

コンクリート巻き立て管の 地震時挙動の定量評価について

若竹 雅人¹・伊藤 陽²・田中 宏司³

正会員 NTTアクセスサービスシステム研究所（〒305-0805 茨城県つくば市花畑1-7-1）

¹E-mail:wakatake.masato@lab.ntt.co.jp

²E-mail:ito.akira@lab.ntt.co.jp

³E-mail:tanaka.koji@lab.ntt.co.jp

本稿では通信埋設管の浅層埋設区間に適用されるコンクリートで巻き立てられた区間に着目する。コンクリート巻き立て工法は地下管路の浅層埋設区間において道路工事等から管と収容ケーブルを保護することを目的として採用される。過去の震災の経験によりこの区間は地震時において被害を受けやすいという経験則は有しているが、地震時の挙動が不明であるため定量的な評価が実施できていなかった。地震時の着目区間の定量評価を目的として、地震時におけるコンクリート巻き立て区間の挙動を把握するための実験を実施した。本稿では実験結果について報告する。

Key Words : conduits reinforced by concrete, soil tank test, earthquake, underground pipeline systems

1. はじめに

日本電信電話株式会社(以下、NTT)は日本全国で約62万延長kmの通信用地下管路設備を有しており、管路内にケーブルを布設することにより通信サービスを提供している。通信用地下管路設備は、平常時はもちろん大規模地震等による災害時にも収容ケーブルのために安全な空間を確保することが求められる。地下管路設備の内、ルート上の地下埋設物を避ける場合や橋梁添架への接続区間は標準土被りが確保できず、限定的に管路の浅層埋設が実施される。地下管路の浅層埋設を実施する場合、管の強度確保やアスファルトカッター等による管路設備と収容ケーブルへの加害を防ぐことを目的として、管路に防護工法がなされる¹⁾。その中の1つに標準土被りが確保できない区間の管をコンクリートで巻き立てて防護する方法が存在する。本研究ではこのコンクリートで巻き立てられた管路設備について着目する。コンクリートで巻き立てられた区間とそうでない区間では特性が異なるため、地震時における挙動が異なることが想像できる。特に、コンクリートで巻き立てられた箇所とそうでない箇所の境界では地震時にひずみが蓄積されやすいと想定できるため、地震時における弱点部となりうる。過去の震災でも図-1に示すような、コンクリートで巻き立てられた箇所の近傍での管路被害が確認されている。通信用



図 1 コンクリート巻き立て箇所付近の管路被害

埋設管以外でも、例えば水道管の屈曲部における不平衡力への対策のコンクリート補剛部付近の管継手部への地震による被害が報告されている²⁾。このような被害事例の蓄積により、コンクリートが管路スパン中に存在するような設備形態は弱点部であるという経験則は有しているが、埋設地盤中のコンクリートの挙動が不明であるため、定量的な耐震評価を実施できていないのが現状である。本研究では、埋設された通信用管路にコンクリートが巻き立てられた区間の地震動に対する定量的な評価手法の確立を目的として、埋設地盤中のコンクリートの地震時挙動を把握する実験を行った。本稿は著者らが既に実験結果を報告³⁾したが新たな実験データ、考察及びコンクリート巻き立て区間の計算モデルの構築方法について加えて報告するものである。

