地震時における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

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 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

埋設管路の耐震性評価は、管と地盤との境界で生じる滑りの有無で評価手法が異なる.滑りが生じる場合には異 形管・給水分岐に応力とひずみが集中し、詳細評価が必要となる.これまでの研究では水道配水用ポリエチレン管 は軟弱地盤では滑りが発生しないが、良好地盤かつ呼び径が大きい場合は僅かではあるが滑りが生じることが報 告されている.本研究ではこの滑りが異形管や給水分岐に作用した場合の影響について検討を行った.想定され る滑り量(相対変位)は最大12.5mmであり、この滑りが給水分岐・異形管部に作用した場合にもおいても管路から 漏水することは無く、また発生ひずみは十分小さかった.本研究を通じて水道配水用ポリエチレン管はレベル2地 震動において給水分岐・異形管を含めた水道管路システムとして耐震性能を有することが明らかとなった.

Key Words : buried pipeline, polyethylene pipe, critical shear stress, relative displacement

1. まえがき

地中埋設管の耐震設計は、地盤と管との境界面に発生する滑りの有無により評価手法が大きく異なる。即ち、直管に滑りが発生する場合には、管体に発生する応力とひずみは低減されるが、90°曲管やT字管などの異形管部や給水分岐にひずみが集中し、その影響評価が必要となる¹⁾.滑り発生の判定は、地震時に管表面に作用するせん断応力 τ_{G} と地盤の限界せん断応力 τ_{G} との比較によりなされる。即ち、 τ_{G} > τ_{a} であれば滑らない判定となる。ここで、地震時に作用するせん断応力 τ_{G} は(1)式で示される²³.

$$\tau_G = \frac{1}{L'} (2 \times \pi \times \mathbf{E} \times t \times \alpha_1 \times \varepsilon_G) \tag{1}$$

L': 見かけの波長 (m) E:管材料の弾性係数 (kN/m²) t:管厚 (m) a₁:管軸方向の地盤変位伝達係数 ε_G:地盤ひずみ

水道配水用ポリエチレン管(以降, 青ポリ管)の限界せん 断応力では、これまでの研究において日本ガス協会や日本 水道協会の設計指針で示されているtr=10kN/m²と大きく乖 離が無いことが明らかになっている4. 一方, 青ポリ管の実管 路を想定した場合には融着継手や給水分岐が地震時に抵 抗となり、これらの抵抗を考慮した限界せん断応力が青ポリ 管に相応しいと考えられる.また,各種地盤において滑りの 判定を行った結果,良好地盤であれば青ポリ管も僅かに滑り が発生することが明らかとなっている. 滑り発生時における異 形管および給水分岐に生じる応力集中について評価するこ とで水道管路システムとしての耐震性評価が完成するものと 考える. 本研究では、まず実管路に相応しい限界せん断応 力を提案するために各種埋設実験を行った.また,実験から 得た限界せん断応力を用いて,各種地盤モデルにおける滑 りの有無および滑り量を確認した. 最後に, その滑りが生じた 場合の異形管や給水分岐への影響評価を行い,水道管路 システムとしての耐震性評価が完了した.

2. 実管路を想定した限界せん断応力

(1) 実験目的

これまでの研究では青ポリ管の突起部の無い管(以降、裸 管)および融着継手を有する管(以降,融着継手付)におい て限界せん断応力を測定する実験を行ってきた.融着継手 付では,継手部が抵抗となりせん断応力が増加する傾向を 得ており,これらの抵抗を考慮した限界せん断応力の決定が 必要であった.本研究では青ポリ管の裸管,融着継手付に 加えて給水分岐を有する管(以降,給水分岐付)において限 界せん断応力測定実験(以降,滑り実験)を行い,青ポリ管の 実管路を想定した限界せん断応力を決定することを目的と する.

