

上水道における地震被害の経年的影響について

亀田 弘行・杉戸 真太
後藤 尚男・神田 仁

LONG-TERM EFFECTS ON EARTHQUAKE DAMAGE OF WATER SUPPLY SYSTEMS —SURVEY AND CHARACTERIZATION—

By Hiroyuki KAMEDA, Masata SUGITO, Hisao GOTO and Hitoshi KANDA

Synopsis

Seismic damage of water supply systems for various cities have been surveyed with emphasis on its long-term effects during post-earthquake periods. The long-term effects are represented in terms of the time variation of water leak, number of pipe repairs, and in some cases the cost of repairs before these indices recover to their pre-earthquake levels. Comparative discussion is made between the cities with various system conditions and different soil conditions.

1. 緒 論

1.1 概 説

近年、耐震工学上クローズアップされている都市構造物のひとつにライフライン系が挙げられる。このライフライン系は、上下水道、電力、ガス、通信、電話などの供給施設をはじめとし、道路、鉄道、港湾等の交通施設をも含んだシステムのことであり、広範囲にわたって網目構造をなし、需要、中継、供給などの種類のノードが多数のリンクで結合し能力を発揮するという特徴を持っている。

文字通り我々市民の生命線としての役割を任っているライフライン系であるが、ひとたび地震に見舞われると、その結合の広がりから何らかの被害を受けやすく、またその性質上、局所的な破壊からシステム全体の機能低下を招くことも十分考えられる。加えて、電力、ガス、上下水道といった個々の被害が相互に影響を及ぼしあって被害が波及するという側面もあり、こうした問題はライフライン系の耐震工学に特有である「システム信頼度」という考えかたに集約される。

これらライフライン系のなかで上下水道、ガスなどは、地下埋設管を主な輸送路としているが、この耐震性には埋設深さ、地盤の硬軟、管種、継手の形態、管路に対する地震動の入力方向などが複雑に関わってくる。一般に埋設深さが深ければ震害は少ないとされているが、維持管理や破壊箇所の修繕にかかる手間、経済性を考えるといたずらに深くするのも不合理であるし、実際問題として、都市では他の地下埋設物との関係から埋設深さが決まってしまうことも多いもので、現存の埋設管が十分に好ましい状況下に置かれているとは言い難い。また、地盤の不均等なところや軟弱地盤に敷設するときには、杭打ち工法等により基礎を均等化し、継手部には最近研究がすすめられている「離脱防止機能」「伸縮性」「可とう性」を重視した耐震継手を設けるなどの方法があり、その他、管種についても日本海中部地震の被害調査¹⁾では変形性能の大きいダクタイル鋳鉄管が優れた耐震性を有することが報告された。こうした耐震設計法を今後敷設される管路に適用することは非常に有意義であるが、現在ある施設については、これらを短期間で全面的に新しく敷設替

えすることは現実としてまず不可能であろうし、現段階では主要幹線から徐々に耐震化してゆくというところが妥当であろう。

この様な現状を鑑みるに、埋設管路網ではある程度の地震被害は避けられないという認識のもとで、むしろ被災後の速やかなシステム機能の復旧への手だてを検討することが重要となってくる。

ところが、上水道管路の地震被害においては、地震直後の被害の他にその後数年間にわたって修理事件数、漏水量が地震以前より大きな値を取り、地震の影響が長い間消失しないことが分かってきた。この原因としては、細かな漏水箇所が発見されるまでに時間のかかることや、地震によって管の老朽化が促進されることなどが考えられる。こういった被害を経年の被害と称し、これを正確に把握することが出来れば、地震被害をより総合的に評価することができ、またシステムの早期回復への有力な情報となり得るであろう。

本研究はこのような観点から、1978年宮城県沖地震で被害を被った仙台市の上水道システムについて、地震被害の経年的影響に着目して調査を行い、その上で、これまでになされた研究による他の都市についてのいくつかのデータとも相互比較をし、それぞれの都市の地域特性と地震被害の経年的影響との関連について広く考察を行うものである。

1.2 従来の研究

安達²⁾、亀田・杉戸・安達³⁾は、1983年日本海中部地震で被害を被った能代市、男鹿市の上水道システムについて、地震被害の経年的影響に着目して調査を行い、震害を評価するパラメータとしての漏水量、修理事件数、修理に要した費用の推移を昭和55年4月から昭和59年3月にわたって図示した上で、地震被害が「季節変動とも思われるような」変動を示しながら地震後約2年かかって徐々に減少してゆく調査結果を発表した。合わせて、これら2年間に、地震以前の平均値から増加した量を地震被害の経年的影響であると考え、地震直後の報告による値より大きな地震被害量を算出している。

また Isenberg⁴⁾は、ロサンゼルス市の水道電力局(The Los Angeles Department of Water and Power)の修理事件数の記録から、1971年サンフェルナンド地震の被害の「Lingering Effects」の形跡を見出したことを発端とし、地震の「Prompt Damage」だけでなく、「Lingering Effects」にも注目すべきであると指摘している。そして、1983年 Coalinga 地震で被災した Coalinga 市の綿密な地震被害調査を行い、埋設管路網の震害を表わすパラメータとして、ガス、上水道、下水道のそれぞれについて敷設更新に要した財政支出、修理事件数を取りあげその推移を図示した結果、地震後2年を経た時点でも、財政支出は地震以前のおよそ2倍、修理事件数も40～50%多くなっていることが分かった。

さらに、先に挙げた亀田・杉戸・安達³⁾は、1985年 Mexico 地震で被害を被った Mexico 市の上水道システムについて、その取水流量の月毎の変動を調査し、地震の半年後にもなおその影響が残っている様子を発表した。

1.3 本研究の方針と概要

本研究はこれらの研究を継承し、発展させようとするものである。上記の調査結果に加えて、典型的な都市震災の例と考えられる1978年宮城県沖地震による仙台市の被害に注目し、その上水道システムの被害の経年的影響を調査する。具体的には、震害を表わす指標として修理事件数、漏水量、修理に要した費用を取りあげ、これらの地震前後数年間に推移を調べ、図示する。そして、能代市、男鹿市、Coalinga 市、Mexico 市の被害と仙台市の被害を、その地域特性に関連づけながら比較し、考察を行なうものとする。

1978年宮城県沖地震による仙台市上水道システムの被害については、これまでに幾つかの調査、研究が行われている。片山・増井・磯山・甚内⁵⁾による地震後の被害調査では、口径、管種ごとに被害率(被害箇所/敷設距離)を算出し、管の被害場所、被害形態、地盤との間でクロス集計を行って被害内容を分析し、かつ、それまであまり検討されていなかった復旧と応急対策の経過について概説している。

また、Kameda, Goto, Kasuga⁶⁾、亀田⁷⁾は、地震後の水供給システムに対する機能的要求を4段階に分け

た上で、システムとしての信頼度予測を行ない、モンテカルロシミュレーションの結果を仙台市上水道システムの実際の被害と照らし合わせ、その適合性を検討している。

こうした研究は、地震直後の被害を対象に行ったものであるから、この他に地震被害の経年的影響がどの程度現れてきて、これがシステム全体に占める影響はどの位なのかは未解明である。本研究により、地震被害の経年的影響の程度が明らかにされれば、これら地震直後被害の詳細な研究に加え、より有益な情報が得られるものと期待される。

次章以降の方針としては、第2章で仙台市上水道システムの被害調査の方法と、その解析結果を述べて若干の考察を加える。第3章では、上述の各都市の研究結果について簡単に紹介し、その地域特性と、被害の概況をつけ加えるとともに、それぞれを相互比較し、考察を行うこととする。

2. 仙台市上水道システムの調査

2.1 本調査に用いるデータと解析方法

本調査を行うにあたって、震害を表すパラメータとして修理件数、漏水量、修理に要した費用の3つを取り挙げる。漏水量は地震被害を直接示すものと期待され、修理件数の推移は震害の復旧過程をたどるものとして今後の復旧戦略を講じる上で有用な情報となる。また修理費用は、破壊箇所の規模の大小を表す指標として利用できると思われるからである。

本研究をすすめるには、仙台市上水道システムの概要と事業状況についての長期にわたるデータが必要のため、仙台市水道局に赴き資料の収集を行った。水道局の方には、研究の趣旨にご理解を頂き、快く協力して頂けたこともあって、数多くの貴重なデータと、その後の解析に有益な助言を得ることができた。

60余万の給水人口を抱える大規模システムであるが故に、その事業内容は毎年「水道事業統計年報」なる冊子に細かくまとめられており、解析に必要なデータは、ほとんどここから抽出することにより得たが、特別に頂いたものもあった。

