

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 25 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25282118

研究課題名(和文)地震によるメカニカル継手埋設管の抜出被害分析結果に基づいたパイプラインの防災対策

研究課題名(英文) Disaster prevention measures in the buried pipeline based on the extraction damage analysis result of mechanical joints caused by the earthquake

研究代表者

北野 哲司 (KITANO, Tetsuji)

名古屋大学・減災連携研究センター・寄附研究部門教授

研究者番号：90644849

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,300,000円

研究成果の概要(和文)：重要なライフラインである水道と都市ガスは埋設管を用いて水やガスを供給している。多種多様な埋設管のなかでメカニカル継手鋳鉄管は重要拠点から遠方地域に水を輸送する重要幹線にも用いられている。このメカニカル継手から管が抜け出す被害が発生すると、その被害の影響は供給ネットワーク全体に波及する。そこでメカニカル継手埋設管の継手抜出し被害に着目し、既往地震での被害データに基づいた被害発生条件の特定、統計分析からの管路被害判別式の構築を行った。また、この研究成果を愛知県250メッシュに適用し、被害が発生し得る地域を特定した。更に継手抜出しの発生過程および損傷メカニズムについて数値解析を用いて明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Water and city gas is an important lifeline is to supply water and gas by using a buried pipeline. Among a wide variety of buried pipeline, cast iron mechanical joint pipe is used in important trunk line to transport the water to the far region from the important bases.

In the case that the withdrawal break of this mechanical joint occurred, the impact of the damage is spread to the entire supply network. So by focusing on the joint withdrawal damage of mechanical joints, specific damage occurred conditions based on damage data in the previous earthquake and the construction of a pipeline damage discriminant from the statistical analysis were performed. In addition, by applying the results of this research in Aichi Prefecture 250 mesh areas, it was to identify the areas where damage may occur. It was further clarified by using a numerical analysis for the development process and damage mechanism of joint withdrawal damage.

研究分野：ライフライン地震工学、パイプライン工学

キーワード：埋設管・鋳鉄管、メカニカル継手、損傷メカニズム、被害統計分析、液状化地盤、ライフライン、スラストブロック、数値解析

1. 研究開始当初の背景

今世紀中に発生が懸念されている国難『南海トラフの巨大地震』や『首都圏直下型地震』は、都市機能の高度化・複雑化が急速に進展している日本三大都市圏を巻き込んだ広域的・複合的災害になることは必須である。この国難的震災からの早期復旧を実現するためには、まず、生活・社会経済活動の基盤を形成しているライフラインがレジリエンスを発揮し、供給途絶状態の短縮化、供給停止地区の極小化が図れる柔軟性が高い供給ネットワークを形成していく必要がある。

そのためには、供給ネットワークに影響を及ぼすような重篤な被害を抑止していくことが肝要である。重篤な埋設管被害の一つに、メカニカル(機械的)継手を有する埋設管(以下、「メカニカル継手埋設管」と略す)の接合継手部から管体が抜け出してしまふ被害がある。一度、継手部から管体が抜け出すと、輸送流体を上流のバルブ等で遮断して修繕しない限り、輸送流体が管端から大量に噴出し続け、供給ネットワーク全体にその影響が波及する。東日本大震災を例に挙げると、宮城県南部地区において、約1か月に亘る長期断水が発生した。その原因の主たるものが、水源からの主要導水管(直径2.4m)のメカニカル継手埋設管の1箇所継手抜出被害であり、この被害がネットワーク全体に波及した。

2. 研究の目的

メカニカル継手埋設管(本研究の対象は、主にメカニカル継手埋設管の内、耐震管と称される継手抜出し防止機能付き埋設管である。)の継手抜出し被害について、発生し得る埋設条件の把握、メカニカル継手の損傷過程・メカニズムの解明、その結果を濃尾平野に適用した場合、抜出し被害等が発生する可能性が有る地域を特定することが、本研究の目的である。

