

# 水道管横断方向耐震性の寸法効果と踏まえた 大口径管の地震被害要因の考察

鍬田 泰子<sup>1</sup>・櫻井 敬己<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 神戸大学准教授 工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

E-mail: kuwata@kobe-u.ac.jp (Corresponding Author)

<sup>2</sup>学生会員 神戸大学工学部 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

E-mail: 1624250t@stu.kobe-u.ac.jp

2018年の大阪府北部の地震で大口径の水道管が複数管体破損をした事例を受けて、破損管固有の強度不足や劣化などの要因だけでなく、小口径管よりも大口径管の方が横断方向の耐震性が劣る、いわゆる寸法効果があると考えられる。本研究では、管横断方向の耐震性評価においてより精度の良い応答震度法を用いて、小口径から大口径までの水道管を対象にして口径による地震応答への影響を評価し、横断方向の耐震性に寸法効果があることを明らかにした。さらに、大阪府北部の地震で管体損傷があった口径 900mm の被害要因について、種々の条件を変えて耐震性を比較した。その結果、地震時の動水圧の上昇よりも、腐食劣化によって管厚減肉する方が被害要因としての寄与が大きいことがわかった。

**Key Words:** buried water pipe, size effect, damage mechanism

## 1. はじめに

2018年6月18日に発生した大阪府北部の地震では、上水道管路や工業用水道管路に複数の管体破損被害が生じ、水道水や工業用水の供給を一時的に停止した他、周辺道路が冠水するなどの被害が発生した。本地震では、地震規模 M6 クラスの中規模地震であったのにも関わらず過去の地震では被害事例がないダクタイル鋳鉄管の管体が大きく破損する事例が複数確認された<sup>1)</sup>。

これらの管体破損したダクタイル鋳鉄管を管理していた大阪広域水道企業団<sup>2)</sup>では、管体破損した口径 800mm, 900mm の管路を掘り上げて被害要因解明のために調査を行った。その原因として、管路の製造方法に由来する局所的な強度不足と経年腐食による管厚の減少、そして地震時の管内動水圧の上昇といった3つの要因が複合的に影響したと考えられる<sup>3)</sup>。さらに、著者らが管体破損した管の一部を用いて材料試験を行った結果、鋳鉄管の機械的性質である引張強さが規格値を満たさないだけでなく、物理的性質である弾性係数においても一般的な値の 160kN/mm<sup>2</sup> の半分程度しかなかった<sup>4)</sup>。

口径 900mm の管体破損が管路断面を流下方向にみて時計の 2 時、3 時方向に生じているため、管軸方向の地震動作用による被害ではなく、横断方向で地盤のせん断

変形による地震外力が作用して管が斜めに 8 の字変形したために当該箇所で破損したと推察される。また、本地震の被害として 100mm 程度の小口径管路で管体損傷の被害がなく、また、一般的な地震被害形態である継手抜けの被害が若干であったことを踏まえると、管体破損した管には特有の素因があったとしても、断面方向の管の耐震性については口径による応答特性、つまり寸法効果があると考えられる。しかし、水道管の耐震設計指針<sup>5)</sup>において埋設管横断方向の耐震計算法は規定されておらず、水道管の横断方向の耐震性についての検討は十分なされてこなかった。

本研究では、耐震計算の評価精度を上げるために、地盤ばねの設定に課題のある応答変位法ではなく、応答震度法を用いて様々な口径に対して同一条件で管横断面に地震外力を作用させるパラメトリックスタディを行い、耐震性の寸法効果の有無を確認する。さらに、先の地震被害の要因分析<sup>3)</sup>では、応答変位法によって管横断面の耐震性評価を行っているが、本研究では先の大阪府北部の地震で管体損傷があった口径 900mm の被害要因について考察するため、種々の条件を変えて応答震度法で詳細に応答特性を検討した。

## 2. 応答震度法による耐震性評価

水道の埋設管の耐震計算では、疑似静的解析法として応答変位法が簡便であるために広く用いられてきた。この耐震計算方法では地盤ばね定数が管と地盤との動的相互作用を説明するために重要な変数となる。しかし、地盤ばね定数は、地盤条件や構造物の形状、埋設深さなどで異なるために、適切な値を設定することが肝要である。さらに、応答変位法で使用される地盤ばねは、管と地盤との間すべりや剥離の現象を適切に表現するのは困難である。これらの課題から、近年では応答震度法を用いてより合理的な耐震性評価を行う研究が進められている<sup>9)</sup>。

