

平成 29 年 5 月 27 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K12489

研究課題名(和文) 高経年化インフラ社会における先進的パイプライン耐震アセスメント解析手法の構築

研究課題名(英文) Studies on the creation of advanced pipeline seismic assessment analysis method in aged infrastructure society

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) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：現行の埋設管耐震設計指針では埋設管の管軸直角方向の地盤拘束力を管周方向の全ての位置で同一の値に設定している。しかし、実際には管周方向の地盤拘束力は各位置で異なる値を示すと考えられる。そこでこの研究では、実規模土槽を用いた鋼管水平方向牽引実験を行って埋設管表面に作用する土圧を“触覚センサー”を用いて測定すると共に、この実験の再現数値解析を実施した。その結果、埋設管を水平に牽引すると埋設管は水平移動すると共に上方にも移動すること、及び、管周方向の各位置において作用する土圧の値は水平方向成分も鉛直方向成分も共に管表面の上半分よりも下半分の方が大きくなることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In the existing buried pipe seismic design guidelines, the restraint force acting on the pipe is set to the same value. However, it is considered that the restraint force acting on the pipe shows different values at each position. Therefore, in this study, the authors measured the earth pressure acting on the surface of the buried pipe by performing the buried pipe horizontal traction experiment and the numerical analysis of this experiment was carried out in order to confirm the results of this experiment. As a result, it is clarified that both the horizontal component and the vertical component of the earth pressure value acting on the pipe surface are larger in the lower half than the upper half of the pipe.

研究分野：ライフライン地震工学、パイプライン工学、耐震工学

キーワード：埋設管 パイプライン 地盤拘束力 土槽実験 数値解析 触覚センサー 管周方向土圧分布 SPH粒子  
法

1. 研究開始当初の背景

高度経済成長期において急速に整備された供給系ライフライン施設も近年老朽化が進行し、大規模な更新ピークを迎えつつある。供給系ライフライン施設の更新等は全国のライフライン事業者共通の喫緊の課題であるが財政難に阻まれている。今後、供給系ライフライン施設の補修・補強・更新を効果的に進捗させるために、アセットマネジメントや余寿命予測を実施し、その結果を社会に提示して理解を得ることが求められている。更に、パイプラインの耐震対策は、パイプラインの被害・機能損失の最小化に加え、地震災害復興の早期化からも要求される喫緊の課題である。

2. 研究の目的

本研究では、供給系ライフライン施設の内、埋設パイプラインの耐震設計や耐震性評価で実施されている埋設パイプラインの変形解析に必要な地盤拘束力について、これまで確認されていなかった管周方向の地盤拘束力分布を実規模実管実験と実験再現数値解析から明らかにする。

また、現在の解析技術で計算可能となったソリッド要素・シェル要素を用いた解析手法から一歩進んだ大変形解析手法であるFEM-SPH解析手法の確立に向けて実規模実管実験の再現解析を行うことにより、FEM-SPH解析手法の適用性と精度検証を行うことを本研究の目的とする。

3. 研究の方法

(1) 埋設管に作用する地盤拘束力の評価

埋設管の挙動に関する数値解析を行うためには埋設管に作用する地盤拘束力の評価が重要である。そこで先ず、先進的な圧力計測センサーである“触覚センサー”を鋼管の表面に貼り付けた鋼管を図1に示すように実規模土槽内に埋設し、それを水平方向に牽引して埋設管に作用する地盤拘束力を測定する実験を実施した。

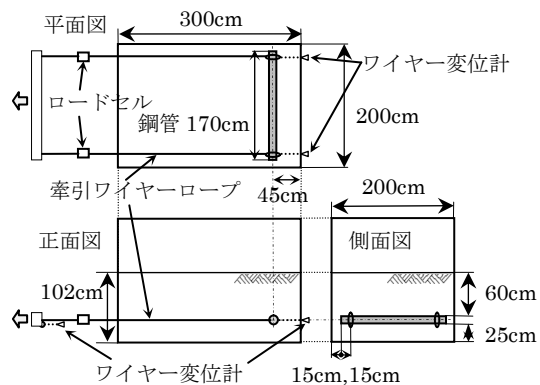
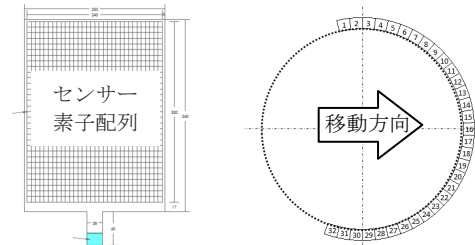


