給水用高密度ポリエチレン管の耐震性評価に関する研究

西川　源太郎[1]・塩浜　裕一[2]・鈴木　剛史[3]・大沼　博幹[4]・清野　純史[5]

[1]正会員　京都大学大学院　工学研究科（〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂）
E-mail: nishikawa.gentaro.78v@st.kyoto-u.ac.jp

[2]正会員　積水化学工業株式会社（〒105-8450 東京都港区虎ノ門2-3-17）
E-mail: shiohama@sekisui.com

[3]正会員　積水化学工業株式会社（〒105-8450 東京都港区虎ノ門2-3-17）
E-mail: suzuki059@sekisui.com

[4]正会員　大沼水道技術研究所（〒950-3323 新潟市北区東栄町2-3-28）
E-mail: onuma@ae.auone-net.jp

[5]正会員　京都大学大学院教授　地球環境学堂（〒606-8501 京都市左京区吉田本町）
E-mail: kiyono.junji.5x@kyoto-u.ac.jp

東日本大震災給水装置被害状況調査報告書によると地震動の影響で給水装置引込部に2,500件以上の被害が確認されており，当該部分の耐震性向上が課題と指摘されている．また，給水装置引き込み部に関しては，耐震設計法が確立されておらず，それぞれの給水管の耐震性評価も定まっていないため，今後の研究の進展が望まれるとされている[1)]．本稿では報告書を受けて給水装置引込部を対象に，給水用高密度ポリエチレン管と金属継手による複合配管の耐震性評価を行った．レベル2地震動による地盤ひずみは最大1%であり，この地盤ひずみが配水管の管軸方向および給水管の管軸方向に生じた場合を想定した評価を行った．結果は，給水青ポリ管の柔軟性で地盤ひずみに追随するため，可とう管を用いることなく通水機能を継続し，耐震性能を有することを確認した．

Key Words : *service pipe, polyethylene pipe, seismice design, slippage effect*

1.　まえがき

埋設水道管路は，配水管および給水装置を介して各家庭まで面的なネットワーク整備がなされており，地震時にはこれらネットワークとしての水供給を維持することが重要である．

東日本大震災給水装置被害状況調査報告書では，給水装置引込部を対象に被害状況を部位別，被害原因に分類し，詳細な報告がなされている[1)]．**図-1**，**表-1**に部位別，原因別の被害件数を示す．地震動による影響で給水管および給水分岐部に2,500件以上の被害が確認され，当該部分の耐震性向上は重要な課題と指摘されている．2016年に発生した熊本地震においても同様の被害が報告されている．（**写真-1**，**写真-2**）

また，上記報告書では水道管路の耐震設計の分野において，配水管に対する耐震設計法は確立しているが，給水管に対しては耐震設計法が確立されておらず，それぞれの給水管の耐震性評価も定まっていないことから今後の研究の進展が望まれるとされている．

よって本研究では報告書を受けて，給水装置引き込み部を対象に耐震性評価を行ったものである．評価は，[1]配水管の管軸方向に作用する地震動に対して，特に管と地盤との境界で滑り（相対変位）が生じた場合に給水装置引込部に与える影響の評価，次に，[2]給水管の管軸方向の地震動に対して，給水装置引込部に与える影響について評価した．水道施設耐震工法指針・解説によるとレベル2地震動で生じる地盤ひずみは，指針で示された地盤モデルで計算すると最大1%であるため，1%のひずみレベルが評価の基準となる[2),3)]．

対象とする給水管の管種は，配水管の分野で耐震管と位置づけられている水道配水用ポリエチレン管の小口径管種である給水用高密度ポリエチレン管（給水青ポリ管）を用いる．また，接合部は給水青ポリ管用金属継手（以降，金属継手）を用い，樹脂と金属の複合構造（ハイブリッド構造）による評価とする．

評価手法は，給水分岐部から水道メーターまでを再現した配管モデルを土槽内に埋設し，配水管と地盤との境界で滑りが生じた場合（地盤変位I），給水管の管軸方向の地震動が作用する場合（地盤変位II）において，給水管に発生するひずみ，継手部からの漏水の有無を確認することで耐震性能を照査した．

