

水道管の震害特性

Special Characteristics of Seismic Damages to Water Pipes

久保 慶三郎*・片山 恒雄*

Keizaburo KUBO and Tsuneo KATAYAMA

1. まえがき

地下埋設物は都市の近代化につれて多様化し、現今では水道管、ガス管にとどまらず、大量交通機関としての地下鉄トンネル、沈埋トンネルのほか、通信地下ケーブル、送電用パイプ、また油輸送用のパイプラインなどが都市の重要な施設であり、これらの施設を地震から防護することは非常に重要となってきた。

地下構造物の多様化、重要性の増加にも拘らず、これらの構造物の地震時挙動の解明、耐震設計法の確立は、数年前に開始されたといつて過言ではなく、水道管、ガス管、地下鉄トンネルなどはよい耐震設計法もないというのが現状であろう。

その上、地下構造物の耐震設計の確立が困難なのは、本誌の「都市構造物の耐震強度の調査研究」でも述べたように²⁾、地下構造物の耐震設計には他の構造物の設計に用いられている、いわゆる地震荷重の考え方が適用できないことである。このような現状をふまえて、本研究においては、第一に震害特性、地震時挙動の研究から開始することにした。

震害特性の調査は資料の豊富な水道管が主として調査対象に選ばれて行われた。水道管に震害を発生させた地震のうちで、その地盤についての調査報告書の刊行されている地震を選んだ。関東地震 (1923 年)、福井地震 (1948 年)、新潟地震 (1964 年)、十勝沖地震 (1968 年) およびサンフェルナンド地震 (1971 年) について調査を行った。この調査結果は既に「生産研究」などに発表した³⁾が、関東地震の東京市における震害と地盤との関係については、昭和 49 年度に新しい手法で調査した。また、ロスアンゼルス市の水道管も再調査し、地表の加速度と単位長さ当りの水道管の破損との関係を求めた。この 2 つの調査結果は第 2 節、第 3 節で述べる。

電源と被害地との距離が短い場合、すなわち福井地震とサンフェルナンド地震では、水道管の方向によって震害率が異なることが判明した³⁾。両者の地震では偶然にも被害をうけた水道管の埋設区域の北に震源 (福井地震では 5 km、サンフェルナンド地震では 10 km) が位置し、共に南北方向の管が東西方向の管より高い震害率であった。遠距離地震による震害の特徴としては、十勝沖地震の青森市水道のように、地盤の硬軟が震害率を高く

していることで、硬い地盤から軟弱地盤に移つる過渡区域で震害率が高くなっている。この事実は岡本名誉教授も関東地震による東京の水道管の震害の分析結果として述べられていることとも一致する¹⁾。新潟地震の水道管の震害は砂の液状化とそれともなう地盤変位によるもので、この点では他の例と異質の震害であるが、砂の液状化が如何に震害を大きくするかを示す好例であろう。

水道管の震害の 1 つの特徴は曲げひずみによるものより、軸方向ひずみによる抜け、フランジ破損が多いことであるので¹⁾、硬い地盤から軟い地盤へ通っている水道管の地震時の軸方向変形を 2 次元のシミュレーションモデルを用いて解析した。あまり多くの場合について計算がなされたわけではないが、軸力の最大は両地盤の境界付近に生じること、また両地盤の弾性係数の差が大きいほど、応答軸力も大きいことが明かにされた。

以上が過去の調査研究成果の概要であるが、以下には水道管の震害率と地盤構成および地盤加速度との関係について述べる。

2. 水道管震害と地盤構成との関係

水道管の震害が地盤と密接な関係にあることは上述の研究結果よりも明かであるが、地盤の垂直的な構成と同時に、平面的な構成による影響の調査も重要な研究課題と考えられる。この問題を定量的に研究するため、比較的まとまった形で震害報告の存在する関東地震の際の東京の水道について調べた。まず被害個数を調査し、人口密度が配管延長に比例すると仮定して、単位面積当り (=1 km²) の震害係数を決め、これと数量化を行った地盤構成との関係を求めた。人口密度に関する仮定は大変大胆な仮定であったが、単位面積当り地震当時の配管延長についての資料が皆無であったことと、単位面積当りの配管延長には明かに地域的に差があることのために、他の方法がなかったので、止むを得ず上記の仮定を用いた。

配水管の震害総数は 381 ケで、1 km メッシュ内の震害数を求めた。最も多い震害数は 1 区画 20 ケ所であった。

耐震工学的に考えた地質上の特性は、主として地表面に近い層の特性をさし、地表層の深さ、硬さ、成層状態などが含まれるが、今回の調査においては、地表層の地質を総合的に判断し、平面的拡がりの方を重視したの