この中で本調査に用いるデータは次のものである。

- ① S 49年4月から S 60年3月までの配水施設、給水装置修繕工事件数の月毎の推移
- ② S 49年4月から S 60年3月までの給水実績（配水量、有効水量、無効水量）の月毎の推移
- ③ 配水管工事に要した費用のなかの、材料費の S 49から S 60までの年度毎の推移

これらを検討するに当たっては、12年間にわたる事業規模の拡大に伴う影響を除去し、正規化する必要がある。そこで、修理件数に関しては配水管の敷設延長で割り単位長さ当りの件数とし、水量に関しては、給水人口と日数で割り1人、1日当りの水量とする。そのため、次の2つのデータも必要となった。

- ④ S 49から S 60の配水管の敷設距離の年度毎の推移
- ⑤ S 49から S 60の給水人口の年度毎の推移

これらのデータについては、年度末に集計された記録しかないので、直線的に変動するものと見なして回帰分析を行い、月毎のデータとして用いるものとする。回帰分析の結果はそれぞれ **Tables 1, 2** の様になった。

Table 1 Served population of Sendai water supply system and its regression on time data (persons)

1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985
537785	553970	589667	603294	613695	621898	629295	636843	644182	650914	659335	666594

$$y = -237,240 + 10,749x \quad (x=74, 75, \dots, 85; \text{fiscal year})$$

Table 2 Evolution of the total length of water distribution pipelines in Sendai data (m)

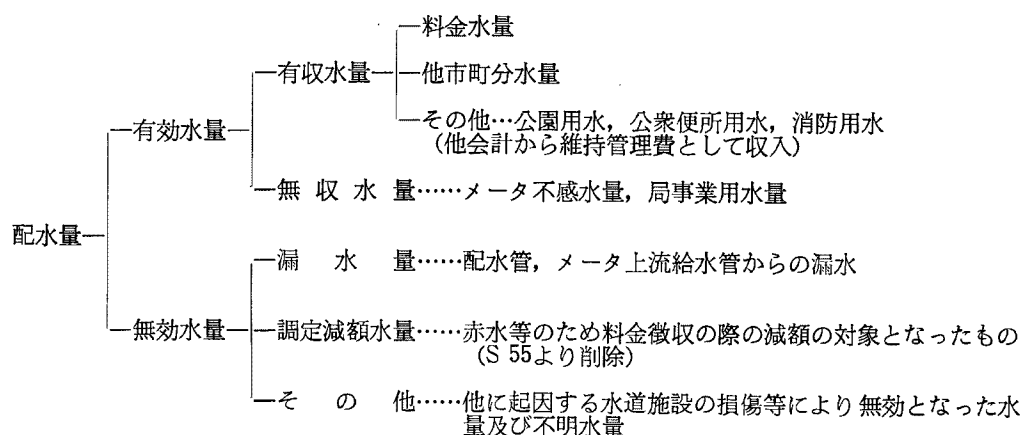
1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985
933336	1010918	1065252	1143388	1220379	1287818	1347735	1414678	1458603	1502199	1528434	1570867

$$y = -3,420,539 + 59,256x \quad (x=74, 75, \dots, 85; \text{fiscal year})$$

2.2 解析結果

(1) 漏水量

以下に漏水量の追跡を行うが、まず仙台市水道局では配水量はさらに下図のようにその内訳が分類される。



これによると、無効水量には漏水量の他、調定減額水量、その他が含まれており、無効水量＝漏水量として良いかという疑問があるが、この点については水道局の担当者の意見を参考に、調定減額水量とその他の割合は低く、無効水量はほぼ漏水量と考えられるものとして解析をすすめる。

また、ここでは仙台市配水区域を対象として解析を行うため、他市町への分水量は不要であり、統計年報の配水量、有効水量の値から他市町分水量の値を減ずるという操作を行った。こうして得た、仙台市配水区域の配水量、有効水量、無効水量のデータを示したものが **Table 3** である。これを、上式で推定した給水人口と、1ヶ月の日数で割って1人、1日あたりの給水実績をプロットしたものを **Fig. 1** に示す。

Fig. 1 から明らかなように、配水量と有効水量のピークには、ずれが生じている。この原因は、配水量の測定は、即時にメータを読みとることによって行なわれるが、有効水量は検針日から次の検針日までメータを読みとることによって測定されるためそこに時間的な差がでてくるためである。よって毎月の無効水量の変動を正確につかむためには、有効水量を配水量に対応させるべく補正する必要がある。このような検針日ずれを考えた有効水量の補正は、能代、男鹿の給水実績の調査²⁾の際にも検討された。その結果、能代市では、全市の検針日を一律毎月15日とし、男鹿市では一律毎月20日として、有効水量をそれぞれ15日、10日前へずらしたところ、配水量と有効水量の増減がほぼ一致した。

仙台市の検針方法は次のようになっている。まず、配水区域を地理的に8つにほぼ等分割する（この小区域を1～8とする）。そして、この小区域の1つを1週間かけて検針して、2ヶ月をかけて、全区域を検針し終える。そこで9、10月を例に取ると、**Table 4**の様に1～4区域の7月検針時と9月検針時とのそれぞれの差をもって全区域の9月の有効水量とし、5～8区域の8月検針時と10月検針時との差をもって全区域の10月の水量として記録する。すなわち、半分の地区の2ヶ月分を交互に1ヶ月分としている。

そこで、有効水量の補正方法としては、

Table 3 Amount of distributed water (original data; Sendai)

(m³)

	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Dec	Nov	Jan	Feb	Mar
1974	4670209	5170387	5187566	5732477	6181961	5695066	5611978	5168568	5404466	5439277	5066805	5362138
	3699111	4161375	4388460	4559586	4721150	5130486	4520070	4505011	4059809	4193915	4240838	4128890
	971098	1009012	799106	1172891	1460819	564580	1091908	663557	1344657	1245362	825967	1233248
1975	5116417	5427011	5501626	6266827	6462713	5972294	5671712	5346765	5444368	5682510	5524466	5606564
	3906703	4522908	4516709	5161217	5413804	5859234	4983323	4996677	4516731	4602741	4872983	4557599
	1209714	904103	984917	1105610	1048909	113060	688389	350088	927637	1080769	651483	1048965
1976	5493681	5823466	5905237	6555826	6131730	5787336	5686269	5329816	5646332	6839054	6284773	6335086
	4531744	4783346	5033895	5392576	5441616	5585569	4945335	5007682	4660780	5195722	5292137	5088794
	961938	1140121	871342	1163250	690115	201767	740934	322134	985552	164332	992655	1246292
1977	6146826	6410650	6440548	7349541	7028798	6445660	6682292	6272676	6450526	5764571	5983507	6119447
	4720253	5040327	5112484	5618696	5814938	6132075	5261891	5501239	4870103	5098277	5168264	5183853
	1426573	1370323	1328065	1730845	1213854	313585	1420401	771437	1580423	666294	815243	935594
1978	6235172	6564283	7152386	7712820	7288291	6486525	6525316	6270417	6465086	6121615	6069633	6756157
	5071677	5192526	5671374	6288986	6637555	6424230	5758213	5630877	5332624	5260087	5237959	4789602
	1163495	1371757	1481012	1423834	650736	62295	767103	639541	1132462	861528	831674	1966555
1979	6107255	6663689	6893220	7053857	7176308	6574068	6591387	6087932	6626663	6436182	6273318	6469617
	4896604	5309011	5662739	6013204	6199799	6270235	5741517	5645555	5385895	5301524	5425371	5147638
	1210651	1354678	1230481	1040653	976509	303833	849870	442377	1240768	1134658	847947	1321979
1980	6259801	6722248	6729066	6840877	6666743	6728045	6637252	6303218	6536682	6551494	5951486	6640074
	5124016	5326431	5733379	5937329	5834165	5936172	5647598	5640844	5387051	5352037	5444923	5329686
	1135785	1395817	995687	903548	832578	791873	989654	662374	1149631	1199457	506563	1310388
1981	6397942	6664502	6572129	7714311	7514145	6886731	6848851	6423259	6717903	6523469	6340932	6762399
	5227320	5503931	5711150	6108631	6437325	6533206	6000031	5927475	5523191	5569368	5698947	5471627
	1170622	1160571	860979	1605680	1076820	353525	848820	495784	1194712	954101	641985	1290772
1982	6543621	7118788	7120481	7438431	7563035	7052826	7168477	6731864	6969180	6690047	6397116	6941542
	5454112	5842412	6185325	6431867	6377571	6594418	6157138	6211307	5694557	5706715	5823471	5612304
	1089509	1276376	935156	1006564	1185464	458408	1011339	520827	1274623	983332	573645	1329238
1983	6887074	7296782	7104497	7533653	7822151	7383578	7390720	6920497	7179253	6853751	7058489	7153453
	5613321	6085952	6211993	6408193	6619659	6964881	6286916	6286512	5879445	5965547	6186991	6234356
	1273753	1210830	892504	1125460	1202492	418697	1103804	623985	1299808	888204	871498	919097
1984	7075418	7361370	7441820	8040007	8398701	7428813	7457124	6991165	7361088	7743684	6907307	7542475
	6078788	6125364	6305551	6602203	7140972	7338822	6591699	6586889	6015290	6409135	6732072	6174412
	996630	1236006	1136259	1437804	1257729	89991	865425	404276	1334549	1334549	175235	1368063
1985	7150849	7696587	7583629	8649262	8761300	7780243	7681000	7252620	7506634	7255676	6984093	7188868
	5773488	6286654	6623306	6955604	7324471	7640799	6688355	6728188	6175492	6185741	6483020	6369894
	1377361	1409933	960323	1693658	1436829	139444	992645	524432	1331142	1069935	501073	818974

