

地中構造物の周面摩擦に関する寸法効果の影響

佐藤 清¹・中村敏晴²・竹内幹雄³・森崎 啓⁴・小西康彦⁵・佐伯宗大⁶

¹株式会社大林組 技術研究所 土木構造研究室 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)

E-mail:sato.kiyo@obayashi.co.jp

²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

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

⁵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

⁶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

地中構造物の地震時挙動を考えると、周辺地盤との摩擦の影響を考慮する必要がある。しなしながら、滑りや剥離現象の発生過程や、それに伴う外力の変化について具体的な部分は不明確である。筆者らは地中構造物の周面せん断力の影響について構造物の大小による影響の違い、すなわち寸法効果に着目し、応答震度法による検討を行った。対象としたのは円形断面構造物で、異なる4種の径、500mm、1500mm、3000mm、10000mmを有する構造物とした。地盤条件は粘土(N値=2、10)および砂(N値=10、30)を想定した。応答震度法による検討では、まず次元重複反射解析によって地盤の最大加速度分布を求め、これを構造物と周辺地盤をモデル化した2次元有限要素に慣性力として作用させた。解析ではJOINT要素や地盤の非線形性によって管路と地盤との境界での滑り・剥離現象を考慮し、管路寸法の違いによる応答の違い、すなわち寸法効果について考察を行った。

Key Words : *Underground pipe, Size effect, Shear stress, Seismic response, skin friction*

1. はじめに

シールドトンネルや埋設管路などの地中構造物の耐震設計を実施する場合、外力として周面せん断力を考慮する必要がある。周面せん断力の大きさは、構造物と地盤との境界における滑りや剥離の影響を受けるため、本来はその影響を考慮した上で設計に取り込むべきである。例えば、滑りや剥離が生じないとすれば、周面せん断力は構造物に直接作用するが、滑りや剥離が生じる場合、周面せん断力は低減されると考えられる。例えば構造物の大きさや周辺の地盤条件毎に滑りや剥離の影響を評価し、周面せん断力の低減量を定量的に把握することができれば、合理的な設計を実施するうえで有効な目安になり得る。しかしながら、滑りや剥離現象の発生過程や、それに伴う外力の変化については不明な部分が多く、現状では周面せん断力の低減を定量的に取り入れることは困難である。

高田ら¹⁾は、応答変位法と応答震度法による評価を行い、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や、200～800mm程度の比較的口径が小さい管では滑りや剥離によって周面せん断力が低減されることを示している。このことから筆者らは、管径の違いによる周面せん断力の影響の違い、すなわち寸法効果に着目し、応答震度法による解析によって地震時周面せん断力が構造物の応答に与える影響を考察した。このとき地盤を非線形材料とすることで、管路周辺地盤の挙動と滑り・剥離現象との関連についても考察した。なお地盤を線形材料とした検討も実施しており、別途報告²⁾する。

2. 応答震度法による影響評価手法

(1) 評価手法

応答震度法では地盤を2次元FEMでモデル化し、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。周面せん断力は周辺地盤から構造物へ直接作用するが、このとき構造物と地盤との間にJOINT（亀裂）要素を設けることで滑りや剥離を考慮できる。そこで、JOINT要素によって滑り・剥離を考慮したケースと、地盤と構造物を完全固着したケースを実施し、滑り・剥離現象の発生状況や断面力の違いを調査した。

応答震度法の解析には逐次非線形動的応答解析プログラムFLIP³⁾を使用した。

(2) 実施ケース

表-1に応答震度法による解析ケースを示す。解析は管径（内径）と周辺地盤の土質条件をパラメータとし、4種類の管径と4種類の地盤を設定した。合計16種類のモデルに対して滑り・剥離を考慮するケースと考慮しないケースを実施した。

表-1 解析ケース（応答震度法）

Case	管径（内径） (mm)	土質	N値	滑り・剥離 の考慮
1	500 (ヒューム管)	粘性土	2	しない
2				する
3			10	しない
4				する
5		砂質土	10	しない
6				する
7			30	しない
8				する
9	1500 (ヒューム管)	粘性土	2	しない
10				する
11			10	しない
12				する
13		砂質土	10	しない
14				する
15			30	しない
16				する
17	3000 (ヒューム管)	粘性土	2	しない
18				する
19			10	しない
20				する
21		砂質土	10	しない
22				する
23			30	しない
24				する
25	10000 (シールドトンネル)	粘性土	2	しない
26				する
27			10	しない
28				する
29		砂質土	10	しない
30				する
31			30	しない
32				する