なお、この成果は、上水道・都市ガス・情報通信分野等の管路全般に広く応用することが可能である。

3. 研究の方法

(1)メカニカル継手埋設管の抜出し被害箇所の地盤条件の分析・特定方法の検討

阪神大震災及び東日本大震災において、メカニカル継手埋設管の抜出し被害が発生している。そこで、被害事例について、現地調査、図面調査、航空写真調査および微地形分類、地盤強度(深度方向の平均N値)等の地盤調査を行うと共に、それらのデータについて整理・分析・統計処理を行う。

(2)メカニカル継手埋設管の損傷過程及びメカニズムの解明

本研究では、上水道大口径メカニカル継手埋設管および小中口径メカニカル継手埋設

管について、数値解析でメカニカル継手の損傷過程及びそのメカニズムを解明する。

スラストブロック近傍の大口径メカニカル継手埋設管についての検討

水道管の曲管等の異形管部には、水圧の不均衡と水流の運動エネルギーによりスラスト力が作用する。そのため、異形管の前後には、スラスト力を受け止める鉄筋コンクリート製のスラストブロックを設置するケースが多い。東日本大震災において、スラストブロックと一体化したメカニカル継手大口径送水管が抜け出す被害が発生した。そこで、地盤とスラストブロックをモデル化することが可能なFEM-DEM結合解析手法を用いて、被害発生メカニズムを解明する。

継手抜出し防止機能を有する小中口径メカニカル継手埋設管についての検討

阪神大震災および東日本大震災において、継手抜出し防止機能を有する小中口径メカニカル継手が抜け出した。そこで、メカニカル継手の各構成部材を正確にモデル化し、挿し管が抜け出していく損傷過程を数値解析で再現する。なお、数値解析の実施に当たっては、継手を構成している部材(ゴム材料および複合材料等)の材料特性・内部構造を性能確認試験等を実施して把握する。

(3)本研究成果の濃尾平野への適用

本研究の総まとめとして、上記の(1)、(2)の研究成果を濃尾平野に適用する。地理情報システム(GIS)を用いて、微地形分類、地盤強度、振動特性、埋立履歴等と導管ネットワークを重ね合わせると共に、統計分析から導出する被害発生判別式を用いて抜出し被害等が発生し得る地域を特定する。

4. 研究成果

(1)メカニカル継手埋設管の抜出し被害箇所の地盤条件の分析・特定方法の検討

過去の地震による被害事例に関する研究
東北地方太平洋沖地震・兵庫県南部地震でのメカニカル継手抜出し被害発生地点について、現地・図面及び航空写真での調査を行い、メカニカル継手抜出し被害が発生した場所の地盤及び土質特性等を整理した。

その結果、激しく液状化する地盤や急傾斜地での地盤の滑動がメカニカル継手抜出し被害の要因となっていることが確認された。

地形学的観点からの液状化地盤及び急傾斜地の特定方法に関する研究

東日本大震災において千葉県香取市では、微地形分類「旧河道」で激しく液状化した。そこで、「旧河道」に着目し、レーザー航空測量から得られた5mメッシュ標高値を用いて旧河道の位置の特定を試みた。

図1は、愛岐大橋南側地区の5mメッシュ標高プロット図である。また、図2は、国土地理院発行の土地条件図から旧河道と盛土地・埋立地のみを表示したものである。標高プロット図における低地部と微地形分類「旧河道」等は、よく合致していることが読み取れる。また、微地形分類を用いて液状化地盤の絞り込みを行う場合は、「盛土地」、「埋立地」も液状化対象としておくことが望ましい。

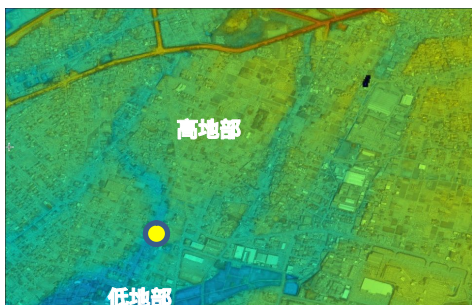


図1 愛岐大橋南側地区の標高データ



図2 同位置での土地条件図（国土地理院）

次に、急傾斜地内の埋設管を把握するため、前述の標高値からアナグリフ画像（立体視地形図）を作成し、管路網と重ね合わせ、急傾斜地に存在する埋設管の位置を特定した。図3にその結果の一例を示す。