upper; Total middle; Effective lower; Ineffective

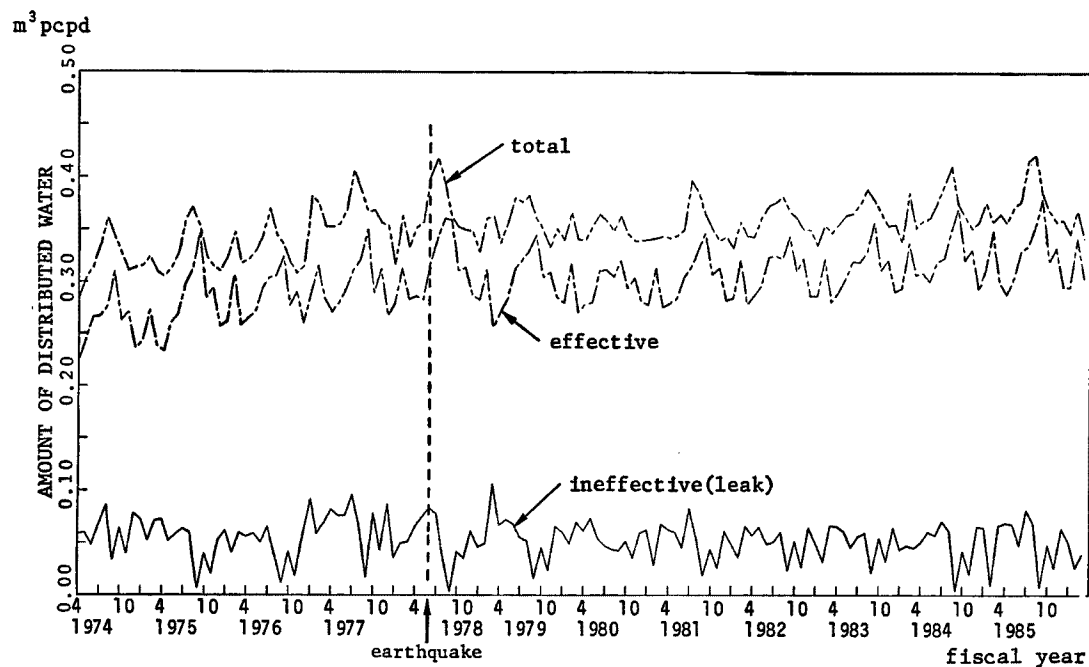


Fig. 1 Amount of distributed water (original data; Sendai).

Table 4 Meter examination period in Sendai

Distributed Water		 9/1	10/1	11/1	.....
Examination Period		Y, ...Amount of <u>distributed water</u> in September			
District No.1		Y ₁₀ ...Amount of <u>distributed water</u> in October			
	Jul. 1st week	Sep. 1st week	Nov. 1st week	.....	
No. 1	...	x ₁	Sep. 2nd	Nov. 2nd	.....
No. 2	...	x ₂	Sep. 3rd	Nov. 3rd	.....
No. 3	...	x ₃	Sep. 4th	Nov. 4th	.....
No. 4	...	x ₄	Sep. 4th	Nov. 4th	.....
No. 5	Aug. 1st	Oct. 1st	Dec. 1st	.....	
No. 6	...	x ₅	Oct. 2nd	Dec. 2nd	.....
No. 7	...	x ₆	Oct. 3rd		
No. 8	...	x ₇	Oct. 4th		
	...	x ₈			

Data of amount of effective water in September = $x_1 + x_2 + x_3 + x_4$

Data of amount of effective water in October = $x_5 + x_6 + x_7 + x_8$

Table 5 Effective amount of distributed water in September '85 (corrected half a month)

	7/1	8/1	9/1	10/1	11/1	12/1
district No. 1~4	...	7/16	9/15	11/15	.....	
		7640799m ³ data of effective water in September		6728188m ³ in November		
No. 5~8		8/16	10/15	.....		
			6688355m ³ in October			
Corrected effective amount of water in September is $7640799 \div 4 + 6688355 \div 2 + 6728188 \div 4 = 6936424.3 \text{ m}^3$						

- ・ 9月の有効水量は1～4区域の8, 9月の値であるから, 8, 9月に2等分
- ・ 10月の有効水量は5～8区域の9, 10月の値であるから, 9, 10月に2等分する。

そうした上で, この2つの9月分の和をもって9月の有効水量とするようにし, その次に検針日ずれを考える。これは **Table 4** から明らかなように, 検針日が何週にもわたっているため, 9月の水量といっても, 7月第1週から9月第1週までのものから, 7月第4週から9月第4週までのものが混ざっており, これを補正するためのものである。すなわち検針日ずれが10日であれば, 全域の検針日を一律20日とし, 9月分の有効水量は7月21日～9月20日(1～4区域), 10月分の有効水量は8月21日～10月20日(5～8区域)の配水量に対応させる。例として昭和60年9月, 10月の値を検針日ずれ15日として **Table 5** に示す。

この検針日ずれを15日として, それぞれの値をプロットしたものを **Fig. 2** に示す。このグラフによれば, 配水量と有効水量の山が良く一致しており, また月の中央ということで検針員の検針方法(第一週じめ, 第二週じめ, 第三週じめ, 第四週じめの4地区を単純に平均すれば月の中央となる)とも合致しているので, ほぼ現実の姿をとらえているものと考えられる。なお, この図においては, 有効水量のみを移動平均したために, 配水量からこの有効水量を減じて求めている無効水量の値が, 細かく変動をして, 傾向がつかみにくくなった。そこで, 無効水量のおおまかな変動を探るために, グラフを平滑化する操作を施した。これは, その月の無効水量は, 両隣の月の水量の1/4ずつと, その月の水量の1/2を加えたものとなるように補正するものである。また, 無効水量のところには, 比較的変動の落ちついている昭和55年4月～昭和60年3月の平均値を目安として引いた。そして, 能代市, 男鹿市の給水実績と比較を行うため, 下段には漏水率(漏水量/配水量)を算出し, その変動を同じ時間軸で示した。

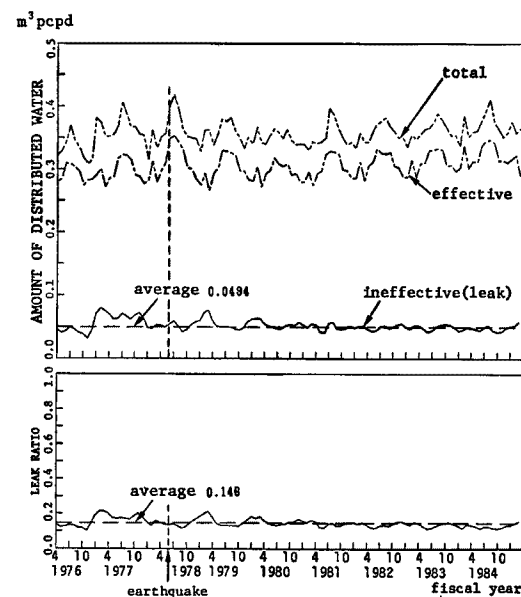


Fig. 2 Amount of distributed water and leak ratio (corrected; Sendai).