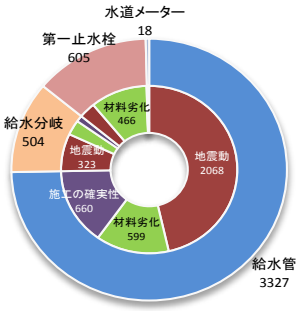

表-1　被害件数と被害分類

被害箇所／原因		被害件数
給水管		3327
（被害原因）	地震動	2068
	材料劣化	599
	施工の確実性	660
給水分岐		504
（被害原因）	地震動	323
	材料劣化	128
	施工の確実性	53
第一止水栓		605
（被害原因）	地震動	136
	材料劣化	466
	施工の確実性	3
水道メーター		18
（被害原因）	地震動	6
	材料劣化	12
	施工の確実性	0

図-1　東日本大震災の給水装置の被害件数(被害箇所，原因)

写真-1　給水管の接合部被害

写真-2　給水分岐部のズレ

2.　給水青ポリ管の耐震性評価実験

(1)　想定地盤変位

実験は，給水用青ポリ管と金属継手による複合構造を対象に**図-2**で示す給水装置引き込み部から水道メーターまでの配管モデルに対して行う．地震動は，配水管と地盤との滑りが生じた場合（地盤変位I）と，給水管の管軸方向に地震動が作用した場合（地盤変位II）の2方向を想定する．

配水管と地盤との滑り（地盤変位I）については，配水管の材料剛性によってその挙動が異なるため，，管種ごとに水道施設耐震工法指針・解説の地盤モデルに基づく滑り量を設定し，評価する．

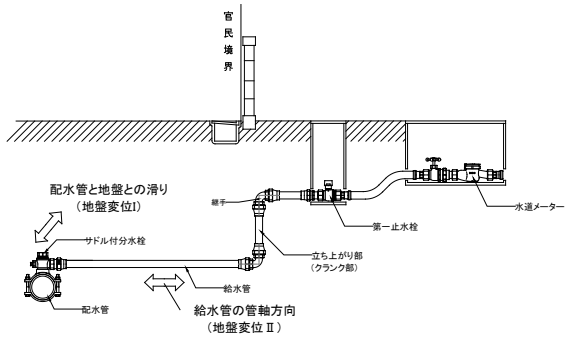

図-2 想定する地盤変位と配管モデル

(2)　配水管の滑りに対する実験（地盤変位I）

a)　実験概要

実験は，**図-3**に示す鋼製土槽内（2.0m×1.35m×0.9m）に配水管を埋設し，サドル付分水栓を規定トルクで取付け・穿孔した後，給水青ポリ管φ20を給水青ポリ管用金属継手（以降，金属継手）を用いて直線的に約1.5m配管する．給水管の接合方式は，金属継手によるメカニカル接合と樹脂継手を用いた融着接合があり，実現場ではいずれの場合も存在する．本稿では，異種材料の接合となる金属継手の方が耐震設計上厳しい条件と考え，金属継手による複合構造を供試体の基本とする．

配水管の管種は，材料剛性が大きく管と地盤との滑りが大きくなるダクタイル鋳鉄管等の金属管と材料剛性が小さく滑りが生じにくい水道配水用ポリエチレン管の2種類を評価対象とした．

管種ごとの滑り量は，**表-2**で示す通りである．レベル2地震動を想定した場合，配水管が水道配水用ポリエチレン管であれば，管と地盤との最大滑り量が，最も厳しい条件の呼び径200で12mm程度であることが確認されている[4]．本実験ではより厳しい条件での評価を行うため100mmまで強制的に相対変位を加えた評価を行った．一方，配水管がダクタイル鋳鉄管等の金属管の場合，管材料の剛性が大きく，滑りが発生し，レベル2地震動の最大水平振幅であるため，300mmの滑り量で評価した．

載荷は，配水管の管軸方向に複動油圧ジャッキ（型名MD1-300，能力100kN，最大ストローク300mm）を用いて，管と地盤との相対変位が管種ごとの想定滑り量に達するまで強制変位させる．管路には，水圧0.5MPaを負荷した状態とし，載荷中の荷重および変位量を配水管の管端部に設置したロードセル（型名 CLP-50KNB，㈱東京測器研究所），変位計[1][2]（型名 SDP-300D，㈱東京測器研究所）で測定する．（**図-3**，**写真-4**）また，載荷中の給水青ポリ管の変形は，**図-3**の側面図中に示す軸方向に設置したひずみゲージ[番号]で把握する．

埋戻し土は青ポリ管の埋戻しで標準的に使用される川砂を用い，浅層埋設の最小土被り60cmとなるように埋戻土と鉄板を介して上載荷重を負荷することで再現する．締固度の管理は，木ダコ等を用いて薄層に締固めを行った後，RI測定器を用いて締固度90%以上となるように管理を行う．