応答震度法は、二次元有限要素 (FEM) 等でモデル化した地盤—構造物系の全体モデルに、構造物位置における地盤のせん断ひずみが最大となる時刻での地盤の加速度分布を慣性力としてモデルに作用させることにより、構造物に発生する変位、断面力等を求める手法である。地盤・構造物を一連として計算するため、応答変位法で課題となっている地盤ばねの設定が必要ない。

下水道管きよの横断面耐震設計において周面せん断力を無視できないとして、高田ら<sup>7)</sup>は応答変位法と応答震度法による応答計算の結果を比較し、200-800mmの小口径管ではすべりが生じるために周面せん断力は低減されることを示している。佐藤ら<sup>8)</sup>や森崎ら<sup>9)</sup>は口径による周面せん断力への影響には管の寸法効果があるとして、応答震度法によって複数の口径に対して数値解析を行って考察している。

一方、水道管の耐震設計指針である水道施設耐震工法指針<sup>9)</sup>では、横断面の耐震計算についてはシールドや立坑等は応答変位法での検討が規定されているが、埋設管については触れられていない。前述の下水道管と比べて、管路の大部分が口径100mm以下の小口径であり、地盤と管の間でのすべりによって応答が低減されること、また下水道管に比べて地表近くの浅いところに埋設されているために地震時の地盤のせん断変形による影響を受けにくいなどのことが考えられる。しかし、送水管などの上流の管路であれば口径は大きく周面せん断力等も無視できなくなると考えられる。

本研究では、佐藤ら<sup>8)</sup>や森崎ら<sup>9)</sup>の行った応答震度法による下水道管の応答計算を参照して、水道管を対象に、市場に小口径から大口径まで展開しているダクタイル鋳鉄管の規格を用いて口径による地震応答への影響を評価して、横断方向の耐震性に寸法効果の有無を検討した。とくに、管と地盤との間にジョイント要素を配置してすべりや剥離を考慮する場合としない場合による断面力の違いについても検討した。なお、既往の下水道管を対象とした研究と比べて、水道管では埋設深さが浅いことや、内水圧が作用していることなど解析条件が異なる。

## 3. 解析ケースと解析条件

### (1) 解析ケース

水道管横断方向の耐震性の寸法効果を応答震度法によって評価するため、口径の異なる6種類のケースを設定した。管の材質は、小口径から大口径まで市場に展開しているダクタイル鋳鉄管 (JPA G 3004)<sup>10)</sup>として、呼び径で75, 100, 250, 500, 900, 1500mmを対象として、それらの規格から表-1に示すように諸元を揃えた。さらに、6種類の口径モデルに対して管の地盤とのすべり・剥離を考慮するケースと考慮しないケースをそれぞれ2ケースの解析を実施した。

### (2) 解析条件

#### a) 管路および地盤条件

対象とする水道管の材料特性を表-1に示す。なお、管路材料の非線形性の影響を除去するため、いずれも線形はり要素でモデル化した。また本研究の計算方法は、二次元有限要素法モデルを用いた応答震度法による静的耐震計算としている。そのため、管の断面力(軸力)を求める際に断面二次モーメントを与える必要があるが、極力単純化するために奥行きを一律1mと設定している。

地盤諸元を表-2に示す。管の土被り厚は図-1に示すように一律1.5mとし、表層厚は一律GL-15mとした。

表-1 構造物諸元

呼び径 (mm)	75	100	250	500	900	1500
外径 (mm)	93	118	271.6	528	939	1554
管厚 (mm)	7.5	7.5	7.5	9.5	15	23.5
ヤング率 E (kN/m <sup>2</sup> )	1.6×10 <sup>8</sup>					
断面積 (m <sup>2</sup> /m)	0.0075	0.0075	0.0075	0.0095	0.015	0.235
単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	70.7					

表-2 地盤条件

土質名	N 値	ポアソン比	せん断弾性波速度 (m/s)	単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	粘着力 (kN/m <sup>2</sup> )	内部摩擦角 (°)
砂質土	2	0.28	100	16.7	0	30
粘性土	5	0.28	250	16.7	38	0
基盤層	50		400	19.6		