(2) 修理事件数

修理件数についての統計年報の集計は、「配水施設、給水装置修繕工事件数」として月毎に記録されているので、これをそのまま用いる。ただし、この中味はほとんどが給水装置の件数であるから、これを配水管の敷設延長で正規化することは一見矛盾しているように思える。しかし、給水管の敷設延長を算出することは煩雑すぎて不可能であるし、配水管の修理件数だけではその傾向がつかめないで、ここでは配水管の単位長さ当り、その支線としての給水管の工事件数というように、1つのトレンドとして考える。また、この中には有料工事件数という項が含まれ、これは工事に要した費用を発注者本人が支払った工事（地下鉄工事等の公共企業体が配水管を壊した場合など）の件数なので、これは除外し、あくまで不可抗力で破壊したものだけを取り扱う。こうして得たデータを **Table 6** に、そしてこれを **Table 2** で推定した配水管の敷設距

Table 6 Number of repairs of buried pfpes (distribution & service; Sendai)

	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar
1974	1229	1136	1193	969	1539	1049	1127	1337	1229	1207	881	993
75	846	598	559	829	665	717	721	753	940	1495	1148	819
76	719	734	857	761	739	775	697	781	917	5228	2296	1242
77	817	847	856	995	952	878	890	871	788	774	1462	961
78	838	1070	1646	1671	1192	1148	1096	1045	1197	1003	948	1143
79	898	913	1023	942	927	876	763	873	1077	877	992	1111
80	1099	910	843	965	1067	1297	1089	1060	1087	953	900	1162
81	989	768	930	1043	1070	1247	899	790	783	904	983	881
82	760	719	880	903	877	994	975	945	834	685	847	973
83	731	663	640	714	797	1023	844	789	830	1144	1676	1060
84	1084	863	706	920	804	830	958	901	939	1224	923	783
85	800	695	668	792	1015	876	961	847	821	735	890	818

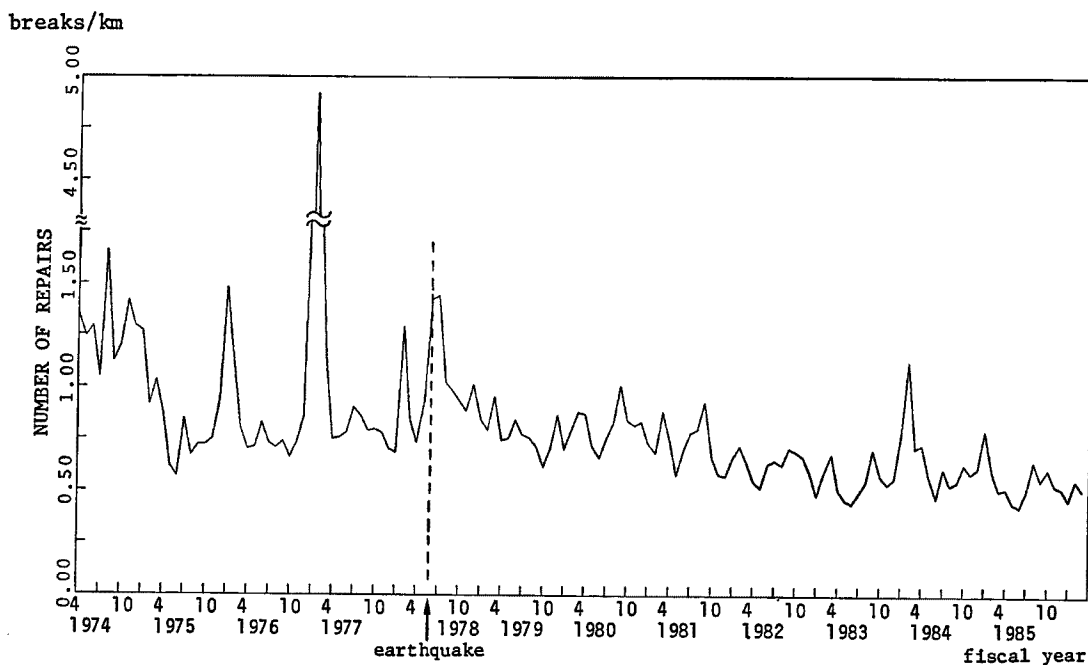


Fig. 3 Number of repairs of buried pipes (Sendai).

Table 7 Repairs of leaks found out by leakage-detection teams Sendai)

	Total # of repairs(a)	from leakage survey(b)	proportion (b/a)
1974	13959(125)	842()	6.0%
75	10900(93)	1005(7)	9.2%
76	15746(93)	1051(3)	6.7%
77	11091(80)	1171(14)	10.6%
78	13997(177)	1576(35)*	11.3%
79	11272(132)	1169(18)	10.3%
80	12432(71)	1132(8)	9.1%
81	11287(74)	1167(13)	10.3%
82	10392(23)	975(17)	9.4%
83	10911(166)	833(7)	7.6%
84	10935(178)	1035(21)	9.6%
85	9918(608)	814(6)	8.2%

• Numbers in parentheses indicate distribution pipes

*The # of leaks found out by the leakage-detection team immediately following the 1978 Earthquake is 288(24)

離で割り、配水管 1Km 当たりの修理件数としてプロットしたものを Fig. 3 に示す。昭和 52 年の 1～3 月には修理件数が非常に突出しているが、これは異常寒波に見舞われたことが原因である。

参考として、仙台市水道局は日頃から漏水調査を実施しており、年間に配水管の敷設延長をふた回りすることを目標に、漏水の早期発見に努めている。従って、配水施設、給水装置工事件数の中にも、この漏水調査により発見された件数が毎年およそ 1,000 件ほど含まれており、これは、全体の修理件数の 1 割程度に相当する。この件数と比率を Table 7 に示した。水道局の担当者のお話では、上水道業務も「経営」であり、漏水防止調査をするか、ある程度の漏水にはかまわず給水するかは結局はコストバランスの問題であるとのことであった。その意味で、仙台市は、比較的水を得るのにコストがかかるので、普段から修理件数が他の都市（例えば、男鹿市など）を比べて幾らか多めになっている。

(3) 修理に要した費用

このデータについては、安達²⁾ が能代市の被害調査を行った際には、修理伝票をひとつひとつ確認し、集計してゆくという作業を行ってデータを収集したのであるが、仙台市の場合には規模が大きく、同様の調査を行うことはできない。ここでは、仙台市水道局の年度毎に集計された修理費用についての資料に基づいて、解析を行う。途中で会計決算上の記載法の変更があったため、12 年間一貫して比較できるのは材料費の記録のみであるが、これを Table 8 に示す。なお、12 年間にわたる物価変動の影響を除去するため、消費者物価指数（総合品目）の値を記し、これで正規化したものを Fig. 4 に示した。

Table 8 Cost of repair materials for water distribution pipes (Sendai)

	net cost	price index	corrected cost
1974	10368	1.000	10368
75	6704	1.118	5996
76	14247	1.222	5486
77	11185	1.321	8467
78	9335	1.371	6809
79	18566	1.420	13075
80	13461	1.534	8775
81	18687	1.590	11753
82	16621	1.652	10061
83	18893	1.683	11226
84	29651	1.719	17249
85	29911	1.755	17043

million yen

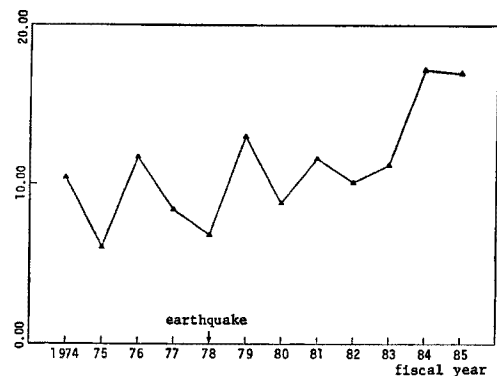


Fig. 4 Cost of repair materials for water distribution pipes (Sendai).