表-2　実験条件

CASE	地盤変位	配水管	給水管/継手	実験変位量(mm)	配管形態（給水管）
1	地盤変位I（配水管の管軸方向）	水道配水管用ポリエチレン管	給水青ポリ管(呼び径20)/金属継手	100	直線配管
2		ダクタイル鋳鉄管		300	

写真-3　実験土槽（全景）

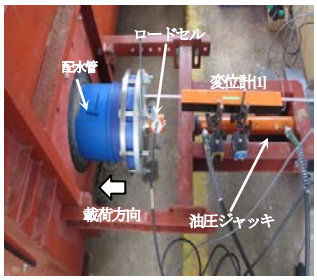

写真-4 載荷位置詳細

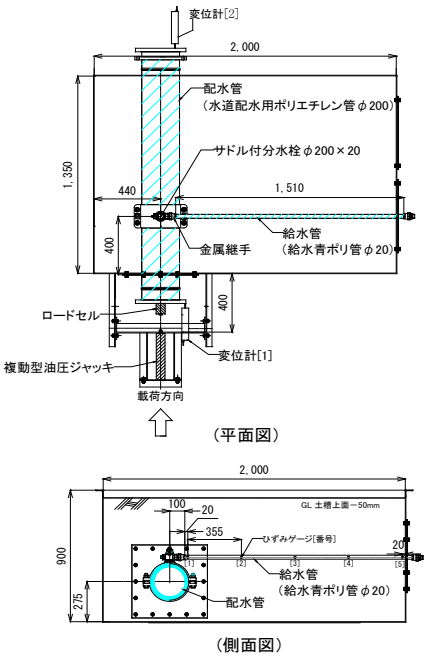

図-3　土槽実験（地盤変位I）

(3)　配水管の滑りに対する実験結果（地盤変位I）

a)　CASE1

CASE1 における給水青ポリ管に発生した軸ひずみを図-4，図-5 に示す．横軸はサドル分岐中心部からの距離を示す．ひずみゲージは図-3 および写真-5 に示す[1]～[5]の位置に，給水青ポリ管の流水方向に対して右側（R 側）と左側（L 側）の管側部に設置した．

評価結果は，金属継手の根元から 20mm（サドル分岐中心部からは 120mm）の位置に設置したひずみ[1]の L 側で最大引張ひずみが生じ，R 側で最大圧縮ひずみが生じた．ひずみ[3]以降はひずみがほとんど発生していない．これは，実験後の変形状況を示した写真-5 からも確認でき，サドル分岐から 800mm 程度の直線部で変位量を吸収していることがわかる．

100mm まで強制的に相対変位させる厳しい条件での評価の結果，給水青ポリ管は十分な変形性能を有していたため，管体および金属継手に異常は無く，通水機能を継続できた．水道施設耐震工法指針・解説では，埋設管路（一体構造管路）の耐震性能として，レベル 2 地震動の場合は耐震性能 2 を規定し，「部分的に塑性化しても漏水が発生しない限界の状態」と記されている．つまり，地震後に通水機能を継続していることが評価のポイントであると考える．本研究では，給水管に対しても耐震性能 2 を照査基準として定め，評価を行う．実験結果は，より厳しい条件を仮定した 100m 変位時においても，漏水は無く，照査基準を満足するものと考える．

