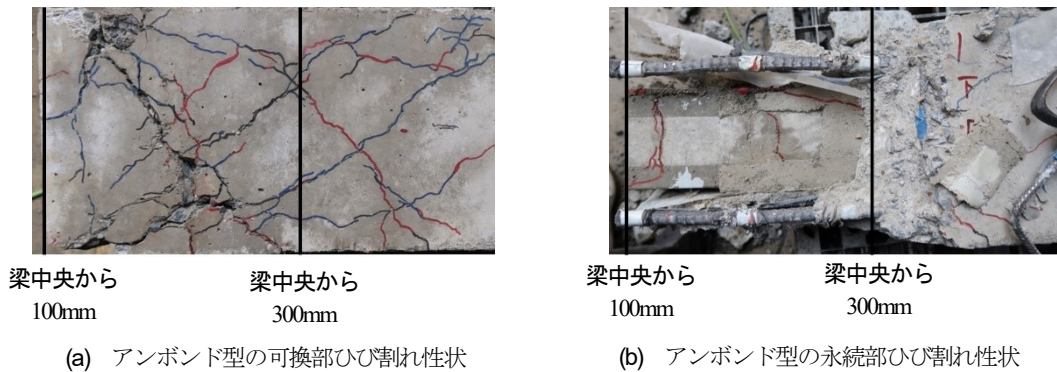


図-24 アンボンド型供試体のひび割れ性状

験で確認された各供試体間の差は、鉄筋かぶり及び材料特性の差に起因するものと考えられる。よって、可換性と維持管理性の両立のために導入した鋼板や、可換部取替により生じた可換部への初期軸力の作用性状の違いが実験結果に与えた影響は小さかったといえる。以上より、軸力支持下での取替そのものは復元力特性に影響を及ぼさないことが分かった。さらに、腐食－取替型に対しても腐食を考慮しない供試体と同様の手順で解析を行った結果、実験結果を再現できたことから、腐食後の取替が復元力特性に影響を与えないことも確認できた。また、アンボンド型に関しても、解析により実験の荷重－変位関係が再現できていることが分かる。

(3) 破壊性状

各供試体の終局時の載荷側面の様子を図-23に示す。各供試体のせん断区間のひび割れを比較すると、アンボンド型でせん断ひび割れが顕著に表れていることが確認できる。ただし、載荷時にせん断ひび割れが開いたものの終局時の破壊形態は曲げ破壊であった。また、取替型及び腐食－取替型においては、アンボンド型ほど顕著ではなかったものの、載荷時に一部のせん断ひび割れが開いていることが観察された。以下、永続部と可換部の付着による影響を考察する。

正負交番載荷実験終了後、アンボンド型において、永続部のせん断区間の可換部を撤去し永続部のひび割れ状況を確認した。図-24(a)にアンボンド型の可換部せん断

ひび割れ、図-24(b)にアンボンド型の永続部せん断ひび割れの様子を示す。図より、アンボンド型においては、可換部にせん断ひび割れがあるものの永続部に到達していないことが分かる。よって、永続部にせん断ひび割れが到達しなかったことで、可換部でせん断ひび割れが発生したものの、供試体全体ではせん断ひび割れが貫通せず、せん断力に抵抗できる状態だったためせん断破壊を起こさなかったと考えられる。ただし、可換部でせん断ひび割れが開いたことにより、せん断変形の影響が標準型に比べて強く表れていると考えられる。これが5.(1)で述べたアンボンド型の荷重－変位関係の履歴面積が小さくなった要因と考えられる。

また、取替型及び腐食－取替型に見られる各供試体のせん断ひび割れは、鋼板を導入した位置と一致したことを確認している。鋼板の導入箇所では、永続部と可換部の付着が切られている。これにより、その区間のみアンボンド型と同様に永続部と可換部が別々にせん断力に抵抗する状態となったため、可換部にせん断ひび割れが表れた可能性が考えられる。

(4) 鉄筋のひずみ分布

各供試体の軸方向鉄筋の梁長さ方向ひずみ分布を図-25に示す。図-25中の縦方向の点線は等曲げ区間を表す。図-25を見ると、すべての供試体で等曲げ区間での軸方向鉄筋の塑性化が確認でき、このことから曲げによる破壊が進行していることが分かる。

