

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 14 日現在

機関番号：16201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560584

研究課題名(和文) 各種外力に伴う継手・一体構造管路の挙動解明と耐震計算法の提案

研究課題名(英文) Response Analysis of Buried Continuous or Jointed Pipelines against Earthquake Ground Motion and Liquefaction

研究代表者

野田 茂(Noda, Shigeru)

香川大学・工学部・教授

研究者番号：80135532

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：継手構造管路における異形管の地震時挙動は100%明確でなく、伸縮可とう離脱防止メカニカル継手の有効性も十分に調べられていない。そこで、本研究では、修正伝達マトリックス法を用いた擬似静的地震応答解析法を用いることにより、継手特性を変えて地震波入射や液状化による側方流動・沈下・浮上に伴う地盤の変位・歪、管体の曲げモーメント・応力、継手の伸縮・回転応答比率などを調べた。その結果、異形管部では曲げモーメント・回転が卓越しやすいことなど、直管に比した異形管(曲管・T字管)の地震時挙動特性が明らかになるとともに、伸縮可とう離脱防止メカニカル継手の有効性が検証された。

研究成果の概要(英文)：The seismic behaviors of the deformed pipelines are not clear. The effectiveness of the flexible and non-detached mechanical joint is not examined enough. Moreover, the influence of the joint characteristics on the bending moment, stress, strain of pipelines, etc. has not been clarified. Numerical response analyses were carried out for buried pipelines with typical joint characteristics and soil frictions subjected to seismic waves or ground displacements during liquefaction by using ERUAL program. As a result, it was found that the stress concentrations occur near bend pipe section or branched pipe section as the bending moment and the rotation are predominant, and the effectiveness of the flexible and non-detached mechanical joint was verified.

研究分野：地震工学

キーワード：水道管 異形管 管路継手挙動 地震応答解析 耐震計算法

## 1. 研究開始当初の背景

平成 23 年度末現在、導水管・送水管・配水本支管の耐震化率は平均 10.1% (最高は東京都の 28.7%, 最低は茨城県の 3.3%) と、耐震化が極めて遅れているのが現状である。このため地震のたびに被害が発生し、市民生活や社会活動に支障をきたしてきた。管路の耐震化の促進に向け、現状の大幅な改善に向けた取り組みが課題となっている。

東日本大震災では、強い地震動に対して耐震管がその機能を発揮する一方、軟らかい地盤で被害が多かった。阪神・淡路大震災に比べて被害は軽微であったが、これは地震動の周期が短かったためである。大口径管路に被害が発生したこと、構造が変化する箇所や異形部などの周辺継手には応力集中によって被害が見られたことがこの地震の特徴である。

水道施設耐震工法指針・解説 2009 年版<sup>①</sup>では、応答変位法に基づき継手構造管路 (ダクタイル鋳鉄管, DCIP) と一体構造管路 (鋼管) の応力・歪計算が示されているが、水道配水用ポリエチレン管 (PE 管) や硬質塩化ビニル管 (PR 管, PR ロング管) からなる一体構造管路については具体的な耐震計算の検証対象になっていない。また、上述のように被害が発生しやすい異形管部の計算法も示されていない。こうした管路・継手に適した耐震計算法の確立と検討が必要である。

国内外では特に我が国の研究が活発であり、中でも高田が牽引役としてライフライン地震工学を体系づけている。引用文献<sup>②</sup>ではその成果が集大成されており、弾性床上の梁理論に基づいた管路・継手の応力・歪計算法を提案している。引用文献<sup>①</sup>の指針・解説と異なり、複雑なコンピュータ解析を必要とするが、試験結果との対比から、解析法の有効性が立証されている。

引用文献<sup>①</sup>、<sup>②</sup>とも、地震波動の設定には大きな仮定を設けており、コンピュータ解析や実測データからその妥当性の検証が求められている。また、地盤変状による耐震安全性照査については簡便法が示されているが、精度確認にはより精緻な検討が必要である。

## 2. 研究の目的

現行の耐震指針、耐震解析では、地震波の設定が応答変位法か調和波 (周期と振幅の仮定) で単純化されており、耐震管・継手の一体構造管路の耐震計算方法が確立されていない。また、被害が発生しやすい異形管周辺部の挙動が十分に解明されておらず、合理的な地震対策に必ずしも結びついていない。