図1 鋼管水平牽引実験の実験概要

図2は鋼管に作用する土圧分布を測定するために、鋼管中央部の半周に“触覚センサー”(センサー素子サイズ：横7.5mm 縦10mm、横

方向に32個・縦方向に32個)を張付けた状態を示した図である。次いで、この実験の再現数値シミュレーションを行い実験結果と数値解析結果とを比較検討した。なお、数値シミュレーションは陰的静解析と陽的動解析の2種類で実施した。



(a) 触覚センサー素子配列 (b) センサー貼付位置



(c) 鋼管への貼付状況

図2 触覚センサーの外観と貼付位置

(2) 埋設管耐震解析のためのFEM-SPH解析手法の適用性と精度検証

既往地震において、盛土道路の斜面が崩落し、埋設管が露出する事例が多く報告されている。そこで、埋設管の耐震性を評価するための数値解析手法として適当であり且つ効果的であると考えられるFEM-SPH解析手法について検討するために、図3に示した土槽を用いて埋設鋼管の引上げ試験を行ない、この実験を再現するための数値シミュレーションをFEM-SPH解析手法を用いて行なう、実験結果と数値シミュレーションの結果とを比較検討して、FEM-SPH解析手法の適用性とその精度について検討した。

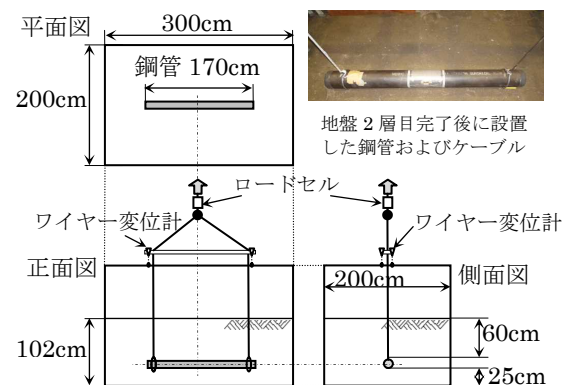


図3 鋼管垂直引揚実験の実験概要

#### 4. 研究成果

##### (1) 埋設管に作用する地盤拘束力の評価

図4に鋼管水平牽引実験終了後の地表面の状況を示す。地表面の隆起と陥没状況が確認



図4 実験後の地表面の状況

できる。管が移動した後方が陥没している。管は38cm(水平37.5cm, 上方5.3cm)移動させた。図5に実験後の土槽中央断面における管の移動に伴う地盤変状を示す。滑り線が2本(黄色破線(変状量:小)と橙色一点鎖線(変状量:大))出現している。また、埋戻し層境の白線の移動から管直近の地盤は約180mm、従って管の直径よりやや多く隆起したことがわかる。



図5 実験後の管の中央断面の地盤変状

実規模土槽を用いた鋼管水平牽引実験において、埋設管表面に作用する法線方向の土圧を“触覚センサー”を用いて測定した結果を図6に示す。図6の横軸の左端が図2(b)図に示した触覚センサーの配列の鋼管の一番上の行に対応し、横軸の右端が一番下の行に対応している。従って、横軸の中央が埋設管の中心を通る水平面と鋼管表面の交線の位置

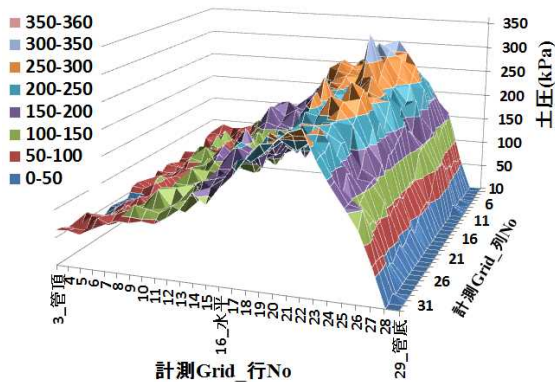
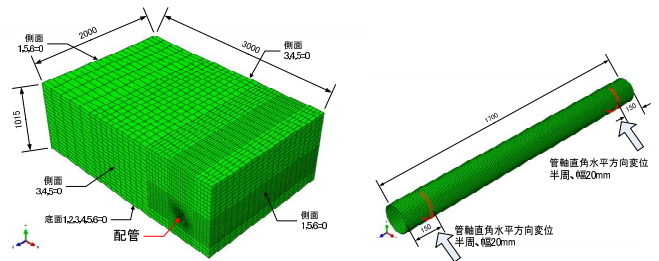


