

## 10. 地下埋設管における地震災害と耐震設計

### 10.1 はじめに

兵庫県南部地震時のライフライン被害については、当研究委員会の他にライフラインに関する研究委員会が組織され、被害実体等について詳細な報告がある<sup>①</sup>。本研究では主として上下水道を例にして、地震による破壊とその関連要因について検討した結果をまとめ、今後の設計資料として供したいと考えたものである。

表10.1.1は、上水道被害と管種についてまとめたものである<sup>②</sup>。阪神地区に分布した上水道の総延長は11,828kmで、その内被害合計は2,791箇所余り(属具の被害を除く)で、神戸、芦屋、西宮市の被害は約80%を占める。管種別では全被害の内約45%はダクタイル管で、その多くは継手部の「抜け」による。鑄鉄管は全被害の約35%で、破損と「抜け」が半数づつを占める。また塩ビ管の被害は全被害の14%であるが、被害率は1.1件/kmと、水道管の中では最も高い。特に芦屋市では、5箇所/kmと高い数字を示した。逆に鋼鉄管(延長距離は251km)の被害率は、0.08箇所/kmと最も低い。管の強度と靱性が、耐震性にとって重要な因子の一つであることを示す結果であろう。

表 10.1.1 上水管路被害(属具を含まない)<sup>\*1</sup>

| 都市名       | 神戸市          | 芦屋市      | 西宮市      | その他 <sup>*2</sup> | 合計           |
|-----------|--------------|----------|----------|-------------------|--------------|
| ダクタイル管(件) | 710(3,452)   | 90( 72)  | 256(635) | 162(4,961)        | 1218(9,120)  |
| 鑄鉄管 (件)   | 394( 316)    | 88( 89)  | 176(98)  | 274(1,602)        | 932( 205)    |
| 塩ビ管 (件)   | 24( 129)     | 116( 23) | 216(186) | 34( 14)           | 390( 352)    |
| 鋼管 (件)    | 13( 105)     | 2( 0.3)  | 1(29)    | 5( 117)           | 21( 251)     |
| その他 (件)   | 123( -)      | 1( -)    | 48( -)   | 58( -)            | 230( -)      |
| 被害件数(件)   | 1,264(4,002) | 297(184) | 697(948) | 533(6,694)        | 2791(11,828) |

( )内は延長距離(km); \*1:文献2の資料を再整理した.; \*2:大阪市、宝塚市、尼崎市の合計

表 10.1.2 は、下水管路の全被害の概要をまとめたものである<sup>③</sup>。10,834kmの延長距離を持つ6都市の下水道の被害は、33,740箇所、上水道被害の10倍以上である。その内訳は、汚水・合流管で管渠被害が30,000箇所(本管部、継手部被害がほぼ同数)、マンホール部、取付管で約4,000箇所の被害である。

表 10.1.2 下水管路の被害概要<sup>③</sup>(下水道協会)

| 管路種別  | 被害対象  | 被害箇所数    | 被害の形態と内訳                         |                               |                                       |
|-------|-------|----------|----------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|
| 汚水・合流 | 管渠    | 8,805スパン | 30,697ヶ所<br>(たるみ、蛇行は1,976スパンで発生) | 本管部 48%                       | マンホールから1本目の本管(約40%;主に円周クラック)          |
|       |       |          |                                  | 継手部 52%                       | その他の本管(約60%;円周クラック50%、管軸クラック・破損が約30%) |
|       | マンホール | 3,373個   | 4,412ヶ所                          | 直壁部 42%                       | スレ(約70%)、破損(約20%)、その他(10%)            |
|       |       |          |                                  | 隔壁部 19%                       | 横方向スレ、破損が多い                           |
|       |       |          |                                  | その他 39%                       | 底部、管口、インバートの破損が大部分                    |
|       | 取付管   | 3,908本   | 3,999ヶ所                          | 破損(45%)、管突出し(16%)、浸水・スレ等(39%) |                                       |
| 雨水    | 管渠    | 714スパン   | 1,831ヶ所                          | 継手スレ(約40%)、その他(約60%)          |                                       |
|       | 矩形渠   | 730スパン   | 1,212ヶ所                          | 本管部クラック・破損(約70%)、その他(約30%)    |                                       |
|       | 開渠    | --       | 748ヶ所                            | 破損(54%)、クラック(23%)、その他(23%)    |                                       |