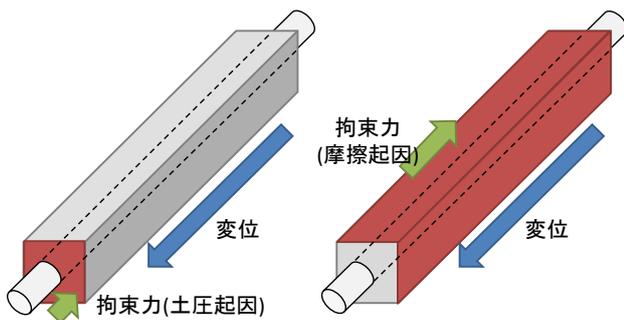


図 2 コンクリート巻き立て管のイメージ

表 1 埋戻し土の特性

比重	2.68
50%粒径	0.566mm
均等係数	55.9
最大乾燥密度	19.7kN/m ³
最適含水比	9.1%

2. 実験の概要

(1) コンクリート巻き立て区間の考え方

管軸方向の変位を管路に作用させる場合を考える。この場合、コンクリートで巻き立てられていない埋設管に作用する軸方向の地盤拘束力は主として地盤と埋設管表面との摩擦によるせん断抵抗である。一方、本研究で対象とするコンクリートで巻き立てられた区間は図-2のような構造であることから、通常の埋設管のような摩擦力起因による拘束力(図-2右側)に加えて、張出した箇所が地盤により作用される土圧起因による拘束力(図-2左側)が存在すると考えられる。これらの摩擦力起因による拘束力と土圧起因による拘束力を独立に評価するため、2種類の形態の土槽実験を実施した。実験は試験体を土槽内に埋設し加振器による強制変位を与えることにより実施した。幅1m×長さ1m×高さ1mの鋼製土槽を用い、埋戻し材には真砂土を用いた。室内土質試験による真砂土の特性を表-1に示す。以降本稿において、摩擦力起因による拘束力を外周バネ、土圧起因による拘束力を端部バネと表記する。

(2) 端部バネ試験の概要

本節では端部バネ試験について述べる。端部バネ試験に利用した試験体は図-3に示すように巻き立てられたコンクリートの断面を模した鋼板を鋼管に溶接することにより作成した。これを土槽内に埋設し変位制御により一方向へ静的に強制変位を与えることにより端部バネによる地盤拘束力を計測した。この実験では鋼管区間も土槽内に埋設されるため、鋼板が受ける地盤拘束力に加えて、

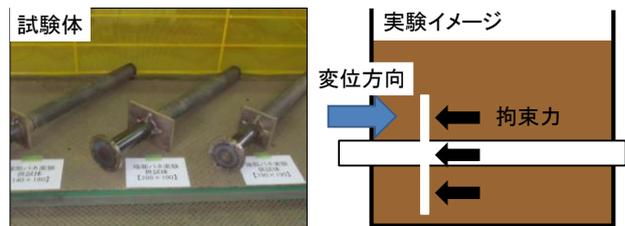


図 3 端部バネ試験体と試験イメージ



図 4 外周バネ試験体と試験イメージ

表 2 試験における断面形状

断面名称	1	2	3	4
高さ[mm]	190	280	190	190
幅[mm]	190	190	140	280

試験体の鋼管が周囲の地盤から作用される摩擦力起因の地盤拘束力も合わせて計測されることになる。この影響の排除を目的として、鋼管のみを土槽内に埋設し強制変位を作用させ、鋼管が周囲の地盤から作用される地盤拘束力のみを計測する実験を合わせて実施した。概要は後の節で示す。端部バネ試験に用いた試験体の断面の寸法は表-2に示す通りであり、各断面形状について2ケースの実験を実施した。NTTの施工標準による断面寸法、断面形態(高さや幅)による地盤拘束力の差異を確認すること等を目的として断面の組合せを決定した。

(3) 外周バネ試験の概要

本節では外周バネ試験について述べる。外周バネ試験は図-4に示すようなコンクリートの試験体を実験土槽内に埋設し、試験体に強制変位を作用させることによりコンクリート試験体の外面と周囲の地盤との摩擦による地盤拘束力を算定する実験を行った。外周バネ試験においては、試験体を実験土槽の長さより大きくすることにより、試験開始時から完了時まで摩擦力による地盤拘束力のみが作用するようにした。また、外周バネ試験の断面の寸法は端部バネ試験と同じ寸法とした。なお、コンクリート巻き立て防護は浅層埋設区間に適用されることから、実環境においては上層路盤又は下層路盤内にコンクリート巻き立て区間が存在していると想定できる。このため今回の実験では、外周バネ試験については、C-40 砕石で埋め戻して試験環境を構築した。



図 5 鋼管バネ試験試験体(2×2 ソケット有)

