

地震時に被害を生じやすい 通信管路布設形態に関する分析

若竹 雅人¹・瀬川 信博¹・榎 克実¹・片桐 信²・鈴木 崇伸³

¹NTT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)

E-mail:wakatake.masato@lab.ntt.co.jp segawa.nabuhiko@ntt.lab.co.jp sakaki.katsumi@lab.ntt.co.jp

²正会員 摂南大学 理工学部 都市環境工学科 教授 (〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町17-8)

E-mail:shin-k@civ.setsunan.ac.jp

³正会員 東洋大学 理工学部 都市環境デザイン学科 教授 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)

E-mail:tsuzuki@toyo.jp

通信管路設備は、収容ケーブルに安全なケーブル収容空間を提供することが求められる。過去の大震災を教訓として地下管路においても、設備の信頼性向上の取り組みが実施されてきたが、高度経済成長期に大量に建設された耐震性が不十分と考えられる旧規格管路が、多数稼動中である。管路設備の信頼性向上のためには、最新規格へ更改することが理想であるが、膨大な設備量のために現実的ではない。本研究はこのような問題を解決するために、地下管路設備の耐震性評価の高度化を目指すものである。本稿では特に管路の布設形態に着目する。現実存在するような布設形態を反映した管路モデルに対し、応答変位法による解析を行った。種々の布設形態の場合において、標準状態と比較してどの程度管路に作用する力が増幅するか定量的に評価した。

Key Words :underground pipeline system,conduits,seismic evaluation,

1. はじめに

日本電信電話株式会社(以下、NTT)は全国で約 62 万延長 km の地下管路設備を保有しており、縦横にケーブルを張り巡らし通信サービスを提供している。その多くは 1970 年頃から 1980 年頃の高度経済成長期に建設された設備であり、社内マニュアルしたがって画一的に同じ設計法で設備を効率よく建設してきた経緯がある。

過去の地震被害から、通信管路において被害が発生しやすい個所には伸縮・可とう構造とするなどの対策が取られてきた。コンクリート製のマンホールと管路の接続点には伸縮性のあるスリーブ構造が採用され、また液状化地盤や橋台背面など不等沈下を生じやすい個所では離脱防止継手を設置するなど耐震設計を高度化してきているが、対策導入前に建設された大量の設備の適切な評価が望まれている。

通信管路は通信ケーブルを外力から保護することが主な機能であり、設計時に線形の自由度が高い特徴がある。標準的な埋設深度は地下約 1.2m であるが、例えば他企業埋設物と交差する場合には、これを回避するために急激な線形変化を行い浅い区間を通過させる設計が行われ

ている。この浅い区間に埋設される管路には、道路工事等から管路と収容ケーブルを防護するためにコンクリートで防護され、この箇所は不連続点となる。また道路線形に合わせて曲げる場合には、線形に適した曲管を利用したり、直管を現場で加工して曲線布設を実施している。耐震設計においてこれらの点は考慮されておらず、実際の布設状況を反映するような既設設備の耐震性評価の観点で影響の明確化が望まれている。

本研究は、管路線形に注目して 2011 年東日本大震災の管路点検結果を分析し、さらに全設備の内の約半数を占める鋼管について弾性床土上の梁としてモデル化を行い、応答変位法により管路線形が応答値に及ぼす影響を検討している。平面線形に入る曲線部あるいは縦断線形に入る曲線部が管路の地震時応答に及ぼす影響を明確にするとともに、浅層部に設置することとなっている防護コンクリートの影響について解析的に分析している。解析結果から曲線区間あるいは防護コンクリート際には地震時応答が増大することが判明し、解析結果を定量化することにより既設管路の弱点部を設備記録から把握できる可能性を示している。

表-1 津波エリアにおける被災

県	設備数	点検数	被災数	被災率
岩手	82	29	4.5	5.5%
宮城	280	36	7.8	2.7%
福島	33	3.5	0.61	1.9%
茨城	37	2.4	0.79	2.1%
計	430	70	13.7	3.1%