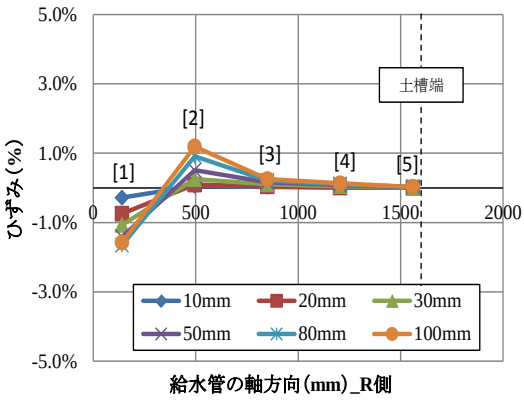

図-4　管軸ひずみ分布（R 側）

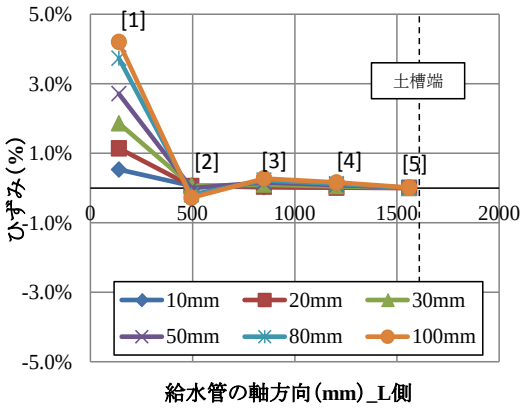

図-5　管軸ひずみ分布（L側）

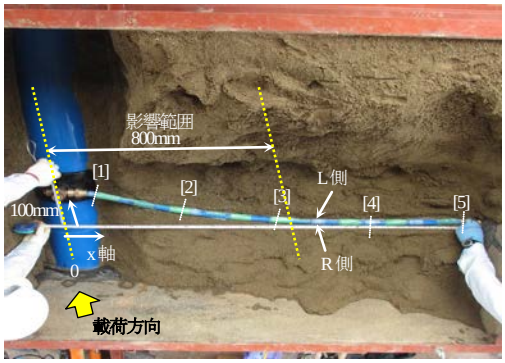

写真-5　実験後（滑り量Δ=100mm）

表-3　給水青ポリ管の最大発生ひずみ（CASE1）

配水管の滑り量Δ	最大引張ひずみ [1]-L側 (%)	最大圧縮ひずみ [1]-R側 (%)
レベル2地震動時の滑り量 Δ=12mm	0.7	-0.4
Δ=100mm	4.2	-1.6

b)　CASE2

次に大きな滑り量が想定されるダクタイル鋳鉄管を配水管に想定し，CASE2 の実験を行った．滑り量は，水道施設耐震工法指針で示されるモデル地盤における最大水平変位振幅 300mm を想定する[2),3)]．

CASE2 の給水青ポリ管に発生した軸ひずみを**図-6**，**図-7** に示す．横軸はサドル分岐中心部からの距離を示す．また，**表-4** で最大発生ひずみを変位量毎に示す．発生ひずみは，300mm 変位時において，金属継手部の根元から 20mm（サドル分岐中心部から 120mm）の位置に設置したひずみ[1]-L 側で最大引張ひずみ 5.1%，[1]-R 側で最大圧縮ひずみ 2.0%であった．また，300mm 変位時にはサドル分岐から 1000mm の範囲で概ね変形を吸収していることが確認できる（**写真-6**）．[1]-L 側のひずみは，変位量 50mm 程度までは変位量に伴い比例的にひずみが増分しているが，50mm 以降はひずみの増加率が小さくなることが確認された．これは，サドル上部に地盤反力が作用し，サドル分岐部の根元が徐々に回されたため，ひずみが緩和したと考える（**写真-6**，サドル上部の拡大）．また，この時にサドル部からの漏水は無かった．

レベル 2 地震動を想定した場合，ダクタイル鋳鉄管では大きな滑りが想定されるが，給水青ポリ管および金属継手は，可とう管を用いなくとも，管体の柔軟性で地盤変位を吸収し，通水機能を継続できることが確認された．