* 東京大学生産技術研究所 第 5 部

で、地質分類は次の4種とした。

第I種：ローム層とローム質粘土層（厚さ 10~15 m）の下にしまった砂層のある（淀橋）とローム層（厚さ 7~10 m）の下に砂礫層のある地質（豊島，本郷）

第II種：河谷底の地盤で 5~10 m の軟かい腐蝕土，腐蝕質粘土，泥炭よりなる地質

第III種：沖積層（有楽町層）の厚さが 10~20 m で，主としてゆるい砂よりなる地質

第IV種：沖積層の厚さが 30 m 以上で，その下に軟い粘土層のくる地質

この4種の地盤種別を定量化するために、地盤種別を第I種から第IV種まで1点差で最小1点，最大4点になるように数値化した。1つのメッシュが同一種類の地盤で占められるよりは、他種の地盤と混在している例が多いので、混在した地盤の数値化を次のように行った。まず、4種の地盤が各メッシュ内で占める面積割合を読みとり、 i 点の地盤の占める面積割合を A_i としたとき、その地盤の数値 C_0 は

$$C_0 = \sum_{i=1}^4 i \cdot A_i$$

で与えられるとした。例えば $i=1$ と 4 の地盤が 1:1 で混在しているときは $C_0=1 \times 0.5 + 4 \times 0.5 = 2.5$ となる。また $i=1$ の地盤が 100% のときは $C_0=1 \times 1 = 1$ である。数値化の段階でいろいろ問題もあるが、なるべく簡単な形で数値化をはかったので、上述のようにした。

つぎに、異種地盤の混在の性質を数値化するために、

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^4 (i - C_0)^2 A_i}{2.25}$$

で与えられる σ^2 を考え、地盤の異質性と名付けた。この式は考えられるもっとも非均質な状態、すなわち $i=1$ と $i=4$ の地盤が半分づつ、一つのメッシュに混在する場合に σ^2 の値が 1.0 になるように決めた式である。しかし、もしこのように極端に種類の異なる地盤（例えば第I種と第IV種）が一つのメッシュ内に含まれているとすると、平均地盤種別の工学的意味が極めてあいまいになってしまうが、東京の場合には極端に程度の異なる地盤の含まれていることは極めて稀であったので、地盤の数値化に、平均地盤種別 C_0 と異質性 σ^2 をパラメータとした。

このようにして求められた平均地盤種別値 C_0 は 1.0 から 4.0 の範囲に存在することになるが、地盤と震害率との関係を明かにするために、地盤のグルーピングを行った。平均地盤種別 C_0 が 1.0~1.5, 1.5~2.5, 2.5~3.5, 3.5~4.0 の四つの範囲に別け、それぞれの範囲で震害率でなく、震害係数を求めた。震害率を求めなかった理由は各メッシュごとの水道管の総延長が不明で、震

害率を求めることができなかったためである。震害係数は次のようにして求めた。1つのメッシュ内の破損個数を m 、そのメッシュで配水管が布設されていたと考えられる有効面積（川などの面積を除外したもの）を A_e 、人口密度比を p としたとき、ある地盤種別グループの震害係数 α は

$$\alpha = \frac{\sum m}{\sum p \cdot A_e}$$

で与えられるとした。和算は同一地盤種別グループに属するメッシュ全体について行った。 $\sum p \cdot A_e$ で割ったのは水道管の総延長が $\sum p \cdot A_e$ に比例すると考えたからである。

地盤種別 C_0 と震害係数との関係を図1に示す。この図によると、震害係数の最も高い地域は、平均地盤種別 C_0 が 2.5~3.5 の地域であり、沖積層の最も厚い $C_0=3.5\sim 4.0$ で代表される下町の震害係数より高かった。この地域は山手台地および河谷低地が沖積層地盤に移行する境界付近より東側の、厚さ 10~20 m の沖積層を含む地域である。ついで震害係数の高いのは山手台地と河谷低地との混在する平均地盤係数 C_0 が 1.5~2.5 の地域であった。山手台地および下町の厚い沖積層地域の震害係数は全市の平均値より低い値を示した。