表-2 液状化エリアにおける被災

県	設備数	点検数	被災数	被災率
茨城	16	4.8	1.2	7.9%
千葉	190	32	6.6	3.5%
東京	20	4	0.3	1.4%
計	230	41	8.1	3.6%

表-3 その他のエリアにおける被災

県	設備数	点検数	被災数	被災率
岩手	310	65	3.8	1.2%
宮城	1,400	68	10	0.7%
福島	1,300	68	8.5	0.7%
茨城	2,100	77	19	0.9%
計	5,100	280	41	0.8%

2. 東日本大震災の被災分析(地下管路設備)

(1) 管路設備の被害の概要

東日本大震災により通信土木設備が被災したエリアは岩手県、宮城県、福島県、茨城県、千葉県、東京都に及んだ。地下管路のような目視点検できない被災調査は、路面踏査により路面の変状を確認し、変状が確認できる箇所を対象に、マンドレル通過試験を実施し、異常が確認できた場合は管路内部点検用のカメラにより被災状況を確認するという方法で被災把握を実施した¹⁾。地下管路設備の被災状況について、津波エリア²⁾における被災、液状化エリア³⁾における被災、その他のエリアにおける被災の3つに分類して表-1、表-2、表-3に示す。設備数、点検数、被災数はそれぞれ点検を実施したエリアの全設備数、点検を実施した設備数、地震による被災が確認できた設備数であり単位は延長kmである。集計対象は全ての管種である。津波エリアや液状化エリアの被災率はその他のエリア(地震動や地震動に伴う地盤変状による作用のみ)よりも高いという被災状況であった。詳細は参考文献¹⁾で議論している。

(2) 鋼管の地震動による被害の分析

本節では鋼管の被災事例の分析を行う。被災データの内から鋼管の被災事例を抽出し建設年度と布設形態で整理を行う。なお本稿では地下埋設管路の地震動による影

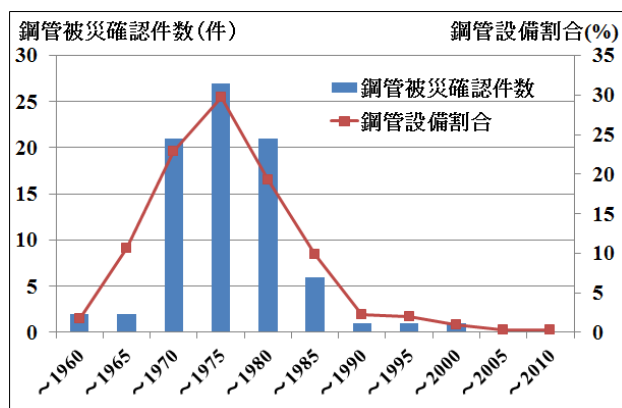


図-1 被災設備件数と鋼管総設備数の関係



写真-1 曲線布設箇所の被災事例

表-4 曲線布設管路の被災割合

	点検スパン	被災スパン	被災率
全体	1064	82	7.7%
曲線布設	60(推定)	6	10%

響を検討するため前節のその他のエリアにおける点検箇所と被災事例に注目して布設形態による分析を行った。また、橋梁区間については集計の対象外とした。図-1に建設年度別の鋼管の被災確認件数と建設年度別の鋼管の設備数を示す。集計対象となる設備数が多くないため、一概に結論付けることは難しいが設備の母数が多ければ被災の確認できた件数も多くする傾向が得られた。地震動による鋼管の被害についてマクロの視点からでは、古い設備ほど被災を受けやすいというわけではないということが分かった。

次に鋼管の布設形態と被災の関係を考える。大きく3種類に分類する。平面曲線と縦断勾配、不連続点である。

a) 平面内の曲線

カーブしている道路下へ布設の場合、管路もカーブを描いて布設される。写真-1に曲線布設箇所て管路が被災した現場の状況を示す。写真中の点線が布設されている管路ルートであり、バツ印の箇所が被災箇所である。表-4に鋼管の被災データと設備記録図から判断した曲線布