(2) 実験概要

実験は図-1に示す鋼製土槽内(長さ 1.6m×幅 0.9m×深 さ 1.2m)に青ポリ管を埋設する. 管端部には閉止フランジを 設置し, 管内に水圧 0.5MPa を負荷する. 管端を複動型油圧 ジャッキ(能力 100kN, ストローク 200mm, オックスジャッキ(株) で載荷し,管と地盤との相対変位量が 100mm となるまで強 制変位させる. 載荷荷重及び変位量は管端に設置したロー ドセル(型名 CLP-50kNB, ㈱東京測器研究所)と変位計(1)2) (型名 SDP-100C, (㈱東京測器研究所)を用いて計測する(写 真-1).表-1に載荷ケース一覧を示す.融着継手及び給水 分岐は、土槽の境界条件の影響を極力緩和するため載荷側 から 0.4m の位置に設置した(写真-2, 写真-3). 給水分岐付 は、金属製サドル付分水栓(水道配水用ポリエチレンパイプ システム協会規格品、バンド部滑り止め塗装)を標準締付けト ルク 40N・m で締付けた後, 穿孔し分岐側を閉栓した状態と する. 平均載荷速度は, 過去の実験において載荷速度が遅 い方が限界せん断応力が小さくなる傾向を得ているため,安 全側の結果を得る 10mm/s 程度と低速での載荷速度を採用 した. また, 土被りと限界せん断応力は比例関係を示すため, 国内の浅層埋設基準である最低土被り 60cm を中心に実験 を行った. 本実験では土被り 40cm までは青ポリ管の埋戻し で標準的に使用される川砂(表-2)を使用し, 締固度 90%以 上となるように RI 測定器を用いて締固め管理を行う. 40cm 以上の土被りに関しては必要上載荷重を鉄板を介して載荷 することで必要土被りを再現した(写真-4).



図-1 実験土槽(側面図)





写真-1 載荷位置詳細

写真-2 融着継手付



写真-3 給水分岐付

写真-4 上載荷重①

表-1 載荷ケース一覧

		Φ50		Φ100		Φ200	
対象	土被り						
	30 cm	60 cm	120 cm	60cm	30 cm	60 cm	120 cm
裸管							
	•	•	•	•	•	•	•
融着維手付	•	•	•	●	•	•	•
給水分岐付	-	•	-	•	-	•	_

表-2 土質試験結果(埋戻土)

1	結果	
<u>ģ</u> n.	土粒子の密度(g/cm ³)	2.69
лх	自然含水比(%)	11.8
谷田よ	最大乾燥密度(g/cm ³)	1.72
柿直の	最適含水比(%)	13.8
三軸圧縮	粘着力(kN/m ²)	1.9
(締固め90%)	内部摩擦角φ(°)	36

(3) 実験結果

a) 実管路を想定したせん断応力と変位量関係

土被り 60cm における呼び径ごとのせん断応力と変位量の 関係を図-2から図-4に示す.図より裸管のせん断応力 τ は, 管と境界面の砂の破壊に伴い滑り出し,一定のせん断応力 に収束することがわかる.一方,融着継手付や給水分岐付で は,滑り開始に伴いせん断応力が増加する傾向を示した.こ れは融着継手や給水分岐等の突起部が抵抗となったためと 考える.写真-5 に実験後(100mm 変位時)の埋戻土の表面を 示す.突起部が設置された直上を中心に砂のひび割れが確 認でき,砂のせん断破壊が上面まで達していることがわかる. また,突起部の側部を掘削した際には変位量の分だけ側部 に空洞が確認できた(写真-6).本実験では土槽長さ 1.6m に おいて実験を行ったが、実管路を想定した場合には融着継 手は 5m 毎,給水分岐は一般的に 10m 毎に設置される.よ って、図中に示すせん断応力は実験で得たせん断応力を実 管路の設置間隔に変換し、図示している.また、図中の合成 グラフは裸管のせん断応力に融着継手と給水分岐の抵抗を 加えたせん断応力であり、最終的な青ポリ管の限界せん断 応力の決定に使用する.