今までに上、下水道被害とそれの関連因子についての研究も多い。北浦<sup>④</sup>は水道の被害数とその地区の家屋被害率について調べたが、やはり決定的な関連を見出してはいない。また震度階については、「神戸、芦屋、西宮市において、震度階が5の地域と7の地域を比較しても、両者の上水道の被害率に大きな違いがない」ことを日本上水道協会<sup>⑤</sup>が報告している。また高田<sup>⑥</sup>は渦が森断層、長田断層からの距離で被害率を説明しているが、断層に平行に被害分布するような傾向は認められないし、また地質条件に関しても「沖積層における上水道の被害率が最も高い」と報告<sup>⑦</sup>したが、埋立地、自然堤防、砂州、大阪層群の地域でも大きな被害を受けたことが橋上<sup>⑧</sup>によって報告されているし、また岩盤地域での被害数を調べてみると少

なくはない。一方埋立地では液状化による上下水道の被害が大きいとされているが、ポートアイランドでは耐震継手が用いられ、むしろ被害は少ない。もちろんこれは耐震継手が地震動に対して有効であったことを裏付けてはいるが、もう一方ではどの程度の液状化が発生したのか、あるいはその液状化と被害との関連等を評価することは難しいことを示している。

一方都市の防災上、将来の地震に対して工学的指標を用いた上、下水道被害予測は、必須の事項であるが、その工学指標に何を用了らよいか、に答えがない。そこで筆者らの研究グループでは「上、下水道は地下・線状構造物である」との視点から、「近隣地盤断面の地震時応答による相対変位の違いは、上、下水道管の挙動に影響を与えるのではないかと考えた。日本上水道協会<sup>6)</sup>からも同様な考えに立つ検討結果を報告している。すなわち地盤の平均残留ひずみ( $\epsilon_r$ )と管被害の関連について、埋立地や三宮周辺地域で検討したところ、上水道被害に関しては、ダクタイル管(一般継手)の場合、地盤の残留ひずみ( $\epsilon_r$ )が0.3%を越えたところで被害が生じ、0.5%以上では被害割合が急増すること、また铸铁管の場合は $\epsilon_r$ が0.1%を越えた場合被害が発生していること、等を指摘している(ひずみは30~100mの距離で定義)。下水道の継手部についても同様な検討が一部行われており<sup>6)</sup>、 $\epsilon_r=0.3%$ で被害が増え始め、1%を越えると急増することを報告している。しかし地震時にいかほど変位したかは明確でなく、また一般化するまでには至っていない。

そこで本報告では、神戸市中央区、芦屋市地区、西宮市地区の3被害の大きい個所を選び、区域の特性を詳細に検討する目的で、さらに1.2×1.2kmを単位に区切って、メッシュ毎に被害と既存の因子、例えば地質、震度階、最大地表加速度、断層、液状化等の因子との関連性について、まず検討することにした。次いで、各区域内の100~400m離れた2点で、それぞれ一次元複素応答解析を行い、その応答変位差を「相対変位」と定義し、それを管被害を予測するための工学的指標になり得るのではないかと考えて検討した。

## 10.2 注目した3地域の特徴と被害の分布

図10.2.1~10.2.3は本研究で取り上げた、西宮(9.6×8.4km<sup>2</sup>)、芦屋(7.2×7.2km<sup>2</sup>)、神戸市中央区(6×6km<sup>2</sup>)の下水道の被害分布図で、図中の○は被害場所を、図中のメッシュ(1.2×1.2km<sup>2</sup>)は、前述したとおり各種の関連要因を検討するためのunitである。また西宮地区に対しては(図10.2.1参照)、さらに地質の特徴が異なる「Zone A: 甲陽断層に沿う段丘礫層地盤地帯(被害が多い)」、「Zone B: 沖積粘土層地盤・埋立地盤(被害が多い)」、「Zone C: 西宮周辺沖積砂層地盤(被害が少ない)」の3つを、芦屋地区(図10.2.2参照)に対しては、「Zone D: 沖積層(被害が軽い)」と「Zone E: 沖積層(被害が大きい)」の2つを設定した。