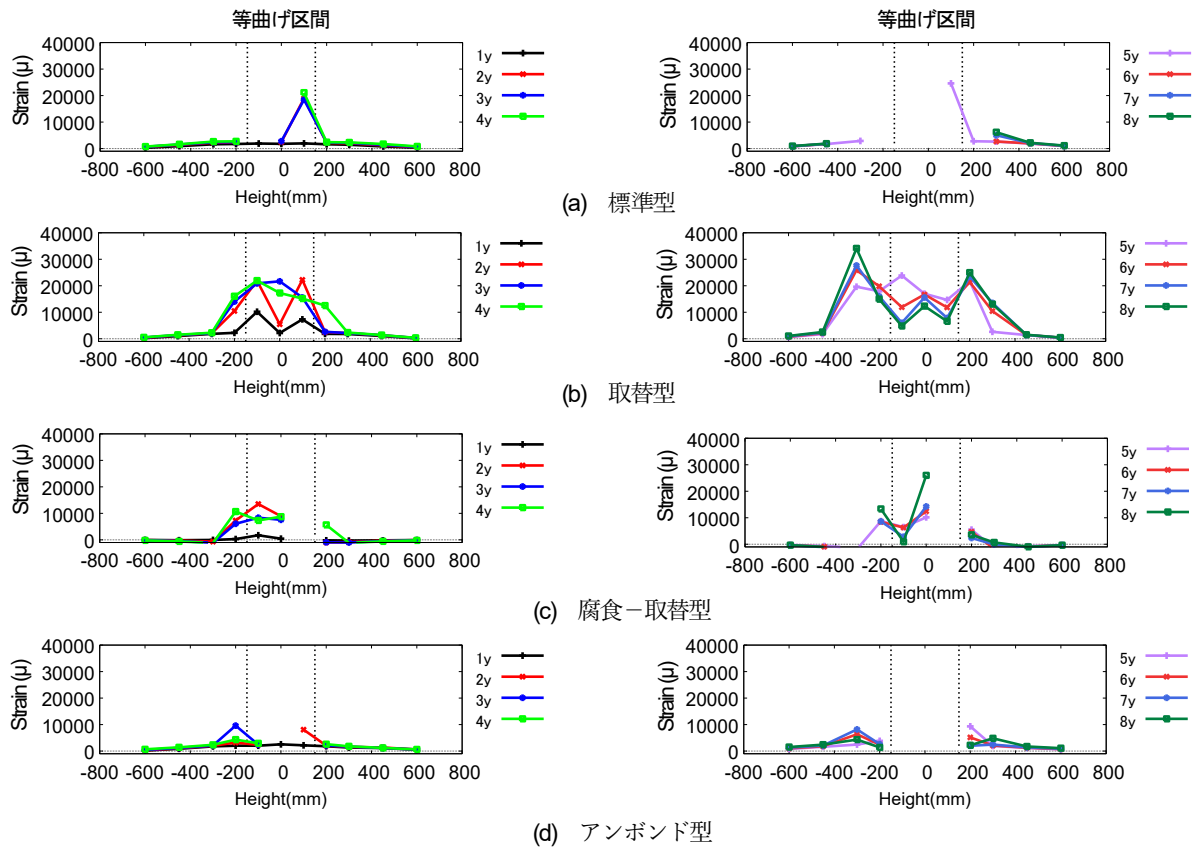


図-25 各供試体の軸方向鉄筋の梁長と方向ひずみ分布(降伏ひずみ $2286\mu\epsilon$)

