# 地中埋設管の寸法と周面せん断力の関係に関する研究

森崎　啓[1]・佐藤　清[2]・竹内幹雄[3]・小西康彦[4]・佐伯宗大[5]・中村敏晴[6]

[1]パシフィックコンサルタンツ株式会社　大阪本社 交通技術部
（〒541-0052 大阪市中央区安土町2-3-13 大阪国際ビルディング）
E-mail:Hiroshi.Morisaki@os.pacific.co.jp
[2]株式会社大林組　技術研究所　（〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640）
E-mail:sato.kiyo@obayashi.co.jp
[3]株式会社日水コン　下水道本部　（〒163-1122 東京都新宿区西新宿6-22-1）
E-mail:takeuti_m@nissuicon..co.jp
[4]株式会社日水コン　東京下水道事業部　（〒163-1122 東京都新宿区西新宿6-22-1）
E-mail:konisi_y@ nissuicon..co.jp
[5]日本技術開発株式会社　東京支社 地下・地盤技術部　（〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11）
E-mail:saekimu@jecc.co.jp
[6]株式会社奥村組　技術研究所　（〒300-2612 茨城県つくば市大字大砂387）
E-mail:toshiharu.nakamura@okumuragumi.jp

地中構造物の地震時挙動を正確に再現する場合，構造物と地盤間のすべり・剥離などの相互作用を的確にモデル化することが重要である．しかし，比較的小口径の円形断面に対する合理的な耐震計算方法は必ずしも確立されていないのが現状である．そこで筆者らは，下水道管（φ500mm，800mm，1500mm，3000mm）を対象に，地盤条件，寸法，埋設深度，すべり・剥離効果の有無，等に関するパラメータスタディを実施し，管径の大小による影響の違い，すなわち寸法効果の解明（特に，地震時周面せん断力の影響）を試みた．その結果として，径の大小によるすべり・剥離効果の寄与度と応力転化のメカニズムに対する知見を示した．

***Key Words :*** *Underground pipe, Size effect, Sheaingr stress, Seismic response*

## １．はじめに

シールドトンネルや地中埋設構造物の耐震解析手法には，従来から応答変位法が多く用いられてきた．応答変位法による耐震計算では地盤ばね定数を正確に算出することが重要となる．しかし，地盤ばね定数は地盤条件，構造物の形状，寸法，埋設深度などにより異なり，これらの幅広い条件に見合った合理的な設定手法が求められている．特に，構造物と地盤の間のすべりや剥離などの現象を的確にモデル化することが重要であるが，比較的小口径となる下水道などの円形管路の合理的な耐震設計手法は必ずしも確立されていないのが現状である．

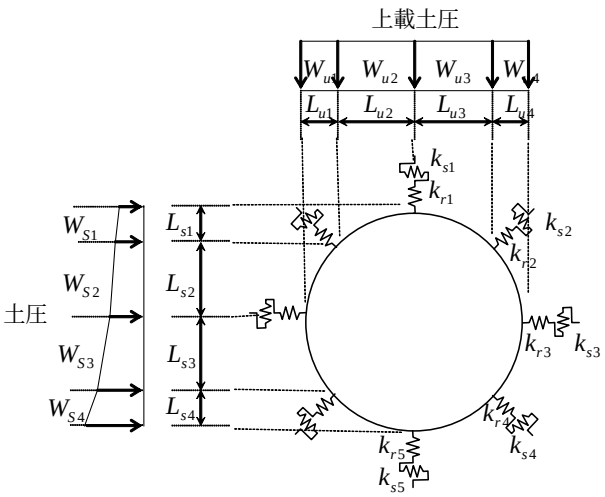
高田ら[1)]は，周面せん断力の影響は地盤のN値よりも口径の影響が大きいことを示している．そこで本研究では，下水道小口径鉄筋コンクリート管（JSWAS規格）を取り上げ，地盤条件，寸法，埋設深度，構造物と地盤の間のすべり・剥離効果の有無などをパラメータとした解析を実施し，管径の大小による影響の違い，すなわち地震時周面せん断力の影響による寸法効果の解明を試みた．

なお，この解析は時間無限大の解析である．すなわち，瞬時（例えば0.2秒間）に起こる現象も，無限大の後に起こる現象も同一と捉えている解析である．ここには，土のレオロジカルな性質，特に現段階では不明な1秒未満の土の挙動は考慮に入れていないことを予めお断りしておく．その上で，現実的で有効な設計情報を得ようとしているわけであるが，多くの問題点が簡易計算のために存在することを承知の上で話題を提供したい．