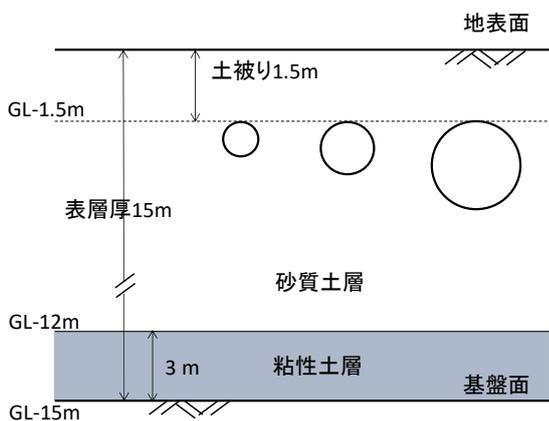
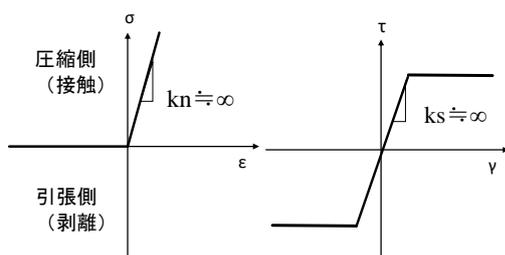


図-1 検討モデル



(a) 法線方向ばね (b) 接線方向ばね

図-2 ジョイント要素のばね特性

### b) 滑り・剥離の考慮

管路と地盤との接触面の滑り・剥離はジョイント要素によって考慮した。図-3に示すようにジョイント要素は接触面の法線（垂直）方向ばね  $kn$  とせん断ばね  $ks$  の2つで定義される。これらのばね係数は数値計算上可能な範囲でできる限り大きな値で設定した。せん断ばね  $ks$  の降伏応力は、式(1)に示す Mohr-Coulomb の破壊基準を採用した。また、法線ばねは圧縮域を線形、引張域では剥離するものとし応力が 0 になるよう設定した。すべり・剥離を考慮しないケースでは、構造物と周辺地盤を固結した。

$$\tau = c + \sigma_v \tan \phi \quad (1)$$

### (3) 解析モデル

応答震度法の解析には静的応答解析プログラム SoilPlus を使用した。図-3に解析モデルの一例を示す。鉛直方向には図-1に示す表層地盤までをモデル化し、水平方向には側方境界の影響がないように管路水平端より左右に約 30m の地盤を設けて側方境界を配置した。モデル底面は固定条件とし、側方端部は水平ローラーとした。

管路は管周方向に 36 分割した。管路位置の水平方向、鉛直方向以外の地盤要素の大きさを砂質土層に対しては

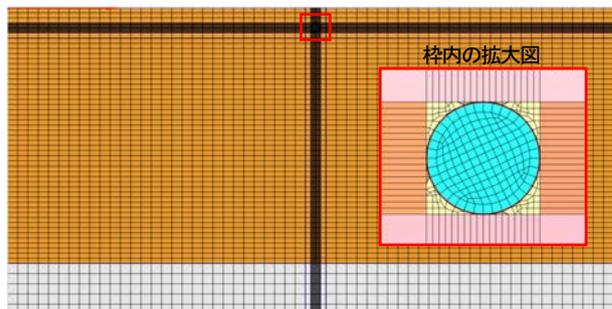


図-3 応答震度法による解析モデル（口径 900mm の場合）

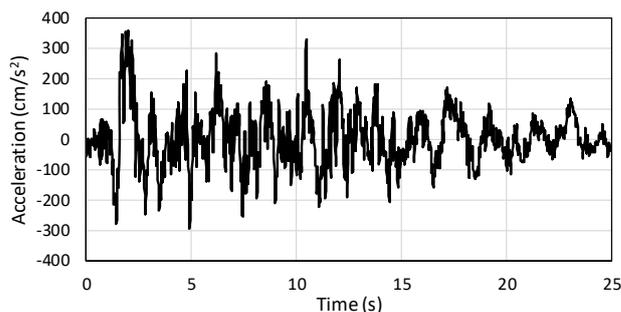


図-4 入力加速度波形（一次元重複反射解析）

水平 1m × 鉛直 0.5m に、粘性土に対しては水平 1m × 鉛直 1m と設定した。とくに管周面では細かくメッシュを切った。ただし、管路の近傍地盤についてはこの限りではない。地盤剛性は後述する一次元地震応答解析による収束時のせん断剛性を用いた線形解析とした。