表-5 縦断勾配管路の被災割合

	点検スパン	被災スパン	被災率
全体	1064	82	7.7%
縦断勾配	不明	56	不明

表-6 不連続管路の被災割合

	点検スパン	被災スパン	被災率
全体	1064	82	7.7%
不連続点	99(推定)	22	22%

設箇所の関係を示す。なお曲率半径が100m以下である区間を含むスパンを曲線布設と分類した。全設備の内の5.65%程度が曲率半径100m以下というNTTの調査結果が存在するため、曲線布設の点検スパン数を60と推定した。母数が多くないため結論付けることは難しいが、曲線布設はそうでない場合と比較してやや被害を受けやすいということが示唆された。

b) 縦断勾配

NTT所有以外の地下埋設物を避けるために線形を縦方向に変化させて布設するケースが存在する。このような布設形態が耐震性に与える影響を測定する。表-5に縦断勾配箇所と被災確認数の関係を示す。ここで縦断勾配となるスパンは設備記録図においてスパン中に勾配率1%以上の区間を含むことが確認できたスパンと定義した。管路の布設形態において勾配率で整理したデータが確認できなかったため、勾配率が1%以下の場合と比較して被災を受けやすいか受けにくいかの判断は、今回の分析ではできなかった。

c) 不連続点

浅層埋設区間では、道路工事などから地下管路と収容ケーブルを防護するために管路に防護コンクリートと呼ばれる部材で管路にコンクリート補強を実施する。このような箇所は不連続点となり、地震時においてコンクリート箇所とそうでない箇所の境界で応力が増加することが想定でき、被災事例も報告されている。表-6に防護コンクリート補強がなされた箇所と被災の関係を示す。

全設備の内の9.35%程度に防護コンクリート補強が実施されているというNTTの調査結果が存在することより、不連続点の点検箇所数を99箇所と推定した。この結果により、スパン中に防護コンクリートが存在しているような場合はそうでない場合と比較してかなり地震動の影響を受けやすいということが分かった。しかし防護コンクリートは支障物上越し等の条件の悪い箇所(軟弱な地盤と推定できる箇所)に設置されることが多いため、防護コンクリート単体による影響が大きいか、複合的な要因によって地震動による被災を受けやすいのかは、引き続き、被災事例の分析や解析により定量的な影響の把握を実施する。

表-7 管体特性値

弾性係数(N/mm ²)	外径(mm)	肉厚(mm)
2.06×10^5	89.1	4.20

表-8 地盤特性値

	軸方向	軸直角方向
$k(\text{N/mm}^3)$	5.82×10^{-3}	2.67×10^{-3}
$k'(\text{N/mm}^3)$	5.04×10^{-4}	2.67×10^{-5}
$\delta(\text{mm})$	5.00	40.0

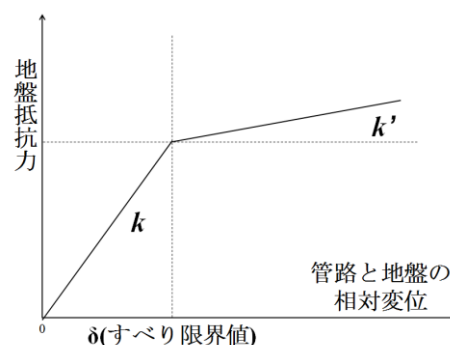


図-2 地盤特性モデル

3. 線形変化を考慮した応答変位法解析

本章以降は種々の布設形態について、それぞれのモデルを作成し解析を行い、布設形態が耐震性に与える影響の定量化を行う。解析手法は地下構造物の解析としてよく利用される応答変位法とした⁴⁾。NTTの地下管路(鋼管)は5.5mごとに継手で接続される形態であるが、布設形態による応答値の変化に把握を目的とするため継手を無視したモデルでの計算を実施した。地盤条件と管体条件はそれぞれ表-7、表-8のようにした⁵⁾。また地盤特性値は図-2に示すようなバイリニア型とし、管体は弾性体として解析を実施する。