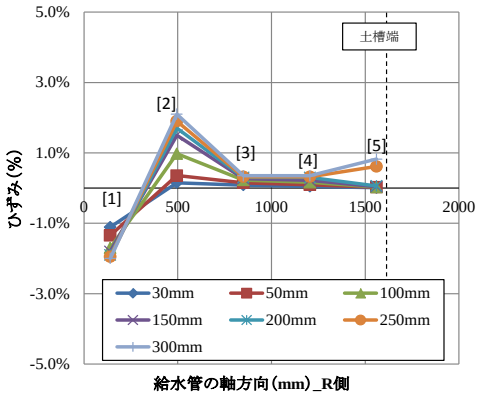

図-6　管軸方向ひずみ分布（R側）

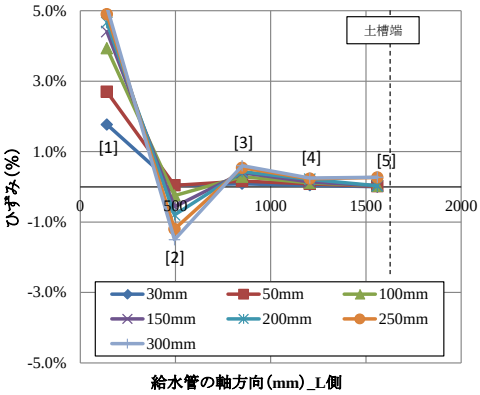

図-7　管軸方向ひずみ分布（R側）

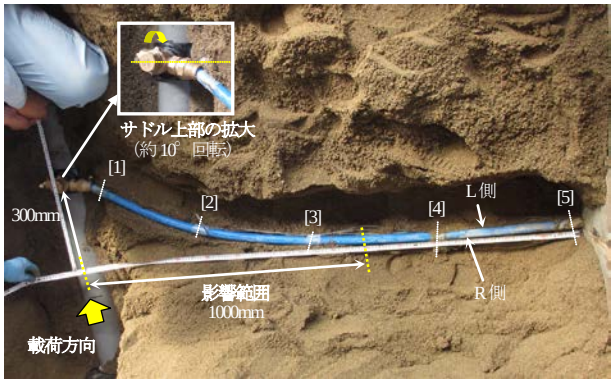

写真-6　実験後（滑り量Δ=300mm）

表-4　給水青ポリ管の最大発生ひずみ（CASE2）

配水管の滑り量Δ	最大引張ひずみ [1]-L側 (%)	最大圧縮ひずみ [1]-R側 (%)
Δ=50mm	2.7	-1.4
Δ=100mm	3.4	-1.7
Δ=200mm	4.7	-1.9
レベル2地震動時の滑り量 Δ=300mm	5.1	-2

c)　**給水青ポリ管が水道配水用ポリエチレン管の限界せん断応力に与える影響**

配水管の地震時挙動は管表面に作用するせん断応力と砂（地盤）の拘束力である限界せん断応力の比較によってなされる．

これまでの研究では，水道配水用ポリエチレン管の限界せん断応力に関する各種埋設実験を行い，融着継手やサドル付分水栓の抵抗を加味した限界せん断応力を提案し，地震時の管と地盤との相互作用に関する検証を行ってきた[5)]．過去の実験は，給水管を設置しない条件（サドル付分水栓のみ）で評価を行い，限界せん断応力を提案してきたが，給水管の設置有無が限界せん断応力に与える影響評価を行った．せん断応力は，管端に設置したロードセルの荷重を土槽内の配水管の表面積で除した値である．

図-8において，給水青ポリ管の設置有無ごとのせん断応力と相対変位量の関係を示す．図より，せん断応力は給水管の設置有無に関わらず同程度であることがわかる．つまり，給水青ポリ管自体が，土中で変形し，せん断抵抗にならなかったと考える．

給水青ポリ管のような柔軟性に富む管材料を給水管として使用した場合，これまで提案してきた限界せん断応力値をそのまま使用できるものと考える．一方，給水管に剛性の大きな材料を使用した場合は，せん断抵抗を別途実験等で加味することが望ましいが，限界せん断応力が大きくなることは，滑りにくくなる条件であり，耐震性設計上は安全サイドとなると考える．

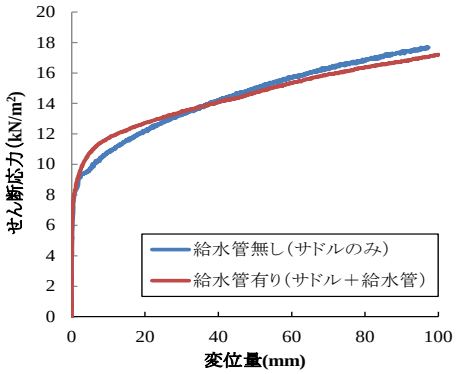

図-8　せん断応力τ-変位量Δ

(4)　給水管の管軸方向変位（地盤変位II）の実験

a)　実験概要

次に，給水管の管軸方向変位（地盤変位II）を対象に，給水管の配管形態を直線配管およびクランク配管とした場合について評価を行う．直線配管では，配管途中に金属継手を設け，クランク配管ではエルボを用いて配管し，継手近傍での応力集中を把握する．

レベル2地震動における地盤ひずみは管軸方向に対して1%であり，管体にも最大1%のひずみが生じることが想定される．本実験では，給水管を土槽内に埋設した状態で，直線配管は軸方向に100mm（ひずみに換算すると6%），クランク配管は軸方向に150mm（ひずみに換算すると10%）の引張変位を加えた．

また，中低圧ガス導管耐震設計指針によると給水管の管軸方向に50mmの変位吸収能力を有することで地震時被害を軽減できるとされている[6]．

実験は，油圧ジャッキを用いて給水青ポリ管の管軸方向に引張り，載荷中の荷重および変位量をロードセル（型名 TLP-10KNB，㈱東京測器研究所），変位計[1]で測定する（図-9，写真-7）．ひずみゲージの設置位置は，直線配管の場合は図-3と同様であり，クランク配管の場合は図9の側面図に示す．