図6 管表面法線方向土圧

となる。図に示した測定結果から、埋設鋼管を水平方向に牽引した時に鋼管の前面に作用する土圧は管の下半分の方が上半分よりも大きくなることが明らかとなった。現行の埋設管の耐震設計指針では埋設管の管軸直角方向の地盤拘束力を管周方向では同一の値に設定しているが、今回の実験により、図に示したように、実際には管周方向の地盤拘束力は各位置で異なる値を示すことが明らかになった。この成果は耐震設計において重要な成果である。次いで、この鋼管水平牽引実験の数値シミュレーションを実施した。図7は解析モデルを示した図である。解析は、陰的静解析と陽的動解析の2種類を用いて実施した。



(a) 地盤モデル (b) 配管モデル  
図7 解析モデル

解析結果を以下に示す。図8は鋼管変位が70mmに達した時の地盤変形図である。図5に示した主地盤変状である一点鎖線滑り線は再現できているが、地盤変状量が小さい破線の滑り線は作製地盤の固さの不均一性を解析モデルに反映しきれなかったため出現しなかった。例えば、埋戻し層境の内部摩擦角が大きい層の存在が挙げられる。

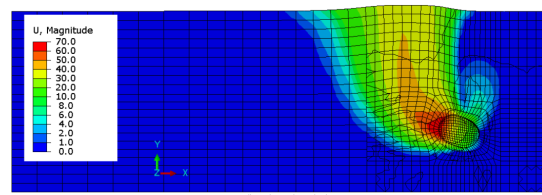


図8 鋼管変位70mm時の地盤変形図

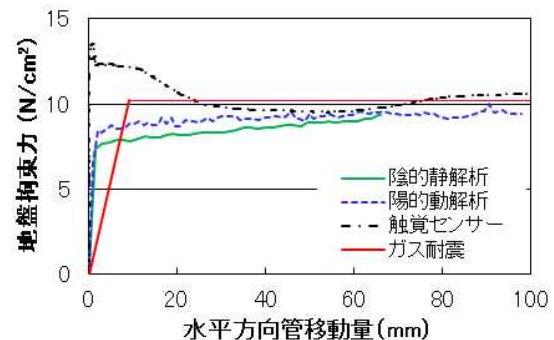


図9 地盤拘束力と水平移動距離との関係



図 9 に触覚センサーでの計測結果および数値解析結果から算出した地盤拘束力と高圧ガス導管耐震設計指針で定義されている管軸直角方向の地盤拘束力を比較して示した。解析結果では高圧ガス導管耐震設計指針より立ち上がりが早めで、最大地盤拘束力は小さ目となった。触覚センサー算出値の初期段階の立ち上げり挙動は、作製地盤の層境の固い締固め部（石灰散布による固結部）の影響に起因するものと考えている。

図 10 は鋼管変位 70mm 時点における管の移動方向側半周の管周表面の法線方向の土圧分布である。図 10 の横軸は図 6 と同じで鋼管表面の触覚センサー配列の行番号である。解析結果と触覚センサー測定値は概ね合致している。

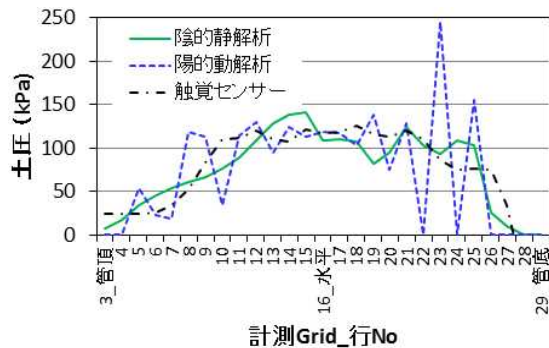
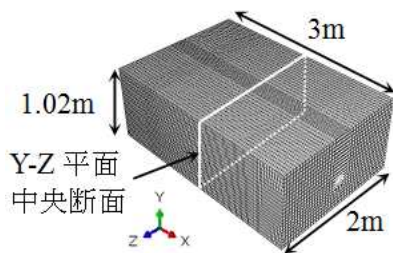