2.3 考 察

(1) 無効水量

Fig. 2 によれば、地震直後に無効水量が著しく増大するといった事態は全く現れておらず、その経年的影響に至っては、ほとんど見られない様である。やはり、大都市だけに母体が大きく、局所的な地震被害の影響は都市全体としては明確に現れてこないようである。加えて、仙台市水道局⁸⁾が推定した、地震による6月12日から6月30日まで漏水量は、553,290m³であり、これは53年6月の配水量 7,152,386m³ のわずか7.7%でしかない。これでは地震被害の経年的影響は現れないわけである。

この結果について、水道局の担当者は、「配水幹線が被害を免れたことが漏水を防止できた大きな要因であった」と指摘しておられた。そこで、後に述べる能代市、男鹿市との比較という観点から、配水管全体における口径 150mm 以上の管路が破壊した場合と、その敷設距離についてそれぞれ調べ、単位長さ当りの破壊率として Table 9 に示した。これによれば、それぞれ都市の被害の特徴がはっきりと表れている。仙台市においては、ほとんどが 150mm 以下の管の被害であり、能代市においては、どちらの被害率も大きい。また男鹿市においては、総被害率は仙台市に近いが、大口径管が被害を被っている。

(2) 修理事件数

Fig. 3 によれば、修理事件数の推移に関しては、地震の影響が現れていることが分かる。地震発生後にピークを迎えた件数が翌年の4月頃まで尾を引いており、約10ヶ月をかけて下降している様である。S51 と S53 には、いずれも冬期に件数が増大しているが、地震直後のピークはこれらとほぼ同じ高さであるのに対し、ピークの右側のすそ野が、冬期の場合と異なり幾分広くなっており、これが地震被害の経年的影響を表すものと考えられる。

漏水量がほとんど変化しなかったのに対し、件数は幾らかでも増加したことは注目に値する現象であった。この解釈については、次のように考えた。まず、仙台市の給水系統がブロック給水体制をしいており、この的確な仕切弁操作により、大口径の配水管からの漏水を未然に防げたことが、漏水の防止に役立った。加えて、地震後に仙台市水道局が特別に実施した漏水防止調査⁸⁾により、288件の地下漏水が発見され、推定約 16,400 m³/日の漏水量を防止できたこと（本研究で用いた補正を施して推定した53年6月の無効水量は約 31,000 m³/日であり、もしも漏水防止調査がなければこれがおよそ1.5倍になっているはずである）も漏水を防止できた大きな要因となった。そして、この他に、日頃から行っている漏水調査によっても、地震後には、本来ならば発見がもっと遅れていたであろう数多くの地下漏水が発見され、修理された。こうして漏水量はほとんど増加しなかったのに対し、その修理の多さが、件数の増加になって現れたのであろう。

Table 9 Number of distribution pipe breaks and their occurrence rate

1. Sendai

(a) Leaks observed on ground surface

diameter of pipe	150mm～	～150mm	total
	16	199	215

(b) Leaks found out by leakage-detection teams

diameter of pipe	150mm～	～150mm	total
	9	35	44

total

diameter of pipe	150mm～	～150mm	total
total length(m)	580821	562567	1143388
# of breaks	25	234	259
break occurrence rate (breaks/km)	0.04	0.42	0.23

2. Noshiro

diameter of pipe	150mm～	～150mm	total
total length(m)	49397	96475	145872
# of breaks	86	380	466
break occurrence rate (breaks/km)	1.7	3.9	3.19

3. Oga

diameter of pipe	150mm～	～150mm	total
total length(m)	65137	107553	172690
# of breaks	59	49	108
breaks occurrence rate (breaks/km)	0.92	0.46	0.63

(3) 修理費用

修理費用については、年度毎のデータしか得られなかったが、この Fig. 4 を見る限りでは、地震と関連づけられるような顕著な傾向は無いようである。出庫した時点で会計に計上するので、タイムラグが生じるということも無く、S54 に上昇しているものも、特に地震と関連があると考えられない。

以上の仙台市の調査結果については、次章で他の都市、特に資料の整っている能代、男鹿の各都市との比較という観点から考察を行ない、いくつかのこれを補足するデータを示すことにする。

3. 埋設管路の震害の経年的影響に関する比較

3.1 概 説

上水道管路が地震被害を受け、重大な機能低下に及んだ場合には、まず第一に、不便さを強いられている市民生活が一刻も早く回復するように、応急復旧の後、速やかに全域に通水を再開することが急務である。そして、細かな漏水箇所についてはその後通水しながら徐々に修理していくという体制がとられることになろう。従って、地震後、市民の側から上水道が一応の復旧をみた時点でも、給水する側から見るとまだ数多くの破壊箇所が残存しており、多少の漏水は覚悟の上で給水しているという状態が予測できる。

Fig. 5 は、1983年日本海中部地震で被害を受けた能代市上水道システムについて、地震後の復旧過程を配水量の日変化から示したものである。砂地盤の液状化により大きな被害を受けた臥竜山浄水系統については断水して修理を行ない、地震後13日を経た6月8日に通水を再開した。そして、6月10日には全市通水に至ったが、その後も破壊箇所の修理を続け、一応の修理が完了したのは6月末であった。しかしながら、この時期においても、配水量は地震以前の平均値（約1.0万t/日）のおよそ6割増しとなっており、未発見の漏水箇所がまだ数多く残っている状況が推察される。

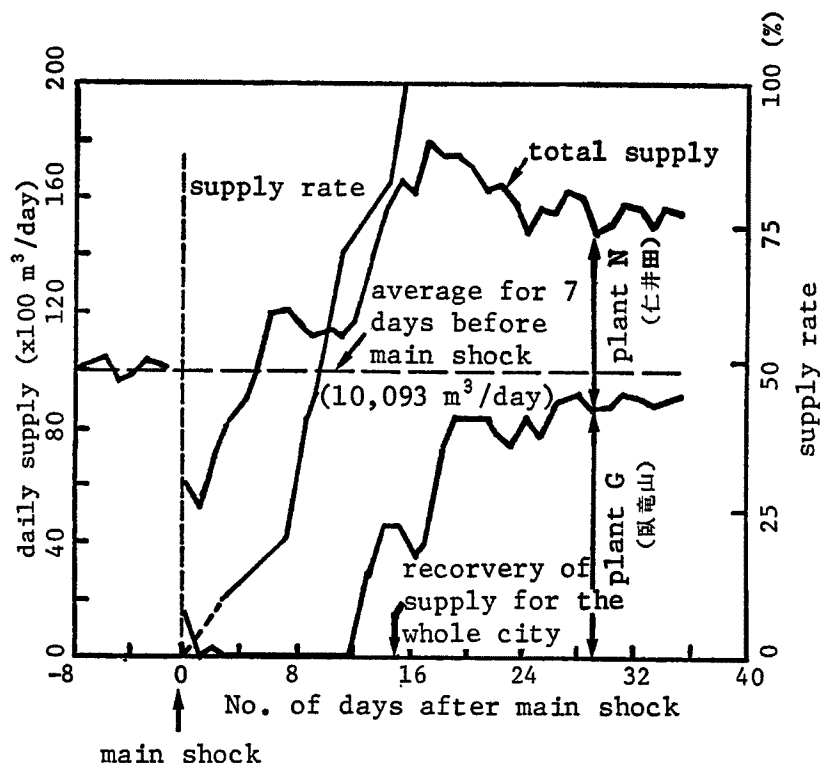


Fig. 5 Record of water supply for Noshiro City before and after the 1983 Nihonkai-Chubu Earthquake.

地震被害が完全に復旧した状態とは、この配水量が地震以前の値にまで戻った時であるから、この後、破壊箇所がどのように修理され、配水量がどのように減少してゆくかを追跡することは、地震被害を総合的に評価する上でも非常に興味深いものである。

このような経緯から、最近、地震被害を経年的にとらえる調査が注目されるようになった。本章では、安達²⁾、Isenberg⁴⁾、亀田⁹⁾の研究についてこれを紹介するとともに、第2章で発表した仙台市の被害の内容との比較という観点から考察を行う。

3.2 能代市

1983年日本海中部地震による能代市配水管の被害は466件あり、大規模な噴砂現象が起きた市の西部の沖積平野において、多くの破壊が生じた。その内容は、石綿管での管体の切損、塩ビ管では異形管部での離脱。喰込み、铸铁管では継手部の抜け、破損などが多かった。

そして、安達²⁾による経年的影響を考慮した能代市の地震被害調査結果を Figs. 6, 7 に示す。Fig. 6 は配水量、有効水量、漏水量を給水人口と1月の日数で割り示したもの、Fig. 7 は配水管の単位長さあ

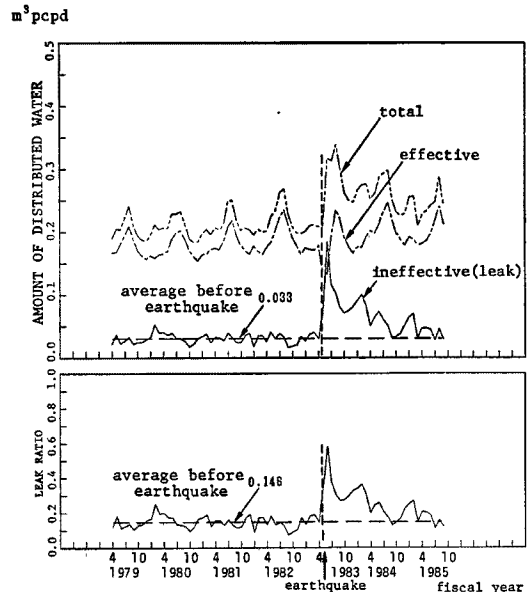


Fig. 6 Amount of distributed water leak ratio (Noshiro).