表-5　実験条件

CASE	地盤変位	配水管	給水管/継手	実験変位量(mm)	配管形態(給水管)
3	地盤変位II(給水管の管軸)	水道配水管用ポリエチレン管	給水青ポリ管(呼び径20)/金属継手	100	直線配管
4				150	クランク配管

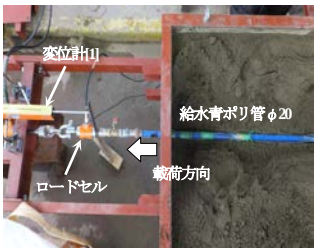

写真-7　地盤変位 II

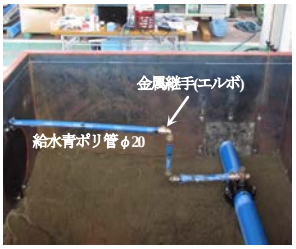

写真-8　クランク配管

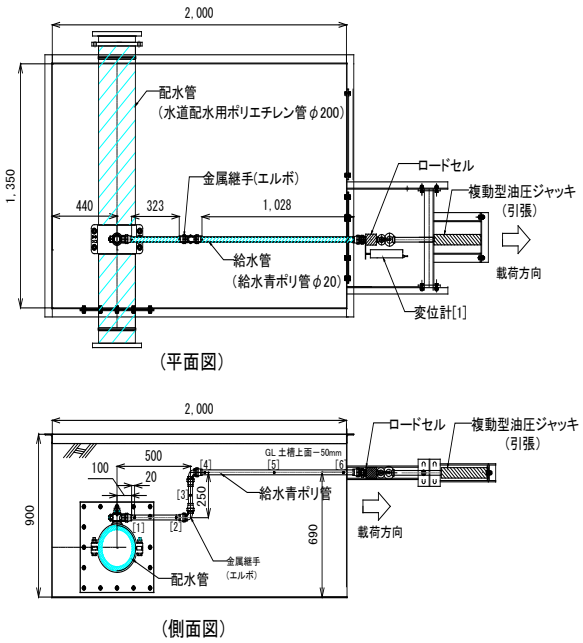

図-9　給水管の管軸方向変位による土槽実験（地盤変位II）

(5)　給水管の管軸方向変位（地盤変位II）の実験結果

a)　CASE3（直線配管）

CASE3（直線配管）の給水青ポリ管に発生したひずみを軸方向に図-10に示す．ひずみは，管の両側部に設置した一対のひずみゲージの値を平均した値である．また，ひずみ[3] [4]の間には金属継手が設置されている．

図-10より，ひずみ[5]の引張載荷側の土槽端を最大とするひずみ分布を確認した．ひずみ[5]は，載荷直後から土槽外に引き出され，地震動と異なる単純な引張試験の状態となったため，評価対象から除外した．よって，管路には100mm変位の時点では，軸方向に3%～4%のひずみが発生している．地震時に管軸方向に発生する最大ひずみが1%であるため，その3～4倍程度のひずみが作用していることになるが，管および金属継手に異常は無かったことがわかる．また，金属継手の前後でひずみに最大0.7%のひずみ差が生じていることから，金属継手部が土中で抵抗となっていることがわかる．

100mm引張後に荷重を除荷し，掘削した際の管体を写真-9の下段に示す．写真-9上段の載荷前と比較すると，継手位置が除荷後には元の位置に戻っていることが確認できた．

これらの結果から，給水青ポリ管に地震時の3～4倍のひずみレベルまで変形を加えた場合でも，通水機能を継続できることを確認した．また，この時に軸方向に100mmの地盤変位吸収力を有することが確認でき，中低圧ガス導管耐震設計指針で示された管軸方向の設計地盤変位50mmに対して，2倍の吸収能力を有する結果となった．