図 10 鋼管変位が 70mm 時の管半周土圧分布

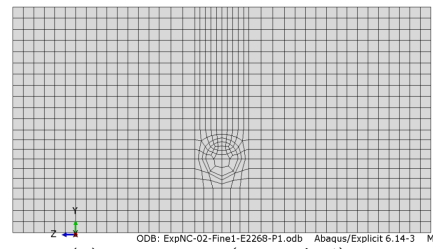
これ等の図に示すように、今回の数値シミュレーションの結果は実験結果とほぼ一致しており、管周に作用する土圧の値は管の表面の上半分よりも下半分の方が大きくなることが明らかになった。この成果が埋設管の挙動解析に及ぼす効果は非常に大きい。

(2) 埋設管耐震解析のための FEM-SPH 解析手法の適用性と精度検証

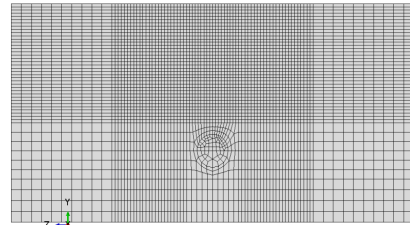
実規模土槽を用いた鋼管引上げ実験結果と FEM-SPH 解析手法での解析結果とを比較することにより解析精度の検証を行った。解析はメッシュ分割が異なる 3 ケースについて行った。解析モデルの寸法及びメッシュ分割を図 11 に示す。



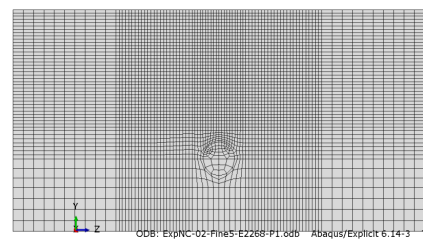
(a) Case-MF1 全体モデル図



(b) Case-MF1 (Y-Z 平面)



(c) Case-MF4 (Y-Z 平面)



(d) Case-MF5 (Y-Z 平面)

図 11 解析モデル寸法・各モデル Y-Z 平面メッシュ分割

FEM-SPH 解析手法では、解析開始時点では地盤モデルは Solid 要素でモデル化しておく。鋼管が引上げられると共に徐々に地盤ひずみが増大する。従って解析が進行して地盤を構成している Solid 要素に発生する主ひずみの値が 20% を超過すると Solid 要素から SPH 粒子に変換して解析を継続させる。今回の解析によって得られた結果の一例として、図 12 に鋼管引上げ変位が 60mm 時の地盤変位分布を示し、図 13 に鋼管近傍における地盤変位状態を示す。図 12 に示すように、鋼管上方に逆釣鐘状の変位領域が形成されている。また、鋼管直上部および鋼管が直上地盤を持ち上げることにより発生する滑り線上では、Solid 要素から SPH 粒子への変換が進展している。この滑り線を延長した場合の地表面隆起幅は 40cm であった。この範囲が土槽実験で得られた陥没領域にほぼ対応している。

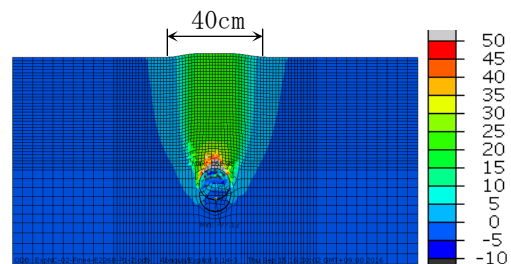


図 12 鋼管引上げ変位 60mm 時の地盤変位分布 (単位:mm)

図 13 に示した鋼管近傍における地盤の変位状況から、地表面まで繋がる滑り線の発展過程 (Solid 要素から S P H 粒子への移行) を確認することができる。また、同図 (b) においては、土槽実験で確認した露出鋼管の上部表面に残存した山形土塊が既に形成されており、その山形土塊の頂点から両側斜め方向に滑り線が存在していることが確認できる。