表 3 鋼管バネ試験の実施パターン

配列	1×1	1×1	2×2	2×2
ソケット	無	有	無	有

(4) 鋼管バネ試験

前述したようにコンクリートで巻き立てられた区間の地盤拘束力算定試験では鋼管の摩擦による拘束力も計測されるような試験形態であるため、この影響の排除を目的として鋼管が作用される地盤拘束力を算定する試験を実施した。加えて、後藤らによると埋設管の継手のような張出した箇所は地盤拘束力を受けることによりすべり現象を低減させることが示されており⁴⁾、また高圧ガス導管耐震設計指針⁵⁾においても埋設管にフランジのような張出した箇所が存在する場合は個別検討が必要であると明言されている。以上のことから、図-5のような通信埋設管の継手ソケットの張出した箇所が作用される地盤拘束力の算定試験を合わせて実施した。実施パターンを表-3に示す。表-3中の「1×1」は管1条の埋設パターンを示し、「2×2」は図-5のように縦方向と横方向に2条ずつ、合計4条の管を埋設したということを示す。他の試験と同様にそれぞれ2ケースずつの実験を実施した。端部バネ試験、外周バネ試験、鋼管バネ試験それぞれにおいて、締固め度合の確認やパラメータの取得を目的として、試験実施前に平板載荷試験を行い、地盤反力係数を測定した。

3. 実験結果

(1) 端部バネ試験と鋼管バネ試験

本節では端部バネ試験及び、鋼管バネ試験の内ソケット有パターンの結果を示す。実験後、土槽内の土を除去し、試験体を確認した所、図-6のように端部バネ試験においては鋼板の後方に空隙が確認でき、鋼管バネ試験の内ソケット有パターンではソケットの後方に空隙が確認できた。ソケットが無い場合の試験についてはこのような空隙は確認されなかった。両者の試験形態は異なっているが、どちらも埋設管から張出した断面積の大きな

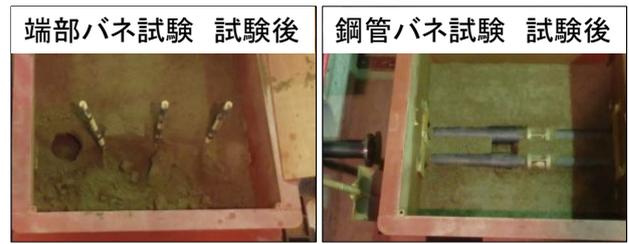


図 6 試験後の張出箇所付近の様子

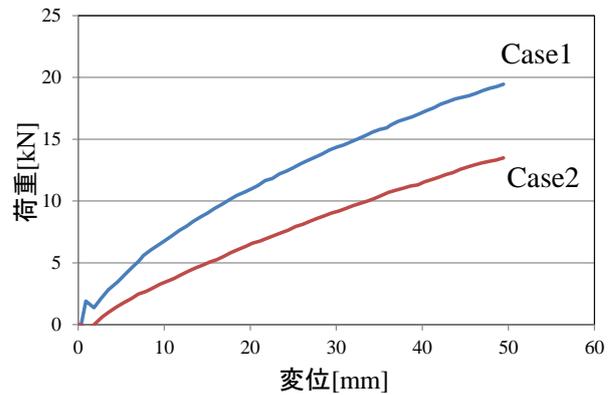


図 7 高さ 190mm×幅 190mm 端部バネ試験結果

箇所が地盤により土圧起因の地盤拘束力を受けた結果、図-6に示すような空隙が発生したと考えられる。以上のことから、本節では今回の試験体のように張出した箇所が軸方向に変位する際の地盤拘束力について整理する。前述したように実施した試験形態は通常の鋼管部分の地盤拘束力と張出した箇所が作用される地盤拘束力が合わせて計測される形態であるため、その影響を排除して整理する。そのためにソケット無の鋼管バネ試験における2ケースの平均の荷重を鋼管単体の地盤拘束力とみなした。端部バネ試験とソケット有の鋼管バネ試験において地盤拘束力を受ける鋼管区間の長さが分かっているので、その分の地盤拘束力を実験で得られた地盤拘束力から減じることにより、張出した箇所が作用される地盤拘束力のみを算出した。試験結果の例として図-5に補正を行った後の断面の形態が高さ190mm×幅190mmである端部バネ試験結果を示す。横軸が変位量、縦軸が荷重である。試験における観測値同士で演算を行ったため、各試験ごとの誤差によりケースによっては負の値となる場合が存在している。表-4に各実験ケースのまとめを示す。張出面積は張出した箇所の断面積であり、鋼板及びソケットの断面積から鋼管区間の断面積を減じた値を記載している。利用した鋼管の外径は89.1mm、ソケットの端部の外径は115mmであることから各試験パターンにおける張出し箇所の面積を算出している。また地盤反力係数は直径300mmの平板が2.5mm沈下した際の荷重を平板載荷試