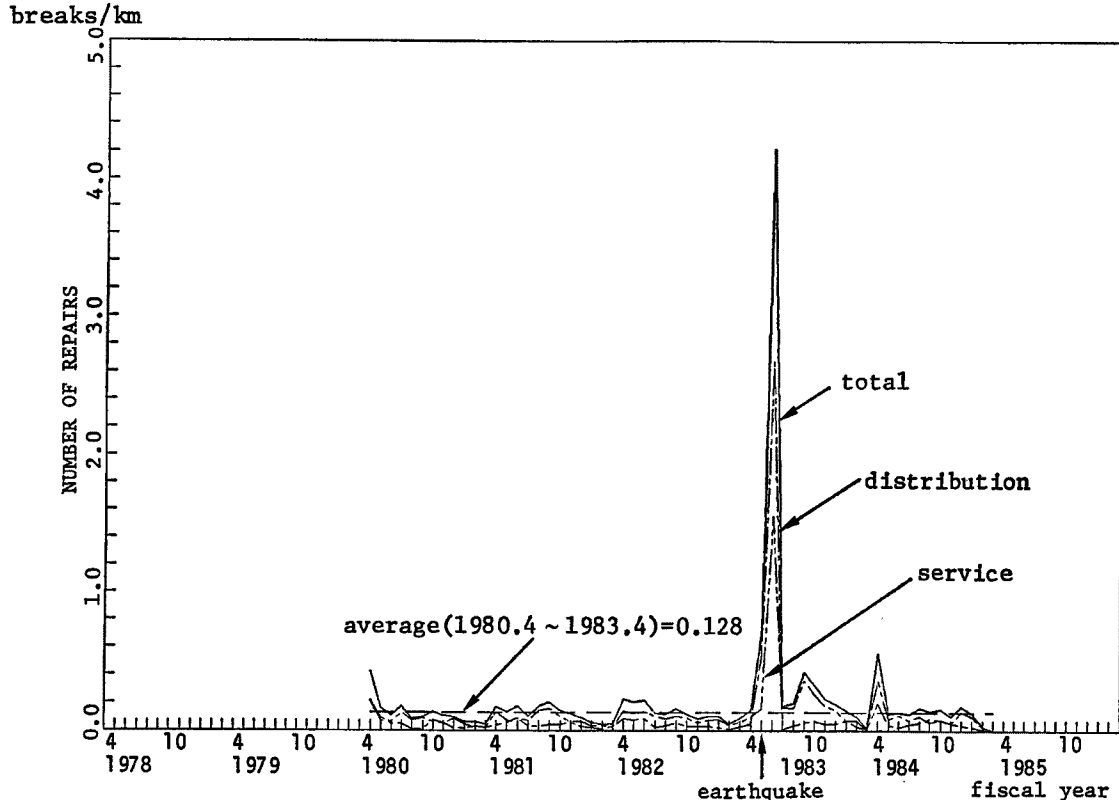


Fig. 7 Number of repairs of buried pipes (distribution & service; Noshiro).

たりの、配水管と給水管の修理件数である。

Fig. 6 によれば、有効水量については、地震で断水した時には激減しているが、その後すぐをもとの季節変動をとり戻している。しかし、漏水量は地震発生後一気にはね上がってから、地震以前の値にまで戻るのはおよそ2年を要し、その間にも季節的に変動を示しながら下降している。これが、まさしく経年的影響の現れたグラフであるといえよう。また、漏水率について見ても、その変動は基本的には漏水量と同じであるが、地震後の漏水率が60%にも及んでいることが分かる。

ただし、Fig. 5 で紹介したように、能代市の場合、5月26日の被災後断水して修繕を行ったため、このグラフにおいても無効水量のピークは6月から7月にかけて表れている点は、次に述べる男鹿市とは異なる点である。

修理件数に関しては、7月、8月に一旦収まったかに見えた件数が9月、10月にかけてまた上昇しており、6月末に修理が一応の完了をみた後にもなかなか漏水が減少しないため、また修理を行ったのではないかとこの状況が推察できる。(Fig. 7 参照)

3.3 男 鹿 市

日本海中部地震で男鹿市上水道配水管が被災した被害は108件であり、被害状況は石綿管や塩ビ管の継手、または異形管部での離脱、食い違いが多かった。そして、安達²⁾による調査結果は Figs. 8, 9 に示される。

Fig. 8 は1人あたり月平均1日量の給水実績であるが、こちらの無効水量は5月にピークを迎えたのち、数箇月で地震以前の状態にまで戻っており、この時点で地震の影響は消失したかに見える。しかしながら、翌年の冬にかけてまたピークを迎え、その後変動をしながら段階的に下降している。昭和59年の1月から3月といえば、仙台市においても修理件数が増大した時であるから、この中には寒波による被害も含まれてはいるだろうが、他のピークの大きさと比較してみれば、ここに地震の影響がまだ尾を引いていることは明らかと思われ、地震による破損が冬場のピークとして現れてきたものと考えられよう。また、漏水率を先の能代市と比較すると、能代市ほど大規模な液状化は発生しなかったこの男鹿市では、直後の漏水率はおおよそ35%と、だいぶ低くなっていることが分かる。

Fig. 9 の修理件数に関しても、ほぼ同じことが言える。地震後一旦落ちついた件数が59年の冬にピークを迎え、次の60年の冬にもピークを迎えている。これらは冬期のピークであるから、寒波により増加したものであろうが、ピークの高さが他より幾分高くなっている事を考えると、この中には地震による破損箇所が含まれており、地震の経年的影響が現れているものと注目される。

3.4 Coalinga 市

Isenberg⁴⁾ が発表した、Coalinga 地震 (1983. 5. 2) で被災した Coalinga 市の地震前後数年間にわたる被害調査結果を Fig. 10, Fig. 11 に示す。Fig. 10 は Coalinga 市土木部における、上水道管路の破損箇所、漏水箇所率の年度毎の推移であり、細い実線は地震以前5年間の平均値を示している。

同市は、被災後も特別な漏水調査、破壊箇所の修理などは行っておらず、地震の際に破損した漏水箇所が、

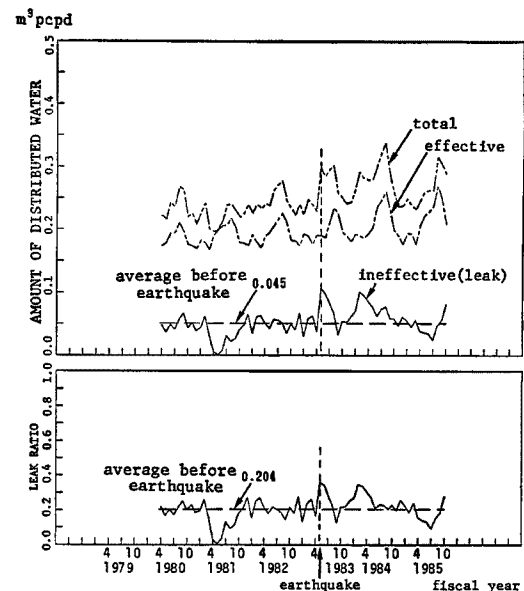


Fig. 8 Amount of distributed water and leak ratio (Oga).