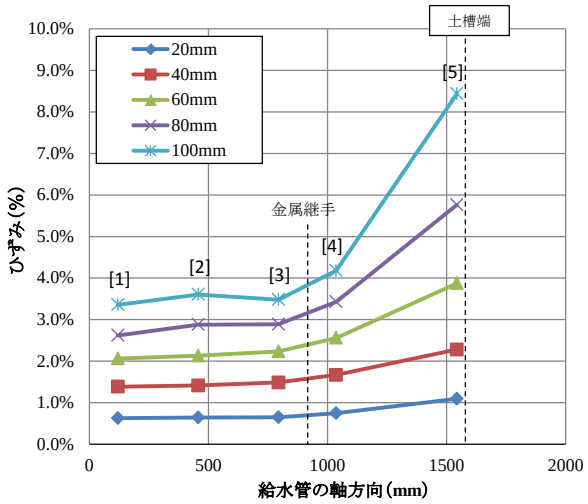

図-10　給水管の発生ひずみ（直線配管）

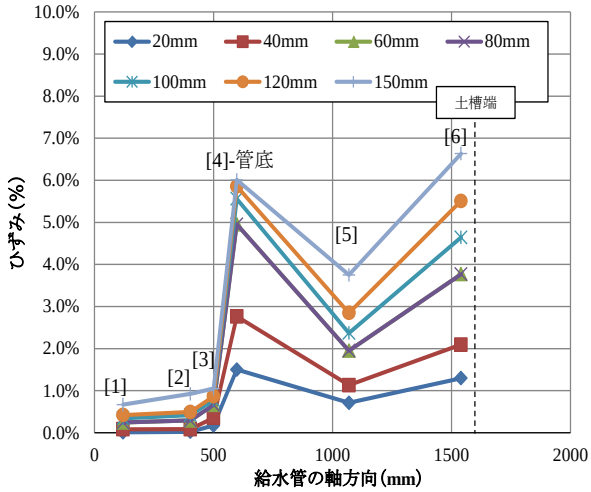

図-11　給水管の発生ひずみ（クランク配管）

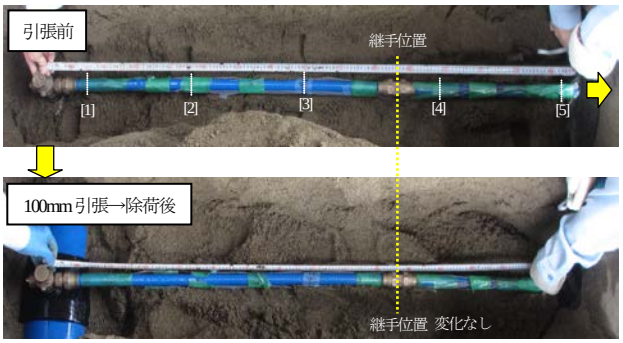

写真-9　直線配管（上段：実験前，下段：実験後）

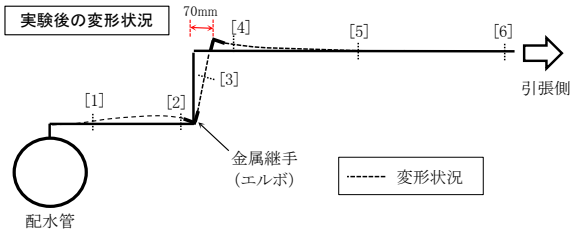

図-12　給水管の変形状況イメージ図（クランク配管）

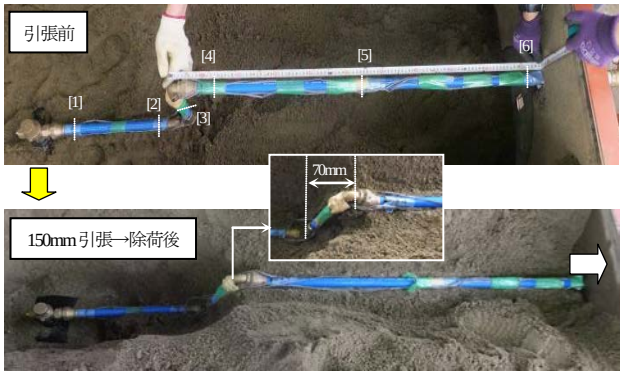

写真-10　クランク配管（上段：実験前，下段：実験後）

b)　CASE4（クランク配管）

次にCASE4（クランク配管）において給水青ポリ管に発生したひずみを図-11に示す．ひずみ[4]は，管底ひずみが最も大きくなったため，管底のひずみ値を示す．図より，クランク（立ち上がり部）の上段であるひずみ[4]から[6]に変形が集中し，ひずみ[1]から[3]は小さいひずみとなっている．これは，図-12および写真-10の変形状況からもわかるように，クランク部で変位量を70mm程度吸収していたため，クランクの下段に変形が伝わらなかったためと考える．

最大発生ひずみは，変位に伴い土槽外に移動したひずみ[6]を除くと，エルボ根元の管底部に取り付けたひずみ[4]で，6%であった．これは変位に伴い，エルボ根元に曲げが作用し，管底部のひずみが大きくなったためにひずみが集中したと考える．

レベル2地震動で作用する地盤ひずみが最大1%であるのに対して，管体には最大6%近いひずみが発生したが，給水青ポリ管および金属継手に異常は無く，通水機能を継続した．また，この時に軸方向に150mmの地盤変位吸収力を有することが確認でき，中低圧ガス導管耐震設計指針で示された管軸方向の設計地盤変位50mmに対して，3倍の吸収能力を有する結果となった．