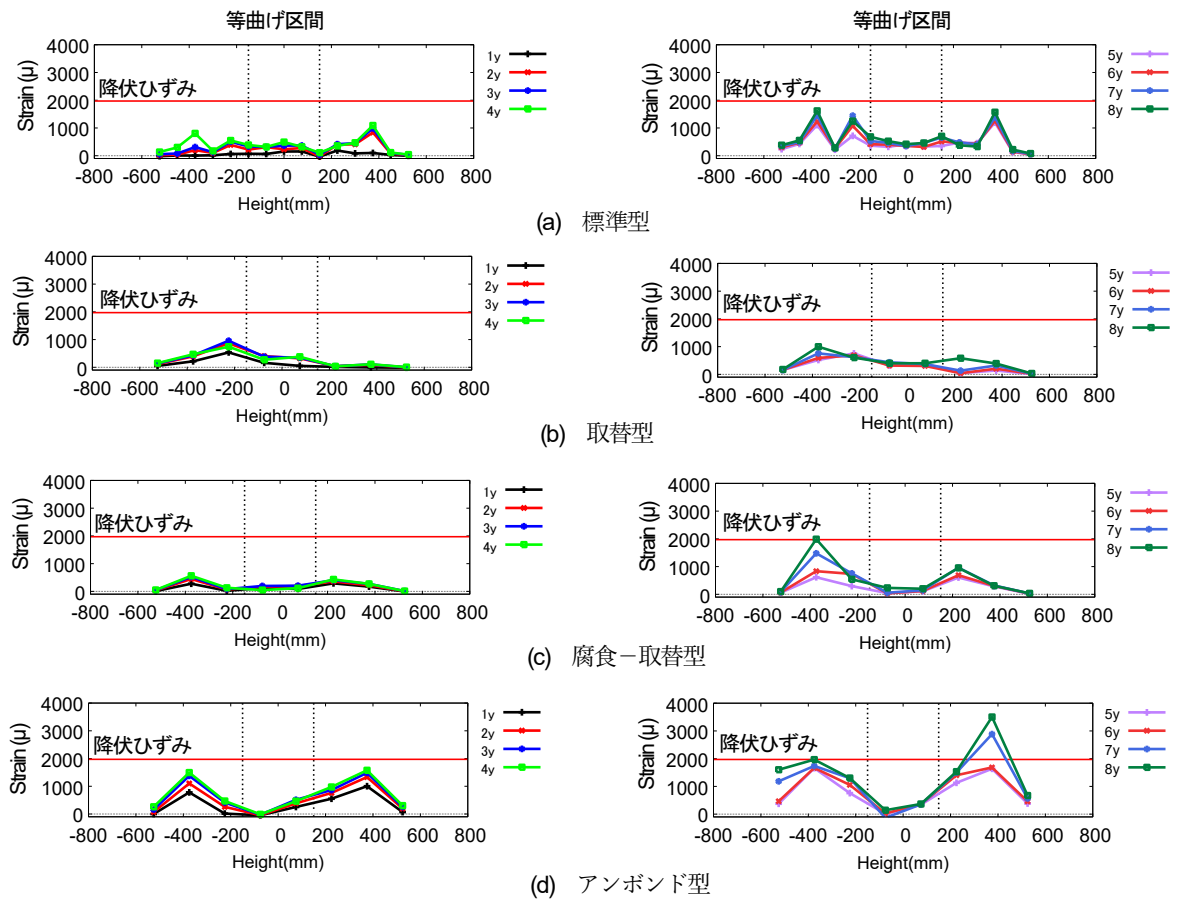


図-26 各供試体の帯鉄筋の梁長と方向ひずみ分布(降伏ひずみ $1963\mu\epsilon$)

続いて、帯鉄筋の梁長さ方向ひずみ分布を図-26に示す。図-26中の横方向の赤線は鉄筋の降伏ひずみを表す。図-26(d)を見ると、アンボンド型においてせん断区間における帯鉄筋ひずみがその他の供試体に比べて大きくなっていることが分かる。これは、アンボンド型で可換部のせん断ひび割れが開いたことによると考えられる。よって、5.(3)で述べたようにアンボンド型ではせん断ひび割れが永続部に貫通せずせん断力に抵抗できる状態であったものの、帯鉄筋の降伏を抑制させるためにも提案構造実現の際には永続部と可換部の仕切りの大きさ・間隔を適切に調整し、可換部と永続部の付着を確保することが望ましいといえる。