解析は①自重・水圧解析、②応答震度解析の二段階で行った。自重・水圧解析は応答震度解析と同じジョイント要素の条件で行い、解析後の応力状態で応答震度解析時を行った。応答震度解析では、徐々に荷重を増加させるステップ解析を行った。

### (4) 地震荷重

応答震度法では地盤加速度を慣性力としてモデルに作用させる。本研究では、一次元重複反射法による等価線形解析によって、構造物上端と下端の相対変位が最大となる時刻での加速度分布を求め、モデルの各節点に作用させる慣性力を算出した。重複反射解析における地盤の初期せん断剛性は、せん断波速度と密度から評価した。

重複反射解析における入力地震動は、基盤面が I 種地盤相当として「地震時保有水平耐力法の照査用 I 種地盤」<sup>1)</sup> の波形を入力した。図-4 に入力加速度波形、図-5 に最大相対変位の概念図を示す。

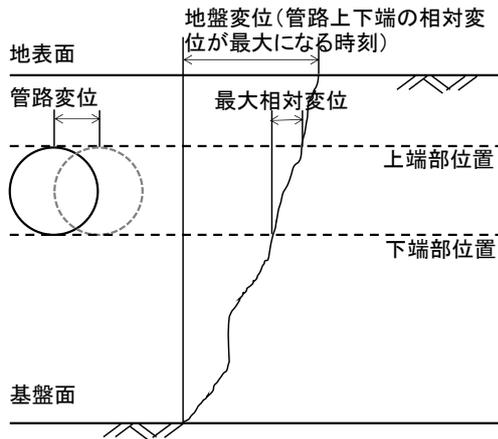


図-5 最大相対変位の概念

### (5) 水圧

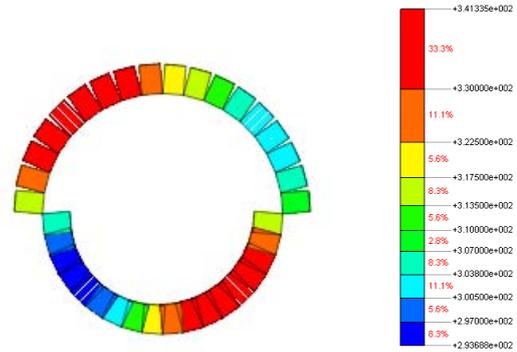
管路内側から管路に与える水圧は、水道施設設計指針<sup>12)</sup>に即し、配水管の一般的な管種の最高使用圧力から算定する。最高使用圧力は、ダクタイル鋳鉄管及び鋼管、ステンレス鋼管では最も低い管種で 1.00MPa、硬質ポリ塩化ビニル管や水道配水用ポリエチレン管では 0.75MPa となっている。配水管網の中では、これらの管種が混在するので最大静水圧としては、現在使用されている給水装置の保護の観点から 0.74MPa が設定されている。本研究では、36 分割された管のより要素に対して法線方向に作用させた。

## 4. 口径別耐震解析の評価結果

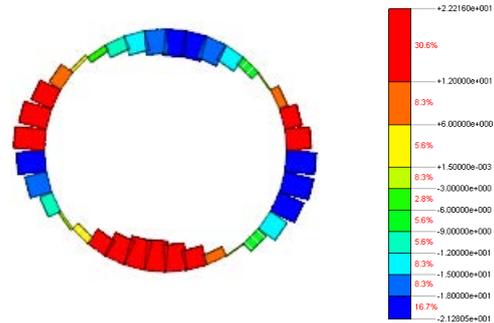
### (1) 口径と断面力との関係

口径 6 ケースとジョイント要素有り無しの全 12 ケースについて横断面の地震応答解析を行った。応答解析結果の一例として、口径 900mm のジョイント要素ありの場合の断面力分布図を図-6 に示す。本研究は内圧管であるため軸力はすべて引張側に発生している。せん断力、曲げモーメントについては、地震動による地盤のせん断変形の影響を受けて斜め 8 の字の分布形状を示す。最大断面力が発生する位置は口径によって若干異なっているが、断面力分布はジョイント要素の有無に関わらず同一口径においてほぼ同じ形状を示した。