3.　まとめ

本研究では給水装置引き込み部を対象に，給水用高密度ポリエチレン管と金属継手による複合配管（ハイブリッド配管）を用いた耐震性評価を行い，一定の成果が得られたため以下にまとめる．

(1)　配水管の軸方向にレベル 2 地震動が作用し（地盤変位 I），配水管と地盤の滑り（相対変位）が発生した場合において，給水青ポリ管に与える影響を評価した．

結果は，配水管が水道配水用ポリエチレン管の場合，レベル 2 地震動で想定される滑り量は 12 ㎜程度であるが，より厳しい 100mm 変位での評価を行い，管体および継手に異常が無く，通水機能を

継続できた.

また，配水管に最大で 300mm の滑り量が想定されるダクタイル鋳鉄管の場合，給水青ポリ管に発生したひずみは最大 5.1%であったが，給水青ポリ管および金属継手に異常は無く，通水機能を継続した.

いずれの場合も，給水青ポリ管を用いることで可とう管がなくとも，漏水することなく通水機能を継続できることを確認した.

(2) 次に給水管の管軸方向にレベル2地震動が作用した場合（地盤変位II）において，給水青ポリ管に与える影響を評価した.

結果は，地震動による最大地盤ひずみ1%を上回るひずみを管体に作用させて場合でも，管体および金属継手部からの漏水等の異常は無かった.

また，クランク配管の場合は，エルボ近傍にひずみが集中し，150mm変位時には最大6%のひずみが生じたが，通水機能を継続した.

(3) これらの実験を通じて，配水管の管軸方向および給水管の管軸方向にレベル2地震動が作用した場合において，給水青ポリ管は地盤変位によく追随し，可とう管を用いることなく，通水機能を継続できることが確認できた.

(4) しかし，実際の地震動を想定した場合，繰り返し載荷の影響評価が課題となるため，今後の研究で議論を進展させたい.

参考文献

1) 公益財団法人 給水工事技術振興財団：東日本大震災給水装置被害状況調査報告書，pp.pp，2016.
2) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，I 総論，pp.87-92, pp. 185-197, pp. 257-272, 2009.
3) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，設計事例集，pp. 42-48, 2009.
4) 西川源太郎，塩浜裕一，鈴木剛史，大沼博幹，清野純史：水道配水用ポリエチレン管の地震動に対する耐震性評価に関する研究，土木学会論文集 A1, Vol. 72, No. 4, pp. I_424-I_433, 2016.
5) 西川源太郎，塩浜裕一，鈴木剛史，大沼博幹，清野純史：水道配水用ポリエチレン管の異形管・給水分岐の耐震性評価，土木学会論文集 A1, Vol. 73, No. 4, pp.未定, 2017.
6) 日本ガス協会：中低圧ガス導管耐震設計指針，pp. 6-15, pp. 20-35, 2013.
7) 日本水道協会：水道配水用ポリエチレン管・継手に関する調査報告書，1998.
8) 片桐信，坂本宏昭，橋津健二，大室秀樹：給水管路の地盤変位吸収の性能評価，平成 26 年度全国水道会議（水道研究発表会）講演集 pp.454-pp.455，2014
9) 山田俊光，渡辺隆雄：小口径高密度ポリエチレン管金属継手の開発，平成 28 年全国水道会議（水道研究発表会）講演集，pp.578-pp.579，2016.

(?????)

EVALUATION OF SEISMIC PERFORMANCE ON POLYETHYLENE SERVICE PIPE FOR WATER SUPPLY AN EARTHQUAKE

Gentaro NISHIKAWA, Yuichi SHIOHAMA, Tsuyoshi SUZUKI,
Hiromoto ONUMA and Junji KIYONO

According to the investigation report of on the pipeline damage in Great East Japan Earthquake, there are much damages not only distributing pipes but also service pipes and branch saddles. The report mentions that it’s important to evaluate the seismic performance of service pipes and saddles to maintain the water supply network during severe earthquake. The porpose of this study to evaluate the seismic performance of service pipes. We performed the test to figure out about influence of slippage between distributing pipes and soil on a service pipe, and influence of ground strain of pipe axis direction on a service pipe. In this study, service pipe was used high density polyethylene (HDPE) pipes which is jointed with mechanical joint.In the result, it was confirmed that HDPE pipes and mechanical joint had earthquake resistance during severe earthquake because pipes follw the groud deformation.