## ２．地震時周面せん断力の影響評価手法

現在，下水道施設の管渠の耐震設計法は応答変位法を用いることが多く，また，横断面の応答計算に

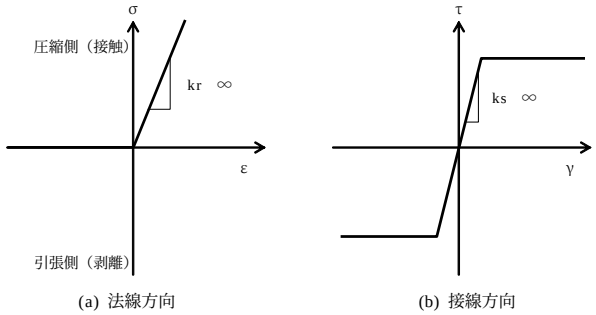
は周面せん断力を作用させずに耐震設計を行っている．一方，最近では地中構造物の耐震設計では，応答震度法が用いられることが多くなってきている．応答震度法は，準動的解析として位置付けられており，自由地盤の地震応答計算から得られる構造物にとって最も厳しくなる時刻の加速度分布を慣性力として，二次元有限要素モデルに作用させるものであり，地盤・構造物を一連として計算するため，応答変位法で問題となる地盤ばねの設定が不要である．そこで，本研究は地震時周面せん断力の影響評価の検討手法として，二次元有限要素法モデルを用いた応答震度法による静的耐震計算法を用いた．ここで，自由地盤の地震応答計算は，一次元地震応答解析（SHAKE）によることとし，入力地震動は，「道路橋示方書 Ⅴ．耐震設計編」[2)]の標準波の内，レベル2タイプⅠのⅠ種地盤用の第三波形（T1-1-3）を採用した．また，基盤入力条件は露頭換算入力（2E入力）とし，地盤の非線形特性は土研資料[3)]によった．




Lsi：側面に載荷される土圧の投影長

Lui：上下面に載荷される上載圧の投影長

**図-1**　モデル化イメージ図（8分割時の例）




(a) 法線方向　　(b) 接線方向

**図-2**　ジョイント要素の非線形特性

地震時において，地盤と構造物の間の付着力は十分に高くないため，地盤と管路との間にすべりや剥離現象が生じる可能性がある．この現象を考慮すると，管路に発生する断面力は変化する可能性がある．そこで，有限要素法でこの不連続面の挙動を表現するため，**図-1**および**図-2**のような非線形性を有するジョイント要素を用いた．理想的な接触面の構成関係は，**図-1**に示すばね定数（kr，ks）を無限大にすることであるが，数値計算上，困難が伴う．そこで，**図-2**のように数値計算上可能な範囲で，できる限り大きな有限な値のばね定数を仮定した．なお，**図-1**は8分割での例であり，実際の計算では36分割で実施している．

せん断ばね（ks）の降伏応力は，(1)式に示す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を0とした．

$$\tau = c + \sigma_v \cdot \tan\phi \quad \text{（接触時）} \qquad (1)$$

$$\sigma = 0 \quad \text{（剥離時）} \qquad (2)$$

ここに，c，φ：土の粘着力，内部摩擦角

## ３．地震時周面せん断力の影響評価

### (1) 計算諸条件

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た．以降で選定した地盤条件を元に地盤の一次元地震応答解析（SHAKE）を実施し，地盤の加速度分布による慣性力（質量加速度）を求め，応答震度法に用いる地震外力（作用外力）とした．

検討を実施したモデルの諸条件を以降に示す．

### a) 管路および地盤条件

対象とする地中管路は，下水道小口径鉄筋コンクリート管（JSWAS規格）とし，その特性を**表-1**に示す．管径は周面せん断力の影響が大きく作用すると考えられるため，内径500mm，800mm，1,500mm，3,000mmの4種類を想定した．なお，管路材料の非線形性の影響を払拭するため，管路材料の非線形性は考慮しないこととした．また，解析において管の土被り条件の影響を払拭するため，**図-3**に示すように，土被り厚さは一律10mとし，表層厚は，一律GL-30.0mとした．なお，対象とする地盤条件は，周面せん断力の影響評価を行う上で極力単純化するため，単層地盤とした．地盤条件は**表-2**に示す土質およびN値の違いより4種類を想定した．

地盤の剛性は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，管の剛性は線形解析であることから，全断面有効剛性とした．なお，地盤を非線形材料とした検討も実施しており，別途報告[4)]する．

**表-1**　管路諸元

| 呼び径(mm) | 500 | 800 | 1500 | 3000 |
|---|---|---|---|---|
| 内　径(mm) | 500 | 800 | 1500 | 3000 |
| 厚　さ(mm) | 70 | 80 | 140 | 250 |
| 材　質 | 鉄筋コンクリート管（JSWAS規格） | | | |
| ヤング係数(kN/m$^2$) | $3.30\times10^6$ | | | |
| 単位体積重量(kN/m$^3$) | 24.5 | | | |
| 断面積(m$^2$) | 0.07 | 0.08 | 0.14 | 0.25 |
| 断面二次モーメント(m$^4$) | $2.86\times10^{-5}$ | $4.27\times10^{-5}$ | $2.29\times10^{-4}$ | $1.30\times10^{-3}$ |