図-4 せん断応力-変位関係(呼び径200)

b) 境界条件の影響

次に実験土槽の境界条件がせん断応力に与える影響に ついて考察する.影響を把握するため写真-4で示した上 載荷重①による実験に加えて,油圧ジャッキを用いて上 載荷重を再現する上載荷重②(写真-7)についても同様 の滑り実験を行った. 上載荷重①では必要荷重分の土嚢 を載せ、突き上げ量を写真-8に示すマイクロゲージで測 定した.一方,上載荷重②では油圧ジャッキで必要荷重 を載荷し、設置したロードセルにより載荷中の上載荷重 の変化を測定した.呼び径50および200の載荷中の突き 上げ量と上載荷重の増分を表-3に示す. 突起部の張出面 積の大きい呼び径200では、滑りに伴い大きな突き上げ 量と荷重増分を示し、上方へ大きな突き上げ力が作用し たことがわかる.また、図-5では上載荷重①②の違いを 比較するため呼び径200におけるせん断応力と変位関係 を示す. 図より上載荷重①の方が上面の境界条件が緩和 されているため、せん断応力が小さくなっていることが 確認できた.よって、上載荷重①を滑り実験の基本とし た.一方,上載荷重①の変位量100mmにおいてもせん断 応力は漸増傾向を示している. これは土槽端部と底部の 境界条件が影響しているためであり、これらの境界条件 を緩和できればせん断応力はより収束すると考える. 本実験では境界条件の影響を完全に緩和することができ ないが、呼び径が小さい管路における実験では20mm変 位時付近から概ねせん断応力が収束傾向を示した.





写真-5 上面に生じた亀裂

写真-6 分岐側部の空洞



写真-7 上載荷重②



写真-8 突き上げ量の測定

表-3 突き上げ量と荷重増分

	呼び径50		呼び径200	
	上載荷重①	上載荷重2	上載荷重①	上載荷重2
	突き上げ量	荷重増分	突き上げ量	荷重増分
融着継手	0.1mm	0kN	1.9mm	1.3kN
絵水分岐	0.25mm	0.5kN	1.4mm	1.5kN



図-5上載荷重①②のせん断応力-変位関係(呼び径200)

c) 限界せん断応力の決定

本実験ではせん断応力は滑り開始から 20mm 変位時まで 漸増し、その後収束傾向を示した.よって、青ポリ管の限界せ ん断応力は 20mm 変位時を境にバイリニア近似線を引くこと で決定できると考える.また、中低圧ガス導管耐震工法指針 においても 20mm 変位時のせん断応力を限界せん断応力と して決定している⁹.表-4に実験結果から得た青ポリ管の限 界せん断応力を示す.呼び径が小さい管路の方が管径に比 べて相対的に張出部の面積が大きくなるため、限界せん断 応力は大きくなる結果を得た.

表 -4 美	管路を相対	した限界せん	断応力	(kN/m^2)
---------------	-------	--------	-----	------------

呼び径	50	100	200
限界せん断応力 τ _{cr}	19.5	14.9	10.8

3. 管と地盤との相対変位

本章では表-4で得た限界せん断応力を用いて青ポリ管の 滑り発生の可能性について検討する.水道施設耐震工法 指針で示された図-6の地盤モデルに基づき,表層厚を変 更した地盤を表-5に示す.モデルIが軟弱地盤であり, モデルIVが良好地盤を想定している.地盤に与える入力 地震波は水道施設耐震工法指針で用いられるレベル2地 震動(Sv=100kine)とした.