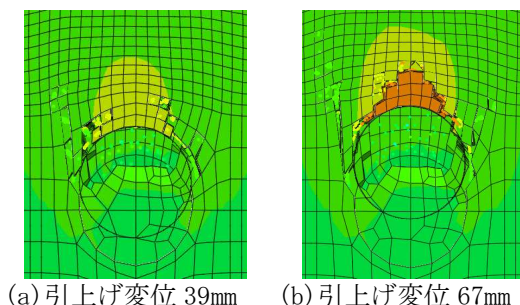
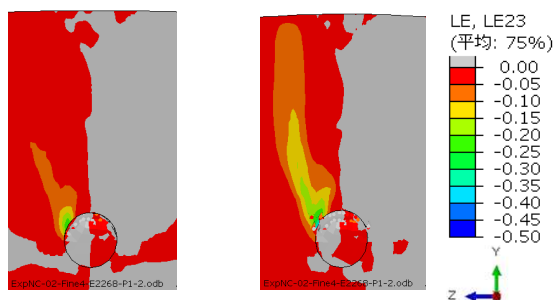
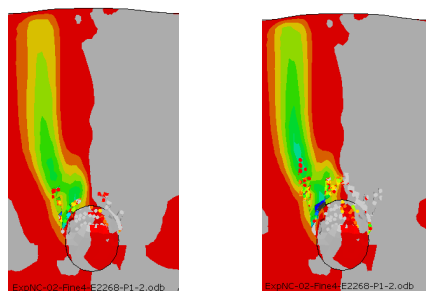


図 13 鋼管近傍の地盤変位分布(単位:mm)

図 14 に各引上げ変位における地盤のせん断ひずみのコンター図を示す。図 14 (a)、(b) より、鋼管の引上げ量の増大と共に、地盤のせん断ひずみも上方に発達していく様子がわかる。一方、同図 (c)、(d) から、鋼管近傍の地盤せん断ひずみは、徐々に同程度のせん断ひずみに収まってきており、大きく増大していない。これは、地盤ひずみが増大すると Solid 要素から S P H 粒子に変換されることによるものであり、実現象とも合致している。



(a) 引上げ変位 10mm (b) 引上げ変位 20mm



(c) 引上げ変位 40mm (d) 引上げ変位 60mm

図 14 各引上げ変位におけるせん断ひずみコンター図

次に図 15 に鋼管鉛直引上げ変位量と引上

げ荷重(鋼管に作用する土圧)の関係を示す。なお、図に示した Case-MF1 ではモデルの地盤のメッシュサイズは縦 2cm×横 3cm×高さ 5cm で、鋼管のメッシュサイズは 2cm×2cm であり、Case-MF4 と Case-MF5 では地盤のメッシュサイズは縦・横・高さが約 1.5cm で、鋼管のメッシュサイズは 1cm×1cm である。なお、Case-MF4 と Case-MF5 との違いは鋼管埋設位置のメッシュ高さ寸法が異なるのみである。

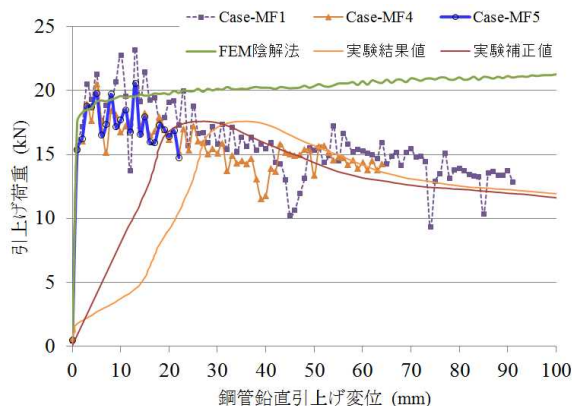


図 15 引上げ変位と荷重

まず、引上げピーク荷重と変位との関係であるが、ピーク荷重(最大地盤拘束力)については、FEM-S P H 解析と実験では、ほぼ同程度である。次に、ピーク荷重の出現変位については、FEM-S P H 解析では解析直後から引上げ変位量 15mm 程度までの間で出現している。一方、実験では引上げ変位量 20~30mm でピーク荷重が出現しているが、これは鋼管を吊り下げたワイヤーの伸びに起因している。次に、ピーク荷重後の荷重(土圧)の減少推移については、FEM-S P H 解析では荷重値が振れているものの、巨視的には減少傾向が再現できている。次に FEM-S P H 解析のメッシュサイズの影響であるが、FEM-S P H 解析の引上げ荷重は、メッシュサイズを細かくすれば、応答値(荷重)の振れ幅は小さくなり安定する傾向にある。しかし、ある程度の細かさを確保すれば差異は無い。なお、メッシュサイズを細かくすると、その分、解析時間は長くなる。