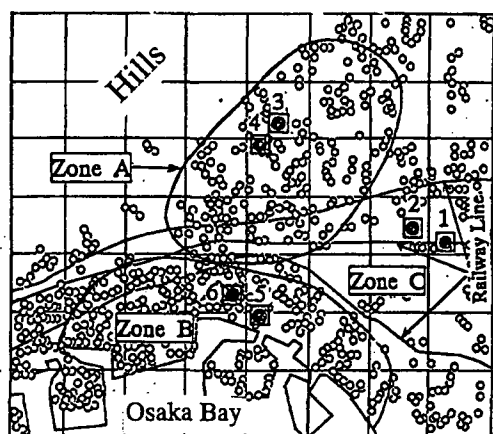


図 10.2.1 西宮地区下水道の被害

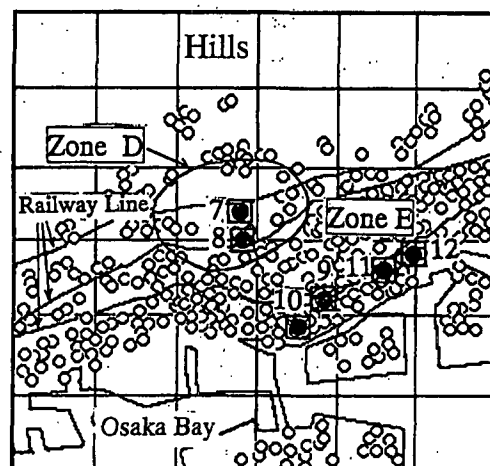


図 10.2.2 芦屋市地区の下水道の被害

図10.2.4(a)は、地質条件を Group-1と Group-2 に分けてと被害個所数の分布に関して整理したものである。Group-1は「軟弱な地盤」で、沖積砂層、沖積粘土層、埋立地等を、Group-2は「硬い地盤」で、段丘、洪積層と岩盤を含む。図中には

それぞれの平均値を実線で結び、偏差±σの範囲を示した。沖積層 Group-1(軟弱な地盤)における被害数の平均値は埋立地の約 1.5 倍となったが、この結果は地質条件と関係が強いというのではなく、埋立地では鋼管やダクト管などの耐震管類が多く設置されたため、と理解する方が妥当であろう。また確かに沖積層被害は大きい、そこだけが特別ではない。Group-2(硬い地盤)では、段丘、洪積層、岩盤の順で被害が少なくなる傾向がみられる。地盤が良いとされている段丘層や洪積層地帯でも被害が多かった点は、認識すべき点であろう。段丘層の被害は沖積層とほぼ同じで、また洪積層は埋立地に相当する被害があり、地質条件の特徴だけでは被害の多少を説明できない。図 10.2.4(b)は下水道の被害数と地質条件の関連を示したものである。メッシュごとの被害数は上水道よりやや多いが、上水道で議論した傾向と同じ結果を示す。地層は管被害と関連する要因ではあるが、一次要因ではないことをしめしている。