図-6 水道施設耐震工法指針の地盤モデル

表-5 地盤モデル

	沖積層厚	(表層)	表層の平均	波旦	表層の固有	水平変位	抽般ひずひ
州船库守	第1層	第2層	弹性波速度	似文	周期	振幅	地産いりの
地盈倍成	砂質土	粘性土	V _{DS}	L	T _G	II. (cm)	ε _G
	N值=2	N值=5	(m)	(m)	(sec)	Uh(cill)	(%)
モデルI	25m	5m	77.7	194.2	1.5	31.2	1.01%
モデルⅡ	10m	5m	85.2	95.1	0.7	14.1	0.94%
モデルⅢ	5m	5m	94.2	61.7	0.42	8.5	0.86%
モデルⅣ	0m	5m	138.3	27.4	0.14	2.8	0.64%

備考)モデルIは、水道施設耐震工法指針で示された地盤モデル

地盤の不均一度係数 η=2.0 として地盤ひずみを計算

表-6 せん断応力と相対変位量

山田・つい	沖積層厚	上段:管表面に作用するせん断応力τ _G (kN/m ²) 下限:漫nがたじた提合の相対恋は是(mm)					
地盤モアル	<u> </u>	n50	a75	/ご物ロウ/旧 の100	刃友恒里(I の150	μπ) (α200	
	25	1.34	1.89	2.63	\$.79	\$.24	
モデルI	5	not slip	not slip	not slip	not slip	not slip	
	10	2.54	3.87	5.38	7.74	9.92	
モデルⅡ	5	not slip	not slip	not slip	not slip	not slip	
Ĩ	5	3.59	5.08	7.07	10.16	14.07	
モナルⅢ	5	not slip	not slip	not slip	not slip	12.10	
モデルIV	0	5.98	8.45	11.75	16.91	23.40	
C / /PIV	5	not slip	not slip	0.98	7 28	12.47	

滑りの判定は式(1)で示した地震時に管表面に作用する せん断応力 $\tau_{\rm G}$ と限界せん断応力 $\tau_{\rm G}$ の比較によって行う. 表-6の上段に地震時に管表面に作用するせん断応力τ₆ を示す. 呼び径が大きく良い地盤であるほど, τ ωが大 きくなる傾向にあることがわかる. 次に表中の下段に滑 りの判定結果を示す. 滑りが生じない場合にはnot slipと 記載し、滑りが生じる場合には管と地盤との相対変位量 Δ を示す. 滑りの判定で使用する限界せん断応力 τ_{σ} は, 安全側の結果を得るために表-4の最小値τ_σ=10.8kN/m² を全ての呼び径に用いて計算を行う.相対変位量△の算 出式は、高圧ガス導管耐震設計指針に基づき計算を行っ た. 表より地盤モデルⅠとⅡにおいては、全ての呼び径 においてていくてのであり滑りが発生しないことがわかる. 一方,良好地盤かつ呼び径が大きくなるほど τ Gが大き くなり、青ポリ管に滑りが発生することがわかる、滑り に伴い発生する相対変位量は、モデルIV地盤の呼び径 200において最大12.47mmとなった. この相対変位量が異 形管および給水分岐に与える影響については、次章で検 討する.

4. 相対変位が異形管・給水分岐に与える影響

(1) 実験目的

滑りの判定を行った結果,良好地盤かつ呼び径が大き い場合に青ポリ管にも相対変位が発生することが明らか となった.この相対変位が異形管に生じた場合の地盤変 位分布を図-7のように考え,管路に生じるひずみを計測 し耐震性を評価する.



図-7 異形管部に作用する地盤変位分布

(2) 実験概要

実験は2章で使用した土槽を用いて異形管(T字管, 90°曲管,いずれも呼び径100)を埋設し,同様の滑り 実験を行う.給水分岐付に関しては2章で記述の通り表-1の載荷ケースの通りである.また,ひずみゲージは図-8に示す位置に設置し,90°曲管およびT字管に対しては 管側部(内側と外側)に,給水分岐付に対して管頂と管 底部にそれぞれ設置した.給水分岐付に関しては内水圧 0.5MPaを負荷した状態で載荷し,異形管実験に関しては, より変形が大きくなるように無圧下で実験を行う.