(3) 解析諸条件

a) 管路および周辺地盤

管路は内径500mm, 1500mm, 3000mmのヒューム管, および内径10000mmのシールドトンネルを想定し,

いずれも線形梁要素でモデル化した。表-2に構造物諸元, 表-3に地盤諸元を示す。

表-2 構造物諸元（線形梁要素）

内径(mm)	500	1500	3000	10000
厚さ(mm)	70	140	250	550
ヤング率E (kN/m ²)	3.3 × 10 ⁷			
断面積A (m ² /m)	0.07	0.14	0.25	0.55
断面二次モーメント (m ⁴ /m)	2.86 × 10 ⁻⁵	2.29 × 10 ⁻⁴	1.30 × 10 ⁻³	1.39 × 10 ⁻²
単位体積重量 (kN/m ³)	24.5			

表-3 地盤諸元（マルチスプリングス要素）

土質	N値	せん断波 速度Vs (m/s)	単位体 積重量 (kN/m ³)	粘着力 C (kN/m ²)	内部摩 擦角 (°)
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

図-1に示すように、地盤は土質に因らず厚さ30mの単一層とし、構造物に作用する土圧の影響を出来るだけ同じくするために、土被りを10mに統一した。地盤は二次元平面要素でモデル化し、マルチスプリングス要素⁴⁾によって非線形性を考慮した。

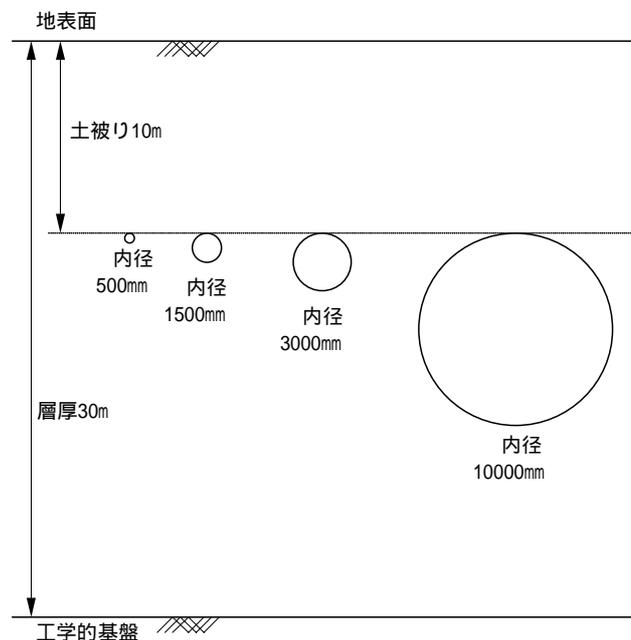


図-1 検討モデル

b) 滑りおよび剥離の考慮

管路と地盤との接触面の滑り・剥離は、JOINT要素によって考慮した。図-2に示すように、JOINT要素は2つの非線形ばね、すなわち接触面の法線（垂直）方向ばねとせん断ばねによって定義される。法

線方向ばねは引張方向の力を負担せず（剥離），圧縮方向はばね定数（Kn）に応じた力を負担する．せん断ばねは，せん断応力がせん断強度に達するまではばね定数（Ks）に応じた力を負担し，せん断強度以上の力は負担しない（滑り）．せん断強度は，(1)式に示すMohr-Coulomb式によって計算される⁴⁾．

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

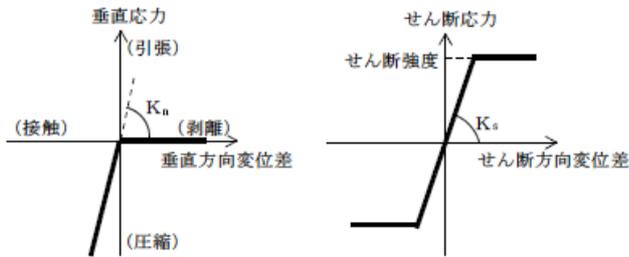
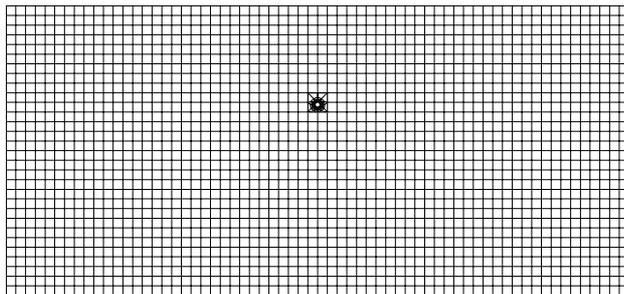