図3 立体視地形図と管路網図

千葉県香取市における水道管被害実績を用いた統計分析

東日本大震災時における液状化地盤での水道管被害実績を基に、説明変数を微地形分類「旧河道」と地盤強度（平均 N 値分布）目的変数を管路被害の発生有無として統計

分析を行った。

まず、図4から分かる通り、継手損傷箇所

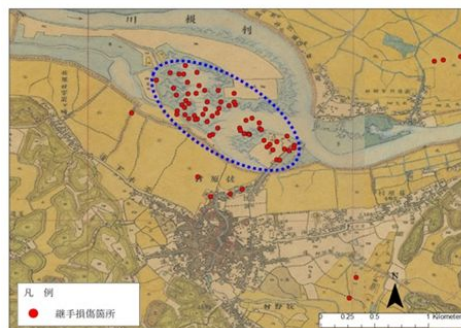


図4 旧佐原市街地における継手損傷箇所と迅速測図の重ね合わせ

次に、地盤強度（平均 N 値分布）で、継手被害発生箇所を評価した。図5は、GL-10 mまでの平均 N 値による色分けである。継手被害が集中した場所では、相対的に平均 N 値が小さく、概ね N 値 10 以下であった。

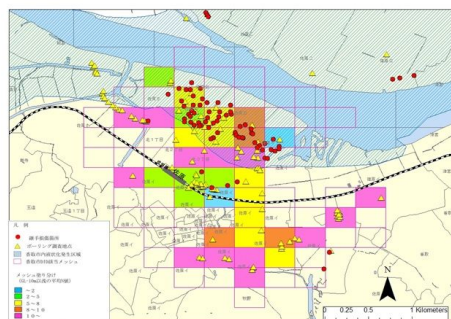


図5 平均 N 値による塗り分け

上記のデータを用いて、線形判別関数を用いた判別分析（重回帰分析）を行った。

(2)スラストブロック近傍の大口徑メカニカル継手埋設管被害発生メカニズムの解明

東北地方太平洋沖地震において、大口徑送水管の継手が抜出した。その要因としては、地震時にスラストブロックと基礎地盤とが、各々の振動特性で挙動したため、スラストブロックの動的変位が増大し、スラストブロックと一体構造となっているメカニカル継手が抜出したと考えられる。そこで、FEM-DEM結合解析手法を用いて、スラストブロックの地震時挙動についてケーススタディーを行った。その結果、基礎地盤とスラストブロックの埋戻し材との不均一性や表層地盤の形状が、スラストブロックの動的変位を増大させる要因（メカニカル継手が抜出した要因）であることが明らかになった。

図6に地表面不整形地盤の解析モデルの一例を示し、図7にスラストブロック周辺地盤とスラストブロックとが分離し、異なる動的挙動を示した時の解析結果を示す。

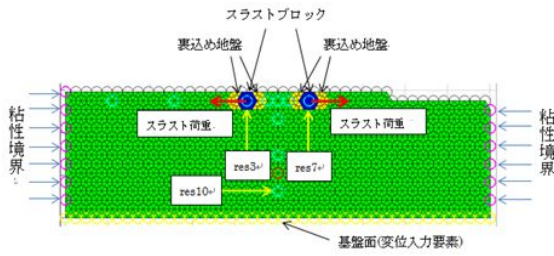


図6 地盤解析モデル(地表面不整形地盤)

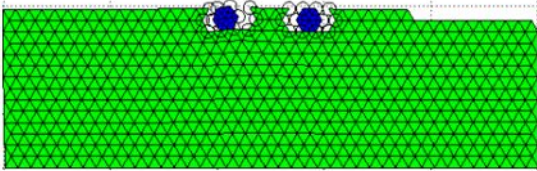


図7 スラストブロック周辺地盤の分離状況

(3)小中口径メカニカル継手の損傷メカニズム解明に向けた継手引張解析

メカニカル継手は、地震による振動を受けた時には圧縮方向、または引張方向に地盤変位を吸収することが可能な仕組みとなっている。しかし、地震動による振幅や側方流動・地盤沈下等による大変位を受けた場合、その結果として継手部材に過度な変形が生じ継手抜きし被害に至るケースがある。