図-8 給水管·異形管実験(平面図)

(3) 実験結果

a) 給水分岐(サドル付分水栓)

給水分岐付の軸方向ひずみ分布(管頂,管底)を図-9, 図-10にそれぞれ示す.x軸は載荷側の土槽端からの距離を 示し, 0.4m の位置に金属製サドル付分水栓が設置されてい る. 相対変位に伴い, 載荷側を最大とする圧縮ひずみが作 用し、その後滑りが生じる.滑り開始以降は設置したサドル突 起部に地盤反力が作用し、サドル部より載荷側では圧縮ひ ずみが増加し、サドル以降ではひずみが小さくなった.サド ル付分水栓は管頂側に分岐の突起を有するため,管頂側に より大きな圧縮ひずみが確認できた.表-7に呼び径ごとの最 大ひずみ(Stl-上)を示す. 上段には地震時に想定される相 対変位 12.5mm における最大ひずみ、下段には実験におけ る最大相対変位 100mm の最大ひずみを示す.なお, 100mmの滑り実験はサドル付分水栓の漏水の有無を確認す るためのものである.青ポリ管の許容ひずみは 3%と定められ ており。,相対変位が給水分岐に作用した場合にも生じるひ ずみは十分に許容ひずみ範囲内であることがわかる.また, サドル部に地盤反力が作用した際にサドル部がズレることが 懸念されたが、いずれの呼び径においてもサドルの拘束力 が地盤反力を上回り、100mmの滑りが発生した状態でもサド ル部がズレて漏水することはなかった. このことから,相対変 位が給水分岐部に作用した場合においても青ポリ管に問題 が生じないことが確認できた.



図-10 管底ひずみ (呼び径 50)

表-7 給水分岐付に生じるひずみ (%)

相対変位	呼び径50	呼び径100	呼び径200
地震時に想定される相対変位 (12.5mm変位)	0.36%	0.20%	0.05%
実験における最大相対変位 (100mm変位)	1.00%	0.35%	0.07%

b) 90° 曲管

90°曲管におけるひずみ分布を載荷方向に対して右側, 左側に分けて図-11,図-12にそれぞれ示す.結果より, SG-Rで圧縮ひずみ,St4-Lで引張ひずみが卓越すること が確認できた.これは90°曲管の曲がり部に地盤反力が 作用し,曲管部に内曲げが作用したためと考える.ひず みの大きさは曲管外側に設置したSt4-Lが最大となる結 果を得たため,St4-Lのひずみを評価の対象とする. 90°曲管に生じる最大ひずみは0.18%程度と極めて小さ いことがわかる(表-8参考).よって,90°曲管に相対 変位が生じた場合には曲管の内曲げ変形によって相対変 位を吸収し,その時に生じるひずみは青ポリ管の降伏ひ ずみに比べて十分小さいことがわかる.



図-11 90° 曲管のひずみ分布 (R側)





表-8 異形管に生じるひずみ (%)

相対変位	対象	呼び径100
地震時に想定される相対変位	90°曲管	0.18%
(12.5mm変位)	T字管	0.35%
実験における最大相対変位	90°曲管	1.22%
(100mm変位)	T字管	1.90%

c) T字管

T 字管の分岐側におけるひずみ分布を載荷方向に対して 右側, 左側に分けて図-13, 図-14にそれぞれ示す. 全体 のひずみ分布を分析した結果, T 字管の分岐側根元に最 も大きなひずみが生じることがわかった. これは分岐管 に地盤反力が作用し, 曲げが作用したためと考える. x 軸(管軸側)に比べて,分岐側(y 軸)が大きなひずみ を示したため y 軸に関するせん断応力図を示す. 表-8 より T字管に生じる最大ひずみは 0.35%程度と許容ひず みに対して十分に小さいことがわかり, T 字管部に相対 変位が生じた場合も問題無いと考える.

異形管実験の配管形態は土槽幅の制約を受けるため今 後は解析を用いて実管路を想定したモデルを作成し,実 験との比較検討および考察を加筆したい.



図-13T字管(分岐側)に生じるひずみ(R側)



図-14 T字管(分岐側)に生じるひずみ(L側)

5. 結論(耐震性評価のまとめ)

本研究を通じて水道配水用ポリエチレン管はレベル 2地震動において給水分岐・異形管を含めた水道管 路システムとして耐震性能を有する結果を得た.詳 細を以下に示す.

