

埋設管被害と地震動・地盤との関連について

東洋大学工学部	鈴木崇伸
東京ガス(株)	清水善久
〃	小金丸健一
〃	安藤広和

(概要)

兵庫県南部地震では数多くの強震観測記録が得られるとともに、ガス管、水道管の詳細な被災状況も明らかになっている。本研究では埋設管種別毎に、地震動の強さ、地盤条件によって被害の発生傾向がどのように変化するかを分析している。兵庫県南部地震以前の被災データと兵庫県南部地震の被害を比較したところ、地震動と被害率の関係は同じような相関があり、ある値から立ち上がるべき関数で表されること、S I値とよい相関があることがわかった。また地盤が液状化することにより被害率は4～6倍になることがわかった。これらの分析結果は地震動、地盤条件、管種別の条件から平均的にどれくらい埋設管被害程度が推定できることを示唆している。

1. はじめに

強震観測が全国的に整備されるのに伴って地震被害と地震動強さの関係がある程度明らかになってきた。とりわけ1995年1月の兵庫県南部地震では多くの強震データが得られており、いろいろな方面で分析が進められている。本研究では地震時に被害になりやすい埋設管に注目してみる。埋設管はいうまでもなくライフラインサービスを支えている基盤設備であり、全国の都市の道路下に設置されている。地震動の強さから平均的にどれくらい埋設管被害程度が推定できれば、事前の防災対策、事後の緊急対応、復旧活動に有効であると考えられる。また最近では各所からさらなる強震観測計画が発表されており、被害と地震動強さの定量的関連について分析することは重要である。

本研究ではほぼ現用の管に近いものの被害があった宮城県沖地震以降の埋設管被害について整理し、地震動の強さ、埋設された地区の地盤条件について傾向分析を行っている。その結果、地震動のスペクトル強度と埋設管被害率はよい相関をもつことや液状化地盤では被害率が4～6倍程度になることがわかった。最小限の被害はやむなしとして地震直後の対策を考える場合に、今回の研究結果は有効であると考えられる。

2. 埋設管の被害データ

(1) ガス管、水道管の種類

地震動との対応を考えて分析を進めるにあたり、ガス管・水道管の種類について整理しておく。表1は現在用いられている主なガス低圧導管と水道配水管について整理したものである。低圧支管は材質的には鋼管とPE管が用いられており、また鋼管はネジ継手とメカ継手に分けられる。メカ継手には抜け出し防止機構のある耐震メカと呼ばれる継手がある。被害率データの整理にあたり低圧支管をネジ、メカ、SGM(耐震メカ継手の一種)に分類し、PE管は除外する。

キーワード：ガス導管、配水管、S I値、液状化

* 東洋大学工学部環境建設学科 0492-39-1405

** 東京ガス(株) 防災・供給センタ 03-5400-7620

*** 東京ガス(株) 基礎技術研究所 03-5484-4635

また低圧本管は材質的には鑄鉄、ダクタイル鑄鉄と鋼管が用いられている。鑄鉄管には印ろう継手とある程度伸縮性能を見込んだメカニカル継手がある。ダクタイル管には伸縮性能だけを見込んだものと、抜け出し防止機構をもった継手がある。低圧本管に用いられている鋼管は支管に比べて径が大きくなるためにネジはあまりもちいられず、メカニカル継手のものや溶接鋼管が用いられている。被害データの整理にあたり、伸縮型のダクタイル管の被害例がないことから、鑄鉄管、GM管（耐震メカニカル継手の一種）に分類する。

ガス低圧導管とサイズの、継手機構的に同様なのが水道配水管である。水道配水管には、鋼管、鑄鉄管、ダクタイル鑄鉄管の他、古くは石綿セメント管から現在の硬質ビニール管（VP管）までいろいろな管材が用いられているが、ガス管との対比という観点から前述の3管種のみをとりあげることとする。配水管の分類として、ネジ鋼管（SP: steel pipe）、鑄鉄管（CIP: cast iron pipe）、ダクタイル管（DIP: ductile iron pipe）の3種について整理する。なおGM管と同様に水道用ダクタイル管にもS型継手と呼ばれる耐震メカニカル継手があるが、兵庫県南部地震では被害は発生していない。