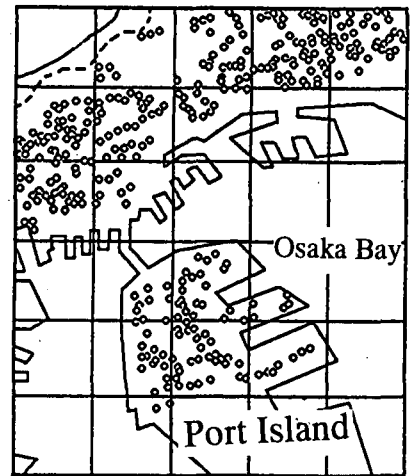


図 10.2.3 神戸市中央区の下水道の被害

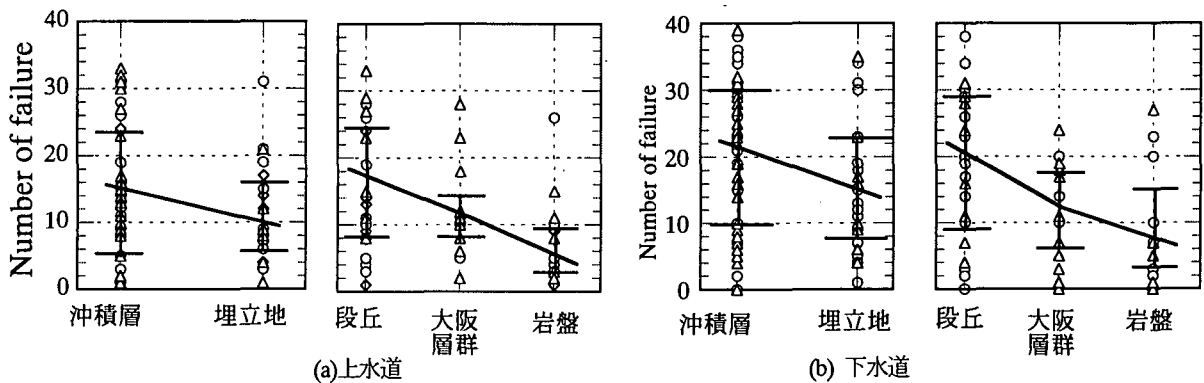


図 10.2.4 被害と地質条件

図 10.2.5(a),(b)は上、下水道の被害個所数と震度階の関係を示したものである。図中にはそれぞれの平均値と±σの範囲を示した。震度階が大きくなると上、下水道被害数の平均値も増加する。同じ震度階では、下水道の平均被害数は常に上水道の場合よりも 1.1~1.2 倍以上大きい。上水道の場合、震度階はVからVIIへと増加しても、被害数分布はほとんど変わらないが、下水道の場合は傾向が見られる。震度階IV域は調査区域には含まれていないが、その地域の被害は当然少ない。この点をも考え合わせると、「下水道被害は地盤の揺れに関係が強い」、とは言えそうである。しかし震度階から被害を推定するにはばらつきが大きく、工学的指標としては少し無理のようである。

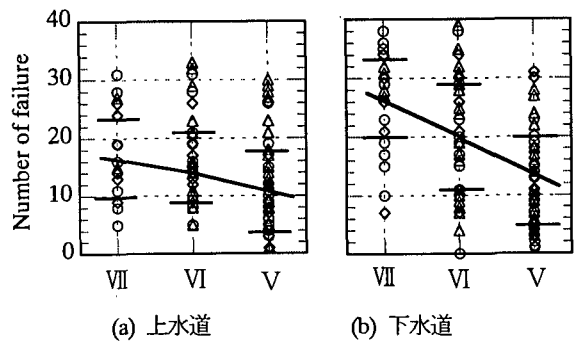


図 10.2.5 震度階と上下水道の被害数

図 10.2.6(a),(b)に地表加速度と被害個所数の関係を示す。下水道では、ばらつきも大きい、地表面の加速度が小さくなるにしたがって被害数も少なくなる。しかし上水道被害の場合、600gal 以上の領域での被害と 400gal 以上の領域での被害にあまり差が無い。やはり地表加速度だけでは被害の推定はできないようである。