6. 結論

本研究では、耐震性能を担保し腐食劣化時に取替により更新を行う可換部と、取替時にも存続し死荷重支持機能を担保する永続部からなるメタボリズムRC柱構造を提案し、実験的検討により提案構造の実現可能性を検討した。以下に本研究で得られた知見を示す。

- 永続部と可換部一体型のメタボリズム構造に対して取替実験を実施し、永続部のみで軸力を支持したまま可換部の撤去、取替が可能であることを確認した。この際、可換性と維持管理の両立のために導入した鋼板が、作業性の向上及び永続部の保護に機能していることが確認され、鋼板導入に一定の効果があったことが確認された。
- 正負交番載荷実験を実施した結果、標準RC供試体と提案構造を有する供試体はともに曲げ破壊をしたことを確認した。一部見られた復元力特性の差については、解析の結果から取替による材料特性の変化及び鉄筋かぶりの製作誤差に起因することが分かった。また、これより永続部で軸力を支持したままでの可換部の取替及び腐食発生後の取替が、復元力特性に影響を与えないことが分かった。
- 永続部と可換部間の付着の有無による影響を検討した結果、復元力特性には変化を及ぼさないことが確認された。一方で、ひび割れ性状には変化が見られ、永続部と可換部の付着を完全に切ったアンボンド型ではせん断ひび割れが開いたことが確認された。また、取替を行った取替型、腐食一取替型についても、付着が切れている鋼板位置では一部せん断ひび割れが開いたことを確認した。
- 永続部と可換部の付着が不十分なため、せん断力が永続部に伝達せず可換部のみで受け持ったことにより、可換部のせん断ひび割れが進展し、帯鉄

筋の降伏が見られた。せん断ひび割れの発生抑制及び帯鉄筋の降伏抑制のために、仕切りの大きさ及び間隔の調整を行い永続部と可換部の付着を確保することが望ましいといえる。

- 以上より、提案構造は、軸力支持下で腐食鉄筋の取替を行うことで、腐食環境下で構造物の機能維持が可能であるといえ、構造物の維持管理方策における新たなアプローチの一つになりうるといえる。

謝辞：本研究の一部は国立研究開発法人科学技術振興機構の持続可能開発目標達成支援事業『ミャンマーの地震災害に対する橋梁構造物強靱化へ向けた課題抽出のための大型共同実験』及び科学研究費補助金基盤研究(A)21H04574の助成のもと行った。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) United Nations: Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development, <https://sdgs.un.org/sites/default/files/publications/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf> (Last access: 2021.10.25)
- 2) 濱田秀則, 野村倫一, 新名勉, 渡辺博志, 寺田典生: 表面保護工法を中心としたコンクリート構造物のアップグレード技術の現状と将来展望 3. 適用事例, 材料, Vol. 61, No. 11, pp. 89-95, 2012.
- 3) 守分敦郎, 三浦成夫, 長滝重義, 大即信明: 既設コンクリート構造物に施工した表面塗装材料の耐久性評価, 土木学会論文集, Vol. 1995, No. 520, pp. 99-110, 1995.
- 4) 山本悟, 川岡岳晴, 田代賢吉: 電気防食新工法のコンクリート実構造物への適用, 材料, Vol. 55, No. 11, pp. 1016-1020, 2006.
- 5) 宮口克一: 塩素固定化材を用いた断面修復工法, コンクリート工学, Vol. 54, No. 1, pp. 117-121, 2016.
- 6) 川西貴士, 石関嘉一, 平田隆祥, 富井孝喜: 高強度かつ高耐久のセメント系補修・補強材料「タフショットクリート」, 大林組技術研究所報, No. 81, 2017.
- 7) 関口武一, 笹井幸男, 石塚喬康: 塩害を受けた RC 床版の劣化度調査と保全工事, コンクリート工学, Vol. 32, No. 5, pp. 41-49, 1994.
- 8) Chenga, C. T., Yanga, J. C., Yehb, Y. K. and Chen, S. E.: Seismic performance of repaired hollow-bridge piers, *Construction and Building Materials*, Vol. 17, No. 5, pp. 339-351, 2003.
- 9) 藤倉修一, 忍田祥太, 臼井裕太, NGGUYEN Minh Hai, 中島章典, 浦川洋介: レベル 2 地震損傷後に修復可能な RC 橋脚の提案および実験的検証, 土木学会論文集 A1, Vol. 75, No. 4, pp. I591-I601, 2019.
- 10) 前田紘人, 林学, 高橋良和: メタボリズム耐震橋脚構造の開発に向けた正負交番載荷及び塑性ヒンジ部取替実験, 土木学会論文集 A1, Vol. 76, No. 4, pp. I_377-I_392, 2020.