このことから、本研究では、1) 地震波伝播解析シミュレーションによって時空間的地盤震動を可視化した上で、管路の追隨的な動きを正確に明らかにする、2) 修正伝達マトリックス法を用いた擬似静的地震応答解析法により、地震波だけでなく、地盤変状 (軟弱地盤沈下、地割れ、液状化、側方流動) に

伴う挙動を定量的に解明する、3) 各種性能試験の実施後にこれまで検証されていない一体構造管路の異形管周辺部・異種間接合部の応力・変形状態を調べることにより、コンピュータ解析を含めた様々な角度から検討を加え、4) 新型継手の開発と最適な耐震計算法の確立に貢献することを目的とする。

## 3. 研究の方法

(1) 管路継手の地震時挙動を正確に把握できるように、震源過程と不規則地盤構造を与え、3 次元地盤震動シミュレーションから地震入力を決める。ここでは、計算メモリと解析時間の低減のため、ボクセル型有限要素法を採用する。これより、実体波、表面波の地震波伝播過程が可視化できる。ダブルカップル、断層の破壊過程などから震源モデルを現実化する。得られた地震波を埋設管に時々刻々作用させ、管路地震入力のあり方を吟味する。その上で、管路継手が時空間的にどのように挙動して応力・歪が発生するのか、その状態を定量的に明らかにする。

(2) PE 管や PR 管, PR ロング管からなる一体構造管路については具体的な耐震計算法を確立するため、まず各管種や口径に対応した性能試験 (引張圧縮試験, 可とう試験, 引抜性試験, 偏芯偏平試験, 曲げ水圧試験, 負圧試験, 耐圧試験, 破壊水圧試験) を実施する。継手にはインコア不要・分解不要メカ形耐震ジョイントの MP 継手を用いる。これより、継手の耐震性能を明らかにするとともに、継手特性のモデル化を図る。

(3) 修正伝達マトリックス法を用いた擬似静的地震応答解析法を用いることにより、

(1) で得られた地震波を上記一体構造管路に入力し、地震時挙動を分析する。各管種において検証すべき管路パターンとしては、管路構造の中心部に配置した DCIP の両端を MP 継手に接続し、その MP 継手から PE 管や PR 管, PR ロング管を延長した一体構造管路とする。T 字管、直管の同様な配管パターンについて耐震計算を行い、比較検討する。また、上記 MP 継手で接続された DCIP の両側に K 型継手あるいは NS 型継手で連結された DCIP および PE 管の異種管接合についても検討する。

(4) 異種管路 (DCIP, PE 管) の挙動を直管、同一管の結果と比較分析することにより、構造の変化箇所や異形部における応力集中の発生状況を解明する。合理的な地震対策のあり方を提言し、学術的な波及効果を明らかにする。

(5) (3) と同様に修正伝達マトリックス法を用いた擬似静的地震応答解析法を適用することにより、上記一体構造管路を対象に各種外力 (軟弱地盤沈下、地割れ、液状化、側方流動) による管路継手の挙動を計算する。図 1 は地盤変状のパターン例である。条件設定については過去の地盤変状の観測データに基づいて決定する。また、強制加力に伴う管路挙動観測試験を行い、地盤変状時の管路