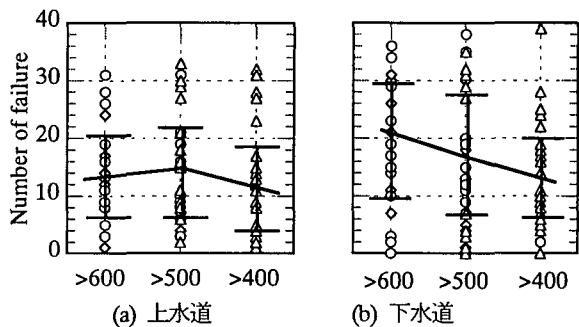


図 10.2.6 地表面加速度と上下水道の被害数

### 10.3 相対変位と下水道の被害

#### 10.3.1 計算条件

相対変位を「近接2地盤断面間の地震時応答変位の差」と定義する。近接2地点間の距離は、「一般的地質調査位置の最短2点間の距離」と考え、100～400mとした。計算は図10.2.1のZone A, B, Cと図10.2.2のZone D, Eでそれぞれ2地点を選び、一次元等価線形化法で地震時応答変位とそれらの相対変位を計算した[No. 1-2, No.3-4, No.5-6(図10.2.1)とNo. 7-8, No.9-10, No.11-12(図10.2.2)]。また入力波は、神戸市Port Island NS成分波(-16m)の記録をZone A, B, Cに、また同(-32m)の記録波をZone D, Eに用いた。図10.3.1にそれぞれの地震波形を示す。

さて一次元地震時応答解析では地盤のせん断波速度( $V_s$ )、および  $G/G_0 \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$  関係を必要とする。ここに  $G$  は剛性率、 $h$  は減衰率、 $\gamma$  はせん断ひずみである。さて一般的に  $V_s$  の決定法には、①PS検層試験、②地震アレー観測から逆算する、③N値から推定する、の3つの方法があるが、ここでは③の方法で各地点の  $V_s$  値を推定することにした。

N値から  $V_s$  値を推定する方法はすでに水谷<sup>7)</sup>や寺田<sup>8)</sup>によって提案されているが、それには「地盤材料」と「深度」の両方の影響が考慮されていない。そこでまず阪神道路公団で調査されたPS検層試験結果を、「礫」、「砂」、「粘土」の3種に分け、それぞれのN値と  $V_s$  値の関係に整理し、結果を基に式(10.3.1)、(10.3.2)を得た<sup>9)</sup>。

$$V_s = A \times N^{0.01} \times H^{0.025} \quad (10.3.1)$$

$$A = B \times N^C \quad (10.3.2)$$

表 10.3.1 係数BとC

| 係数 | 礫    | 砂    | 粘土   |
|----|------|------|------|
| B  | 60.6 | 62.1 | 92.8 |
| C  | 0.44 | 0.43 | 0.43 |