以上述べた分類にあわせてガス管の耐震性能値として用いられている地盤変位吸収能力の目安を表-1中に示している。耐震レベルが低いと考えられるガスネジ管は3cm程度となっている。また水道鑄鉄管の試算例では印ろう継手が2cm程度、メカニカル継手が4cm程度となっているため、平均的には

3cm程度としている。抜け出し防止機構をもたないメカニカル継手は継手1個あたりの伸びしろが地盤変位吸収能力となり5cm程度となっている。また抜け出し防止機構をもつものは2個以上の伸びしろが有効にはたらくため10cm以上となる。なお水道管に関する地盤変位吸収能力の試算例はないが、継手機構を考慮してガス導管の試算例から類推している。

(2) 被害データ

表-2に今回分析の対象とした地震とデータ数の一覧を示している。地震動と被害率に対応付けられた地区数を示しているが、兵庫県南部地震のデータ数が突出している。ガス管被害に関しては公開された被害報告書の他、釧路沖地震、北海道南西沖地震、三陸はるか沖地震、兵庫県南部地震に関してはガス協会資料より引用した。また水道管に関しては、千葉県東方沖地震までの3地震は公開された被害報告書を用い、釧路沖地震、北海道南西沖地震、三陸はるか沖地震、北海道東方沖地震の被害に関しては、

表-2 分析に用いたデータ数

発生年	地震名	ガス管	水道管
1978	宮城県沖	3	3
1983	日本海中部	3	2
1987	千葉県東方沖	9	8
1993	釧路沖	3	8
1993	北海道南西沖	2	3
1994	北海道東方沖	2	3
1994	三陸はるか沖	3	4
1995	兵庫県南部	38	16

表-1 ガス・水道の主な管種と特徴

使用区分	ガス									水道					
	低圧支管				低圧本管					配水管					
データ名称	ネジ	メカ	SGM	-	鑄鉄	-	-	GM	-	ネジ鋼管	鑄鉄管	ダクタイル	-		
材質	鋼管			PE管	普通鑄鉄管		ダクタイル鑄鉄管			鋼管	鋼管	普通鑄鉄管	ダクタイル鑄鉄管		
継手名称	ネジ	メカニカル	耐震メカ	接着	水道型	FG型	DG型	TM型	GM型	メカニカル	ネジ	印ろう	メカニカル	メカニカル	耐震メカ
(種別)		LA MKD	SGM PCM							MKD			A	A K,T	S
伸縮機構	×	○	○	×	△	○	○	○	○	○	×	×	○	○	○
離脱防止機構	×	×	○	×	×	×	×	○	○	×	×	×	×	×	○
地盤変位吸収能力	3cm	5cm	10cm上	10cm上	3cm	5cm	5cm	5cm	10cm	5cm	3cm	3cm	5cm	5cm	10cm上

4つの地震で影響があったと推定される水道事業者にアンケートによる調査を行った。アンケート送付事業者は約100事業者であり、約6割の回答を得ているが、被害があったと思われる事業者のデータは概ね得られている。アンケートに際して、事業者が所有する統計データから管種、管径別の延長と被害箇所数を調査して埋設管被害率を計算している。

兵庫県南部地震のガス管被害についてはガス協会資料、水道管被害については水道協会資料を引用している。ガス協会資料、水道協会資料はともに強震観測地点を中心に約4 km²内にある被害件数を延長で割った値となっており、兵庫県南部地震前の市あるいは町単位の平均被害率とは若干異なっている。地震動や地盤・地形条件との対応を考える場合には兵庫県南部地震の方がより精度が高くなっていると考えられる。