上述の4つの平均地盤種別グループについて、各メッシュの震害係数 $= m/p \cdot A_e$ と異質性 σ^2 との関係を求めた。この結果を図2に示す。 C_0 が 1.5~4.0 の範囲では震害係数と異質性とはあまり関係がないようであるが、 C_0 が 1.0~1.5 の範囲では異質性が大きくなると、震害係数が増加する傾向がある。 C_0 が 1.0~1.5 の地域は主として山手台地に位置する地域であり、そのうち河谷底が入り込んでいて、地盤地形の錯綜度の高い地区が一般に異質性が高い。このことは、震害係数が C_0 が 2.5~3.5 で最高になっている性質と共通したものと考

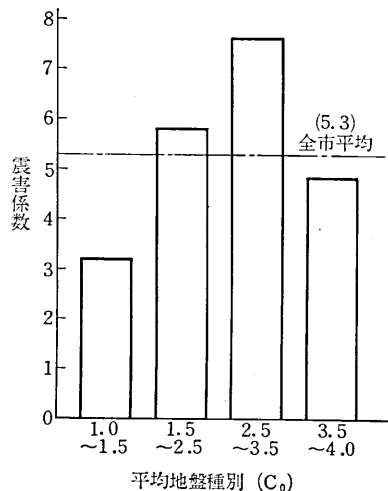


図1 平均地盤種別と破損被害

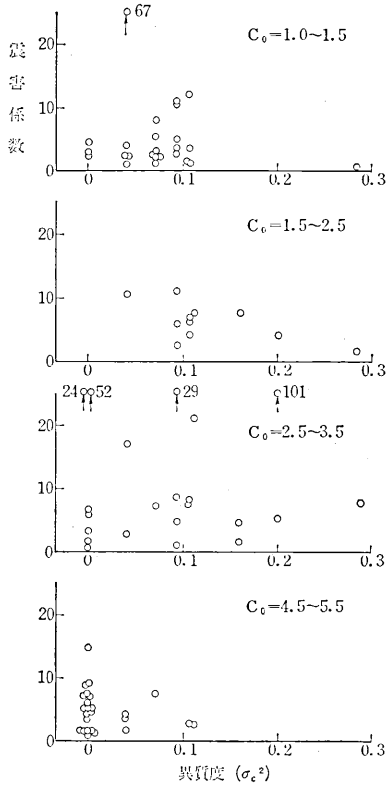


図 2 各区画の破損被害指数と異質度 (σ_c^2) の関係

えられるし、水道管の震害は硬軟両地盤の境界付近に多く発生するという性質と同一傾向であると考えられる。

3. 水道管の震害と地震動の激しさとの関係

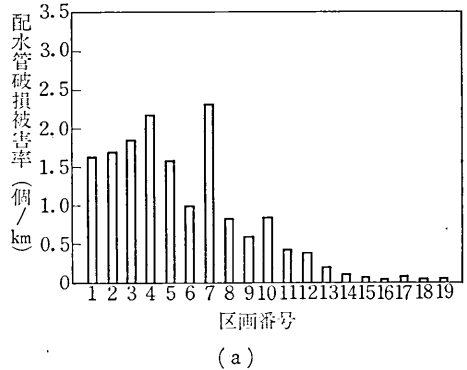
2. で述べた震害と地盤構成との関係はいろいろの仮定のもとについて計算されたものであるが、2. で述べた仮定の他に、全市で地震初は同一の強さであったという仮定がある。これは関東地震時の東京における地震動の強さの分布の資料がなかったのと、地盤種別は間接的には地震動の強さの不同をあらわしているかも知れないと考え、止むをえず全市で同一の強さの地震としたが、この点については研究を発展しなければならないので、サンフェルナンド地震における水道管の震害率と地盤加速度との関係を調査した。

1971 年サンフェルナンド地震 ($M=6.6$) は、ロスアンゼルス市北部の高架橋、病院、建物などに大きい被害を与えた。大部分が鋳鉄管であった水道管の被害も大きく、直径 2 インチ以上の配水管で約 500 ケ所が破損し、またこれと同数の給水管の破損も発生した。水道管の被害の発生した地域は市の北の境界線から南へ約 8.5 km の範囲であって、面積で比較すると、関東地震当時の東京の被災面積に匹敵する。震央の位置は前述のように市の北端から約 10 km 北にある。被害地域の地震動の激しさを加速度であらわすと、市の北端で 500~600 gal,