図-2 JOINT要素

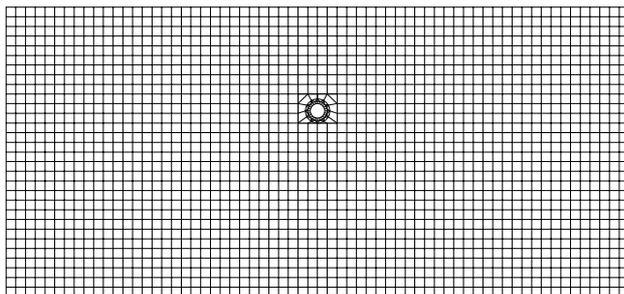
ばね定数KnおよびKsについては，入力可能な範囲で出来るだけ大きな値を設定し，周辺の地盤要素からの力が管路に直接作用するようにした．滑り・剥離を考慮しないケースでは，構造物と周辺地盤を固結した．

(4) 解析モデル

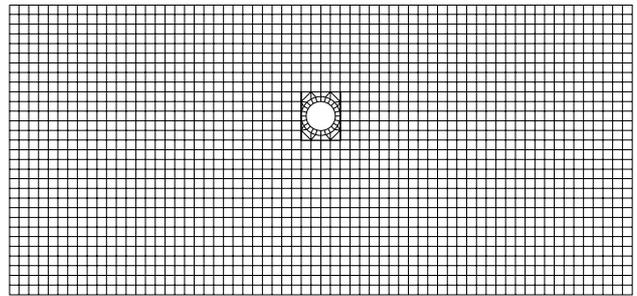
図-3に解析モデルを示す．モデル底面は固定条件とし，側方端部は水平ローラーとした．地盤要素の大きさを全ケース1.0m×1.0mに統一した．ただし，管路はすべて24角形でモデル化したため，管路の近傍地盤についてはこの限りではない．



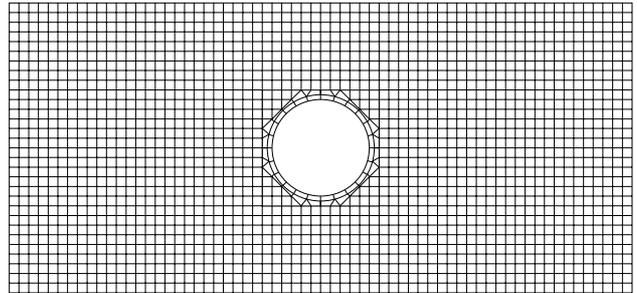
【内径：500mm】



【内径：1500mm】



【内径：3000mm】



【内径：10000mm】

図-3 応答震度法による解析モデル

地盤の初期せん断剛性は，せん断波速度Vsから以下の式(2)によって算出した．初期せん断剛性に関する拘束圧は考慮していない．

$$G_0 = V_s^2 \quad \cdots (2)$$

解析は 初期自重解析， 応答震度解析の2段階とした．初期自重解析では構造物と周辺地盤要素を完全固結させることで，応答震度解析時におけるJOINT要素の初期応力を0とした．これは，JOINT要素について，地震荷重のみの影響を考察するためである．

(5) 地震荷重

既に述べたように，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剛性は，応答震度法モデルと同じく式(2)によって評価し，非線形特性は土研資料⁵⁾を参考にした．

重複反射解析における入力地震動は，「道路橋示方書・同解説 耐震設計編」⁶⁾に示されるレベル2タイプ 地震動のうち，種地盤用第3波形とし，工学的基盤に2Eとして入力した．図-4に入力加速度波形，図-5に管径500mmのケースにおける，構造物相対変位が最大時の自由地盤の加速度深度分布を示す．

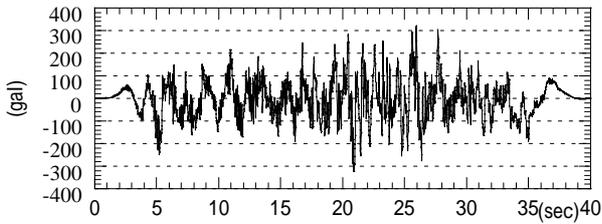


図-4 入力加速度波形（一次元重複反射解析）

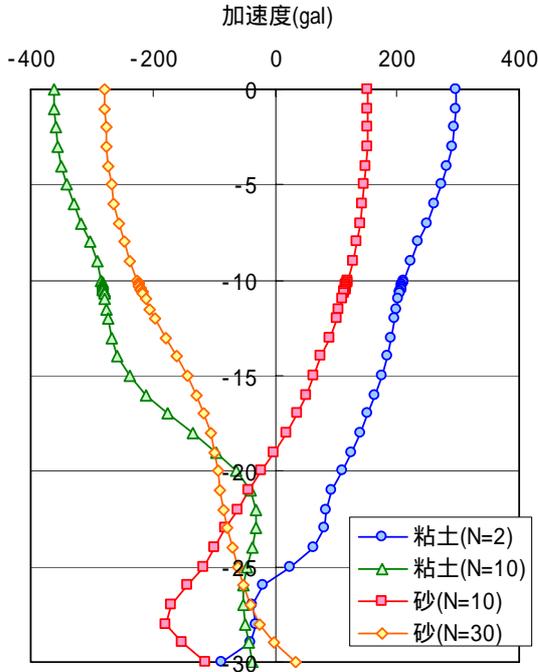


図-5 自由地盤の加速度分布
(内径500mm / 構造物相対変位最大時)