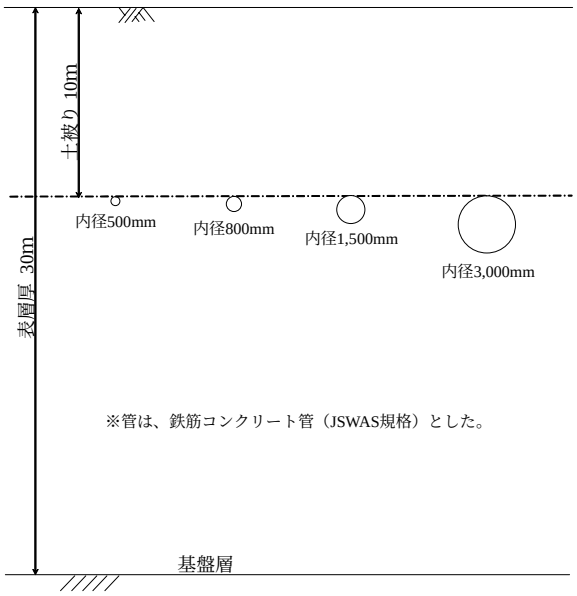



**図-3**　検討モデル概念図

**表-2**　地盤条件

| 土質名 | N値 | せん断弾性波速度 (m/s) | 単位体積重量 (kN/m$^3$) | 粘着力 (kN/m$^2$) | 内部摩擦角 (度) |
|---|---|---|---|---|---|
| 粘性土 | 2 | 126 | 16 | 20 | 0 |
| | 10 | 215 | 16 | 60 | 0 |
| 砂質土 | 10 | 172 | 19 | 0 | 31 |
| | 30 | 249 | 19 | 0 | 31 |

### b) 地震荷重

応答震度法に用いる地震荷重は，一次元地震応答解析（SHAKE）により算出した．入力地震動波形を**図-4**に示す．また，一次元地震応答解析結果を**表-3**に示す．ここで，最大相対変位とは，管渠上端部軸線と下端部軸線位置でのものである（**図-5**参照）．

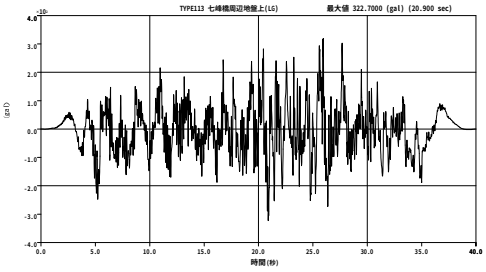



**図-4**　入力地震動波形

**表-3**　地盤の一次元地震応答解析結果総括表

| 土質 | N値 | 内径 (mm) | 最大応答加速度(gal) 地表面 | 基盤面 | 応答倍率 | 最大せん断ひずみ (%) | 最大変位 (cm) | 最大相対変位 (cm) | 地盤のせん断剛性 (kN/m$^2$) 初期 | 収束時 | 剛性低下率 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 粘性土 | 2 | 500 | 321 | 275 | 1.17 | 1.50 | 26.2 | 0.34 | 25920 | 7635 | 0.29 |
| | | 800 | | | | | | 0.53 | | | |
| | | 1500 | | | | | | 1.03 | | | |
| | | 3000 | | | | | | 2.23 | | | |
| | 10 | 500 | 355 | 302 | 1.18 | 0.32 | 5.7 | 0.09 | 75469 | 37903 | 0.50 |
| | | 800 | | | | | | 0.13 | | | |
| | | 1500 | | | | | | 0.26 | | | |
| | | 3000 | | | | | | 0.56 | | | |
| 砂質土 | 10 | 500 | 157 | 275 | 0.57 | 1.60 | 23.5 | 0.25 | 57357 | 7598 | 0.13 |
| | | 800 | | | | | | 0.41 | | | |
| | | 1500 | | | | | | 0.83 | | | |
| | | 3000 | | | | | | 1.97 | | | |
| | 30 | 500 | 290 | 288 | 1.01 | 0.63 | 5.8 | 0.08 | 120206 | 38050 | 0.32 |
| | | 800 | | | | | | 0.12 | | | |
| | | 1500 | | | | | | 0.24 | | | |
| | | 3000 | | | | | | 0.52 | | | |

※地盤のせん断剛性は管周辺3.0mの平均値を示す。
※剛性低下率＝(収束地盤剛性)／(初期時地盤剛性)

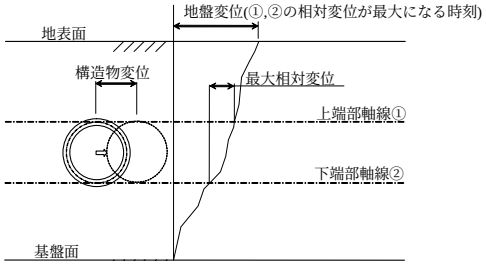



**図-5**　最大相対変位の概念

### c) 解析ケースおよび解析モデル

解析は，地盤条件，管径の違いおよび管と土のすべり・剥離の考慮の有無より**表-4**に示す32ケースとした．

地盤の有限要素モデルは，管周では細かくメッシュを切り，管路と側方境界の距離は十分に確保した．

有限要素モデルの一例として，内径3000mmのものを**図-6**に示す．

管と土のすべり・剥離の非線形性を考慮するために荷重増分法を用いて，加速度分布を入力した．なお，管材料および地盤の非線形性の影響を払拭するために，ジョイント要素以外は弾性計算としている．