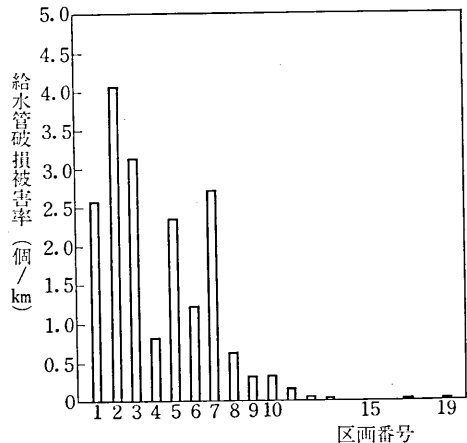
被害区域の南限で 200~250 gal と思われた。この地域の地盤についてみると、この地域はサンフェルナンド盆地とよばれる厚い土層の堆積地 (最大で 600 m) であり、沖積層と呼ばれる地層ではあるが、日本の沖積層とは比較にならない位固いものである。

水道管の被害分布の資料は、以前にサンフェルナンド地震による単位面積当りの震害率の定量的分析に用いたのと同じのもので、市の電力水道局 (Department of Water and Power) から研究用にと恵送されたものである。前回の調査では単位面積当りの震害率の分布であったが、今回は工学的意味がより明確な単位長さ当りの震害率と加速度との対応に主眼をおいて調査した。

上述の地図をロスアンゼルス市の北境界から約 480 m ごとの带状区域に分割し、各带状区域内に含まれる配水管および給水管の破損数および配水管の総延長を求め、水道管の延長当りの震害率を計算した。結果をまとめて表 1 およびこれを棒グラフであらわした図 3 に示す。区画番号 7 の位置で震害率が異常に高くなっているのは、この区域に断層が発生し、これを横切っている水道管の被害を著しく大きくしたためである。



(a)



(b)

図 3 ロスアンゼルス市の配水管被害率 (配水管延長 1 km に対する被害個数)

表 1 サンフェルナンド地震によるロス
アンゼルス市北部の水道管の被害

帯状区画番号	各区画の市域北端からの距離 (km)	配水管延長 (km)	配水管破損		給水管破損	
			個数	個数/l	個数	個数/l
1	0~0.48	14.67	24	1.64	38	2.59
2	0.48~0.96	30.97	53	1.71	126	4.07
3	0.96~1.44	28.58	53	1.85	90	3.15
4	1.44~1.92	24.16	53	2.19	20	0.83
5	1.92~2.40	27.13	43	1.58	64	2.36
6	2.40~2.88	35.12	35	1.00	43	1.22
7	2.88~3.36	33.20	77	2.32	90	2.71
8	3.36~3.84	31.50	26	0.83	20	0.63
9	3.84~4.32	26.00	16	0.62	8	0.31
10	4.32~4.80	29.94	24	0.80	10	0.33
11	4.80~5.28	51.40	22	0.43	8	0.16
12	5.28~5.76	64.49	26	0.40	3	0.05
13	5.76~6.24	96.19	19	0.20	4	0.04
14	6.24~6.72	81.44	9	0.11	0	0
15	6.72~7.20	79.10	6	0.08	0	0
16	7.20~7.68	78.64	5	0.06	0	0
17	7.68~8.16	84.00	7	0.08	1	0.01
18	8.16~8.64	96.60	5	0.05	0	0
19	8.64~9.12	84.83	3	0.04	1	0.01
和および平均		997.96	506	0.51	526	0.53

地表動の激しさは最大加速度で表わすことにし、震央からの距離 10 km で 500 gal, 被害区域の南端, すなわち震央距離 20 km で 250 gal と推定し, さらに最大加速度 $a(\text{gal})$ と震央距離 $d(\text{km})$ の関係が両対数グラフで直線的であると仮定し, 次の関係式を得た。

$$\log_{10} a = 3.70 - \log_{10} d$$

この式は, 過去のいくつかの研究結果ともかなり良い一致を示していた。

配水管の震害率と地盤の最大加速度との関係を示すと表 2, あるいは第 4 図のようになる。この図と表の中には参考のため気象庁の震度階も目安として示してある。

わが国における配水管の km 当りの震害率を調べてみると, 関東地震の東京で 0.22 個所で, 福井地震の福井市を 1.9 個所となっている。福井市内の家屋倒壊率が 100% に近かったのも, 市内で震度階は VII (激震) と報告されているし, 最大加速度は 600 gal 程度と推定されている。また関東地震の際の東京の最大加速度は地盤条件によってかなり違っていただろうが, 300 gal 前後と考えられている。図 4 と前記の両市の震害率とから最大加速度を推定すると, 福井市で 500 gal, 東京で約

表 2 地震動の激しさと配水管破損被害率

最大加速度の範囲 (gal)	気象庁震度階	配水管の平均破損被害率の範囲 (箇所/km)
250~300	V+~VI-	0.05~0.1
300~350	VI-	0.2~0.5
350~400	VI~VI+	0.8~1.0
400~500	VI+~VII	1.5~2.0