慣性力は水平方向の節点荷重としてFEMモデルに入力し、20STEPで所定の力に達するよう、段階的に荷重を増加させた。STEP载荷によって地盤ひずみを段階的に増加させ、非線形性による地盤剛性の低下を考慮した。

3. 応答震度法による評価結果

(1) 滑り・剥離を考慮しないケース

図-6に滑り・剥離を考慮しないケース（表-1の奇数番ケース，以下「JOINT無し」とする）における，構造物上下端の相対変位を示す。横軸は管路の内径によって整理した。図-7は管径に対する相対変位量の割合を，管径ごとに整理して示した。

図-6について地盤毎の相対変位量を見ると，砂(N=10)および粘土(N=2)における変位量が卓越しており，初期の地盤剛性が小さいほど変形量が増加する傾向が確認できる。図-7でも同様である。

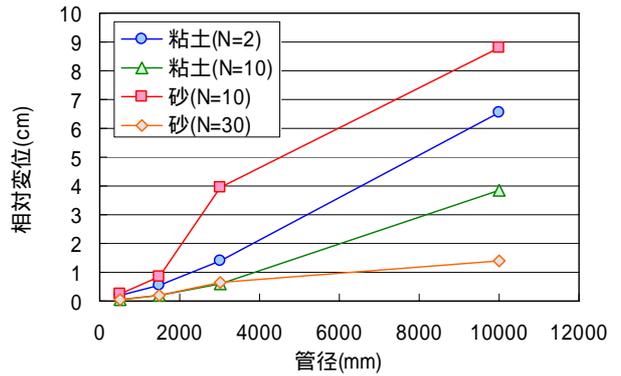


図-6 管路上下端の相対変位（JOINT無し）

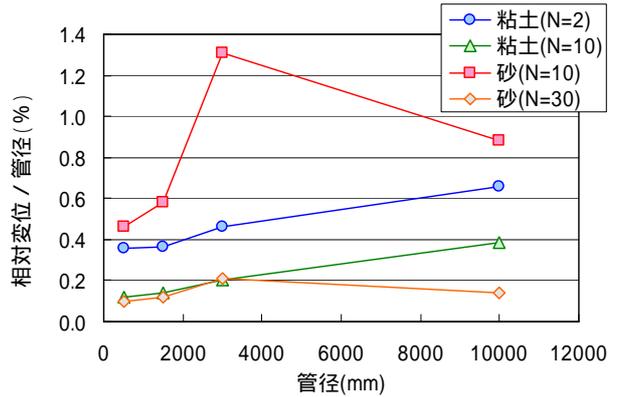


図-7 管路全体の变形率（JOINT無し）

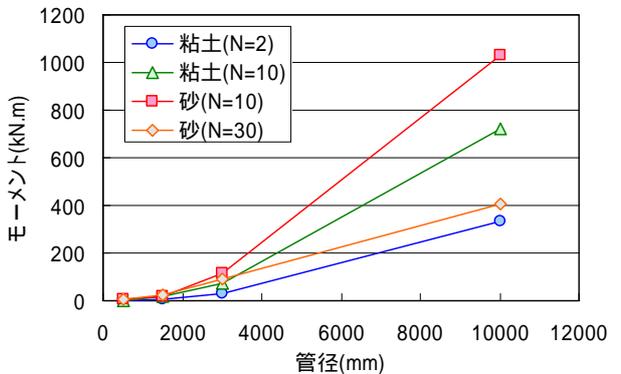


図-8 最大曲げモーメントと管路内径との関係
(JOINT無し)

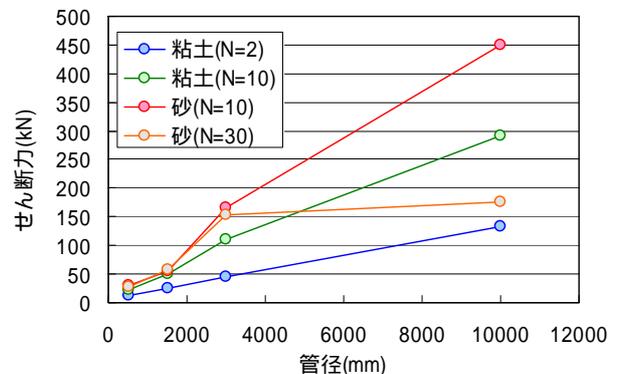


図-9 最大せん断力と管路内径との関係
(JOINT無し)