- 11) 林学, 植村佳大, 高橋良和: 埋込継手構造を用いた塑性ヒンジ部取替による RC 橋脚の耐震性能回復に関する実験的検討, 土木学会論文集 A1, Vol. 77, No. 4, pp. I. 424-I. 435, 2021.
- 12) 林学, 植村佳大, 高橋良和: 埋込メナーゼヒンジ RC 橋脚の地震後復旧性に関する実験的検討, 第 23 回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演概要集, pp. 75-82, 2021.
- 13) 土木学会: コンクリート標準示方書[設計編], 2017.
- 14) Ma, Y., Che, Y. and Gong, J.: Behavior of corrosion damaged circular reinforced concrete columns under cyclic loading, *Construction and Building Materials*, Vol. 29, pp. 548-556, 2012.
- 15) 近田康夫, 松島学, 畦崎成志: 心理的影響に基づくコンクリート構造物の補修時期に関する一考察, 土木学会論文集, No. 682/I-56, pp. 289-298, 2001.
- 16) 橘高義典, Le Phong Nguyen, 塚越雅幸, 松沢晃一: 鉄筋コンクリート表面のひび割れ発生時の鉄筋腐食量に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No. 1, pp. 1145-1150, 2011.
- 17) 元路寛, 関博: 鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れ発生状況及びひび割れ幅に関する研究, 土木学会論文集, No. 669/V-50, pp. 161-171, 2001.
- 18) 土木学会: コンクリート標準示方書[維持管理編], 2018.
- 19) 川上圭司, 高谷哲, 羽村陽平, 山本貴士: 腐食生成物の分析に基づくコンクリート中鉄筋の腐食環境評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 38, No. 1, pp. 1107-1112, 2016.
- 20) 小田稔, 田口史雄, 嶋田久俊: 路面凍結防止剤の影響を受けるコンクリート橋の凍害, 塩害調査, 第 49 回北海道開発局技術研究発表会発表論文集, 技-19, 2005.
- 21) 植村佳大, 高橋良和: あと施工した耐震補強部への軸力伝達性状に関する解析的検討, 第 23 回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集, pp. 281-286, 2021.

(Received October 25, 2021)

(Accepted February 23, 2022)

DEVELOPMENT OF METABOLISM RC COLUMN CAPABLE OF MAINTAINING STRUCTURAL FUNCTION UNDER CORROSIVE CONDITION

Tomoya UEDA, Keita UEMURA and Yoshikazu TAKAHASHI

In current treatment of management system, the structural replacement including replacement of rebars is conducted when the corrosion is severe. However, it is not easy for column structure to replace corroded rebars because it requires the installation of timberings. In this paper, we aim to develop the metabolism RC column structure that can maintain the structural function under the corrosive condition by facilitating the replacement of rebars under axial force support. The proposal structure is made of two parts, exchangeable part and lasting part. The exchangeable part allows the corrosion of its longitudinal rebar. We replace exchangeable part and attach new one when initiating crackings appear. The lasting part supports the axial load when the exchangeable part is replaced. We make four specimens, one is normal RC and other three specimens have the proposal structure. The controlled variables in the test are corrosion level and presence or absence of the bond between exchangeable part and lasting part. Replacement experiments and cyclic loading tests are conducted. Test results show that rebar replacement with axial force support is possible independent of corrosion level, and replacement with axial force support has no effect to the restoring force characteristics. The lack of the bond between exchangeable part and lasting part in replacement experiment changes crack characteristics. Shearing cracks open larger when the bond is lack, so it is preferable to ensure the strong bond considering the control of shearing cracks.