3 埋設管被害の分析

(1) 地震動強度との関係

被害率と地震動強度を対応させてプロット図をつくり、両者の関係について考察する。地震動強度として最大加速度とSI値をとりあげる。最大加速度は時系列の水平方向の加速度の最大値で定義する。またSI値は水平成分ごとに計算したSI値の大きい方を採用して当該地区の値とする。ここで特に注目する管種は被害例の多い低圧ガス導管のネジ鋼管と水道配水管の普通铸铁管、ダクタイル铸铁管の3種類である。3種類の管とも全国で標準的に用いられている管であり、いずれの地震でも被害が報告されている。また口径、継手種別にはいくつかのタイプがあるが概ね管種ごとに同程度の耐震性能を有していると考えられる。ガスネジ、水道CIP、DIPの3種のプロット図を図-1、2、3示す。プロットは兵庫県南部地震前と兵庫県南部地震で異なったマーカを用いることとし、両者の差異についてもみていくこととする。

(a) ガス低圧支管ネジ

ガス低圧支管ネジは現用管の中では最も被害を受けやすい管であり、筆者らは阪神以前のデータを

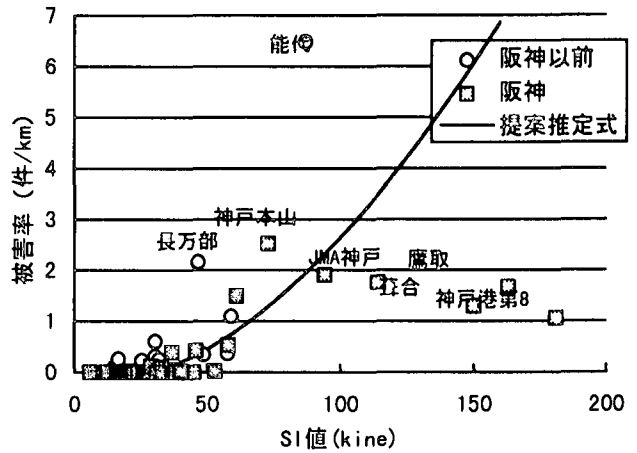
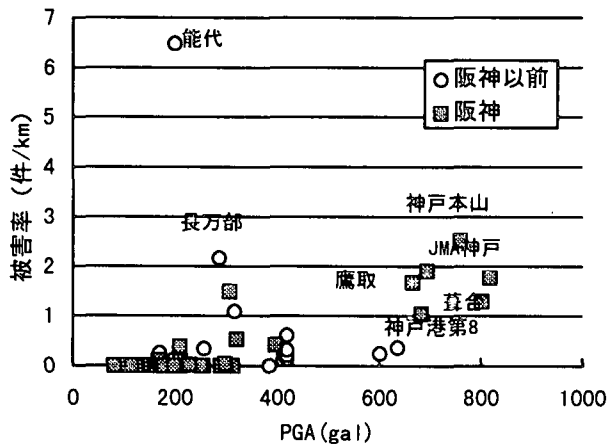
用いて回帰分析を行い、(SI-25)の1.62乗で増加すべき関数で表される推定式を提案してきた。図-1にガス低圧支管ネジの被害率の分布を示している。

図-1(a)は最大加速度(PGA)に対応させてプロットしたものである。液状化の影響のあるものまで含めてすべてのデータをプロットしているが、被害はおよそ200galから起こりはじめ、液状化の影響の大きい能代市、長万部町のプロットを除けば右上がりの相関がある。兵庫県南部地震前のデータと兵庫県南部地震のデータを比べると、兵庫県南部地震のデータは600galを超える大きな加速度のデータが多く比例関係が明瞭に認められるが、兵庫県南部地震以外のデータは加速度に関しては明瞭な比例関係は認められない。

図-1(b)はSI値に対応させてプロットした結果である。加速度の場合と同様に正の相関が認められる。同図中に兵庫県南部地震前の60kine以下のデータから回帰した式を描いているが、100kineまでは概ね増加傾向とあっていると考えられる。推定式のカーブから大きく外れているデータにはいくつかのグループが考えられる。まず兵庫県南部地震でSI値が特に大きかった神戸港第8、JR鷹取、葺合の3点であり、SI値が100kineを超えた部分で被害率が減少する傾向となっている。また上方に外れているグループとしては能代市、長万部町の2点があり、これらは液状化の影響が大きいと考えられる。また神戸本山、神戸大学の2点も推定式に比べて2倍程度の値となっている。ばらつきはあるもののある値から立ち上がるべき関数による近似式は概ね被害の増加傾向を捕らえていると考える。