表 4 端部バネ試験結果まとめ

断面名称	地盤反力係数[N/mm ³]	張出面積 [mm ²]	荷重 [kN]
1 Case1	0.068	2.99×10 ⁴	19.5
1 Case2	0.064	2.99×10 ⁴	13.5
2 Case1	0.072	4.70×10 ⁴	36.4
2 Case2	0.068	4.70×10 ⁴	29.7
3 Case1	0.058	2.04×10 ⁴	16.7
3 Case2	0.060	2.04×10 ⁴	18.6
4 Case1	0.088	4.70×10 ⁴	39.5
4 Case2	0.060	4.70×10 ⁴	26.8
1×1ソケットn1	0.088	4.15×10 ³	10.5
1×1ソケットn2	0.088	4.15×10 ³	13.1
2×2ソケットn1	0.080	1.66×10 ⁴	18.9
2×2ソケットn2	0.090	1.66×10 ⁴	24.6

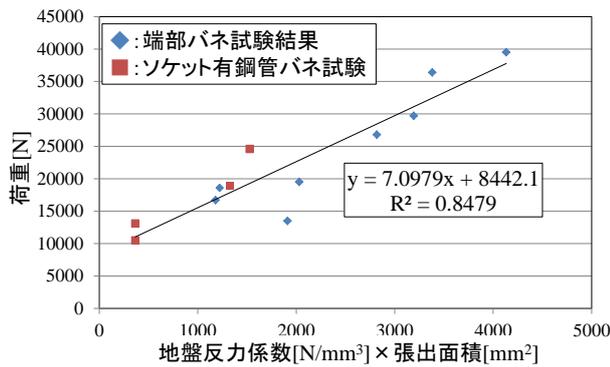


図 8 地盤反力係数、断面積と荷重の関係

験のグラフから読み取った値とした。荷重は試験体が50mm変位したときの値としている。図-7や表-4に示したように、張出した箇所断面積が等しくても観測された荷重は一致しない。試験環境の制約により締固めは人力で行ったため、締固め度合が試験結果に与える影響を明らかにするために平板載荷試験による地盤反力係数と張出面積の積を横軸、荷重を縦軸としたときの関係を図-8に示す。多少の誤差が確認できるが、張出箇所が作用される荷重は地盤反力係数と張出面積をパラメータとすると精度良く説明できることが明らかとなった。

(2) 外周バネ試験

本節では外周バネ試験の結果を示す。図-9は各断面形状の荷重-変位関係である。外周バネ試験においては同一の断面形状であればケースごとの違いはほとんど確認できず、ほぼ同等の荷重-変位関係を示したことから本稿では各断面について2ケースの平均値を示す。図-9から、外周バネは小さな変位量で荷重が急激に増大し、一定の値へ収束するということが明らかとなった。収束する値については、試験体の自重が大きくなり、周面地盤との接触面積が大きくなるに従い大きな値へ収束するということが明らかとなった。東京ガスの実験⁹⁾では、鋼