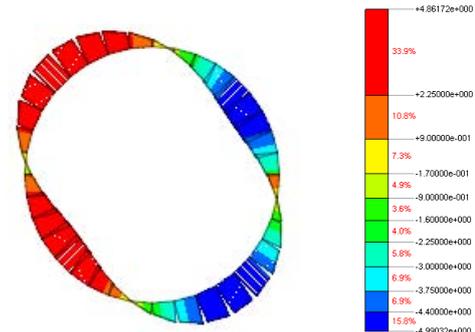
ジョイント要素の有無別に口径と最大断面力との関係を図-7 に示す。横軸の口径は外径ではなく呼び径で示している。いずれの断面力においても口径が大きくなるにつれて最大断面力は単調増加する傾向がみられた。ジョイント要素の有無についての考察は後述するが、軸力についてはジョイント要素無しのものに対してジョイント要素有りの軸力比で 3%の差が発生したが、せん断力、曲げモーメントについては 1%以上の差異はなかった。



(a) 軸力



(b) せん断力

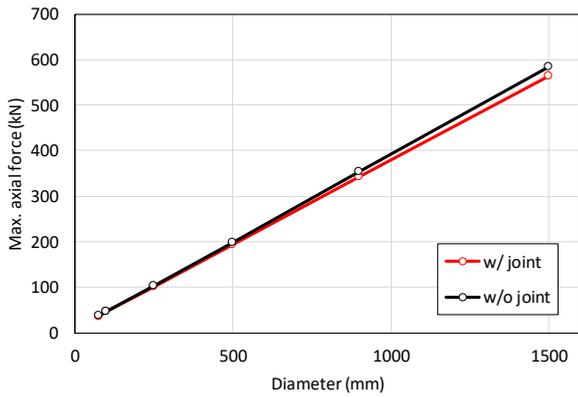


(c) 曲げモーメント

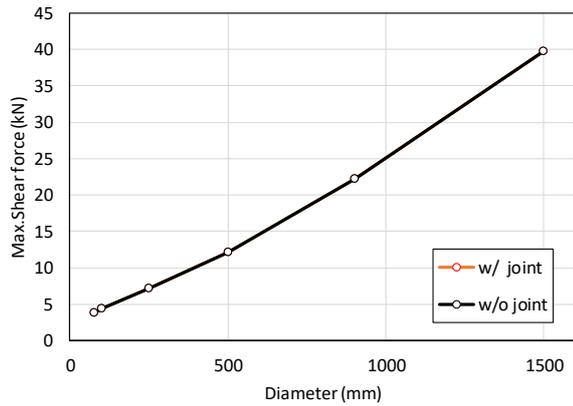
図-6 断面力との関係

### (2) 縁応力からみた口径別安全余裕

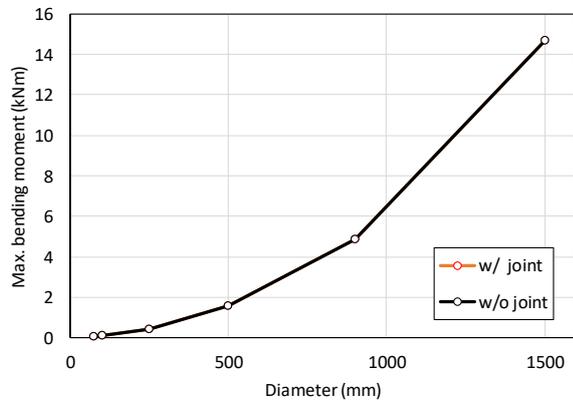
図-8は管外側の縁応力の最大値を口径別、ジョイント要素の有無で整理したものを示す。小口径ほど最大縁応力に対する軸力の応力分担比が高く、口径 75mm で 31%あり、口径 1500mm では 11%まで低下する。つまり、地震時に内水圧の変化がなければ、基本的に横断面の作用外力は地震動の方が支配的である。また、図-8 で口径が 500mm 以降で縁応力の増加勾配が緩やかになるのは、口径に対する管厚比 (D/t) が一定ではなく、口径が大きくなるにつれて増加し、口径 500mm 以上で収束する傾向にあり、それに発生応力も影響されている。