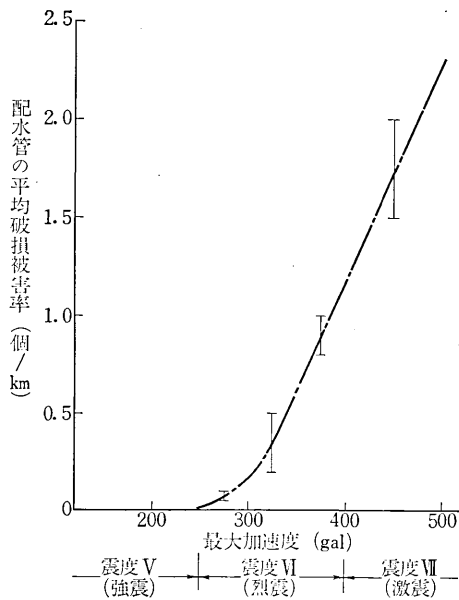


図 4 地震動の最大加速度と配水管破損被害率

300 gal となるので, 米国における最大加速度と震害率との関係は我が国においてもほぼ成り立つものと考えてよいことが判明した。しかしながら, 第 2 節でも述べたように, 水道管の震害は地盤条件, 地盤の強さによって強く影響を受けるので, 地盤の複雑で, かつ弱いわが国の状況を考えると, 福井市では 500 gal より下, また東京でも 250 gal 前後の最大加速度で上記の km 当り 1.9 箇所および, 0.22 箇所の震害が発生したのかも知れない。

4. あとがき

今年度の水道管の震害と地盤構成, あるいは地盤の最大加速度との関係を従来の研究をさらに 1 歩進めることができた。如何なる地盤構成のところで水道管の震害が多く発生するかが明かにされた。東京都の場合でいうと, 平均地盤種別で 2.5~3.5 で異質度高いところほど, 震害が多発することが判明した。これにより, どのような地域を通過している配水管は材質を早急に良くするとか, ループ式の迂回路を増設するとか, あるいはこの地域の両端でバルブを設置し, この地域で震害が発生してもその影響が他に波及しないような方法を講じておくのがよいと考えるし, 本調査はこのようにして実際に応用してゆくことができる。

今回の調査により, 各メッシュ内の水道管の総延長がわかると, 東京が関東地震と同程度の強さの地震に襲われたときの, 水道管の震害個数を予測することもできるようになったわけで, 防災対策上有益な研究であると考えている。しかし, 水道管の震害に及ぼす要因は他に多く存在しており, この面の研究も発展させなければなら

ないと考えている。例えば埋設深さと震害率との関係、管の材質、継手の強度と震害率との関係などがあり、これらの研究は過去の震害調査のみでは不十分であり、シミュレーションモデルによる解析か、実験室内での大きさ地盤がひずんだときの実験などが必要であろう。

地震の激しさと震害との関係の調査において、地表の激しさを最大加速度で表現して、ロスアンゼルス市水道の震害を整理したが、最大加速度が最も適当なパラメータであるか否かは疑問であるが、他の方法がなかったので止むなく最大加速度をパラメータとした。加速度記録しか得られない現観測体制下では、安易に加速度が地震の激しさをあらわしてしまう。本臨時事業の研究においても、加速度記録から速度とか変化とかの情報を得る手法の開発が研究テーマの一つにはなっていた。3年間に研究室においても、この問題を解決すべく、いろいろな方法が試みられたが、いずれも完全な解（実用的意味において）ではなかったもので、発表できる段階ではない

が、速度および変位の情報が与えられると、これらをパラメータにして、震害を再分析してみたいと考えている。

都市の埋設管としては、水道管のほか、ガス管、通信用地下ケーブル、地下鉄トンネルなどがあり、これらについても調査研究すべきであったが、直接研究対象として、実体調査、震害予測の手法の開発、耐震対策の確立などまで手が届かなかった。研究室としては水道管の耐震解析を足がかりに、他の埋設管へも逐次発展させてゆく考えである。
(1974年9月3日受理)

文 献

- 1) 岡本舜三:「地震工学」オーム社, 1971.
- 2) 久保慶三郎他2名:「都市構造物の耐震強度の調査研究」生産研究, 24巻3号, 1972.
- 3) 久保慶三郎:「埋設管の地震時挙動」生産研究, 25巻2号, 1973.
- 4) A. Sakurai and T. Takahashi: [Dynamic Stresses of Underground Pipe Lines during Earthquakes] Proc. 4 WCEE, 1969.