そこで、このメカニカル継手抜きし被害の損傷メカニズムを解明するための数値解析を行った。

メカニカル継手構成部材の材料特性試験および内部構造分析
メカニカル継手を構成する部材に対して、表1に示す、試験・分析を行い、数値解析で用いる入力データの取得およびモデル化への反映を行った。

表1 継手構成部材試験一覧	
構成部材	試験・分析
ゴム部材	<ul style="list-style-type: none"> 単純引張試験 一軸拘束二軸引張試験(純せん断試験) 一様二軸引張試験
複合材料部材	<ul style="list-style-type: none"> 単純引張試験 顕微鏡分析

図8に、ゴム部材の一軸拘束二軸引張試験・一様二軸引張試験で用いた二軸引張試験機を示す。



図8 二軸引張り試験機

また、複合材料部材については、単純引張試験に加え、顕微鏡による内部構造分析を行った。

図9は、複合材料部材の顕微鏡写真である。写真から分かる通り、ゴム材の中に織物が層状に入っていることが確認できた。このことは、非常に重要で、メカニカル継手の損傷メカニズム解明における大きなポイントとなった。すなわち、この織物の層間ゴム部から亀裂が進展し、破壊が生じることが解析的に確認できることに繋がった。なお、複合材料部材の解析モデルでは、この織物の層状構造を反映させている。



図9 複合材料部材の顕微鏡写真

メカニカル継手の圧縮解析

引張解析に先立ちメカニカル継手の圧縮解析を行った。解析では、前述の各種試験等で得られた解析入力データを継手部材モデルに反映させた。圧縮解析では、材料物性、摩擦係数の設定についての検証を行った。