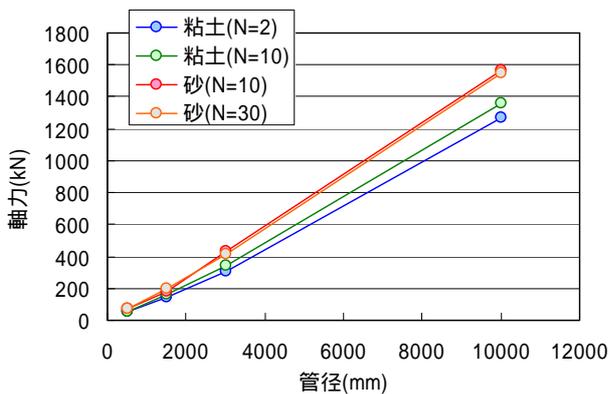


図-10 最大軸力と管路内径との関係 (JOINT無し)

図-8～10に「JOINT無し」のケースにおける、管路の最大断面力を示す。各図から管径の増加に伴って、最大断面力が増加する傾向が見られる。地盤毎の最大断面力を比較すると、砂(N=10)が最も大きな断面力を示すが、最小の値を示すのは粘土(N=2)である。これは図-6および図-7に示した、管路上下端の相対変位量とは異なる傾向であり、地盤種類によって作用する周面せん断力が異なるため、管路に発生する断面力の大小が地盤変位量だけでは決まらないことを示している。

(2) 滑り・剥離を考慮したケース

a) 断面力の低減効果

表-4に滑り・剥離を考慮したケース(以下「JOINT有り」と「JOINT無し」のケースにおける断面力の比を示す。断面力は最大値の比としている。数値が1.0未満なら滑り・剥離の考慮によって断面力が低減されたことを示す。Case5, 9, 13については、「JOINT有り」のケースにおいて解が発散し、断面力が得られていない。

表-4 「JOINT有り」と「JOINT無し」における管路断面力の比 1)

内径 (mm)	土質	N値	曲げモーメント	せん断力	軸力
500	粘性土	2	0.998	0.999	0.998
		10	0.998	0.999	0.999
	砂質土	10	0.974	0.956	1.008
		30	0.995	0.999	0.993
1500	粘性土	2	-	-	-
		10	0.999	0.999	0.999
	砂質土	10	0.999	0.998	0.999
		30	1.000	0.999	1.000
3000	粘性土	2	-	-	-
		10	1.000	1.001	1.000
	砂質土	10	1.000	1.000	1.000
		30	1.000	1.000	1.000
10000	粘性土	2	-	-	-
		10	1.000	1.000	1.000
	砂質土	10	1.000	1.000	1.000
		30	1.000	1.000	1.000

1) 最大断面力 (JOINT有り) / 最大断面力 (JOINT無し)

表-4に示すように、管径3000mmおよび10000mmのケースでは全く低減効果が見られなかった。一方、500mmおよび1500mmの比較的の小口径のケースでは、わずかな低減効果が見られる。ただし、管路の内径500mm・砂質土(N値=10)としたケースにおいて、曲げモーメントで3%、せん断力で4%の低減が見られるものの、それ以外のケースでは1%未満の低減効果に留まっている。また、図-11に示すように断面力分布にもほとんど変化はない。