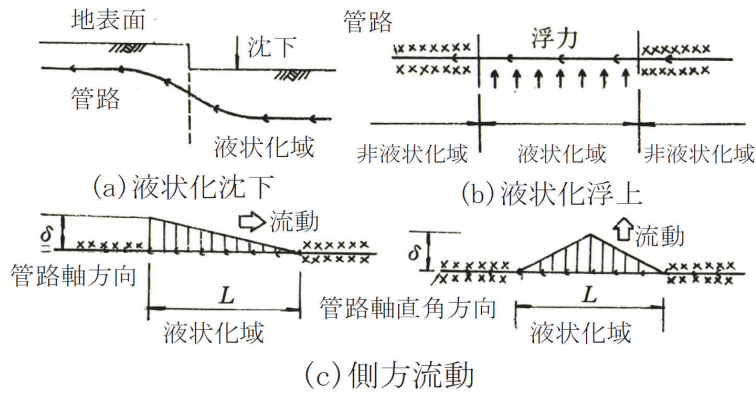


図1 液状化に伴う地盤変状のパターン例

追従性を評価するとともに、解析結果と比較することにより、解析法の妥当性を明らかにする。

(6) (5)と同様の解析ならびに観測試験を通し、各種地盤変状に伴う継手構造管路の応力・変形状態ならびに追従性を明らかにする。管路継手パターンとしては、引用文献③と同様に、耐震性の高い伸縮可とう・離脱防止機能付きメカニカル継手(MD継手)で接続されたDCIPの両側にK型継手あるいはNS型継手で連結された一連のDCIPを配管する。その上で、直管、曲管、T字管における異形管周辺部の挙動や可とう性継手の適用範囲についてメカニズムを解明する。これまではPE管よりなる一体構造管路の耐震実績がなかったもので、(5)と(6)の結果を比較分析することにより、一体構造管路における耐震性の高さを明らかにする。

(7) 水道施設耐震工法指針・解説2009年版<sup>①</sup>では、簡易計算により、地盤変状に伴う継手構造管路の耐震性評価がなされている。本研究の成果と比較することにより、その精度評価を行い、本解析を用いた新たな耐震計算法を提案する。この点は従来の研究に見られない独創性や革新性を有しており、今後の実務の進展に大きな貢献をすることが期待される。

(8) 高い耐震性能を有する伸縮可とう・離脱防止機能付きメカニカル継手(大口径)の新製品開発に取り組むため、試作品の製作(主型・中子型含む)、継手機能を補完する大口径用インコアの新規開発、PE管や塩ビ管などの管種に対する性能試験を実施する。

(9) 擬似静的地震応答解析により、大口径埋設管路の管種や管路形状、継手特性、異種間接合管路に応じた応力変形計算を行い、実際の水道配水管網の耐震性を評価する。その上で伸縮可とう・離脱防止機能付きメカニカル継手(大口径)に要求される耐震性能を明らかにし、その成果を活用した新製品開発に取り組む。

(10) 東日本大震災で被災した大口径管路の耐震対策の再検証を行い、被害メカニズムの解明とともに提案手法の妥当性を検証し、効果的な対策を検討する。

#### 4. 研究成果

紙面の都合上、ここでは修正伝達マトリクス法を用いた擬似静的地震応答解析により、継手特性の異なる4つの継手を有する継手構造管路と一体構造管路を対象に、地震波動を受ける管路継手挙動特性を比較分析する。

##### (1) 解析モデルと解析条件

対象管路は、DCIPよりなる継手構造管路とPE管よりなる一体構造管路である。管形は直管、曲管、T字管とし、DCIPとPE管を組み合わせた異種管は直管、T字管に採用する。継手はK形継手、NS'形継手、MD継手、MP継手の4種類である。NS'形継手はK形継手に圧縮特性及び離脱防止機能を仮想的に追加した継手である。MD継手は管体への負荷を抑え、圧縮・引張側で管路全体の応力・歪を低減する効果がある。MP継手はPE管用継手である。

解析モデルの一例を示す。図2はT字管の継手配置モデル、地震波の入射方向である。管体がDCIPの場合、継手位置A、B、CにはMD継手を、それ以外の継手部では4m毎にK形継手もしくはNS'形継手を設置する。管体がPE管の場合、継手位置A、B、CにはMP継手を設ける。MP継手間の管体材質はDCIPである。PE管ではEF接合により管体を繋げるため、接合箇所は解析上の節点とする。

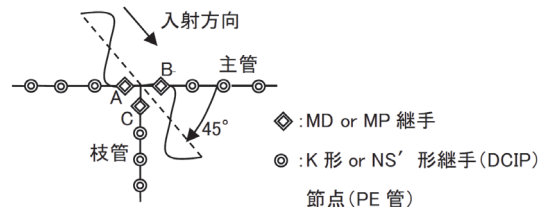


図2 T字管の継手配置

水道施設耐震工法指針<sup>①</sup>を参考に、地盤はN値2、地震入力は波長19,420cm、振幅31.18cm、周期1.54s、入射角45°と仮定する。

解析に当たっては、地震入射波の位相を0.0s~1.5sの範囲で変化させ、引張方向で継手部での伸縮、回転、応力が最大となる位相を調べる。空間的な管路継手挙動は最大応答位相時において検討する。