(a) 軸力



(b) せん断力



(c) 曲げモーメント

図-7 口径と最大断面力との関係

本研究で設定した解析条件では、ダクタイル鋳鉄管の引張強さである  $420\text{N/mm}^2$  には達しておらず横断面の耐震性には安全余裕があるが、口径  $100\text{mm}$  以下の縁応力に対して口径  $500\text{mm}$  以上の縁応力は 6 から 9 倍程度ある。実際には布設場所の地盤条件や布設条件、地震外力によってこの比は左右されるが、口径  $500\text{mm}$  以上の管に対しては横断面の耐震性の検討をすべきといえる。

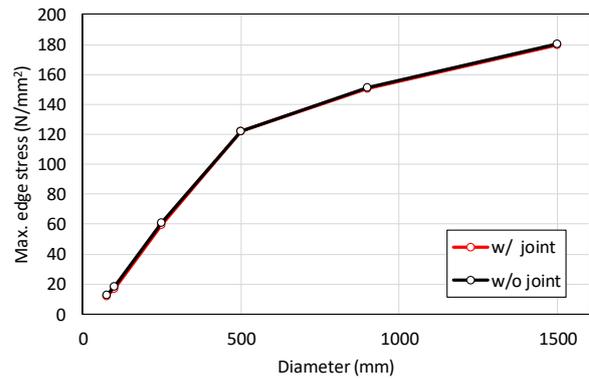


図-8 口径と縁応力との関係

表-3 すべり・剥離による断面力・応力の低減

	75	100	250	500	900	1500
軸力※	0.993	0.992	0.981	0.971	0.967	0.965
せん断力※	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.001
曲げモーメント※	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
縁応力※※	0.998	0.997	0.996	0.995	0.994	0.997

※：断面力（ジョイント要素有） 断面力（ジョイント要素無し）

※※：応力（ジョイント要素有） 応力（ジョイント要素無し）

### (3) すべりと剥離の影響

表-3にすべり・剥離を考慮したケース（ジョイント有り）と考慮しないケース（ジョイント無し）における最大断面力比と縁応力比をそれぞれ示す。数値が 1.0 未満であればすべり・剥離の考慮によって断面力が低減されたことを示す。最大軸力において最大 3%および縁応力においては 1%未満の低減となった。既往の研究で小口径管においてジョイント要素によって断面力が低減するということが指摘されていたが、本研究ではそのような結果には至らなかった。ジョイント要素の応力状態について確認し、さらに検討をする予定である。

図-9は、ジョイント有りの解析結果の一部の口径について、管路周辺地盤の最大せん断ひずみ分布を示したものである。口径  $75\text{mm}$  のケースに比べて口径  $1500\text{mm}$  のケースでは、管路周辺地盤の地盤ひずみが局所的に大きく、口径が大きいほど分布範囲も広い。このように局所的なひずみの増加はすべりと同様な効果をもたらし、口径が大きい方が管路に作用する周面せん断力の低減効果がみられるといえる。ただし、既往研究では下水道管を対象としており、管の埋設位置が深く地盤がせん断変形しやすい場所で断面力の低減が確認されたと考えられる。本研究では口径によって地盤ひずみの差はみられるが、埋設位置そのものが浅く、応答値に効いてくるほど大きなひずみが発生しておらず、すべり等の影響が明瞭ではなかったと考えられる。

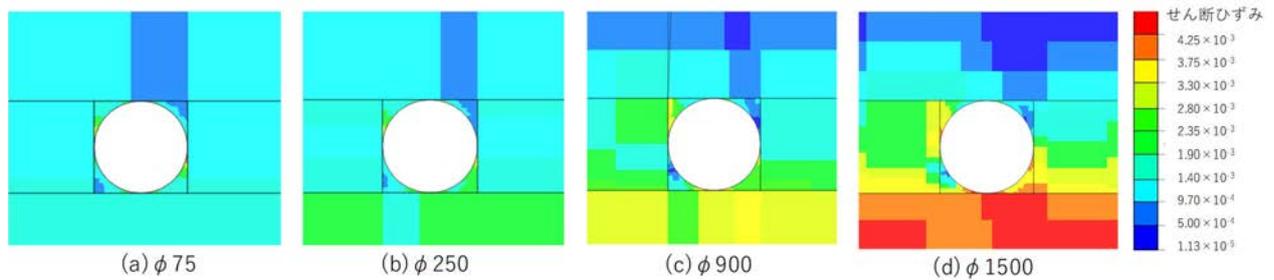


図-9 管路周辺地盤の最大せん断ひずみ

表-4 被害要因の検討ケース

Case0	通常 被害要因無し
Case1	水圧 0.74MPa→3.5MPa
Case2	管厚 15mm→11mm
Case3	ヤング係数 E→0.5E
Case4	Case1 から Case3 の要因全て