比較的の小さな径において断面力が低減する傾向は、高田らの研究¹⁾や周辺地盤を線形弾性体とした応答震度法の結果²⁾と同様であるが、有意な低減量とは言えない。

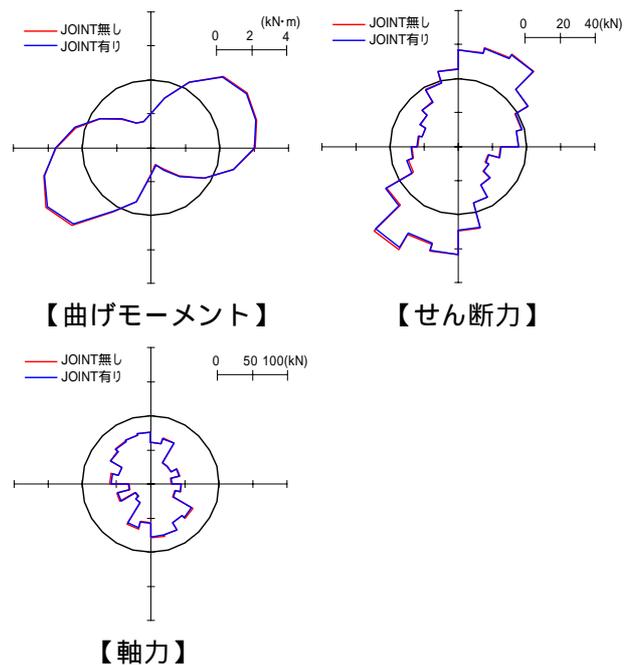


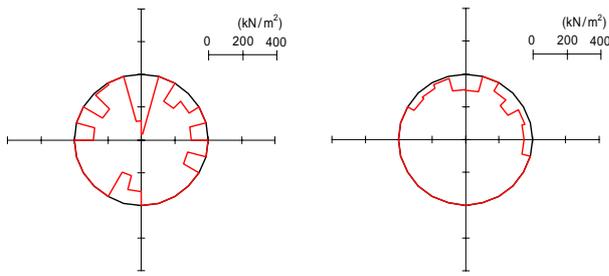
図-11 断面力分布 (管径500mm, 砂質土N=10)

b) JOINT要素の応力状態

図-12に、地盤を砂質土(N=10)としたケースのうち、「JOINT有り」の解析結果におけるJOINT要素の垂直応力を示す。図-13には同様にJOINT要素のせん断応力を示す。垂直応力が0を示す位置は、剥離が生じていることになる。また砂質土なので、Mohr-Coulomb式により垂直応力が0の位置ではせん断応力も0である。

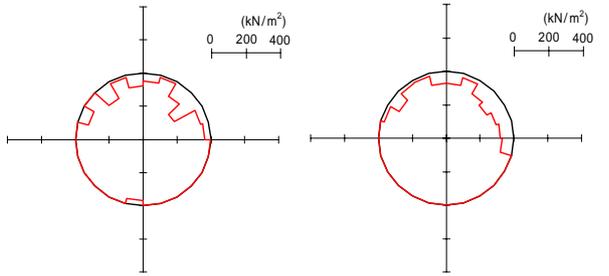
垂直応力を見ると、各管径ともに剥離を示す箇所が多く、特に1500mm, 3000mm, 10000mmのケースでは下半のほぼ全てで垂直応力が0である。管径500mmのケースでは、離散的に垂直応力が0となっている。作用している垂直応力は、管径500mmのケースが最も大きい値を示す。

せん断応力についても同様で、1500mm, 3000mm, 10000mmのケースでは上半しか作用しておらず、管径が大きくなるほど作用しているせん断力が低下する傾向が見られる。せん断応力が作用していない要素は、全要素の50～60%に及ぶ(表-5)。