## (2) 位相変化に伴う管路継手挙動

PE管（主管側）を対象にすると、位相変化（0.0s～1.5s）に伴い、図2のMP継手A、Bおよびこれら継手の隣接節点での管体応力は図3のようになる。管体応力は位相1.3s付近において最大引張応力を示す。

PE管は基本的に継手のない一体構造管路を構成するので、地盤変位に追従するように管体の変位する。このため、MP継手では伸縮が生じない。枝管の影響により、MP継手部では回転が生じたが、その値は極めて小さかった。

他の管種、管形においても、位相変化に伴う管体応力の傾向は図3と同様であった。耐震的には引張による継手部での離脱が問題となるため、(4)、(5)では最大応答位相1.3sにおける管路継手挙動の空間的な変化を検討する。

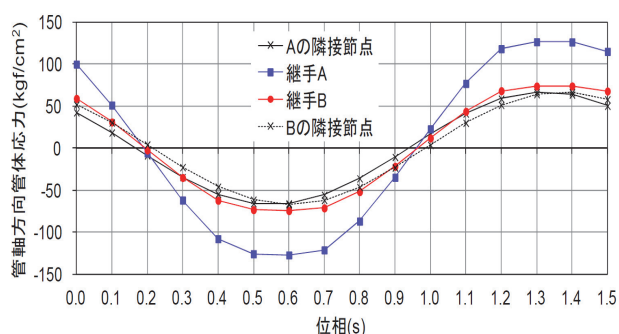
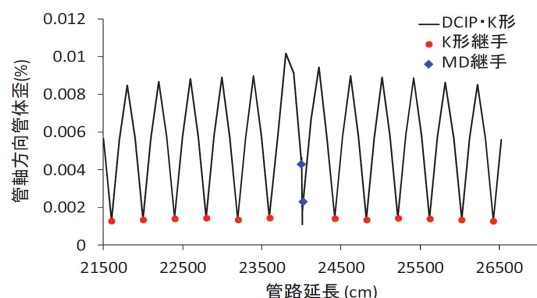


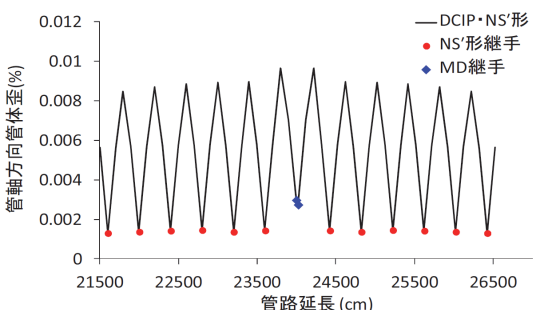
図3 位相変化に伴うT字部での主管側管体応力

## (4) DCIPの管路継手挙動

図2のT字管にDCIPを採用すると、管軸方向の主管側管体歪は図4のようになる。MD継手の隣接継手としてK形継手を用いた場合が図(a)、NS'形継手を用いた場合が図(b)である。



(a) K形継手



(b) NS'形継手

図4 T字管(DCIP)主管側の管軸方向管体歪

K形継手とNS'形継手、T字部のMD継手では伸縮量がほぼ同一となったが、K形継手とNS'形継手の特性の相違により、図2の位置Aに設置したMD継手部では許容回転量5°を超える回転量になった。

図4よりわかるように、K形継手を用いると、MD継手部の管体歪は若干ではあるが大きくなっている。K形継手は圧縮力に弱いため、枝管で生じた圧縮応力を吸収できない。そのため、MD継手の変形によって地震入力エネルギーが低減することになるが、T字部の作用圧縮応力によってMD継手の負荷が大きくなる。一方、NS'形継手を使用した場合、圧縮応力が受け流されるようになるので、MD継手への作用応力・歪はK形継手を用いた場合よりも低くなる。

異形管部にMD継手を使用する場合、隣接継手としてMD継手のように圧縮性能の高い継手を用いることにより、耐震性能をさらに高めることになる。

## (5) PE管の管路継手挙動

図2のT字管にPE管を採用すると、主管と枝管の管軸方向管体歪は図5のようになる。図(a)はT字管主管側、図(b)はT字管枝管側の歪である。

(4)のDCIPと挙動が異なり、PE管では地盤との相対変位がほぼ発生せず、DCIPの管体材質で接続されたMP継手部の相対変位は1cm以下である。このことから、PE管の地盤変位に対する追従性の高さが確認できる。