(b) 水道配水管

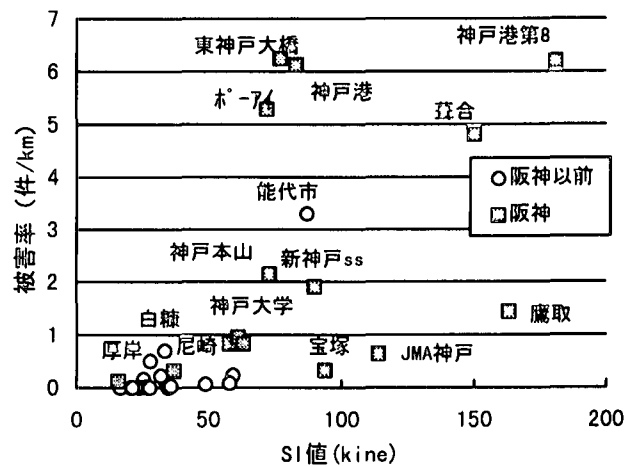
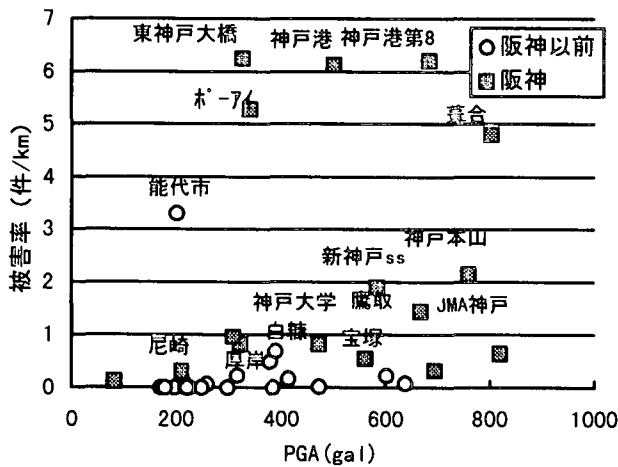
水道管についても同様のプロット図を作成する。図-2は普通铸铁管の被害率をプロットした結果である。表-1に示したように管路材質で区分して印ろう継手とメカニカル継手をあわせた平均被害率を用いている。最大加速度と対応させた図-2(a)、SI値と対応させた図-2(b)とも正の相関が認められる。最大加速度の方はプロットは2つのグルー



(a) 最大加速度

(b) S I 値

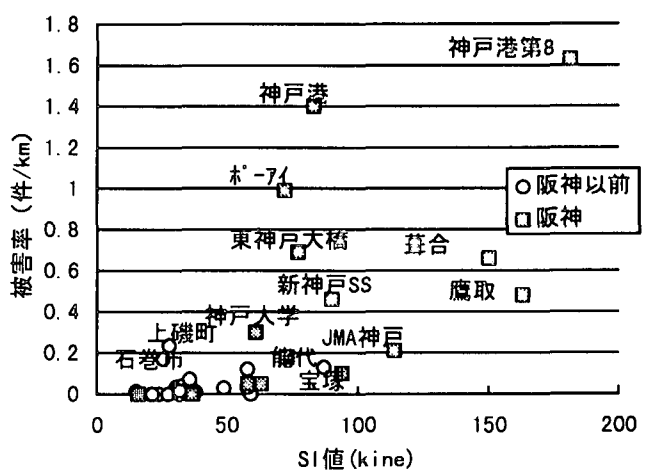
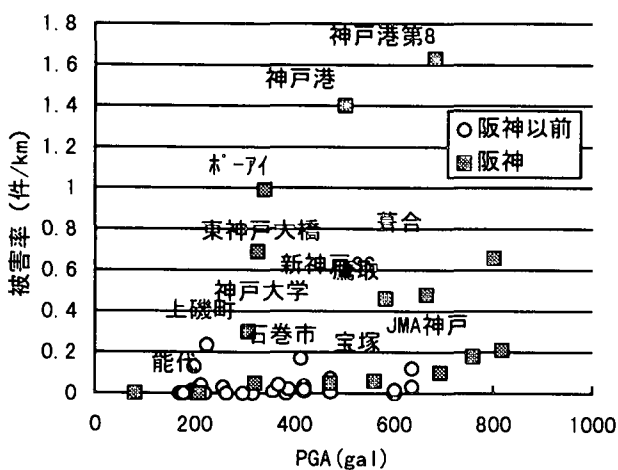
図-1 ガス低圧支管ネジ管の被害率分布