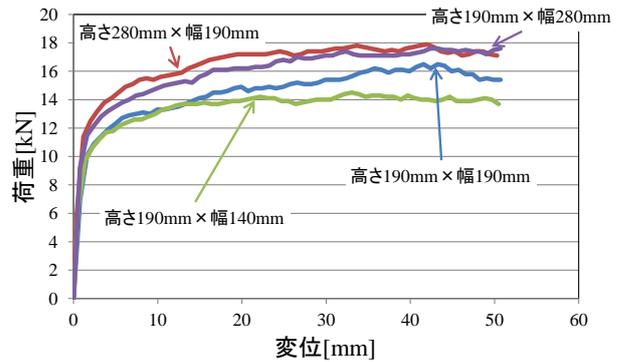


図 9 外周バネ試験結果

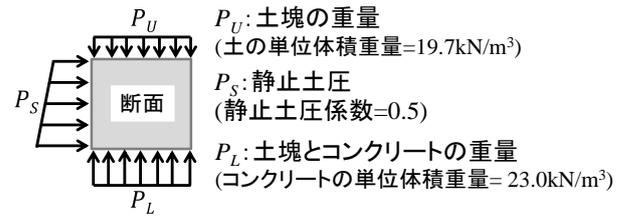


図 10 外周バネ試験体の荷重モデル

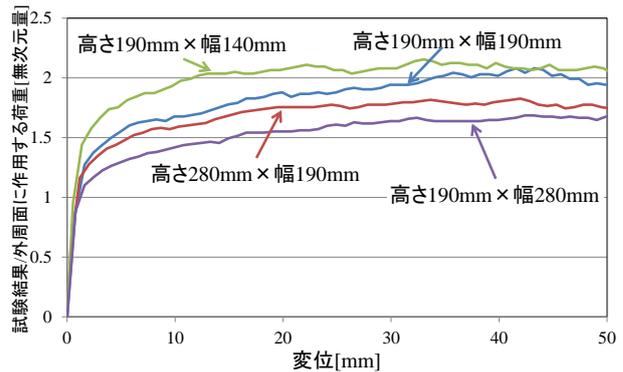


図 11 周面の土による荷重と地盤拘束力の関係

管の最大地盤拘束力は垂直土圧とほぼ線形な関係となり、地盤とポリエチレンで被覆された鋼管外面の限界せん断応力は垂直土圧から推定することが可能であることが示されている。今回の実験では、試験体は円筒形のポリエチレン被覆鋼管ではなく矩形断面のコンクリートである。しかしながら、図-9の関係より外周バネはコンクリートと周面の土との摩擦によるところが大きいと推定できる。確認のため、図-10に示すようにコンクリート試験体の上部に作用する土塊の重量(土被り 0.6m)、土塊の重量と自重による垂直抗力、試験体の側面から作用する静止土圧と試験結果の関係について検討する。試験体外面に作用する周面の土からの荷重で試験結果を除いた結果を図-11に示す。断面形状によらず一定の値を示すと予想していたが、断面の周長が小さいほど、計測した試験結果を外周面全体に作用する荷重で除した値は大きな値

表 5 外周バネ試験結果まとめ

断面名称	地盤反力係数[N/mm ³]	図10による外周に荷重[kN]	最大荷重[kN]
1 Case1	0.112	7.93	16.0
1 Case2	0.124		17.4
2 Case1	0.132	9.80	17.4
2 Case2	0.104		18.6
3 Case1	0.140	6.73	14.0
3 Case2	0.112		15.2
4 Case1	0.096	10.4	17.8
4 Case2	0.108		17.4

へ収束する傾向が明らかとなった。端部バネ試験の場合と同様に平板載荷試験による地盤反力係数や周面の地盤との接触面積による整理を試みたが端部バネ試験のような明確な傾向を得ることはできなかった。表-5 に外周バネ試験における各ケースごとの結果を示す。

4. 計算モデルの検討

(1) 端部バネモデルの構築

本節では端部バネの計算モデルについて検討する。今回の検討では、張出した箇所が地盤により作用される地盤拘束力と埋設管が水平方向に変位するとき作用を受ける場合の地盤拘束力との比較を行う。Trautmann et al.らの実験⁷⁾、高圧ガス導管耐震設計指針は埋設管の水平方向の地盤拘束力について整理されており、たとえば高圧ガス導管耐震指針では鋼管の水平方向の地盤拘束力を式(1)で表現される双曲線近似モデルを採用している。

$$F = \frac{\delta}{0.17 + 0.83\delta} \quad (1)$$

ここで F 、 δ はそれぞれ正規化された地盤拘束力、変位である。端部バネ試験、ソケット有の鋼管バネ試験から得られた結果は全て図-7 のような関係を示し、張出した箇所が作用される地盤拘束力は変位量が大きくなるにつれ単調増加する傾向であった。試験後の土の様子を確認した所、地表面にひび割れが確認でき、また実施ケースによっては鋼製土槽と土の境界で地盤が盛り上がっているような事象も確認できた。この現象は土槽が十分な大きさを有していなかったため、試験により観測された荷重には土槽の加振器と反対側の壁面からの反作用による荷重も含まれていることを示唆している。この影響の検討については今後の課題とすることとし、今回は仮の値として変位量 50mm、そのときの計測された荷重を正規化の基準として端部バネモデルを検討する。図-12 に基準値で正規化した実験結果、式(1)による双曲線モデル、加えて式(1)の双曲線モデルを Thomas et al. が提案し

