

# PE管Pipe-in-Pipe工法で管路更生を行った場合の 本願寺水道の耐震性能評価

Evaluation of Anti-seismic Performance of Honganji Water Supply Pipeline  
When it is Rehabilitated by Pipe-in-Pipe Method using PE Pipe

片桐 信<sup>1</sup>・荒川昭治<sup>2</sup>

Shin Katagiri and Shoji Arakawa

<sup>1</sup>摂南大学准教授 理工学部都市環境工学科 (〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町17-8)

Associate Professor, Setsunan University, Dept. of Civil and Environmental Engineering

<sup>2</sup>株式会社建設技術研究所 大阪本社 技術統括部 (〒541-0045 大阪府大阪市中央区道修町1-6-7)

Technical Director, CTI Engineering Co., Ltd.

In this study, anti-seismic performance of Honganji water supply pipelines when it is rehabilitated by PE pipe pipe-in-pipe method is investigated. First, basic behavior and response of installed PE pipes under seismic wave is assessed by performing a numerical analysis on the beam theory. On the basis of the results, a simple calculation model is examined to obtain the maximum PE pipe strain. Finally, anti-seismic performance of a PE-pipeline installed in 4.6km length of Honganji water supply pipeline is calculated by numerical simulations and introduced calculation model.

**Keywords :** Pipe-in-Pipe method, PE pipe, Water Supply Pipeline, Anti-seismic Performance, Response Analysis, Honganji

## 1. はじめに

### (1) 本願寺水道

本願寺水道とは、明治時代に東本願寺を火災から守るために布設された管路である(図1)。京都市の蹴上から琵琶湖疏水を水源として、約4.6kmの配水管路が布設され、蹴上と東本願寺の約50mの高低差を利用し、ポンプを利用することなく水圧を得ることができ、災害時に電力供給が停止しても東本願寺を火災から守るための放水を行うことが出来る施設である。これは日本初の重力式防火設備であり、その近代歴史遺産としての価値は高い。しかし、配管に使用されたφ300mm フランス製铸铁管は、現在では腐食・老朽化が進み漏水が生じることから、本管路への水供給は停止されている。

近代歴史遺産としての価値が高い本願寺水道を更生し、その機能を回復することは、歴史的遺産価値のある同管路を後世に残すことはもとより、地震時における東本願寺防火施設のバックアップ施設としての活用を可能とする。さらに、同管路から分岐管路を新設することで、本願寺水道周辺の木造家屋密集地域に対して、地



図1. 本願寺水道

震時火災に対応した消火施設を配置することが可能性と考えられ、近隣地域の防災への寄与も期待される。

## (2) PE管Pipe-in-Pipe工法

我が国における上水道基幹管路の耐震化率は、平成 21 年度で約 30.8%と低い状況にある。その一方で、高度経済成長に布設された管路が更新時期を迎えるなど、管路更新事業の発生が多く見込まれており、これらの管路を更新する際に耐震性の高い管路を採用することが、管路の耐震化を推進するにあたり重要である。

こうした背景の中、近年老朽化した管路の更新工法として、「Pipe-in-Pipe工法」が注目されている。Pipe-in-Pipe工法とは、既設管路の一部に発進立坑を設け、発進立坑内で新管を接合しながら既設管内に順次新管を挿入施工し、既設管と新管の間にはセメントミルクを充填する工法である。「既設管」はPipe-in-Pipe工法では「外管」となり、「新管」はPipe-in-Pipe工法で挿入する「内管」となる。本工法の特徴としては、以下のような事項が挙げられる。

- ・主要道路で交通量が多いなどの理由により開削工事が困難な場合などに適用できる。
- ・既設管と新管の二重構造となり、新管が他工事等によって損傷する危険性が少ない。
- ・布設替えとは違い、道路掘削を最小限に抑えることにより工費、工期共に削減することができる。
- ・管路が輻輳する道路下に、新たに管路を埋設するスペースを確保する必要がない。
- ・開削箇所が立坑部だけであり、通常の開削工事と比べて近隣環境への負荷が少ない。
- ・挿入する新管は既設管より内径が縮小するが、管内面の粗度が低くなるため、通水能力の低下は少なく、流速を増大させることで、必要流量を確保することができる。