【Case6 : 500mm】

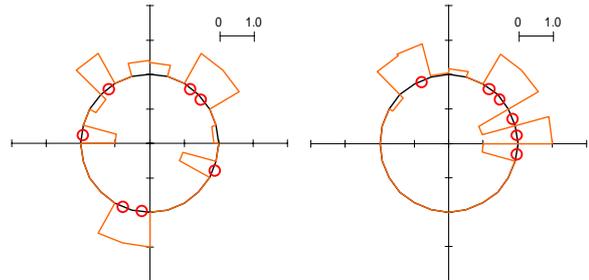
【Case14 : 1500mm】



【Case22 : 3000mm】

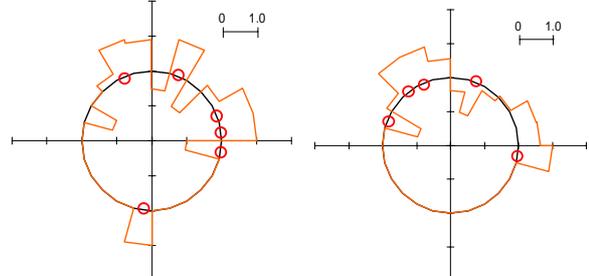
【Case30 : 10000mm】

図-12 JOINT要素の垂直応力（砂質土N=10）



【Case6 : 500mm】

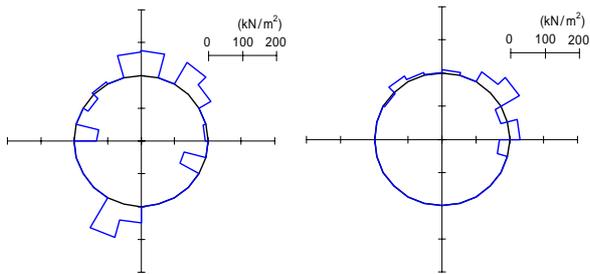
【Case14 : 1500mm】



【Case22 : 3000mm】

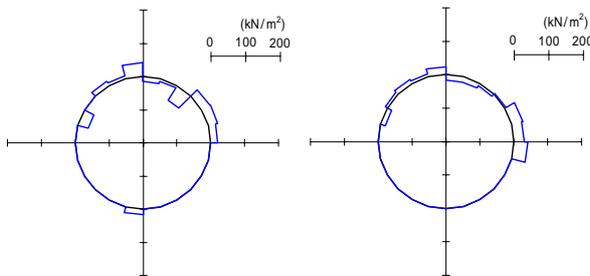
【Case30 : 10000mm】

図-14 JOINT要素のせん断応力比（砂質土N=10）



【Case6 : 500mm】

【Case14 : 1500mm】



【Case22 : 3000mm】

【Case30 : 10000mm】

図-13 JOINT要素のせん断応力（砂質土N=10）

図-14はJOINT要素のせん断強度に対する発生せん断力の割合（以下、せん断応力比）を示している。せん断強度は垂直応力から算出した。図中の赤丸（●）はせん断応力比が1.0の箇所を示しており、滑りが発生しているか、もしくは発生する直前の状態を示している。また、せん断強度比が0となっている箇所は、垂直応力が0であるためにせん断強度が0となっていることを示しており、この要素も外力としてせん断力が作用すると滑りが発生し得る箇所である。

表-5 滑り・剥離要素の割合（砂質土N=10）

Case	内径 (mm)	剥離要素の割合 (%)	滑り要素の割合 (%)	滑り・剥離要素の割合 (%)
6	500	54	29	83
14	1,500	58	25	83
22	3,000	50	25	75
30	10,000	50	21	71

せん断応力比が1.0に達している要素は、全要素の20～30%程度であり、管径が小さいほどその割合は多い。同様に滑り要素と剥離要素を合計した割合についても、管径が小さいほど多い。

以上から、管径が小さいほど滑り・剥離の影響が大きい傾向が示されているものの、すべての管径において50%以上の要素で滑り・剥離を示していることがわかる。そのような条件下でも「JOINT無し」のケースと比較して断面力の低下が見られない。すなわち、管路外周の50%が剥離状態となっても、滑り・剥離を考慮しないケースと同等の断面力が発生したことになる。

c) 周辺地盤のひずみ

図-15は、地盤を砂質土(N=10)としたケースのうち、「JOINT有り」の解析結果について、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。管径500mmのケースに比べて管径1500mm～10000mmのケースでは、管路周辺地盤のひずみが局所的に大きく（2%以上）なっており、管径が大きいほどそのエリアが広がっている。

このような管路周辺での局所的なひずみ増加は、滑り現象と同等の効果（管路に作用する周面せん断

力の低減効果)を發揮し,その結果,図-13に示したように管径500mmに比べて管径1500mm~10000mmのケースでは,JOINT要素に作用するせん断応力が小さくなったと考えられる.

JOINT要素に作用するせん断力が大きい管径500mmのケースでは,他のケースに比べて滑りが生じたJOINT要素の割合が大きく,結果としてJOINT要素の有無による断面力の差が生じたと考えられる.

また,このような周辺地盤の局所的なひずみの増加は,「JOINT無し」のケースにおいても同じように生じていることを確認している.

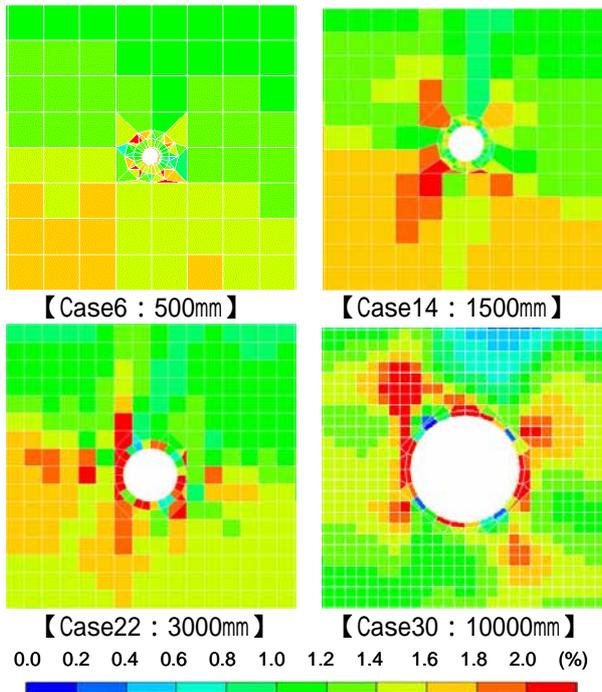


図-15 管路周辺地盤の最大せん断ひずみ (JOINT有り/砂質土N=10)

以上の結果は, FEMによって評価し得る範囲の“滑り量”であれば, JOINT要素によって滑り・剥離の影響を考慮しなくても, 地盤要素の非線形性によって周面せん断力の低減を考慮できることを示している. しかしながら管径500mmのケースのように比較的小口径管路に対しては, その効果は不十分であり, JOINT要素による滑りの考慮が必要となる.