## 5. 被害要因による耐震性のパラメータスタディ

### (1) 検討ケース

先の地震による口径 900mm の管体破損の被害要因について応答震度法を用いて耐力計算を行った。表-4に本研究で検討するケースを示す。Case0 の通常状態は上述の耐震性の寸法効果に関する検討で行った口径 900mm のものである。この通常状態に対して、4 つの検討ケースを設定した。Case1 の水圧について、文献 3)において被災地域周辺の地震動と配管形状から瞬間的に動水圧が 3.5MPa に上昇したと推定されている。Case2 の管厚について、破損管の管厚は 12.9mm で外面腐食部の平均管厚は 8mm であったと報告されている<sup>3)</sup>。本研究では、Case0 において管厚を規格値で設定して検討を進めてきたため、それとの比較のために管厚を 4mm 小さい 11mm に全面減肉させた。Case3 については、著者ら<sup>4)</sup>が破損管の一部を用いて曲げ試験をしたところ通常のダクタイル鋳鉄のヤング係数の半分程度しかなかったことから設定した。Case4 は Case1 から Case3 までの要因を合わせたものである。本検討ではジョイント要素有りの場合のみの解析を実施した。

図-10 は各検討ケースにおける解析で、自重と水圧を载荷する第 1 段階での最大縁応力とその後 2 段階目として地震動を载荷した後の最大縁応力を示す。第 1 段階と第 2 段階の最大縁応力を示す管部材位置は必ずしも一致しない。Case1 では、水圧が 3.5MPa になったために水圧のみの縁応力が 143N/mm<sup>2</sup> 発生しており、地震力よりも動水圧が耐震性評価に支配的になっている。しかし、

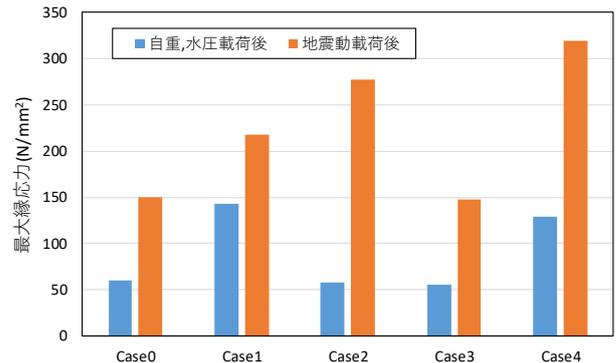


図-10 要因検討ケースにおける最大縁応力

Case1 の水圧よりも管厚が減肉された方が縁応力は大きくなった。Case3 のヤング係数の半減は、たわみが大きくなるかと想定したが、内水圧で内面から支持されているため縁応力としては通常時と変わらない結果になった。

ダクタイル鋳鉄管の布設当時の規格では引張強さは 372N/mm<sup>2</sup> であるが、破損管路の丸棒試験片であれば 300N/mm<sup>2</sup> 程度、円弧状試験片では 200N/mm<sup>2</sup> 程度であったことを踏まえると、動水圧の上昇、腐食による管厚減肉のいずれかだけでも管体破損に至った可能性があるが、劣化による管厚減肉の方が縁応力が大きく、破損要因に寄与していると考えられる。

また、いずれの要因も不確定要素であり、数値にも幅があるが、水圧、管厚と耐力不足のいずれをも考慮すると、地震時に 300N/mm<sup>2</sup> 以上の縁応力が発生する可能性は高く、横断面耐力不足で管体破損に至ることが本研究でも示唆される。

## 6. 結論

本研究では、水道管横断方向の耐震性については口径に応じて耐震性に差異がある、寸法効果があると考えられることから、耐震計算には精度の良い応答震度法を用いて、小口径から大口径までの水道管を対象地震応答解析を行い、口径効果を確かめた。さらにさらに、大阪府