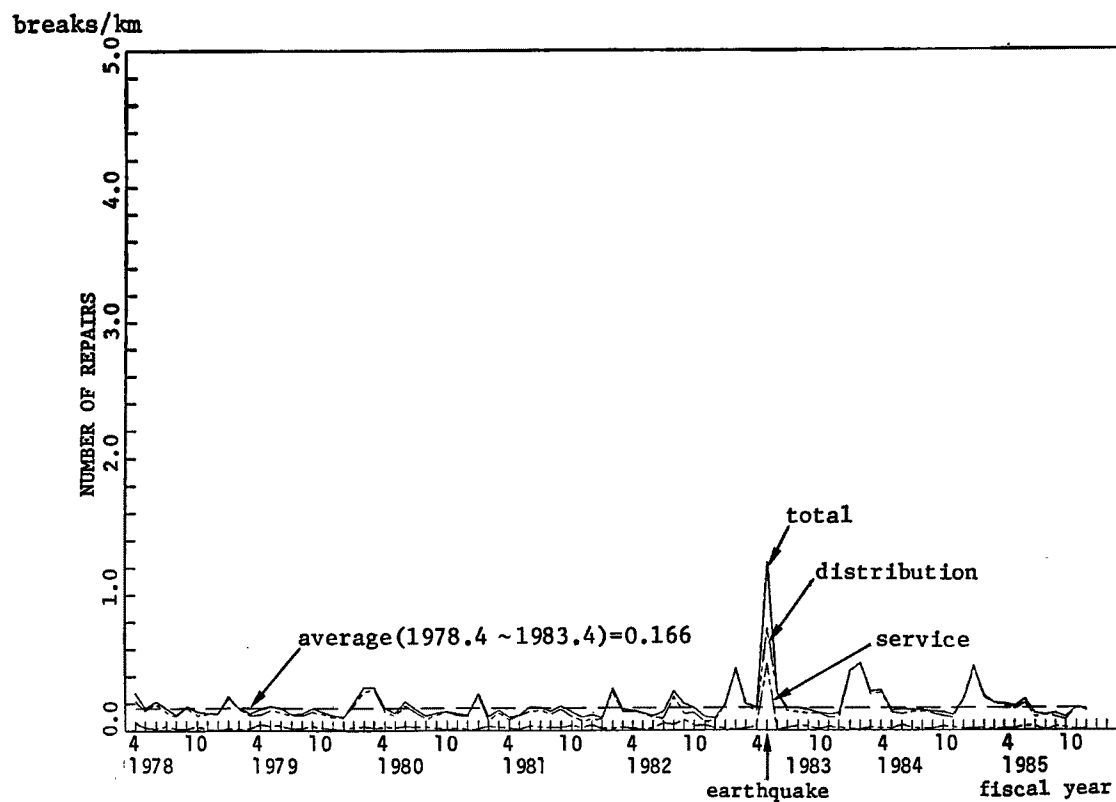
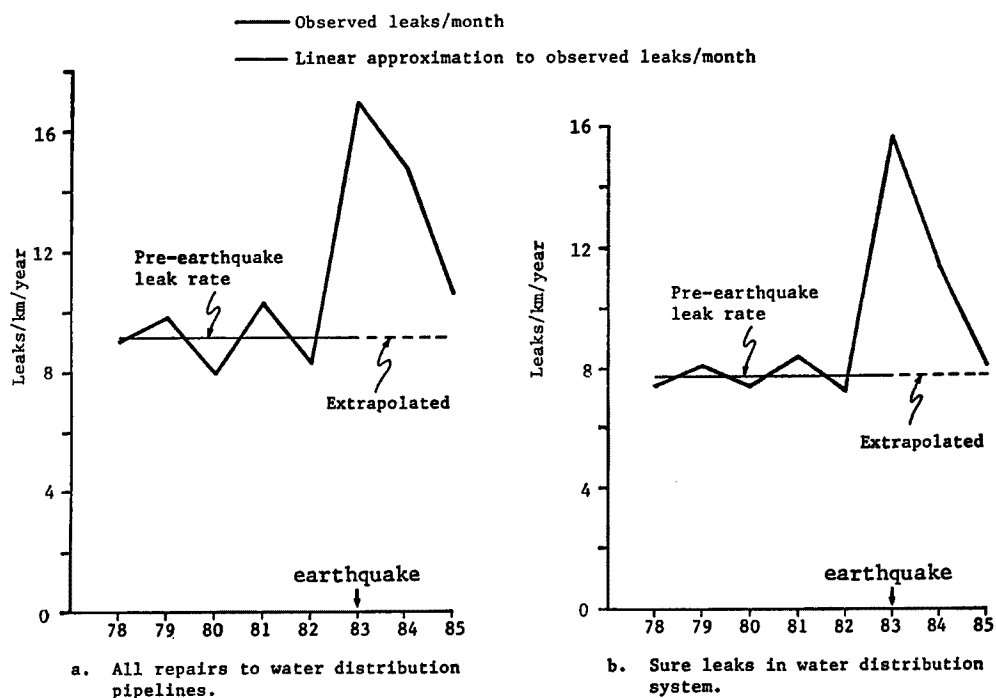


Fig. 9 Number of repairs of buried pipes (distribution & service; Oga).

Fig. 10 Leaks in water distribution system, City of Coalinga⁴⁾.

時を経ても頻発している状況がこの図からうかがえ、地震後2年たった時点でも、まだ地震以前のレベルにまで戻ってはいない。

Fig. 11 は埋設管の敷設更新に要した 財政支出の年度毎の推移であるが、地震により増大した支出額は、その後も高い値を取り続け、地震後4年を経た1986年にも、まだ地震前の倍以上となっていることが分かる。

これらは、仙台市、メキシコ市のような大都市ではなく、地震対策、復旧戦略の整っていない中小都市での事例として、わが国においても地方都市、町村などの被害を考える際の重要な参考となるであろう。システム機能の復旧過程を、より把握できるような、漏水の状態や修理の内容を示しうるデータが是非望まれる。

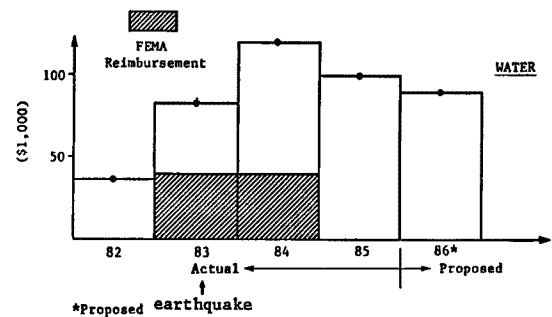


Fig. 11 Capital expenditures for replacing underground pipeline systems at Coalinga⁴⁾.

3.5 メキシコ市

1985年9月19日に発生したメキシコ地震は、いまだ記憶に新しいところであるが、この地震によりメキシコ市上水道システムが破った被害は、導水管で34箇所、主要配水管で167箇所にあんだ。加えて、口径の小さな2次配水管（主に石綿セメント管）には、地震後2箇月までに約7200箇所の被害が発見され、全市通水に至るまでには40日もの期間を要した。これらの被害は、ほとんど、継手部が相対変位により開いたり、衝突により壊れたものであった。

しかし、メキシコ市中心部は地盤沈下の激しい地域であり、漏水被害が日常よりかなり存在するようで、こうした補修方法に慣れていたことと、補修器具のストックをかなり保有していたことなどから、修復活動は比較的スムーズに行われたようである。

m^3/sec

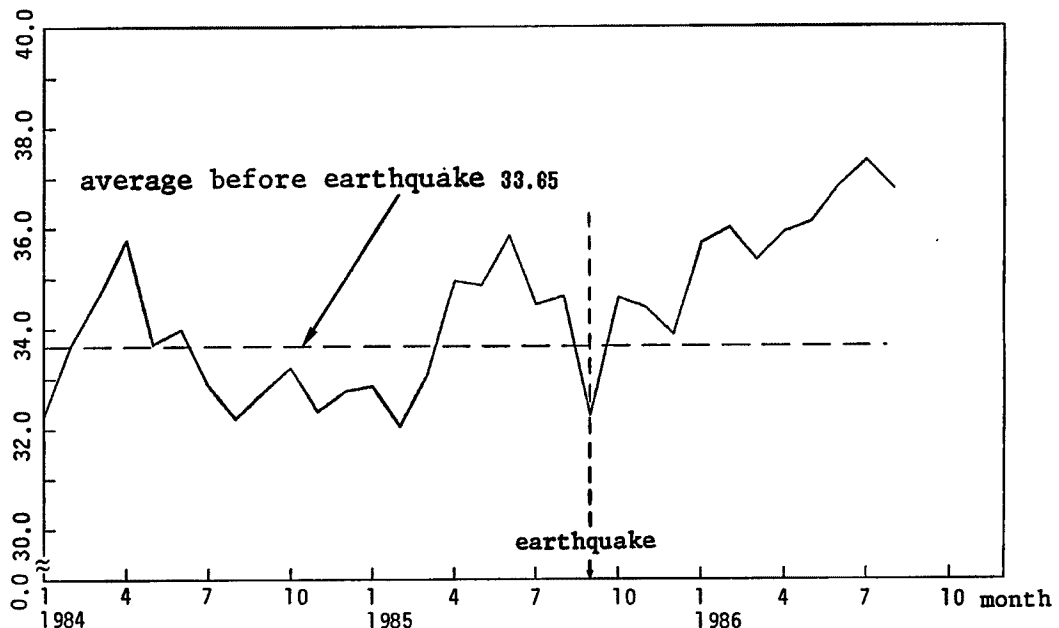


Fig. 12 Variation of in-take amount from source wells (Mexico City).