(a) 最大加速度

(b) S I 値

図-2 水道配水管鋳鉄管の被害率分布



(a) 最大加速度

(b) S I 値

図-3 水道配水管タイル鋳鉄管の被害率分布

プに分かれ、液状化の影響を強く受けているデータが4～6件/km付近に分布する。右上がりの傾向はガス低圧管同様に兵庫県南部地震のデータによっており、兵庫県南部地震のデータを除けば強い正の相関はない。S I 値に対応させた場合も同様の傾向であるが、液状化の影響が大きいと考えられる神戸港、東神戸大橋、ポーアイの3点が大きく上方に外れ、宝塚、JMA 神戸、鷹取の3点が下方に外れている。神戸本山中で被害率が高いのはガス管でみてきた傾向と同じである。最大加速度とS I 値のプロット結果を比較すると最大加速度の方が横軸に近づいた分布となっており、被害の有無の判定はS I 値の方が行いやすいといえる。

次にダクタイル鋳鉄管についてプロットしたのが図-3である。大きな被害率となっている神戸港第8、神戸港、ポーアイ、東神戸大橋はいずれも液状化の影響が大きいと考えられる地区である。これらの点を除いてみると最大加速度、S I 値ともにより比例関係が見出せるが、S I 値の方がばらつきは小さくなる。ダクタイル鋳鉄管においても神戸大学の被害率が高くなっているが、地形的な要因について分析する必要がある。被害の起こりはじめる部分では石巻市、上磯町の2点が突出しているが、およそ30kineからはじまっている。

(c) その他のガス低圧管

グラフは示していないが、被害の報告されているその他のガス導管についても同様の分析を行っている。以下に分析結果の要点を述べる。

・メカ鋼管はネジ鋼管に比べて被害率はおよそ

1/10 程度となっている。データ数が少なくばらつきも大きいがおよそ200gal、30kineくらいから被害が発生しはじめ、正の相関をもっている。

・耐震メカと呼ばれるSGMは被害率がさらに小さく、被害が発生しはじめる地震動もさらに右にシフトする。

・GM型ダクタイル鋳鉄管はSGMよりさらに被害率は小さく、60kineまでは被害が発生していない。正の相関はあまりなく、地震動以外の要因が大きいことが考えられる。

(2) 一般地盤の平均被害率

ある地震動に対して被害率の変化を個々にみればかなりの範囲でばらつくが、平均的に捉えれば増加傾向があることが確認された。最大加速度、S I 値に対応させて分析をしたが、総合的に考えてS I 値の方が対応がよいと考えられる。その理由として埋設管は周辺地盤のひずみ(特にせん断ひずみ)によって変形が生じると考えられるが、進行波を考えれば、速度とひずみは比例関係にあり、最大速度とS I 値がおおよそ一致することが挙げられる。

そこでSI 値を区間分けしてその区間内での平均被害率を計算し、増加傾向の分析を行ってみる。区間分割はSI 値が大きくなるにつれてデータ数が減っていくことを考慮して徐々に区間を広げていく方法で、20、30、40、60、90 (kine) で分割する。表-3 に地震動区分ごとに計算した各管種の平均被害率を示している。計算に際して液状化の影響の大きいデータは除外して、被害率0のデータも含めて平均計算を行っている。また表中の空欄は該当区間にデータがないことを表している。

表-3 地震動区分ごとの平均被害率 (件/km)