北部の地震で管体損傷があった口径 900mm の被害要因について、種々の条件を変えて耐震性を比較した。本研究の結果は以下の通りにまとめられる。

- 本研究で設定した解析条件では、ダクタイル鋳鉄管の引張強さである  $420\text{N/mm}^2$  には達しておらず横断面の耐震性には安全余裕があるが、口径 100mm 以下の縁応力に対して口径 500mm 以上の縁応力は 6 から 9 倍程度ある。口径 500mm 以上の管に対しては横断面の耐震性の検討をすべきといえる。
- 本研究では口径によって地盤ひずみの差はみられるが、埋設位置そのものが浅く、応答値に効いてくるほど大きなひずみが発生しておらず、すべり等の影響が明瞭ではなかった。
- 破損管の耐力がなかったと踏まえると、動水圧の上昇、腐食による管厚減肉のいずれかだけでも管体破損に至った可能性があるが、劣化による管厚減肉の方が縁応力が大きく、破損要因に寄与していると考えられる。
- 水圧、管厚と耐力不足のいずれもを考慮すると、地震時に  $300\text{N/mm}^2$  以上の縁応力が発生する可能性は高く、横断面耐力不足で管体破損に至ることが本研究でも示唆される。

応答変位法では地盤ばねの課題があったために応答震度法によって耐震性評価の精度向上を図った。しかし、応答震度法でも慣性力を静的に与えているため、動的解析との結果の比較も今後必要である。

## 参考文献

- 1) 土木学会：2018 年北海道胆振東部地震・大阪府北部の地震被害調査報告書，地震被害調査シリーズ No.2, No.3, 2019.
- 2) 大阪広域水道企業団：大阪府北部の地震に係る報告会（2019 年 2 月 28 日）配付資料，2019
- 3) 宮本勝利，鎌田泰子，今村健一，浅野公之：大阪北部地震におけるダクタイル鋳鉄管（DCIP）の被害シナリオの分析事例，土木学会地震工学委員会 第 10 回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム，2020
- 4) 鎌田泰子，山村優：大阪府北部の地震で破損した初期ダクタイル鋳鉄管の材料特性，第 39 回地震工学研究発表会，2019
- 5) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説（2009 年版），2009.
- 6) 川西智浩，清野純史，西山誠治：開削トンネルの応答値算定に用いる応答震度法の解析精度に関する検討，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.68, No.4, p. I\_844-I\_854, 2012.
- 7) 高田至郎，上田智宏，鎌田泰子，岡田健二：下水道管路横断面設計と周面せん断力の影響評価，構造工学論文集 Vol.51A, pp.1589-1596, 2005
- 8) 佐藤清，中村敏晴，竹内幹雄，森崎啓，小西康彦，佐伯宗大：地中構造物の周面摩擦に関する寸法効果の影響，土木学会第 27 回地震工学研究発表会報告集，2006
- 9) 森崎啓，佐藤清，竹内幹雄，小西康彦，佐伯宗大，中村敏晴：地中埋設管の寸法と周面せん断力の関係に関する研究，土木学会第 28 回地震工学研究発表会報告集，2007
- 10) 日本ダクタイル鉄管協会：日本ダクタイル鉄管協会規格 JDPA, K 形ダクタイル鋳鉄管 G 3004, 2017
- 11) 土木研究センター：道路橋の免震・制震設計マニュアル(案), 2011
- 12) 厚生労働省：水道施設設計指針，pp.31-32, 2012

## EARTHQUAKE DAMAGE FACTOR OF LARGE DIAMETER PIPE BASED ON SIZE EFFECT OF SEISMIC RESISTANCE FOR THE TRANSVERSE DIRECTION OF WATER PIPE

Yasuko KUWATA and Hiromi SAKURAI

Referring from the case where several pipes with large diameter had damaged with cracks by the earthquake in northern Osaka in 2018, it is considered that not only factors such as insufficient strength and deterioration but also that the pipes with larger diameters is more vulnerable than those with small diameters for the seismic resistance in the transverse direction, which is a so-called size effect. In this study, the more accurate calculation method using soil-and-pipe FEM model and giving inertial force without using soil spring. The influence of the diameter on the seismic response for water pipes with small to large diameters are made clarified. Furthermore, the seismic resistance was compared under various conditions with regard to the damage factor of the 900 mm diameter pipe during the last earthquake. As a result, it was found that the reduction in pipe thickness due to corrosion deterioration contributes more as a damage factor than the increase in hydraulic pressure during the earthquake.