**表-4**　応答震度法解析ケース一覧表

| No. | 地盤条件 土質 | N値 | 管と土のすべり・剥離考慮の有無 | 管内径 (mm) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 粘性土 | 2 | 考慮しない | 500 |
| 2 | | | | 800 |
| 3 | | | | 1500 |
| 4 | | | | 3000 |
| 5 | | | 考慮する（c=20kN/m$^2$） | 500 |
| 6 | | | | 800 |
| 7 | | | | 1500 |
| 8 | | | | 3000 |
| 9 | | 10 | 考慮しない | 500 |
| 10 | | | | 800 |
| 11 | | | | 1500 |
| 12 | | | | 3000 |
| 13 | | | 考慮する（c=60kN/m$^2$） | 500 |
| 14 | | | | 800 |
| 15 | | | | 1500 |
| 16 | | | | 3000 |
| 17 | 砂質土 | 10 | 考慮しない | 500 |
| 18 | | | | 800 |
| 19 | | | | 1500 |
| 20 | | | | 3000 |
| 21 | | | 考慮する（tanφ=0.6） | 500 |
| 22 | | | | 800 |
| 23 | | | | 1500 |
| 24 | | | | 3000 |
| 25 | | 30 | 考慮しない | 500 |
| 26 | | | | 800 |
| 27 | | | | 1500 |
| 28 | | | | 3000 |
| 29 | | | 考慮する（tanφ=0.6） | 500 |
| 30 | | | | 800 |
| 31 | | | | 1500 |
| 32 | | | | 3000 |

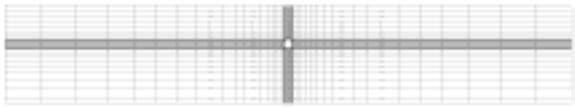


**図-6**　有限要素モデル図（内径3000mm）

また，ジョイント要素のうち管と土のすべりを表現するせん断ばねの降伏は，Mohr-Coulombの破壊基準を採用し，その際に用いるCおよびtanφは**表-4**に示す値を仮定した．

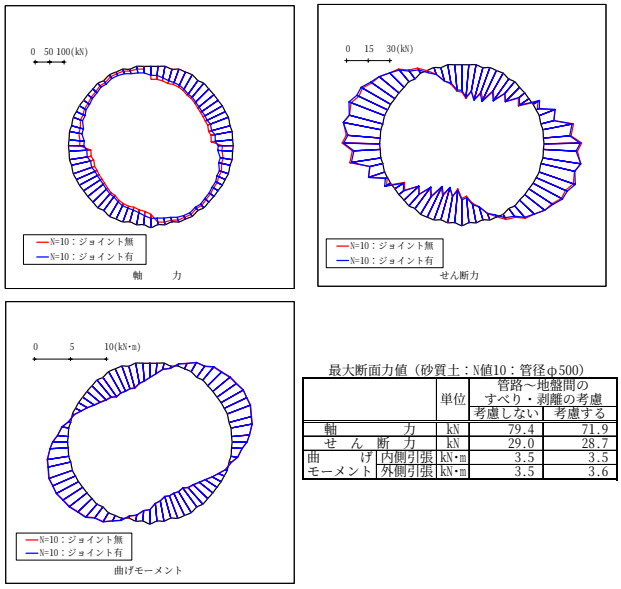
### (2) 応答震度法解析結果と考察

応答震度法解析は，地盤条件，管径を変化させ，管路と地盤の間のすべり・剥離を考慮しないケース（以下，ジョイント無と呼ぶ）と考慮したケース（以下，ジョイント有と呼ぶ）により，パラメータスタディを行った．

#### a) 砂質土の応答震度法解析結果

軸力・せん断力・曲げモーメントの断面力分布の一例として，N値が10の砂質土における管径φ500のものを**図-7**に示す．図中には，ジョイント無・有のケースの断面力を重ねて表現している．

次に，管の内径と変位・各断面力の関係を**図-8**および**図-9**に示す．変位については管の上端位置に着目し，各断面力については，最大値発生位置に着目した．




最大断面力値（砂質土：N値10：管径φ500）

| | | 単位 | 管路～地盤間のすべり・剥離の考慮 | |
|---|---|---|---|---|
| | | | 考慮しない | 考慮する |
| 軸　力 | | kN | 79.4 | 71.9 |
| せ　ん　断　力 | | kN | 29.0 | 28.7 |
| 曲　げ　モーメント | 内側引張 | kN･m | 3.5 | 3.5 |
| | 外側引張 | kN･m | 3.5 | 3.6 |