ここに係数B, Cを表10.3.1に、またG, hのひずみの依存特性については、今津ら<sup>10)</sup>の結果を用いた(図10.3.2参照)。

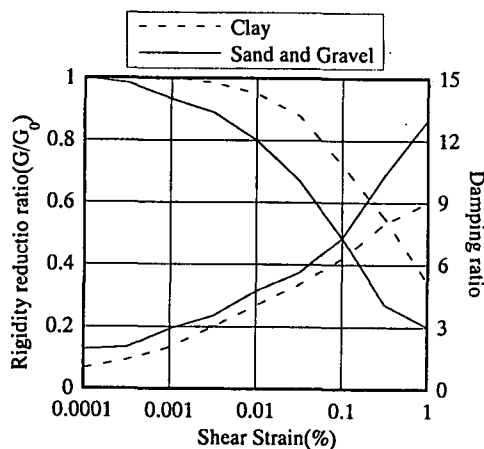


図 10.3.2 土の動的特性値

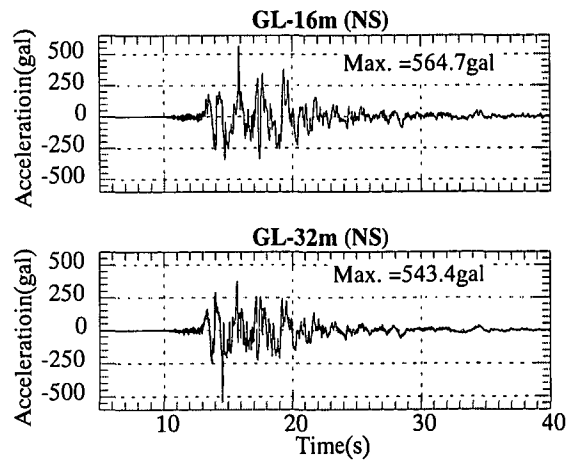


図 10.3.1 神戸 Port Island で記録された加速度波形

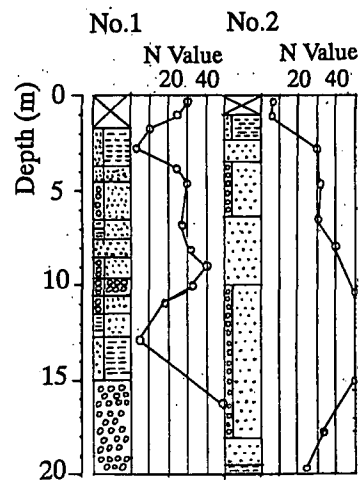


図 10.3.3 柱状図

#### 10.3.2 相対変位

図10.3.3は計算地点(No.1, 2)の柱状図の例を示したものである。その柱状図を基に各層の  $V_s$  値を求め、各地点の一次

元地震応答計算を行った。図 10.3.4 は計算地点 No.1~4 の地表面加速度と変位の時刻歴を示したものである。表 10.3.2 に最大加速度、最大変位等をまとめた。最大加速度は No.1、5 地点で約 700gal、No.2~4 地点では約 800gal、No.6~12 地点での最大は約 1,000gal となった。これらは実測値よりもやや大きい、これは入力地震動が実際よりも過大な入力値で

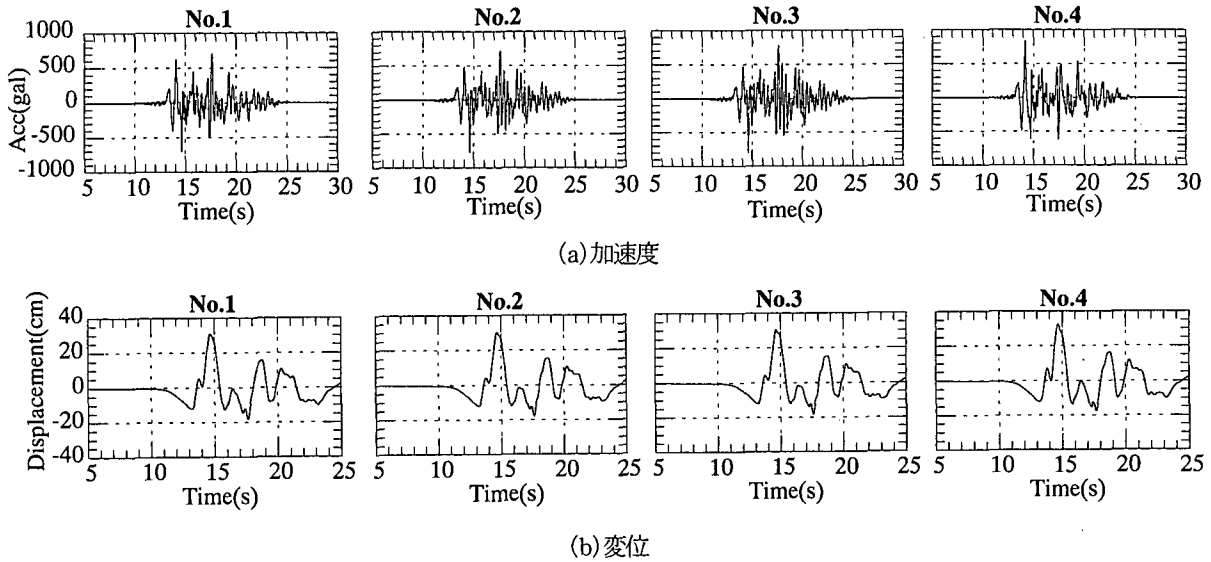


図 10.3.4 地表面の加速度と変位

あったためと考えている。また「相対変位」は各2地点間の時刻歴変位で定義した。図 10.3.5 に例として No.1~2, No. 3~4 の「相対変位」を示す。表 10.3.2 に相対変位の内、最大変位を示す。その内アンダーラインは、被害の大きかった地点を示したものである。被害の大きい場所の相対変位はほとんどが 5cm を超え、被害の軽い場所ではそれよりもかなり小さい。もちろん大きい相対変位が生じた場所は沖積層だけではなく、山地や、段丘、埋立地なども含まれる。また、高い震度階域で、必ず大きい相対変位が起こるとも限らない。すなわち相対変位は地質条件、震度階、地面加速度よりも、直接的で被害と相関性のある因子であるばかりではなく、地震被害の予測も可能な工学的指標となり得ることが、これらの結果から結論できる。