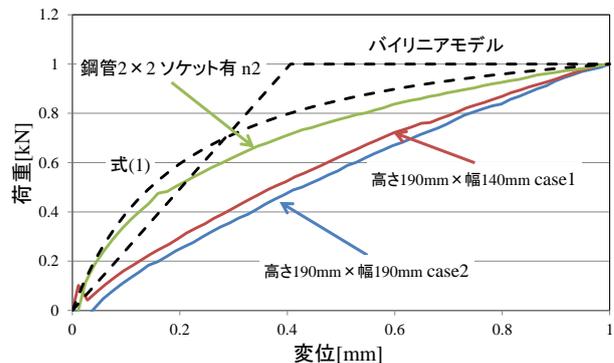


図 12 地盤拘束力モデルと試験結果の比較

た⁸⁾最大荷重の70%を初期勾配とするバイリニア関数で近似したモデルを示す。なお実験結果については、図-8 において回帰直線と下振れ誤差が最大のケース(断面 1 Case2)、上振れ誤差が最大のケース(2x2 ソケット n2)、二乗誤差が最小のケース(断面 3 Case1)の結果を代表して示す。図-12 から、双曲線近似モデルと近い特性を示した試験結果も存在するが、乖離した特性を示す試験結果も存在することが分かる。この理由としては地盤の締固め度合の違いによるものと考えられる。今回の実験では平板載荷試験から求めた地盤反力係数は最小の値が 5.8×10^2 [N/mm³]、最大が 9.0×10^2 [N/mm³]であった。この値と道路橋示方書⁹⁾における標準貫入試験の N 値から変形係数 E_0 と平板載荷試験結果に相当する地盤反力係数 k_v の推定式である以下の式(2)、(3)との比較を行う。

$$k_v = \frac{1}{0.3} \alpha E_0 \quad (2)$$

$$E_0 = 2800N \quad (3)$$

パラメータを仮にN値=10、平常時を想定して $\alpha=1$ とすると、 $k_v=9.33 \times 10^2$ [N/mm³]となり、道路橋示方書の算定式に基づけば、今回実施した端部バネ試験及び鋼管バネ試験はN値が10未満の締固めで実施されたことになる。式(1)の双曲線モデルは密に締固められた砂と中程度に締固められた砂の中間の特性の場合の算定式であり、図-12において双曲線近似モデルに最も近い挙動を示すパターンは地盤反力係数が 9.0×10^2 [N/mm³]であるということから、張出した箇所が作用を受ける地盤拘束力と変位の関係はN値が10程度の砂地盤を仮定すれば式(1)で説明できることが示唆された。簡易的な耐震評価の場合においては、最大地盤拘束力の70%を割線とするバイリニア型の特性が利用できる。なお今回の実験は通信用管路の浅層埋設区間の防護工法に対する検討であるため、提示した結果は土破りを0.6mを想定した場合のみに適用できる。

(2) 外周バネモデルの構築

本節では外周バネ試験の計算モデルについて検討する。図-7から、外周バネは小さな変位量で荷重が急激に増大し、以降一定の値に収束するという、一般的な摩擦力と同じ傾向を示すことが明らかとなった。図-11で示したように試験の荷重を周面の土圧で除した値は摩擦係数 μ となることを予想していたが、この値は1.5~2.0程度に収束するという結果であった。この値について砂の内部摩擦角 ϕ と摩擦係数 μ の一般的な関係式である

$$\mu = \tan \phi \quad (4)$$

を適用すると砂の内部摩擦角 $\phi \approx 56^\circ$ のとき、 $\mu \approx 1.5$ となる。この値は一般的な砂質土や碎石の特性と乖離している。今回実施した実験結果からは、コンクリート巻き立て区間の摩擦による地盤拘束力を精度よく説明できるモデルを構築することはできなかった。理論モデルの構築については更なる検討が必要である。本稿では暫定的な外周バネモデルの構築について提案する。図-11を観察すると、断面積が小さな形態ほど試験荷重を周面の土圧で除した値は大きな値へ収束するということが分かる。言い換えれば断面積が小さなコンクリート巻き立て区間ほど単位面積当たりの地盤拘束力が大きくなり、地震時において地下管路設備にとって厳しい条件になる。最小のコンクリート巻き立て区間の断面寸法は管1条を防護する場合であり、NTTの施工標準によると、190mm×190mmが最小の断面形状となる。以上より、断面の寸法が190mm×190mmの場合の特性による計算モデルを作成し、評価を実施することにより通信用管路の対する安全側の評価が可能となる。検討対象区間に対して、設備データからコンクリートの断面形状、土被りを求めることが可能である。このデータに加えて該地点の埋戻し土の単位体積重量が分かれば、図-10のモデルに基づいてコンクリートの外周面に作用する自重及び土の荷重を算出することが可能となる。この算出された荷重と実験によって導かれた図-11の関係を利用することにより、地震時にコンクリート区間に作用する最大地盤拘束力を求めることができるため、今回着目しているコンクリート巻き立て区間の地震に対する評価が可能となる。