区分 (kine)	ガス低圧管					水道配水管		
	ネジ	メカ	SGM	鋳鉄管	GM	CIP	DIP	SP
20-30	0.028	0.004	0	0.043	0	0.084	0.068	0.15
30-40	0.119	0.017	0.025	0.009	0	0.220	0.020	0.435
40-60	0.312	0.089	0.007	0.283	0	0.299	0.047	0.99
60-90	2.004		0.160		0.050	1.303	0.177	0.933
90-180	1.654		0.044		0.02	1.073	0.313	0.198

図-4(a)にガス低圧支管ネジ鋼管と水道铸铁管の被害率の変化のグラフを示す。全体的に水道铸铁管の被害率はガスネジ鋼管よりも小さくなっているが増加の様子はよく似ている。耐震レベルはガスネジ鋼管・水道铸铁管ともほぼ同程度と考えられ、地盤の変形の影響を受けやすい管種である。これら2つの管種が同じような増減傾向を示すことから、管の耐震性能によって平均的な被害率を決められると考える。

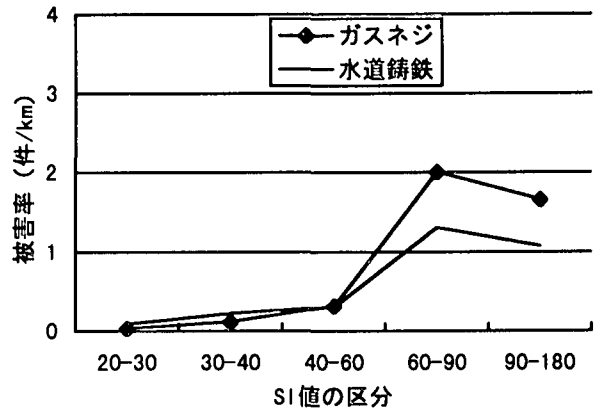
その他の管種の被害率の変動についてグラフにしたのが図-4(b)、(c)である。同図(b)は耐震レベルが中程度のガスメカ継手管と水道ダクタイル铸铁管の被害率の推移を示している。両者を比較してみると、ガスメカは60kineまでのデータしかないものと同じような増加傾向となっている。また水道ダクタイル管は、先にみたガスネジ、水道铸铁管とは異なり、90kine以上でも増加傾向となっている。

図-4(c)は耐震レベルの高いSGM管、GM管の被害率の推移を示している。耐震レベルが中程度の管種を示した同図(b)と比べても、被害率が全体的に小さくなっており、また被害のはじまる位置が右にシフトしているのが注目される。特にGM管では60kineから被害が起ころはじめている。またの両者は増減の変動が大きく地震動以外の地盤・地形的な要因の大きいことが考えられる。

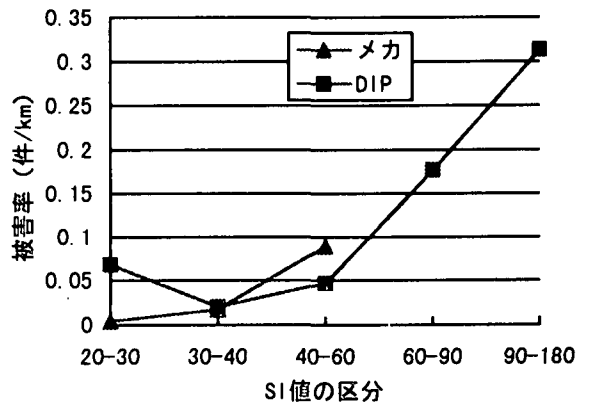
30kine前後で減少傾向を示す管種もあるが、全体的に90kineまでは増加傾向となっており、それ以上ではやや小さくなる傾向がある。また耐震レベルごとに分けてみても、被害の増加傾向はほぼ同じとなるが、被害の起ころはじめるSI値と、被害率の大きさは変化する。これらの特徴を反映させた被害推定式の検討が必要と考えられる。