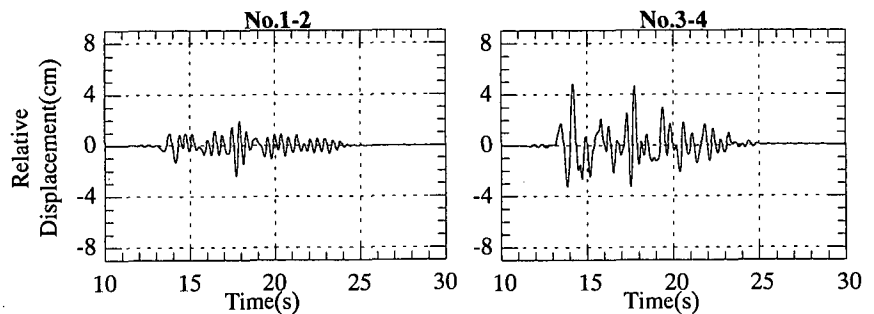


図 10.3.5 相対変位

表 10.3.2 最大応答加速度と相対変位

| 地点  | 都市 (m) <sup>*1</sup> | 地質条件     | 震度階      | 被害程度 <sup>*2</sup> | 最大加速度 <sup>*3</sup> と変位 | 最大相対変位            |       |
|-----|----------------------|----------|----------|--------------------|-------------------------|-------------------|-------|
| I   | 1                    | 西宮 (340) | 沖積層      | 6                  | 軽(10)                   | 712gal(30.9cm)    | 2.5cm |
|     | 2                    |          |          |                    |                         | 768 gal(30.5cm)   |       |
| II  | 3                    | 西宮 (200) | 山地と段丘    | 5                  | 重(22)                   | 804 gal(30.5cm)   | 4.9cm |
|     | 4                    |          |          |                    |                         | 834 gal(32.5cm)   |       |
| III | 5                    | 西宮 (400) | 沖積粘土と埋立地 | 5                  | 重(30)                   | 667 gal(33.2cm)   | 8.4cm |
|     | 6                    |          |          |                    |                         | 898 gal(39.9cm)   |       |
| IV  | 7                    | 芦屋 (190) | 沖積層      | 7                  | 軽(6)                    | 990 gal(37.4cm)   | 1.2cm |
|     | 8                    |          |          |                    |                         | 1,107 gal(37.3cm) |       |
| V   | 9                    | 芦屋 (260) | 沖積層      | 6                  | 重(25)                   | 899 gal(40.9cm)   | 6.8cm |
|     | 10                   |          |          |                    |                         | 1,007 gal(38.7cm) |       |
| VI  | 11                   | 芦屋 (115) | 沖積層      | 7                  | 重(20)                   | 728 gal(37.0cm)   | 5.2cm |
|     | 12                   |          |          |                    |                         | 803 gal(38.7cm)   |       |

\*1:2地点間の距離 ;\*2:括弧の中の数字は 1.2\*1.2km<sup>2</sup> 単位における被害数

\*3: 入射波地点 I、II、III: Port Island-32m NS 波  
地点 IV、V、VI: Port Island-16m NS 波

## 10.4 あとがき

本論では、兵庫県南部地震による被害を詳細に検討して、地震時上、下水道の被害推定のための工学的指標を検討し、従来考えられてきた一般指標では十分ではないこと、さらに提案した「地震時相対変位」が、比較的良く被害を説明し得たことを明らかにした。これと類似の考え方はすでに兵庫県南部地震以降に改訂された指針類<sup>(1), (2)</sup>にも反映されていることから今後の一つの方向になるのではないかと考えている。さてここでは「あとがき」として、最近話題となっている「液状化や側方流動」にともなう大変形問題に焦点を絞って、現時点で考えられる設計上の技術的課題についてふれてみたい。