**図-7**　断面力分布図（砂質土：N値10：φ500）

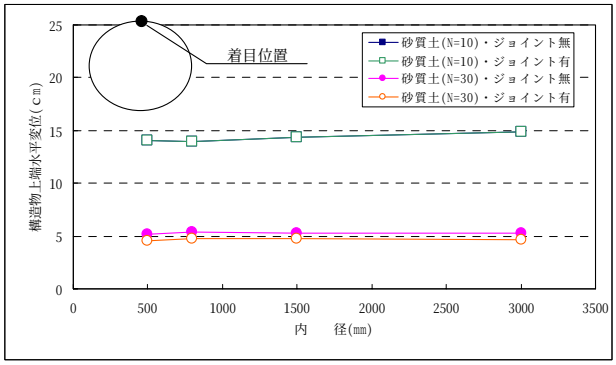
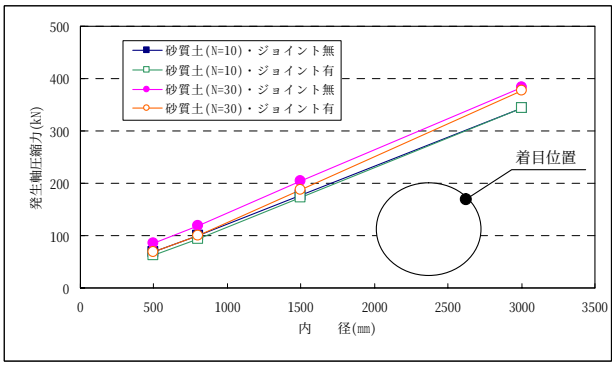
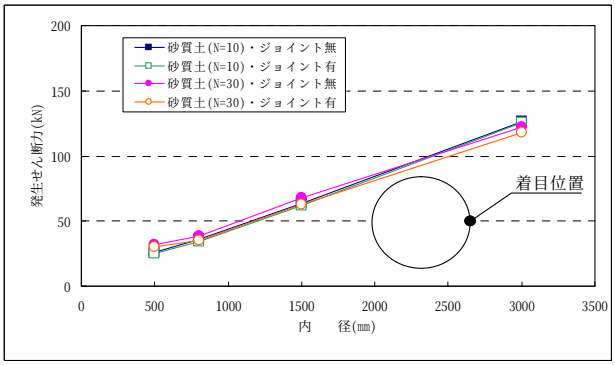


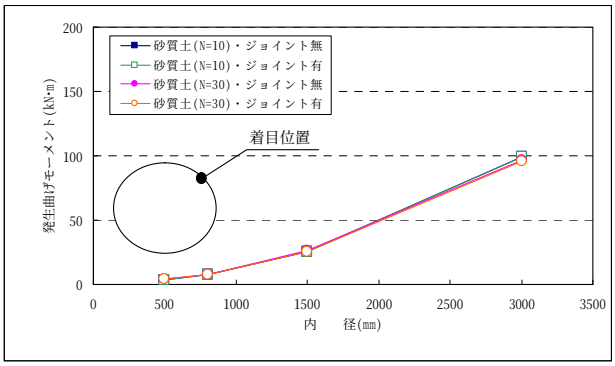

**図-8**　内径と変位の関係（砂質土）




＜軸　力＞




＜せん断力＞




＜曲げモーメント＞

**図-9**　内径と断面力の関係（砂質土）

**表-5**　すべり発生比率【砂質土】（%）

| | N値 | 内　径 | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | φ500 | φ800 | φ1500 | φ3000 |
| 砂質土 | 10 | 36 | 33 | 31 | 11 |
| | 30 | 75 | 81 | 58 | 36 |

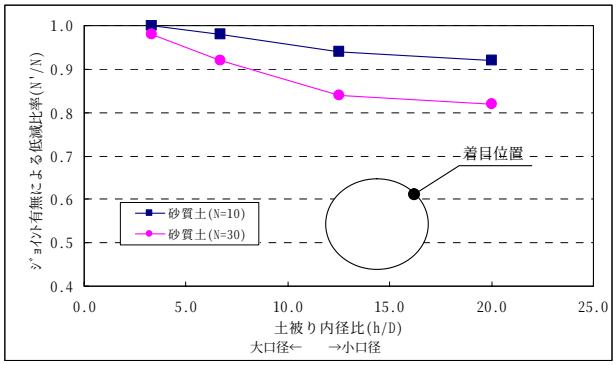
**図-8**によると，管上端の水平変位は内径に関係なく，N値が30の時には約5mm，N値が10の時には約15mmとなる．また，N値が30の時には，わずかではあるがジョイント無のケースと比較して，ジョイント有のケースの水平変位が小さくなっているのがわかる．

**図-9**によると，発生断面力は，内径が大きくなるに従い，線形的に増加する傾向にあることがわかる．また，発生軸力，発生せん断力については，わずかではあるがジョイントを設けることにより発生断面力が小さくなる傾向が見受けられる．

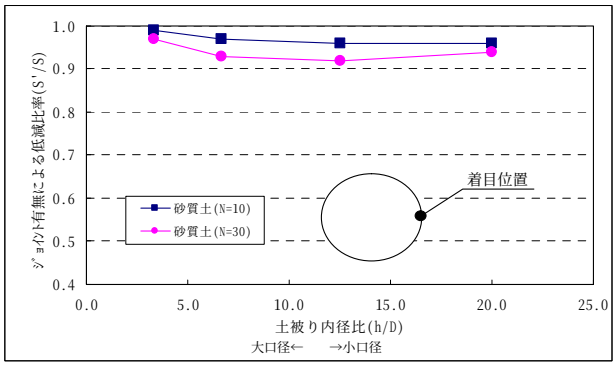
**表-5**には，管周面にすべりが発生した割合を示す．これは，管のモデルに設置したせん断ばねの全体数