(3) 液状化による被害率の変化

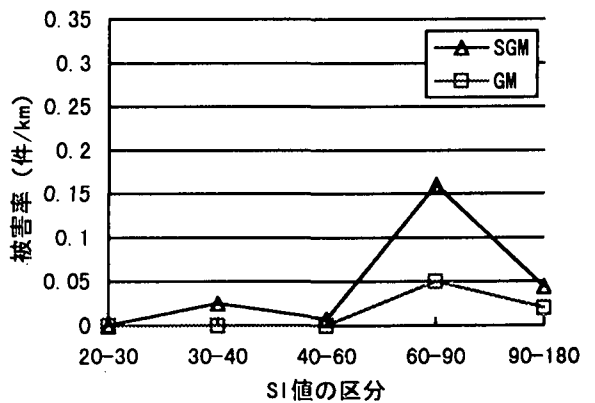
管種ごとの被害率の傾向分析と同様に、液状化の影響の大きい地点で被害率の区間平均を計算し、被害率の増加度合いについて検討する。兵庫県南部地震前では能代市、長南町、長万部町、兵庫県南部地震では、水道協会資料よりポートアイランド、東神戸大橋、神戸港、葺合、神戸港第8の5



(a) ガスネジ管と水道铸铁管



(b) 伸縮型継手



(c) 離脱防止型継手

図-4 管種ごとの平均被害率の変化

点である。ここではデータ数が多く、対比が可能なガスネジ、水道铸铁管、水道ダクタイル管の3管種について平均被害率を計算してみる。表-4に液状化の影響の大きい地点の平均被害率の計算結果を示している。なお長南町の水道ダクタイル管の被害率

はその前後に比べて大きくないために無視している。

それぞれの管種について液状化の影響の有無による被害率の変化を示したのが図-5である。図-5(a)はネジ鋼管の対比を示しているが、90kineまでは液状化の場合にも増加傾向となっており、3～7倍程度の被害率となっている。60-90kineの区間では先にも述べた神戸本山、神戸大学が非液状化の平均被害率を引き上げているために、3倍程度となっている。また90kine以上では逆に小さくなっており、被害データの詳細な分析が必要とされる。水道配水管については60kine以上のプロットだけとなるが、普通铸铁管、ダクタイル铸铁管とも増加度合いは同じようであり、SI値の増加にともなって平均被害率も増加している。

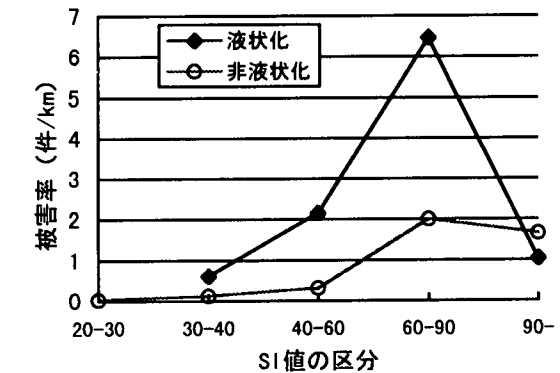
次に液状化の影響の大きい場合とそうでない場合の平均被害率の比を計算したのが図-6である。限られた地震動の範囲ではあるが、液状化による被害率の増加割合は地震動の大小にあまり関係なく一定の傾向があり、概ね4～6倍程度となっている。ただし液状化時の被害率のデータ数は少なく、被害率の増加度合いに関してもより詳細な分析が必要と考える。

表-4 液状化の影響を受けた平均被害率

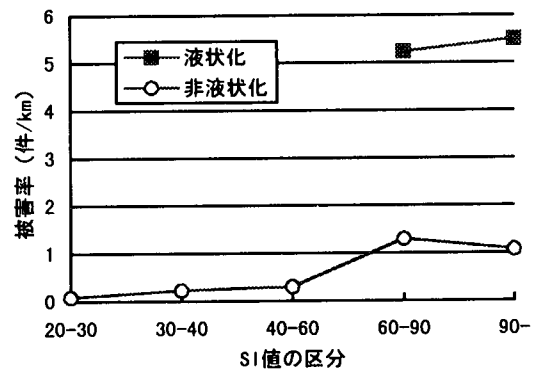
区分 (kine)	ガス低圧支 水道配水管		
	ネジ	CIP	DIP
20-30			
30-40	0.609		
40-60	2.164		
60-90	6.477	5.235	0.803
90-180	1.044	5.5	1.145