- (1) 青ポリ管は一般に給水分岐や融着継手を有する管路であり、地震時にはそれらが抵抗となりせん断応力が増加する.本研究ではこれらの抵抗を考慮した実管路に相応しい限界せん断応力τ_α=10.8~19.5kN/m²を提案した.呼び径が小さい管路であるほど、突起部の抵抗がτ crに与える影響が顕著となり滑りにくくなる結果を得た.
- (2) 実験で得られた τ crを用いて青ポリ管の滑りの可能性を検討した結果,軟弱地盤であれば青ポリ管に滑り発生せず,地盤ひずみを管路の伸縮で吸収することで耐震性評価は完了する.一方,良好地盤かつ呼び径が大きい場合は僅かではあるが滑りが生じることがわかった.この時生じる最大の相対変位量は12.5mmとなる結果を得た.
- (3) この相対変位が異形管や給水分岐に与える影響を 検討した結果,金属製サドル付分水栓では滑りに 伴いサドル部に地盤反力が作用したが,サドル部 の拘束力が変位に伴う地盤反力を大幅に上回り, 地震時の相対変位量12.5mmに対し100mmの相対変 位実験に対してもサドル部がズレて漏水しないこ とを確認した.また,地震時の管体に発生するひ ずみは最大で0.36%であり,実験した100mmの相対 変位におけるひずみも1.0%であり,青ポリ管の許

容ひずみ3%に対して十分に小さいことが確認できた.

- (4) 90°曲管およびT字管などの異形管では,滑りに伴い 異形管部に変形が生じることで相対変位を吸収す ることがわかった. 地震時に生じる相対変位 12.5mm対する発生ひずみは90°曲管で最大0.18%,T 字管で最大0.35%であった.実験した100mmの相対 変位におけるひずみも90°曲管で最大1.22%,T字管 で最大1.90%であり,許容ひずみに対して十分に余 裕があることが確認できた.
- (5) これらの結果より、レベル2地震動が作用した場合 における青ポリ管の給水分岐および異形管部を含 めた管路システムとしての耐震性評価が完了した.

参考文献

- 小池武:埋設パイプラインの地震時ひずみ評価,土木学 会論文報告集 No.331, pp.13-24, 1983.
- 日本水道協会:水道施設耐震工法指針・解説,I総論, pp.257-272, 2009.
- 3) 日本ガス協会:高圧ガス導管耐震設計指針, pp.26-49, 2004.
- 西川源太郎他: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,土木学会論文報告集 Vol.72 No.4 pp.257-272, 2016.
- 5) 日本ガス協会:中低圧ガス導管耐震設計指針, pp.56-63, 2004.
- 6) 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.

EVALUATION OF SEISMIC PERFORMANCE ON POLYETHYLENE PIPE INCLUDING JUNCTIONS AND BENDS DURING AN EARTHQUAKE

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

Evaluation of seismic performance on buried pipeline changes whether the pipe slips against the surrounding soil or not. When slippage takes place, stress and strain concentrate to junctions and bends. Important factors of slip or not-slip are critical shear stress of soil (τ_{cr}) and elasticity of pipe materials. Previous experiments by our group have shown that polyethylene pipe(HPPE) does not slip in the soft ground during severe earthquake. By contrast, HPPE slips a little in solid ground because of the short wavelength. In this study, we estimated the influence of slippage against junctions and bends. Our results are as follows: (1) τ_{cr} of HPPE with accessories including a coupler and branch saddle is 10.8kN/m²-19.5kNm² because these accessories function as resistance in the soil.(2) Maximum slippage of HPPE is approximately 12.5mm in the solid soil. (3) we comfirmed that there are no leakage from the branch saddle and the strain acting on the pipe with accessories and bends is enough small even in case HPPE slips. Through this study, the evaluation of seismic performance on polyethylene pipeline as the water pipeline system were finished.