このメキシコ市上水道システムの経年的被害を推定する指標として、水源の井戸からの取水流量の推移を亀田⁹⁾が発表した。これを Fig. 12 に示す。雨季、乾季により季節変動していた取水流量が、地震後ずっと高い値をとり続けている状況が図よりうかがえる。これは、地震後に新たな水源を確保し、給水に努めているためであるが、この上昇した水量は、需要が増加したということではなく、漏水であることは明らかであろう。

データが地震後1年分しかないので、この後、漏水がどのように減少してゆくかは不明であり、これは是非知りたいところであるが、メキシコ市においても、こうした地震の経年的影響が現れていることは、注目に値する現象である。

3.6 相互比較

これまでに紹介した各都市について、上水道システムの規模と、事業内容、そしてその地震被害をまとめて Table 10 に示した。給水人口わずか6600人のコアリング市から、1800万人のメキシコ市まで、その規模はさまざまであり、震害の経年的影響を広く考察するという本研究の目的にかなった各都市の顔ぶれである。

Table 10 Earthquake damage statistics of water supply systems

	Noshiro(能代)	Oga(男鹿)	Sendai(仙台)	Coalinga Calif	Mexico City
①earthquake	1983 Nihonkai-Chubu (1983. 5. 26) $M_J=7.7$		1978 Miyagi-ken-oki (1978. 6. 12) $M_J=7.4$	1983 Coalinga (1983. 5. 2) $M_L=6.5$	1985 Mexico (1985. 9. 19) $M_s=8.1$
②served population	48,000	28,000	624,000	6,600	18,000,000
③water consumption immediately before earthquake	$1.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ /day (distributed) (0.21m ³ pcpd)	$0.68 \times 10^4 \text{ m}^3$ /day (distributed) (0.24m ³ pcpd)	$21.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ /day (distributed) (0.36m ³ pcpd)	—	$300 \times 10^4 \text{ m}^3$ /day (intake) (0.17m ³ pcpd)
④total length of distribution pipes	145km	173km	1,144km	42.8km	12,500km
⑤proportion of pipe material	ACP 48% PVC 28% CIP 5% DCIP 16% SP 1% PP 2%	ACP 56% PVC 29% CIP 6% DCIP 6% SP 6%	ACP 4% PVC 28% CIP } 62% DCIP } SP 6%	ACP 48% PVC 1% CIP 32% WIP 12% RC 7%	ACP 96% RC } PC } 4%
⑥number of distribution pipe breaks (those found out immediately after earthquake)	461	108	215(259)*	130	7,400
⑦break occurrence rate	3.2(breaks/km)	0.62	0.19(0.23)*	3.1	0.59
⑧type of major ground failure	extensive liquefaction	local liquefaction	block failure and dislocation in cut-fill land developed for residential areas	—	settlement and large deformation of soft ground
⑨period needed for functional restoration	19days	6days	8days	—	40days
⑩duration of long-term effect from # of repairs	1year	1year	about 10 months	2years	—
⑪duration of long-term effect from leak rate	2years	2years	no effect	—	more than 1year

*include the leaks found out by the leakage-detection team

しかし、規模の大小はあっても、給水人口、配水管敷設延長で除し、正規化したものを比べると、共通点が多く見いだせる。

⑥の配水管破壊箇所数を見ると、メキシコ市における7400箇所の被害というのも、男鹿市の被害とその程度はほぼ等しいものであり、液状化が広く発生した能代市の被害は、それらより、格段大きなものであったことが読みとれる。また、仙台市の被害はこれらの中では、もっとも軽微であったことが分かる。

⑤の管種比率について見ると、石綿セメント管について、顕著な特徴が表れている。メキシコ市においては、配水管のほとんどが石綿セメント管であり、また仙台市においては、この比率がわずか4%しかないことである。宮城県沖地震⁵⁾や日本海中部地震¹⁾の際に、石綿セメント管が大きな被害をうけたことから考えて、仙台市において、この石綿管の比率が低かったことは、被害が軽微であったことの、大きな要因であることは間違いないと思われる。

メキシコ市では、配水管のほとんどが石綿管であるが、先にも述べたように、工員が修繕方法に熟知しており、かつストックを保有していたことなどから、被害の規模が大きかった割には、比較的短期間で復旧できたものと考えられる。

こうしてみると、仙台市の上水道システムがおかれた環境は、他と比較して優秀なものであり、また地震後の漏水調査など、ソフト面での対応もゆき届いていて、震害が速やかに収束しえたのも、理解できる結果であったと考えられる。

しかし、その他の都市について見れば、上水道システムの規模、地震被害の大小はあっても、いずれも地震の経年的影響が現れており、これが消失するまでには数ヶ月から数年間を要していることが明らかになった。これは、まだ幾つかの事例から得られた結果であり、その都市の地盤特性、気候条件、そして上水道事業の経営状況も様々であるから、一概に述べることはできないだろうが、今後、地震被災時における、有効で迅速な復旧戦略を講じる場合には、本研究で調査を行った「地震被害の経年的影響」がほぼ必ず現れてくるということを念頭において、対策を練ることが必要となってくるのではないだろうか。

そういった意味で、今回調査を行った仙台市の例は、経年的影響はほとんど現れなかったが、むしろ地震の経年的被害を速やかに収束させられた事例として貴重な意味合いをもつものと思われ、今後速やかなシステム復旧対策を練る上での模範的ケースとなると考えられる。

4. 結 論

本研究は、都市震害の一側面としての、上水道管路網の地震被害について、その経年的影響に着目して調査を行い、都市施設の耐震問題を講じる上での、基礎的資料を作成したものである。

本研究により得られた結論を次に要約する。

- (1) 1978年の宮城県沖地震で被災した仙台市上水道システムについてその被害を長期的にとらえるため、地震前後数年間の漏水量、修理件数について調査を行った。その結果、地震の経年的影響は、漏水においてはほとんど見られず、修理件数においても数ヶ月で消失したようであった。この原因としては、
 - ①震災を被った範囲に対してシステムの母体が大きく、地震の大きさも中程度であったことから、被害率が小さかったこと。
 - ②管種、継手、敷設状況などにも配慮が尽くされ、施設面での地震対策が十分行われていたこと。
 - ③地震後の仕切弁操作、漏水調査など、ソフト面での復旧対策も万全であったこと。
 などが挙げられる。
- (2) 他の罹災都市（ロサンゼルス市、能代市、男鹿市、Coalinga 市、Mexico 市）についての調査結果を照らし合わせてみると、仙台市の例を除いては、いずれも地震の経年的影響が現れており、地震以前のレベルにまで戻るのに数年間を要していることが分かった。
- (3) 地下埋設管が地震に見舞われた場合には、地下漏水が発見されるのに時間のかかることや、管の老朽化

が促進されることにより、こうした地震の経年的影響が、ほぼ必ず現れてくるものと考慮した上で、有効で迅速な復旧戦略を講じることが重要となってくる。その意味で、仙台市の例は1つの模範的ケースであった。

今後の課題としては、都市耐震問題の基礎的資料を充実させるという本研究の目的からして、もっと数多くの罹災都市のデータを収集し、発表していく必要があるだろう。また、何らかの焦点から、各々を比較し、定量的に議論をすすめていければ、今後一層役立つ情報になると思われる。加えて、過去の調査にとどまらず、将来の埋設管敷設に有効となる耐震設計法や、復旧戦略を提案していくことが本研究の今後の方針であると考えている。

謝 辞

本研究をとりまとめるにあたりまして、仙台市水道局工務部配水課の掘寛士主幹、経営管理室の菊池靖様には、資料収集の際からその後の解析に至るまで御協力を頂き、貴重な御助言を数多く頂きました。格別の感謝の念を込めてここに記させていただきます。なお、本研究における数値計算には、京都大学大型計算機センターの FACOM-M382/VP200 システムを用いたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 亀田弘行・杉戸真太：能代市水道管被害の分析，1983年日本海中部地震による災害の総合的調査研究，昭59. 3, pp. 308-313.
- 2) 安達徹：経年的影響を考慮した水道埋設管の地震被害の評価に関する研究，京都大学卒業論文，昭. 61. 2
- 3) 亀田弘行・杉戸真太・安達徹：水道埋設管路網の震害の経年的影響，第5回自然災害科学会，昭. 61 10, pp. 69-70.
- 4) J. Isenberg, "Post-Earthquake Performance of Pipelines in Coalinga," Feb. 1986
- 5) 片山恒雄・増井由春・磯山龍二・基内郁郎：1978年宮城県沖地震による都市供給施設の被害と復旧，生産研究第31巻第4号抜粋，昭. 54. 4, pp. 212-219, pp. 524-531.
- 6) Kameda, H., Goto, H., and Kasuga, T., "System Reliability and Serviceability of Water Supply Pipelines under Seismic Environmental," Proc. 8th World Conference on Earthquake Engineering, Vo. VII, pp. 491-498, July, 1984.
- 7) 亀田弘行：地震被害と復旧技術，土木学会誌，昭61. 4, pp. 24-29.
- 8) 仙台市水道局：1978年宮城県沖地震による被害とその対策の記録，昭53. 10.
- 9) 亀田弘行：未発表資料