(1) 平面内の曲線の解析方法

曲線布設設形態の影響を把握することを目的として曲線布設モデルの解析を実施した。曲線区間を表現するパラメータは曲率半径Rと交角θであり、範囲を $R=\{2.5\text{m}, 10\text{m}\}$, $\theta=\{4^\circ, 8^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ\}$ とした。NTTの施工マニュアルにおいて、標準では曲率半径は10mを下限とし施工上やむを得ない場合は曲率半径2.5m以上と指示されており、交角は60°を上限と定められているためこのようなパラメータで解析を実行した。今回はスパン中央部に定義した曲線区間が存在するような布設形態を想定して解析を実施した。

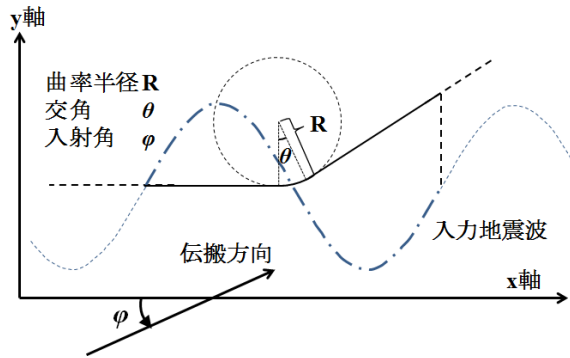


図-3 曲線布設モデル概要

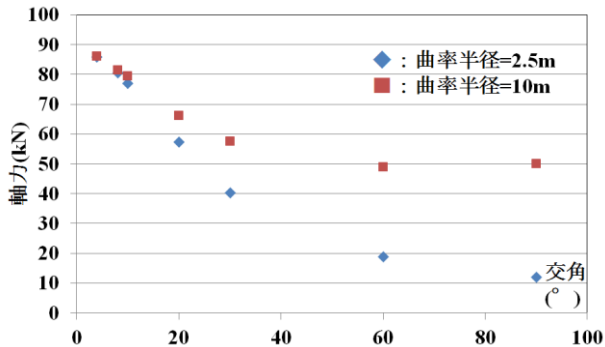


図-4 軸力(曲線布設)

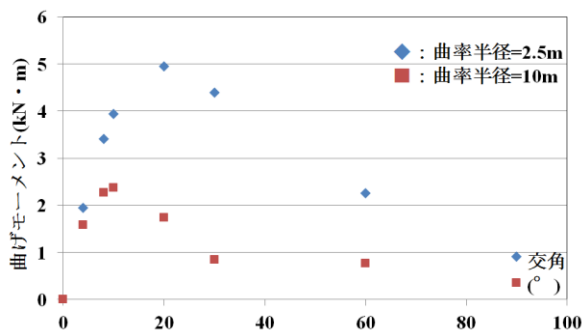


図-5 曲げモーメント(曲線布設)

解析モデルの概要を図-3に示す。入射角は図-3中において曲線中点の接線方向($\phi=\theta/2$)とし、曲線中点に最大地盤ひずみが発生するような位相で入力した。また、地盤ひずみ0.3%相当の地震動を入力した。なお管路長はモデルによって異なるが概ね100m程度とした。

(2) 平面内の曲線の影響分析

応答変位法による計算を行い軸力と曲げモーメントがパラメータによりどのような傾向を示すのかを確認する。図-4、図-5に各モデルにおける軸力と曲げモーメントの最大の応答値を示す。いずれも最大地盤ひずみ発生箇所を観測された。曲げモーメントについては交角が0の場合、応答値は0であるとの仮定してグラフを作成した。