から，すべりが発生した（周面せん断力が降伏した）ばねの数の割合を示したものである．すなわち表中の数値が100であれば，全てのばねにおいてすべりが発生したことを示す．同表より，径が大きくなるにしたがって，すべりが発生しにくくなる傾向が見受けられる．なお，いずれのケースも剥離現象は生じていなかった．

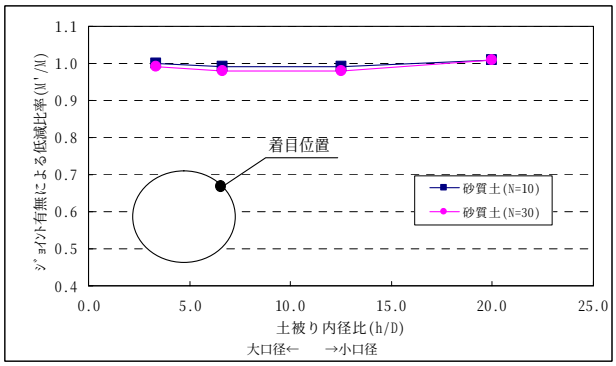
次に，ジョイント無・有における各断面力の比較を行う．**図-10**は，横軸に内径に対する土被り厚の比（以下，土被り内径比と呼ぶ）をとり，縦軸にジョイント無の時の発生断面力に対するジョイント有の時の発生断面力の比（以降，低減比率と呼ぶ）を示したものである．土被り内径比は，(3)式により表わされ，本検討では土被り厚が一定のため，値が小さいと大口径になる．また，ジョイント有無による低減比率は(4)～(6)式に表わされ，値が小さいほどジョイントを設けることによる断面力の低減が大きいことを示す．




＜軸　力＞




＜せん断力＞




＜曲げモーメント＞

**図-10**　土被り内径比と低減比率の関係（砂質土）

土被り内径比＝h / D　(3)

低減比率（軸力）＝N'/N　(4)

低減比率（せん断力）＝S'/S　(5)

低減比率（曲げモーメント）＝M'/M　(6)

ここに，h：土被り厚（=10m）

D：管の内径（m）

N'，S'，M'：ジョイント有の時の発生断面力（軸力，せん断力，曲げモーメント）

N，S，M：ジョイント無の時の発生断面力（軸力，せん断力，曲げモーメント）

**図-10**によると，大口径での軸力は，ジョイントの有無に関わらず，ほぼ同程度の軸力が作用しているが，口径が小さくなるほどジョイントを設けたことにより軸力が低減されている．ジョイントを設けることにより，小口径（土被り内径比=20）の時はN値が10において約10%に，N値が30において約20%ほど低減される．この事より低減される割合は，地盤剛性が大きい方が大きくなる傾向が見受けられる．

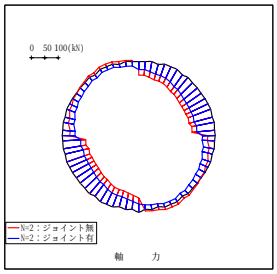
大口径でのせん断力は，ジョイントの有無に関わらず，ほぼ同程度発生している．径が小さくなると若干，低減されるが，土被り内径比が12.5以下では約5%の低減で一定となる．また，低減される割合は，地盤剛性が大きい方が若干，大きいことが見受けられる．

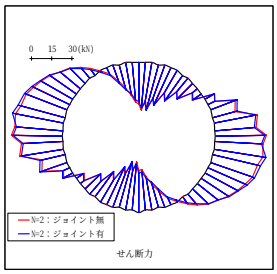
曲げモーメントのジョイントを設けることによる低減は，径の大小，地盤の剛性に関わらず見受けられない．

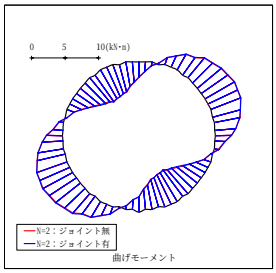
### b）粘性土の応答震度法解析結果

軸力・せん断力・曲げモーメントの断面力分布の一例として，N値が2の粘性土における管径φ500のものを**図-11**に示す．図中には，ジョイント無・有のケースの断面力を重ねて表現している．

次に，管の内径と変位・各断面力の関係を**図-12**および**図-13**に示す．




最大断面力値（粘性土：N値2：管径φ500）

| | | 単位 | 管路～地盤間のすべり・剥離の考慮 | |
|---|---|---|---|---|
| | | | 考慮しない | 考慮する |
| 軸　力 | | kN | 93.3 | 71.2 |
| せ　ん　断　力 | | kN | 41.6 | 40.8 |
| 曲げモーメント | 内側引張 | kN･m | 5.0 | 5.1 |
| | 外側引張 | kN･m | 5.1 | 5.1 |