(1)埋立て地域や沖積地盤地域は地盤剛性が相対的に小さいのでせん断ひずみは大きく、局部的に地震時の相対地盤変位が大きくなる可能性がある。水道施設耐震工法指針・解説(1997)では、平均的な地盤剛性を算定し余弦関数を用いて地盤変形量を算定しているが、地層の剛性が低くてせん断ひずみが大きくなるような層が狭在している様な場合、地盤変形を適切に評価できない。一次元地盤応答解析等の地震時応答解析法を積極的に援用する必要がある。

(2)地層構成が比較的一様な場合でも、局所的な液状化状態の発生により表層地盤の地震時変形に不均一な変形が発生する。この現象は地震動が強いほど顕著で地震時の地盤変形が大きいほど変位の不均一度も大きくなる。水道施設耐震工法指針・解説(1997)では、液状化層中に管路があるという仮定に基づいた照査は加えられたが、管路が敷設されている下層が液状化するような場合には適用範囲外と解釈できる[文献(1)pp198]。このような現象に対応できるように、液状化現象を考慮した簡易な地盤変形量の設計法の確立を考えていく必要がある。

(3)側方流動現象に関する影響要因は多く、厳密には広範囲の領域を対象とした検討を行う必要がある。側方流動の設計に際しては、管路建設地点の点あるいは線的な土質情報のみならず、護岸直下の地盤改良の有無、地盤改良工法の諸元、等の護岸直下・直背後の情報及び護岸背後地域の面的な土質情報が必要となる。すなわち、設計対象施設毎の土質調査結果のみでは不十分であること、面的な情報を収集するためには多大な時間とコストのため一般に敷地内での土質調査に限定されること、等を考えると、今後、埠頭単位や地域ブロック単位に土質データベース・液状化関連データベースを整備し、共通に使用できるシステムを構築していくことも必要であろう。

**謝辞:**本検討は「阪神淡路大震災調査研究委員会/地盤・基礎分科会/線状構造物小委」を中心に進め、まとめたものである。特にパシフィックコンサルタンツ(株)新井雅之様には原稿を詳細に検討していただいた。ここに記して各位に謝意を表したい。また多くの資料は各官庁等から頂いたものである。ここにあわせて謝意を表します。

## 参考文献

- (1) 社団法人 土木学会関西支部: 大震災に学ぶ 阪神大震災調査研究委員会報告書 / (2) 1995年兵庫県南部地震による水道管路の被害と分析, 日本水道協会, 1996年5月 / (3) 下水道の地震対策についての検討報告書(概要), 日本下水道協会, 平成9年8月 / (4) Masaru Kitaura and Masakatsu Miyajima, Damage to Water Supply Pipelines, Special Issue of Soil and Foundation, P325-333, Jan. 1996 / (5) 高田 至郎, 活断層地形と水道管路, 第4回水道管路国際シンポジウム講演集, 神戸, 1997年, pp7-21 / (6) 橋上 重弘, 阪神・淡路大震災における神戸市の配水管被害, 地盤との関係, 日本水道協会関西地方支部第40回研究発表会発表概要集, 平成8年11月, pp160-163 / (7) 水谷 崇亮, 東畑 郁生, 地盤定数の連続性を考慮した動的解析の神戸市内での応用, 第30回土質工学研究発表会, 金沢, pp129-130 / (8) 寺田 邦雄, 兵庫県南部地震による人工島の液状化に関する一考察, 第31回地盤工学研究発表会, pp1223-1224, 北見 / (9) 山村 真由子, 兵庫県南部地震における鉄道盛土の破壊メカニズムの検討, 第52回土木学会年次学術講演会, 1997年9月, pp212-213 / (10) 今津 福武, 礫材料の動的変形特性, 第21回土質工学研究発表会, pp. 509-512, 1986 / (11) 社団法人 日本水道協会: 水道施設耐震工法指針・解説(1997) / (12) 社団法人 日本下水道協会: 下水道施設の耐震対策指針と解説 1997年版