図10は、圧縮解析における変形挙動を示す。

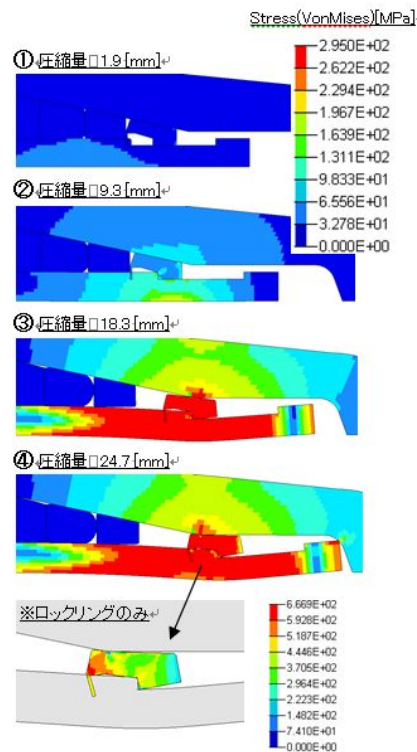


図10 圧縮解析における変形挙動

図11は、メカニカル継手の圧縮方向の試験結果と解析結果とを比較して示した図であ

る。図より両者はよく一致していることがわかる。

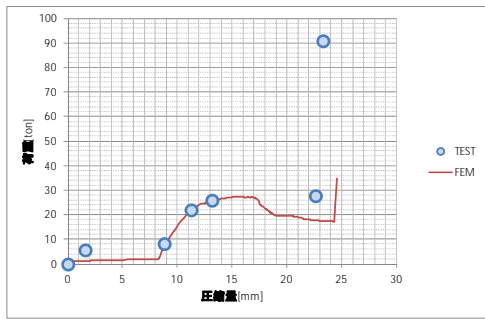


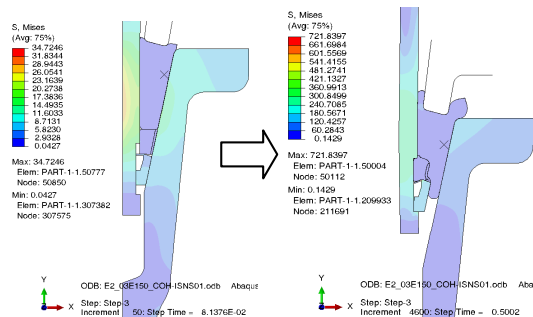
図 1 1 継手圧縮変位量と押し込み荷重の関係

メカニカル継手の引張解析

圧縮試験を踏まえ、メカニカル継手の引張解析を行った。

図 1 2 左側に示す通り、まず、引張解析に先立ち、構成部材の初期応力状態等を再現する必要がある。そのために、メカニカル継手組立て施工手順に従い、各継手構成部材を所定の位置に移動させるための組立て解析を行った。

その状態から、継手引張解析を開始した。継手引張解析の結果、メカニカル継手損傷メカニズムとしては、複合材料部材のせん断破壊（裂ける挙動）を伴いながら、メカニカル継手から管体が抜け出していくことが解明された。



【継手初期状態構築】 【引張解析】
図 1 2 引張解析における変形挙動

(4) 本研究成果の濃尾平野への適用

本研究の総まとめとして、上記の統計分析結果を濃尾平野に適用してメカニカル継手埋設管等の被害が発生し得る可能性がある地域を特定した。

具体的には、愛知県の各 250mメッシュ単位の属性データに対して、下記の被害判別予測式を適用し、特定を行った。

$$y = 0.6232 \cdot t - 0.012 \cdot n + 0.3415$$

ここで、y：被害判別係数

t：明治前期の地形区分

n：GL-1～-10mの平均N値

$y \geq 0.8$ 「被害有り」、 $y < 0.8$ 「被害無し」

として、愛知県犬山市～愛西市周辺の判別予測した結果を図 1 3 に示す。

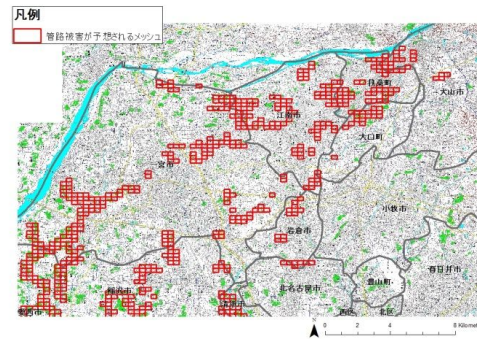


図 1 3 「被害あり」メッシュの分布〔犬山市～愛西市にかけての部分拡大表示〕

また、図 1 4 には、愛知県稲沢市、あま市、津島市、大治町周辺の判別予測結果を示す。

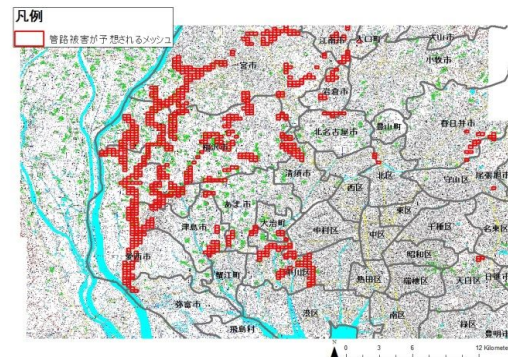


図 1 4 「被害あり」メッシュの分布〔稲沢市、あま市、津島市、大治町周辺の拡大表示〕

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 13 件)

久世晋一郎、北野哲司、ライフライン液状化被害の判別予測とモデル適用について、第 6 回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム概要集、査読無、2016、143-148
川口雄大、片桐信、北野哲司、近接するスラストブロックの地震時相対変位に関する研究(地表面不均一)、平成 27 年度土木学会全国大会第 70 回年次学術講演会 概要集、査読無、2015、-188

T. Kitano, T. Nonaka, S. Fujita, Studies of the effect of ground settlement on the buried pipe including a part passing through the building wall, International Gas Union Research Conference Proceedings、査読有、2014、WP3-37