**図-11**　断面力分布図（粘性土：N値2：φ500）

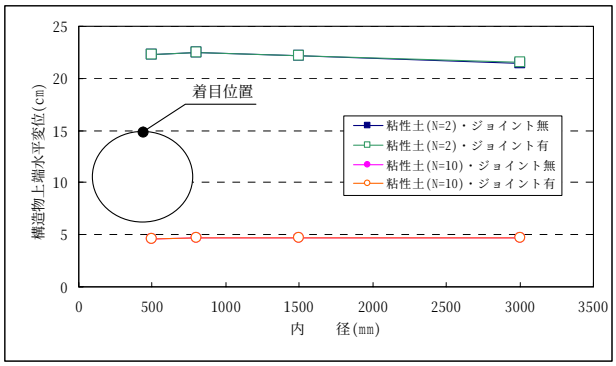
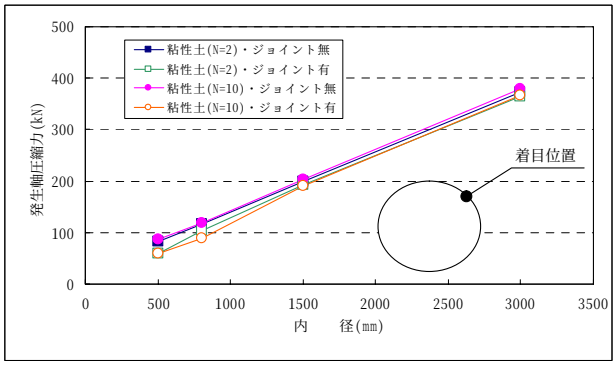
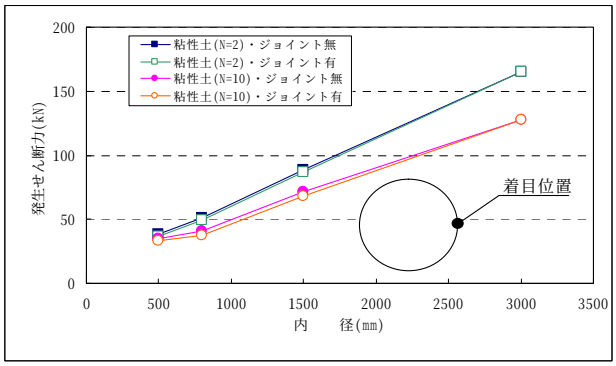


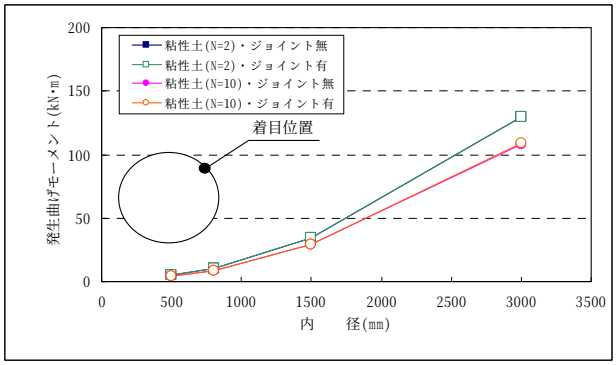

**図-12**　内径と変位の関係（粘性土）




＜軸　力＞




＜せん断力＞




＜曲げモーメント＞

**図-13**　内径と断面力の関係（粘性土）

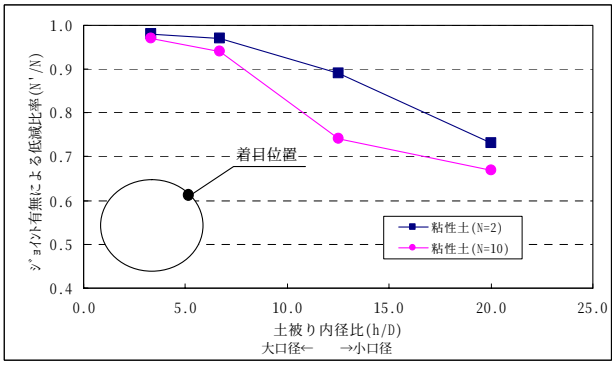
**表-6**　すべり発生比率【粘性土】（%）

| | N値 | 内　径 | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | φ500 | φ800 | φ1500 | φ3000 |
| 粘性土 | 2 | 100 | 94 | 83 | 83 |
| | 10 | 89 | 89 | 72 | 64 |

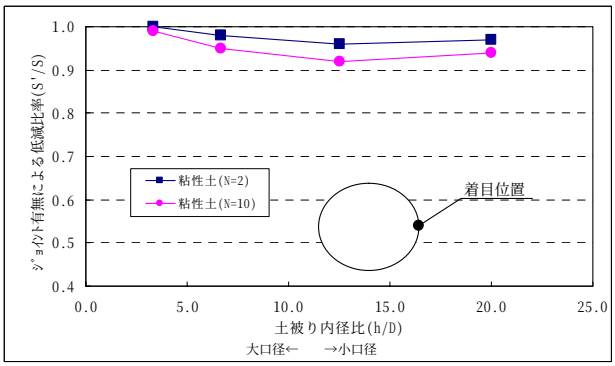
**図-12**によると，管上端の水平変位は内径に関係なく，N値が2の時には約5mm，N値が10の時には約23mmとなる．また，ジョイントの有無による有意差は見受けられない．発生断面力については，**図-13**から明らかなとおり，内径が大きくなるに従い，線形的に増加する傾向にあることがわかる．また，発生軸力，発生せん断力については，わずかではあるがジョイントを設けることにより発生断面力が小さくなる傾向が見受けられる．