得られた結果より軸力は直線構造に近い布設の場合程大きく、曲げモーメントは曲率半径が小さいほど、交角が10°~20°付近で極大となることが分かった。

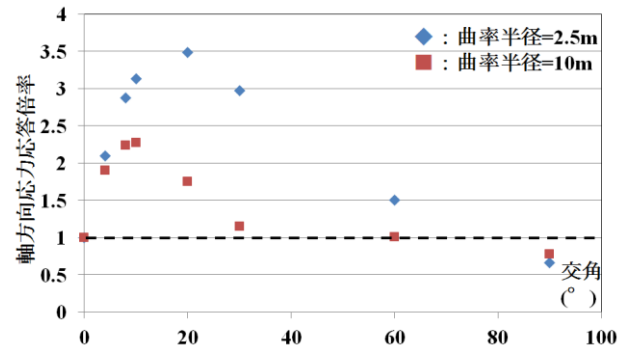


図-6 軸方向応力比較(曲線布設)

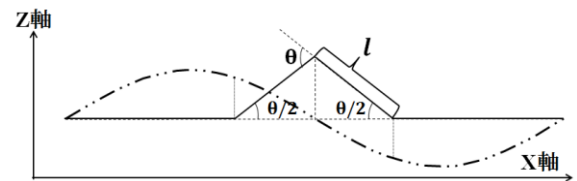


図-7 縦断勾配モデル概要図

次に解析により得られた結果を直線構造管路の場合と比較してどの程度の大きさの軸方向応力が発生しているか比較する。直線構造管路は軸力しか発生せず単純に比較することはできないため、各モデルにおいて得られた軸力をP、曲げモーメントをM、管路の断面積をA、断面係数をZとして

$$\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{M}{Z} \quad (1)$$

により軸方向応力 σ を計算して、応答変位法で直線構造管路で発生する応力と比較した。直線構造のモデル概要は図-3において $\theta=0^\circ$ となる場合である。図-6が軸方向応力の比較である。縦軸が直線構造と応力の比であり、この値が大きいほど大きな応力が発生することになる。点線は1倍の箇所を明示的に示すために描画した。倍率が大きい場合は単純な直線構造より約3.5倍の軸方向応力が発生することが分かる。また、傾向は曲げモーメントのそれと似通っており、曲げモーメントが応答倍率によって支配的なパラメータであることが分かる。

(3) 縦断方向の線形変化の解析

縦断方向の線形変化が地下管路の耐震性にどのような影響を与えるのかを把握するために、図-7のような形態のモデルを作成し解析を行った。設定したモデルは地下管路の布設ルートに支障となる埋設物が存在し、これを避けるために埋設物を上越しての布設を想定したモデルである。実際の布設では緩やかな曲線軌道で線形を変化させていることが想定できるが、これは前節での検討事項と重なるため、屈曲させての布設と設定した。鋼管

表-9 解析パラメータ(縦断勾配)

交角(°)	勾配区間長(m)
10, 15, 30	5.5, 16.5
4, 6, 8, 10, 15, 30	11

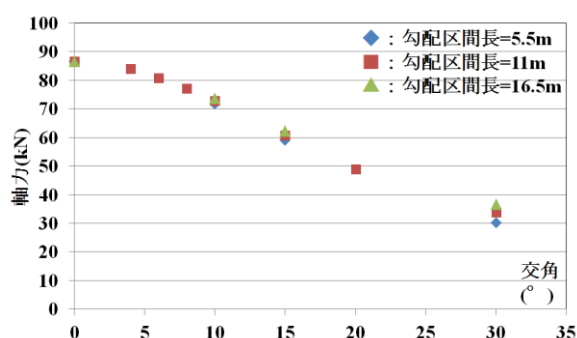


図-8 軸力(縦断勾配モデル)

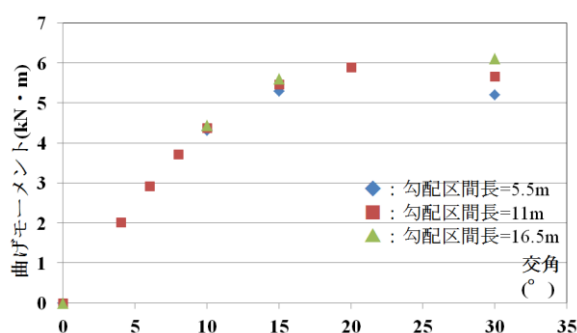


図-9 曲げモーメント(縦断勾配モデル)