主管側では、MP継手の歪が0.7%以下であるが、MP継手間管体のDCIPの影響により、T字部に作用する管体応力は増加する。枝管側ではMP継手部で90 kgf/cmの圧縮応力が発生したが、圧縮歪は小さい。PE管の採用により、管体の作用応力が圧縮、引張方向ともにDCIPの挙動に比べてかなり低減されることから、管体変形による地震エネルギーの受け流しが行われたと考えられる。伸縮、回転量がほぼ生じなかったことと併せれば、PE管の耐震性の高さが認められる。

DCIPとPE管の挙動を比較すると、管体への作用応力がMD継手部よりも小さくなるので、PE管の異形管への適応性は高いといえる。PE管の地盤追従性の高さを勘案すると、PE管はN値2のような非常に柔らかい地盤に対しても有効である。

## (6) まとめ

ここでは、紙面の都合上、修正伝達マトリックス法を用いた擬似静的地震応答解析により、継手特性の異なる4つの継手を有する継手構造管路と一体構造管路を対象に、地震波動を受ける管路継手挙動特性を比較分析した。

分析の結果、1) 圧縮方向に高耐震的な継手を隣接させることにより、異形管部のMD継手は継手構造管路の特性をさらに高めること、2) PE管による一体構造管路は管体変形により地震エネルギーを受け流すことによって高い耐震性を有することなどがわか

った。

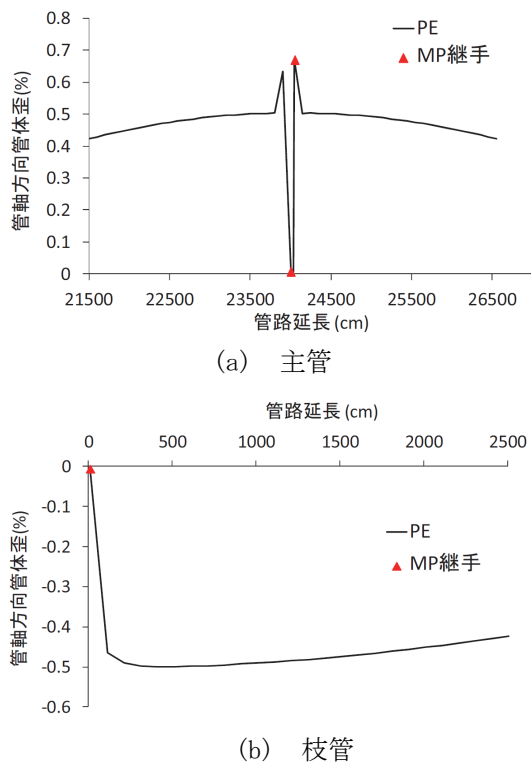


図5 T字管(PE管)の管軸方向管体歪

#### 〈引用文献〉

- ① 日本水道協会：水道施設耐震工法指・解説 2009年版，2009年7月。
- ② 高田至郎：ライフライン地震工学，共立出版，1991年9月。
- ③ 野田 茂，大藪高弘，香川宗文，横井良典：継手挙動に注目した異形管の地震応答解析，土木学会論文集A1，Vol. 66，No. 1，pp. 135-147，2010。

#### 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計11件)

- ① 野田 茂・橘川 宏，地震波動に伴う継手構造管路と一体構造管路の挙動把握，平成24年度土木学会全国大会第67回年次学術講演会，平成24年9月5日，名古屋大学(名古屋市)

〔産業財産権〕

○取得状況(計1件)

名称：天井補強具

発明者：池田 勉・水澤勝史・野田 茂

権利者：日本工機，国立大学法人香川大学

種類：特許

番号：第5610559号

出願年月日：平成26年3月4日

取得年月日：平成26年9月12日

国内外の別：国内

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

野田 茂 (NODA, Shigeru)

香川大学・工学部・教授

研究者番号：80135532

(2) 研究分担者

吉田 秀典 (YOSHIDA, Hidenori)

香川大学・工学部・教授

研究者番号：80265470

末永 慶寛 (SUENAGA, Yoshihiro)

香川大学・工学部・教授

研究者番号：00284349

宮本 慎宏 (MIYAMOTO, Mitsuhiro)

香川大学・工学部・助教

研究者番号：80505694