本工法を採用すれば、内管は外管が無くても土圧に対する十分な強度を有する。したがって、更生を施した時点では、更生管の土圧、内水圧に対する強度は既設管布設時と同等以上に復元される。しかし、その一方で、耐震性能については更生後の管路が既設管布設時と同等以上の機能を保持していることが十分に確認されていないのが現状である。

## (3) 本研究の目的と概要

本研究では、(2)節で述べた PE 管 Pipe-in-Pipe 工法を、本願寺水道の更生に適用した場合の同管路の耐震性能を評価することを目的としている。Pipe-in-Pipe 工法のように、既設管内に新管を挿入する更生工法を施した場合の耐震性能を評価する設計計算法については、現状では十分に確立されていない。更生工法の普及が比較的進んでいる下水道では、内管が単独で土圧に対して抵抗できる「自立管」が主流であり、土圧に対する設計では外管の強度寄与を全く見込まず、内管だけが単独で土中に埋設されていると考えた設計計算を行う。この方針に従って、耐震性能の評価においても、既設管が存在せず内管が直に埋設されている状態を想定した設計計算が行われている<sup>1)</sup>。しかし、本法はあくまでも簡易的な設計に留まっている。

本願寺水道を更生し、その機能を回復させるにあたっては、下水管路に要求されるよりも高いレベルでの耐震性能の照査が必要である。なぜならば、地震時火災が生じた場合で、かつ東本願寺が現有する消火施設のポンプに動作不良が生じるという非常時において、そのバックアップ施設として機能しなければならず、かつ本願寺水道周辺の木造住宅密集地域での初期消火活動に活用することが期待されるためである。

そこで、本研究では、下水道更生管の耐震性照査方法とは異なり、外管と内管の相互作用を考慮した上で、内管にとってより厳しい条件設定での耐震安全性の照査を目指した。検討の方法は、①まず PE 管 Pipe-in-Pipe 工法において、外管と内管の空隙に充填されるセメントモルタルと内管との間の管軸方向への摩擦抵抗力について実験的に調べた。②その結果を用いて、内管の軸方向剛性が地震時における外管の挙動に与える影響を、既設管接合部の引抜きバネ特性として見込み、地震波動を受ける場合の外管の挙動を計算し、次に得られた外管の変位分布を内管への入力として、内管に生じるひずみ分布を計算した。③次に、数値計算で得られた内管の最大ひずみを求めるための簡易計算モデルを用い、外管継手部の伸縮変位の算定値に対応した内管ひずみの計算式を提案している。④最後に、3 次元的に配管された本願寺水道に、水道施設耐震工法指針で想定している地震波動を入力として、波動の入射角度・入射位置（入射位相）を変化させ、既設管継手部の伸縮量と内管最大ひずみを計算することで、PE 管 Pipe-in-Pipe 工法により更生された本願寺水道の耐震性能を評価した。

## 2. PE管Pipe-in-Pipe工法による更生管の基本的耐震性能の評価

### (1) PE管-充填セメントモルタル間の管軸方向摩擦抵抗力

PE管Pipe-in-Pipe工法では、既設管（外管）内に一回り口径の小さなPE管（内管）を挿入した後に、外管-内管間の空隙にセメントモルタルを充填する。これは、外管の腐食が進行した場合でも、土中に空隙生じ路面に影響を及ぼすことを防ぐ目的がある。地震時には、地盤の変位が外管に作用し、外管の変位が内管に作用する。この際、内管にはセメントモルタルとの間の摩擦抵抗力が作用する。そこで、まずこの摩擦抵抗力を実験的に把握した。

実験方法の概要を写真1に示す。ボイド管（紙製）内にPE管を挿入し、空隙をセメントモルタルで充填している。十分に硬化した状態で静的载荷重試験器に設置し、下端の鋼製円筒でモルタル端部を支持し、PE管上部に10mm/minの速度で管軸方向変位を与え、最大摩擦抵抗力を計測した。本実験では、充填モルタルとPE管との間に、管軸方向への相対変位を与えている。したがって、外管の材質や剛性が充填モルタルとPE管の間の摩擦抵抗力に影響を及ぼすことはない。