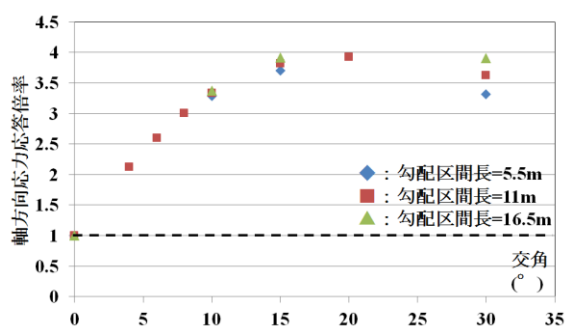


図-10 軸方向応力比較(縦断勾配モデル)

の特性や地盤特性のような基本的な解析条件は曲線布設の場合と同じである。パラメータは勾配区間長 l と交角 θ であり、表-9に示すパラメータで解析を実施した。交角は施工マニュアルで規定される上限値までの設定とし、勾配区間長は鋼管の単位長である5.5mを基準として3パターンで実施した。管路長は概ね100mとした。

(4) 縦断方向の線形変化の影響分析

曲線布設管路の場合と同様に軸力、曲げモーメント、直線構造管路と比較した場合の軸方向応力の比較をそれ

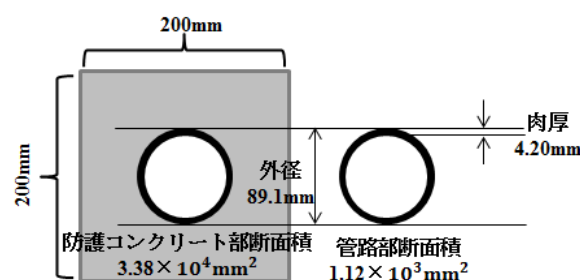


図-11 防護コンクリート区間断面図

ぞれ図-8、図-9、図-10に示す。曲線布設の場合と同様に交角が小さくなるほど軸力は大きくなり、交角が20°付近で曲げモーメントは極大となる。直線構造モデルと軸方向応力の比較を行うと、大きくて約4倍の力が発生していることが分かった。また、応答倍率の傾向は曲げモーメントの傾向とよく似ており、曲げモーメントが主要なパラメータであることが分かる。

4. 防護コンクリートを考慮した応答変位法解析

(1) 防護コンクリート部のモデル化

管路ルート上に管路を防護するためのコンクリートが管路の周囲に施工される場合を考える。同様の検討が過去に実施されているが⁹⁾、新しいモデル化手法を提案する。今回の検討においては防護コンクリートは1管1条の管路を防護しているとする(図-11)。

このような断面構造を有する構造物が地下管路区間に存在すると考える。また、この区間は地震時に次のように挙動するとする。①地盤変位に対して、地盤-コンクリートバネを介してコンクリート部分が挙動する。②コンクリート部の挙動に対して、コンクリート-管路バネを介して管路部が挙動する。

なお今回は、防護コンクリートと管路が強固に付着していると仮定してコンクリートと管路が同じ挙動を示すとする(一体の構造物として運動する)。通常の地盤バネは主に地盤と管路の摩擦力によるものであるが、防護コンクリート部は通常の管路部よりも断面積が大きいので、地盤とコンクリートの間の摩擦力に加えて、張出したコンクリート部が地盤に押される支圧力により拘束力が発生すると考えられる。過去のNTTの実験により摩擦力 $=3.92 \times 10^2 \times (\text{コンクリート周長}) \times (\text{防護コンクリート長})$ [N]、支圧力 $=7.84 \times 10^1 \times (\text{コンクリート部の断面積})$ [N]で算出される。今回の検討では、防護コンクリート長をNTT調査による平均である 2.20×10^4 [mm]とすることから防護コンクリート部に作用する外力は716 [kN]となることにより、単位長さ当たり作用する外力は 4.07×10^2 [N/mm]となる。すべり限界値を地盤-管路バネと同じ5.00 [mm]とすると、