北野哲司、田代喬、野中俊宏、地中構造物に対するDEMを用いた自然災害リスク箇所の特定、平成 26 年度土木学会全国大会 第 69 回年次学術講演会概要集、2014、407-408

〔学会発表〕(計 22 件)

北野哲司、災害とライフライン~私たちが次の世代に残すべきもの、BENTLEY CONNECTION EVENT 2015、平成 27 年 7 月 1 日、椿山荘アンフィシアター(東京都・文京区)

久世晋一郎・北野哲司、GIS と統計的手法を用いた東日本大震災におけるライフラインの液化化被害分析 - 千葉県香取市市街地を事例として、日本地震工学会、平成 27 年 11 月 20 日、東京大学生産技術研究所(東京都・目黒区)

藤田周亮、小倉均、北野哲司、野中俊宏、地盤変状を受ける埋設鋼管のソリッド要素・シェル要素による変形解析手法に関する検討、第 14 回日本地震工学シンポジウム、2014 年 12 月 5 日、幕張メッセ(千葉県・千葉市)

T. Kitano, T. Nonaka, S. Fujita, Studies of the effect of ground settlement on the buried pipe including a part passing through the building wall、2014 年 09 月 17 日、コペンハーゲン(デンマーク)

北野哲司、『地震によるライフライン被害を考える』~特に、通信土木設備~、東海情報通信懇談会 情報通信部会、2014 年 07 月 30 日、愛知県芸術文化センター(愛知県・名古屋市)

Tetsuji Kitano、The Great East Japan Earthquake and Gas System、International Geographical Union、the Kyoto International Conference Center、2013 年 08 月 06 日~2013 年 08 月 07 日(Kyoto、Japan)

〔図書〕(計 3 件)

北野哲司、田代喬、野中俊宏、久世晋一郎、名古屋大学 減災連携研究センター ライフライン地盤防災寄附研究部門、減災連携研究センター ライフライン地盤防災寄附研究部門 平成 27 年度調査研究・活動報告書 (ISSN 2189-4671、国会図書館納本済み) 2016、410 (35-43, 197-214)

北野哲司、田代喬、野中俊宏、久世晋一郎、名古屋大学 減災連携研究センター ライフライン地盤防災寄附研究部門、減災連携研究センター ライフライン地盤防災寄附研究部門 平成 26 年度調査研究・活動報告書 (ISSN 2189-4671、国会図書館納本済み) 2015、343 (37-90)

北野哲司、宮腰淳一、野中俊宏、名古屋大学減災連携研究センター ライフライン地盤防災寄附研究部門、減災連携研究センター ライフライン地盤防災寄附研究部門 平成 25 年度調査研究・活動報告書 (ISSN 2189-4671、国会図書館納本済み) 2014、191 (39-74)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.gensai.nagoya-u.ac.jp/>
減災館ギャラリートーク(ほぼ毎月開催 30 分程度の研究講演)北野哲司、野中俊宏
http://www.gensai.nagoya-u.ac.jp/?page_id=22

6. 研究組織

(1) 研究代表者

北野 哲司 (KITANO, Tetsuji)
名古屋大学・減災連携研究センター・寄附研究部門教授
研究者番号: 90644849

(2) 研究分担者

片桐 信 (KATAGIRI, Shin)
摂南大学・理工学部・教授
研究者番号: 10554412

宮腰 淳一 (MIYAKOSHI, Jun'ichi)
名古屋大学・減災連携研究センター・寄附研究部門准教授
研究者番号: 00393570
(平成 25 年度まで研究分担者)

野中 俊宏 (NONAKA, Toshihiro)
名古屋大学・減災連携研究センター・寄附研究部門助教
研究者番号: 40644852

(3) 研究協力者

保井 基良 (YASUI, Motoyoshi)
寺嶋 孝典 (TERASHIMA, Takanori)
藤田 周亮 (FUJITA, Shusuke)
小倉 均 (OGURA, Hitoshi)
久世 晋一郎 (KUZE, Shinichiro)