4 まとめと今後の課題

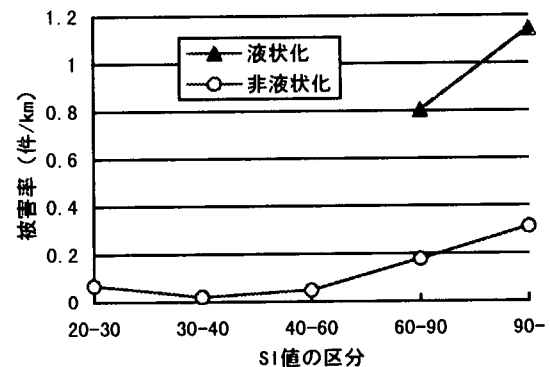
本研究では宮城県沖地震から兵庫県南部地震までの8地震で得られたガス管、水道管の実被害データにもとづいて、SI値と被害率の関係の分析を行った。分析結果のまとめを以下に示す。



(a) ネジ鋼管の被害率



(b) 水道铸铁管の被害率



(c) 水道ダクタイル管の被害率

図-5 液状化による被害率の差異

- ① 兵庫県南部地震では揺れの大きかった地区で強震記録が得られており、これらを埋設管被害率と対応づけるとSI値でも最大加速度でも正の相関が見出せる。いろいろな管種についてプロットした結果から、被害の有無の判定にはSI値の方がむいている。

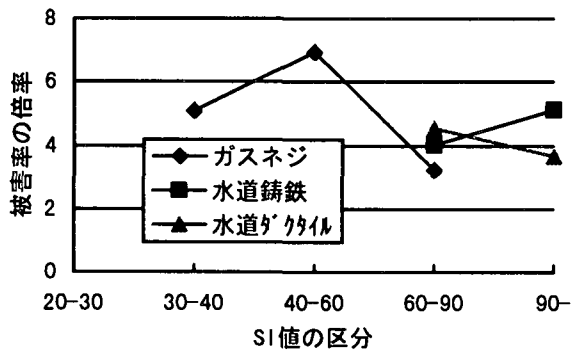


図-6 液状化による被害率の増加

- ② 地震動が与えられたときの平均被害率はある値からはじまるべき関数でその増加傾向をよく説明できる。ただし実際の被害率は倍半分以上にばらつくものとなる。
- ③ 被害の増加傾向は管の耐震性能によって異なる。耐震性の高い管ほど被害率は小さくなり、カーブは右にシフトする。
- ④ 液状化の影響の大きかった地区とそうでない地区の平均被害率を比較すると、液状化地区の被害率は概ね4～6倍になる。液状化による被害率の割り増しを考慮することにより目安を得ることができる。

最後に本研究は(財)地震予知総合研究振興会における地震時被害推定・対応システムの開発に関する研究委員会で行ったものであり、委員会の皆様に感謝いたします。

参考文献

- ①鈴木他3：埋設管被害と地震動強度の関係について、第9回日本地震工学シンポジウム、pp. 2083-2088(1994)
- ②日本ガス協会：宮城県沖地震以降の被害報告書
- ③資源エネルギー庁：ガス地震対策検討会報告書(ガス事業新聞社刊)、(1996)
- ④日本水道協会：兵庫県南部地震被害報告書(1996)

A Relationship between damages of buried conduits and seismic intensity on the ground considering liquefaction effect

Takanobu Suzuki, Yoshihisa Shimizu
Ken-ichi Koganemaru, Hirokazu Ando

(ABSTRACT)

After a major damaging earthquake, lifeline systems face service down because of broken buried conduits or other facilities. The assessment for damages is useful information in immediately after earthquake. Our study is how to predict the number of broken points of buried conduits accurately. After matching seismic intensity to damage ratio in each type of pipe, relationship on damages has been rather clear. First, spectral intensity value (SI value) is more accurate than peak ground acceleration in assessment for damaged number. Second, damages of weak pipes are occurred from and over approximately 0.3 m/sec of SI value. Damages of some pipes which have strong joint are rather less than weak pipes. Third, liquefaction of loose sand makes increase damages of conduits, damage ratio is from 4 to 6 times comparing with at same SI value.