**表-6**には管周面にすべりが発生した割合を示す．**表-6**より，径が大きくなるにしたがって，すべりが発生しにくくなる傾向が見受けられる．なお，いずれのケースも剥離現象は生じていなかった．

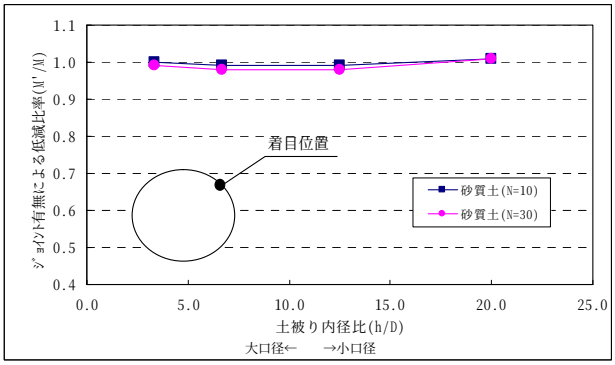
次に，ジョイント無・有における各断面力の比較を行う．**図-14**に土被り内径比と低減比率の関係を示す．**図-14**によると，大口径での軸力は，ジョイントの有無に関わらず，ほぼ同程度の軸力が作用しているが，口径が小さくなるほどジョイントを設けたことにより軸力が低減されている．




＜軸　力＞




＜せん断力＞




＜曲げモーメント＞

**図-14**　土被り内径比と低減比率の関係（粘性土）

ジョイントを設けることにより，小口径（φ500）の時はN値が2において約28%に，N値が10において約32%ほど低減される．この事より低減される割合は，地盤剛性が大きい方が大きくなる傾向が見受けられる．

大口径でのせん断力は，ジョイントの有無に関わらず，ほぼ同程度発生している．径が小さくなると若干，低減されるが，φ800以下では約5%の低減で一定となる．また，低減される割合は，地盤剛性が大きい方が若干，大きいことが見受けられる．

曲げモーメントのジョイントを設けることによる低減は，径の大小，地盤の剛性に関わらず見受けられない．

## ４．まとめ

本研究では，下水道小口径鉄筋コンクリート管（JSWAS規格）を取り上げ，地盤条件，寸法，埋設深度，構造物と地盤の間のすべり・剥離効果の有無などをパラメータとした解析を実施し，管径の大小による影響の違い，すなわち地震時周面せん断力の影響による寸法効果の解明を試みた．得られた主な結果を以下に示す．

(1) 発生断面力は、軸力・せん断力ともに小口径であるほど管周面のすべりの影響により，断面力の減少が確認された．また，曲げモーメントについては，管周面のすべりの影響による断面力の減少は確認されなかった．
(2) 発生せん断力の減少はφ800以下の場合，その減少する割合（低減率）はほぼ一定であった．
(3) 管径の大小によるすべり現象は，小口径の場合が発生しやすい傾向にあった．なお，剥離は何れのケースにおいても発生しなかった。
(4) すべりは軸力，せん断力への影響が大きく，曲げモーメントに影響するのは，剥離であると推定される．(1)の曲げモーメントの減少が少ない要因は，剥離が発生しなかったことであると考えられる．
(5) 小口径の場合では，地盤と構造物間のすべり・剥離を考慮する必要性があると思われ，その境界はφ800程度以下であると想定される．

本研究は，限られた時間のために十分に吟味・検討をする時間がなかったが，今後，外力の分布とその転移など大枠の地盤変位に強制される地中構造物が，すべり・剥離を通じて，独自の運動を発揮できるのか今後の研究課題である．

最後に、これらの検討は、土木学会耐震工学委員会「地下構造物の合理的な地震対策研究小委員会（岩楯敞広首都大学東京都市環境学部教授）」の活動の一環として実施したものである。

### 参考文献

1) 高田至郎，上田智宏，岡田健司：管路横断面に作用する周面せん断力の影響評価，土木学会第57回年次学術講演会，pp.1407-1408，平成14年9月
2) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説 Ⅴ耐震設計編，平成14年
3) 建設省土木研究所資料：第1778号「地盤の地震時応答特性の数値解析法」
4) 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（投稿中）

**(2005. 6. 15 受付)**

## PARAMETER STUDIES OF SIZE EFFECT ABOUT THE UNDERGROUND PIPES AFFECTED BY THE SHEARING STRESS DUE TO SEISMIC WAVES

MORISAKI Hiroshi, SATO Kiyoshi, TAKEUCHI Mikio, KONISHI Yasuhiko, SAEKI Munehiro, and NAKAMURA Toshiharu

When we have to regenerate the exact time behavior of underground pipes affected by seismic waves, it is important to make a precise model for the reciprocal action among slipping and exfoliation of them. However, it seems that a rational method for estimating the resistance of the circular section with a comparatively small diameter against earthquakes has not yet been established. Using parameter studies for sewer pipes with small diameters with changing the parameters such as coefficients of ground condition, sizes and underground depth of them under the existence of slipping and exfoliation, we tried to elucidate the size effect about the pipes affected by the shearing stress due to seismic waves. As the result, we obtained the knowledge about the size effect on the pipe enables us to exactly simulate the exact behavior of them.