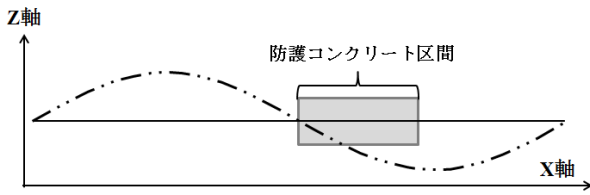


図-12 不連続点モデル間断面図

単位長さ当たりのバネ係数は $8.14 \times 10^3 [\text{N/mm}^3]$ となる。この値を地盤-コンクリートバネの係数とする。防護コンクリート区間の管路はコンクリートと一体として運動するため、通常の管路部と異なる特性値を有すると考えられる。具体的には、通常の管路部と比較してコンクリートと一体となっている区間の構造物の弾性係数が異なると思われる。一体となっている構造物に軸力 P が作用し、 ε だけひずむとする。コンクリート部の弾性係数、断面積、軸力をそれぞれ E_C 、 A_C 、 P_C 、鋼管部の弾性係数、断面積、軸力を E_S 、 A_S 、 P_S とすると、

$$\varepsilon = \frac{P_C}{E_C A_C} = \frac{P_S}{E_S A_S} \quad (2)$$

である。通常の鋼管部に同じ軸力 P が作用し、鋼管部分が ε_1 だけひずむとすると、

$$\varepsilon_1 = \frac{P_S}{E_S A_S} \quad (3)$$

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_1} = \frac{E_S A_S}{E_C A_C + E_S A_S} \quad (4)$$

なので、このひずみの差異を反映して解析を実施する。なお、過去の震災の経験により防護コンクリート部分と通常管路区間の境界に近い継手部に被災が発生している傾向が確認できているため、この境界部分に作用する軸力に注目する。解析モデルは図-12の通りであり、直線構造管路のスパン中に防護コンクリートが存在し、防護コンクリートと通常管路区間の境界部に最大地盤ひずみが発生する条件で解析を実施した。なお防護コンクリート部分は、地盤バネ係数と弾性係数の2つのパラメータを先のモデル化の方法で求めた値として再現した。解析の基本的な条件は前の2例と同様である。またこの解析は直線構造であり、管軸方向に沿った地震波を入力するため、曲げモーメントは発生しない。なお亘長は99mとした。

(2) 防護コンクリート部の影響分析

通常管路部と防護コンクリート部の境界箇所において発生する軸力について検討する。図-13は実施した解析結果と防護コンクリートがスパン中に存在しない場合についての結果の比較である。この結果により注目している境界部は、防護コンクリートが無い場合と比較して、作用する軸力が1.2倍程度に増幅されることが分かった。従来からの防護コンクリート際における地下管路の被災

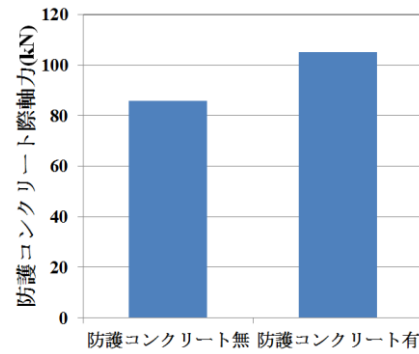


図-13 軸力比較

の報告を補強するような結果であると考えている。

今回は継手無モデルに対する解析であり、最大で100[kN]程度の軸力が発生する可能性があることが確認できたが、継手が破損するほどの大きな力は作用していない(ネジ継手は200kN以上の軸力が作用しないと破損しない)。

通常防護コンクリートは管路の浅層埋設区間に設置され、代表的な例は橋台背面への設置である。軟弱地盤であること、通常の管路と比較して作用する軸力が増幅されることという2点により、被災事例の分析で示したように防護コンクリート部の被災事例が顕著であったことの説明ができる。浅層区間を反映した解析については今後の課題としたい。