5. まとめと今後の課題

本稿では、通信用地下管路のコンクリート巻き立て区間に着目し該区間の挙動を把握するための実験を行い実験概要、実験結果、該区間の計算モデルについて報告した。実験はコンクリート巻き立て区間の張出した箇所が地盤に作用される地盤拘束力と外周部が地盤との摩擦により作用される地盤拘束力をそれぞれ独立に観測する2種類が実施された。それぞれの実験により、コンク

リート区間の断面を模した鋼板に対する土槽実験と継手ソケットの張出区間の地盤拘束力を計測する実験結果より、張出箇所が作用される地盤拘束力は地盤反力係数と張出面積をパラメータとすることで推定できることを示した。また既往研究により提案されている埋設管の水平方向の地盤拘束力を説明する双曲線モデルとの比較を行い、提案された双曲線モデルによって、張出した箇所が作用される地盤拘束力を良好に説明できることを示した。一方コンクリートの外面が周面の地盤により作用される地盤拘束力は端部バネのように明確な傾向を確認することはできなかった。しかしながら、地震動に対する安全側の評価となるような地盤拘束力モデルの案を示し、コンクリートで巻き立てられた地下管路区間の定量評価を可能とした。今後の課題としては、今回の実験を再現する解析が挙げられる。前述したように、今回の実験では土槽の大きさが十分でなかったことから、この影響が実験結果に反映されている可能性が存在する。この影響の有無を明確化するために、今回の実験環境を再現したモデル、土槽壁の影響を排除したモデル双方の2次元FEM解析を行い、より実環境に近い挙動を説明できるパラメータの導出が挙げられる。また、得られたパラメータを用いて、地下管路区間にコンクリートで巻き立てられた区間が存在する場合の地下管路区間の耐震性に与える影響の定量評価等も挙げられる。

参考文献

- 1) 土木学会：都市ライフラインハンドブック，2010
- 2) Tomohiro, H. Takahiro, Y. Toshio, I. Takashi, K. : Seismic Performance Assessment of Expansion Joints for Water Lifelines, Proc. of 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, 24-28 Sept 2012
- 3) 若竹雅人, 田中宏司, 伊藤陽：コンクリート巻き立て管の地震時挙動把握のための実験について，土木学会第70回年次学術講演会，pp.359-360, 2015
- 4) 後藤尚男, 杉戸真太, 亀田弘行, 磯田厚志：コンクリート補剛部を有する有継手埋設管の地震時応力と継手変位の解析，京都大学防災研究所年報，Vol.26, No.B-2, pp51-73, 1983
- 5) 日本ガス協会：高圧ガス導管耐震設計指針，2004.
- 6) 小林実央, 安藤広和, 小口憲武：埋設管に作用する軸方向地震時地盤拘束力に及ぼす地盤の速度と繰り返し変位の影響，土木学会論文集 No. 591, I-43, pp299-312, 1998
- 7) C, H, Trautmann. T, D, O'Rourke : Lateral Force-Displacement Response of Buried Pipe, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.111, No.9, pp.1077-1092, 1985
- 8) H, P, Thomas, : Discussion of "Soil Restraint Against Horizontal Motion of Pipes", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.104, No.9, pp.1214-1216, 1978
- 9) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編, 2012.

FOR QUANTITATIVE EVALUATION OF BEHAVIOR OF CONDUITS REINFORCED BY CONCRETE DURING AN EARTHQUAKE

Masato WAKATAKE, Akira ITOH and Koji TANAKA

In this paper, conduits reinforced by concrete are focused. This method is applied to when telecommunication conduits are buried shallowly. The purpose of this method is to protect pipes and inner cable from other construction works. Stress by seismic wave on these section have not been evaluated quantitatively, though these sections tend to be damaged from past earthquake experience. For quantitative evaluation of this section during an earthquake, soil tank test was carried out to find out behavior of the section of conduits reinforced by concrete during an earthquake. In this paper, results of soil tank test and comparison of previous research are shown.