FEM陰解法の大変形解析への適用性であるが、図 15 から明らかなように、通常の FEM陰解法では引上げ荷重の減少は表現できない。

上記のように、FEM-S P H 解析では、地表面の隆起領域と荷重(土圧)の経時変化及びピーク荷重値を再現することができた。また、一般的な FEM 解析では再現が困難であるピーク荷重以降の土圧減少推移も FEM-S P H 解析手法では大凡再現できたことは非常に有意義である。更に、鋼管周りの土砂の管下空間への移動・落下、引上げ時にお

る鋼管上部表面に残存する山形状土塊もシミュレートすることができた。これ等は非常に革新的な研究成果である。

#### 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 5 件)

- ①北野哲司、小倉均、坂上貴士、保井基良、埋設管に作用する地盤拘束力の管周方向分布に関する研究、平成 29 年度土木学会全国大会 第 72 回年次学術講演会概要集、査読無、2017
- ②北野哲司、坂上貴士、伊藤文樹、鋼管鉛直引上げ土槽実験による FEM-SPH 解析手法の精度検証、第 44 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集、査読無、2017、I-38
- ③Tetsuji Kitano, S. Fujita, H. Ogura and A. Suganuma, Numerical Studies of the Effect of Slope Failure on a Buried Pipeline by a Hybrid Analysis Using SPH and FEM, 16th World Conference on Earthquake, 査読有, 16WCEE 2017, Paper No. 614, 2017.
- ④Tetsuji Kitano, Shusuke Fujita, Hitoshi Ogura, and Atsushi Suganuma, Analyses of the Failure of an Embankment Slope and Its Influence on the Pipeline Installed in that Embankment Slope, 査読有, ASCE Pipelines Conference 2016, pp. 1454-1463, 2016.  
<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784479957.135>

[学会発表] (計 10 件)

- ①北野哲司、最近の自然災害における管路・施設被害分析と管路ネットワーク構築の展望、配水用ポリエチレンパイプシステム協会主催水道講演会 (招待講演)、平成 29 年 3 月 16 日、栃木県産業会館 (栃木県・宇都宮市)
- ②北野哲司、自然災害での被害を見極め、ライフラインの礎を俯瞰的・微視的に築く!、JFE エンジニアリング株式会社技術講演会 (招待講演)、平成 29 年 1 月 23 日、JFE エンジニアリング株式会社 (神奈川県・横浜市)
- ③北野哲司、ライフライン防災～備えと対応～、(公社) 愛知建築士会主催講演会 (招待講演)、平成 27 年 10 月 16 日、名古屋商工会議所 (愛知県・名古屋市)
- ④北野哲司、ソリッド要素を用いた埋設パイプラインの変形解析手法の検討、平成 27 年度土木学会全国大会第 70 回年次学術講演会、平成 27 年 9 月 18 日、岡山大学 (岡山県・岡山市)
- ⑤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 (招待講演)、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)

[図書] (計 3 件)

- ①北野哲司、田代喬、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 28 年度調査研究・活動報告書 (ISSN 2189-4671、国会図書館納本済み)、2017、307 (95-105, 121-141)
- ②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、283 (87-100)
- ③北野哲司、日本建築家協会東海支部、会報誌 ARCHITECT: 「埋設配管の変形特性の理解と建築物導入部」、2015、24 (P. 17)

[その他]

- ①ホームページ等  
<http://www.gensai.nagoya-u.ac.jp/>
- ②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/>

#### 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

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

小倉 均 (OGURA, Hitoshi)  
坂上 貴士 (SAKANOU, Takashi)  
伊藤 文樹 (ITO, Fumiki)  
保井基良 (YASUI, Motoyoshi)