5. まとめと今後の課題

本研究では、通信用地下管路の布設形態に着目し、それぞれの布設形態が地震動に対する地下管路の耐震性に与える影響の検討を行った。布設形態を平面内の曲線布設と屈曲布設、防護コンクリートによる不連続点に分類して、東日本大震災における被災事例を建設年度別及び分類したパターンごとに分析を行った。この結果、鋼管の被災は建設年度による相関は存在しないということが明らかになり、また防護コンクリート施工が実施されている区間については被災率が特に高くなるということが明らかになった。次に分類した布設パターンについて弾性床土上の梁としてモデル化を行い、応答変位法による解析を実施した。継手の非線形性を無視したモデルではあるが、実際に存在する布設形態ごとの耐震性に与える影響を定量的に把握した。平面内における線形の変化を考慮した解析結果より、直線構造の管路と比較すると、大きな場合は3.5倍～4倍程度の軸方向応力が発生する可能性があることを示した。これらの特徴を有する布設形態の場合は、特徴を有しない場合と比較して被災率が高くなるという結果と合わせると、曲線布設形態は地震時において弱点部になりうるという可能性を示すことがで

きた。また、防護コンクリート施工がなされている場合、そうでない場合と比較して、防護コンクリート際で応力が1.2倍程度増幅されることを解析により示した。被災事例の解析と合わせて防護コンクリートは地下管路部の弱点になりうる可能性を示すことができた。

今後の課題としては、継手の非線形性を考慮したより実際の設備形態に近いモデルに対する解析を行い影響を定量的に把握すること、現在は解析対象区間を一様の地盤条件としてモデル化を行っているが、たとえば地盤条件の急変部、軟弱地盤を考慮した解析を行い地盤条件による影響の定量的な把握、複数の布設パターンが1区間に存在する場合の影響の定量的な把握、不等沈下のような地盤変状現象と管路の布設形態による影響の定量的な把握が挙げられる。

参考文献

- 1) 山崎泰司, 瀬川信博, 石田直之, 鈴木崇伸: 東日本大震災における電気通信土木設備の被害状況に関する考察, 日本地震工学会論文集, Vol.12, No.5, pp.55-68, 2012.
- 2) 国土地理院: 2万5千分1浸水範囲概況図, 2011.
- 3) 国土交通省関東地方整備局・地盤工学会: 東北地方太平洋沖地震による関東地方の地盤液状化現象の実態解明, 2011.
- 4) 高田至郎: ライフライン地震工学, 共立出版, 1991
- 5) 田中宏司, 奥津大, 山崎泰司, 片桐信, 鈴木崇伸, 杉山俊幸: ライニング補強した通信管路の地震時ケーブル防護効果評価方法, 土木学会論文集, Vol.68, No.4, pp959-968, 2012
- 6) 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

(20xx. x. x 受付)

AN ANALYSIS ON LINE TYPE OF TELECOMMUNICATION CONDUITS SUSCEPTIBLE TO EARTHQUAKE

Masato WAKATAKE, Nobuhiro SEGAWA, Katsumi SAKAKI,
Shin KATAGIRI, and Takanobu Suzuki

Conduits are required to provide safe underground space for inner cable. Learning from the experience of many large earthquakes, we have introduced countermeasures that improve reliability of telecommunication facilities. Many old standard conduits which were constructed high economic growth period are active service, and which are considered to earthquake-proof is lacking. To improve reliability of conduits, it is ideal to renew all old standard facilities to the latest ones. But it is not practical for a huge amount of facilities. In this study, we will establish upgrading the seismic evaluation method of underground pipeline system to handle this problem. In this paper, we especially focus on line type of conduits. Conduit is modeled to reflect the line type which exists actually, we analyzed the model by seismic displacement method. In case of various line type forms, we evaluated forces acting conduits quantitatively compared to standard line type.