また本検討では, 管路周辺の地盤ひずみの影響により, 「JOINT無し」「JOINT有り」のどちらからも, 周面せん断力の低減がある程度考慮された断面力が算出された. 周面せん断力の低減量を定量的に評価するには至らなかったが, 管周辺地盤の局所的なひずみは, 管径が大きくなるほどそのエリアが増加しており, 寸法効果と考えることができる.

本検討では地震荷重を一方向に静的に載荷しているため, 動的荷重による効果, 例えば荷重の方向が反転するときの構造物と地盤の位相差などは考慮さ

れていない. そのため, 動的応答解析を実施して今回の検討の結果と比較し, その影響を確認する必要がある. また, 今回の検討ではJOINT要素の初期応力を0としたが, 少なくとも垂直方向の圧縮応力は考慮すべきと考えられ, その評価方法も今後の検討課題のひとつである.

4. まとめ

本研究では, ヒューム管およびシールドトンネルによる地中管路を想定して, 地盤条件および管径をパラメータとした応答震度法による数値解析を実施した. 解析ではJOINT要素によって管路と地盤との境界での滑り・剥離現象を考慮し, 管路寸法の違いによる応答の違い, すなわち寸法効果について考察を行った. また, 地盤を非線形材料とし地震荷重を段階載荷することにより, 周辺地盤のひずみと管路周面への作用せん断力の関係についても調べた. 以下に主な結果を示す.

- (1) 地盤を非線形材料とした応答震度法では, 管路周辺地盤で局所的にせん断ひずみが増加する. その結果, 滑り現象が擬似的に再現され, 管路に作用する周面せん断力が低減される.
- (2) 地盤を非線形材料とした結果, 管路周辺地盤のひずみ増加によって「JOINT無し」「JOINT有り」のどちらも, 周面せん断力の低減が考慮された断面力が算出された.
- (3) 管路周辺地盤の局所的なひずみの増加は, 管径が大きいほどその範囲が広く, 寸法効果と考えることができる. 管径10000mmのケースでは, ほぼ全周にわたって2%以上のせん断ひずみが生じる.
- (4) 今回の解析のように地盤を非線形材料として取り扱わない場合は, JOINT要素によって周面せん断力の低減を考慮するか, あるいは作用させる周面せん断力を予め低減しておくことが可能と考えられる. ただし, その低減量の把握については今後の検討課題である.
- (5) 管径が小さい500mmのケースでは, 周辺地盤のひずみ量が小さく, 管径1500mm~10000mmのケースに比べてJOINT要素に作用するせん断力が大きくなる.
- (6) JOINT要素によって滑り・剥離を考慮したケースと考慮しないケースを比較すると, 管径500mmのケースではJOINT要素を設けることによって曲げモーメントが3%, せん断力が4%の低下を示した. それ以外のケースではJOINT要素の有無によらず断面力はほぼ一致した.
- (7) 上記(4)の理由の一つとして, 管路周辺地盤でせん断ひずみが増加したことにより, 滑りが生じるほどのせん断力がJOINT要素に作用しなかったことが考えられる.

(8) 上記(7)の他, JOINT要素の初期応力の評価や, 動的応答解析による周面せん断力の影響, および寸法効果の考察などが, 今後の課題として挙げられる.

最後に, 本研究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) 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に関する研究, 土木学会第27回自身工学研究発表会報告集(投稿中)

- 3) 井合進, 松永康男, 亀岡知弘: ひずみ空間における塑性論に基づくサイクリックモビリティのモデル, 港湾技術研究所報告, 第29巻, 第4号, 1990.12.
- 4) 第二期FLIP研究会事務局: 液状化による構造物被害予測プログラム F L I P (Ver.6.0) 取扱説明書, 平成16年.
- 5) 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」
- 6) 社団法人日本道路境界: 道路橋示方書・同解説耐震設計編, 平成14年.

(2005. 6. 16 受付)

SIZE EFFECTS OF SKIN FRICTION ON UNDERGROUND PIPES

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

In the seismic design of underground pipes, it is necessary to consider the influence of skin friction between structure surface and ground. Analyses of underground pipe models under influence of skin friction were conducted by Seismic coefficient method, to investigate the size effects. At the analyses, the diameters of structure models were 500mm, 1500mm, 3000mm, and 10000mm. JOINT elements were used for the models of skin friction between the structure model and the non-liner ground model. The results of the analyses, it was considered that the influence of interaction between pipes and ground, and size effects about slipping and exfoliation behavior.