計測結果を図2に示す。実験では充填モルタルに亀裂などは生じず、計測されている荷重値は、PE管とモルタルの摩擦抵抗力である。管軸方向変位は、写真1に示す上部载荷点で計測しているため、PE管とモルタルの相対変位とモルタルから突き出しているPE管部の収縮量が含まれている。最大摩擦抵抗力は、図中の破線で示すように0.0068~0.0167N/mm<sup>2</sup>の範囲であり、最大摩擦力が生じる载荷点変位量は0.8~2.7mmであった。中低圧ガス導管耐震設計指針<sup>2)</sup>（以下「ガス指針」と称す）では、埋設管が地盤から受ける地盤拘束力（地盤から受ける摩擦抵抗力）を、管表面の滑らかさに応じて0.0098~0.0147N/mm<sup>2</sup>と設定しているが、今回の測定値は、ほぼ同等の範囲であった。したがって外管は、地盤から受ける拘束力と同等の単位面積当たりの摩擦抵抗力を内管から受けることになる。



写真1 PE管-モルタル間抵抗力測定実験

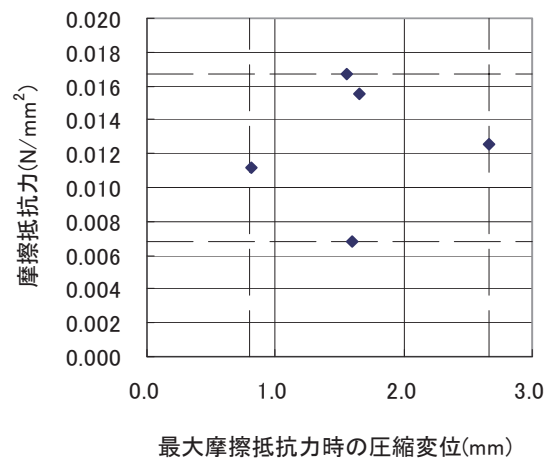


図2 最大摩擦抵抗力

### (2) 内管との摩擦抵抗を考慮した外管継手特性の設定

本願寺水道は、フランス製の鋳鉄管で構成されており、その継手構造は不明である。ただ、現在上水道用として広く使用されているダクタイル鋳鉄管のようにゴム輪を介した接合構造ではなく、写真2に例示されるような印ろう継手と呼ばれる構造であると推察される。この構造は、管の挿し口先端に麻布を巻きつけて受け口内に挿入し、麻布と受け口端部の間に鉛を充填する接続方法である。この場合、継手部を押し込む際には挿し口端部が受け口内部に衝突するが、引抜く場合には抵抗力は低いと考えられる。さらに、

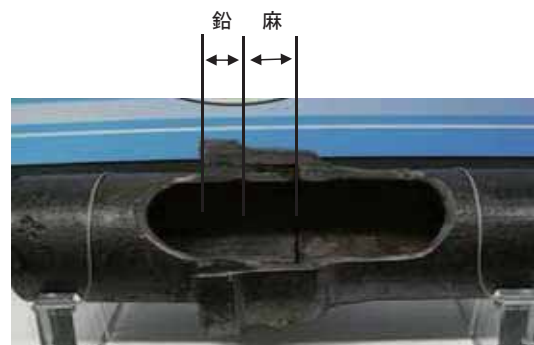


写真2 印ろう継手の構造

本願寺水道の場合、布設後の経過年数が長いため麻布が劣化し、引抜き抵抗力はさらに低くなっていると考えられる。

そこで、PE管Pipe-in-Pipe工法で更生した本願寺水道管路の継手部引抜き抵抗は、内管と充填モルタルとの摩擦抵抗により発現すると仮定した。充填モルタルから内管であるPE管を引抜く際の抵抗力和引抜き変位の関係は、ガス指針に準拠し、図3のように模式化される。外管継手部の伸び出し量は、 $2\delta$ に相当する。図中の諸量の関係はガス指針より、式(1)で与えられる。

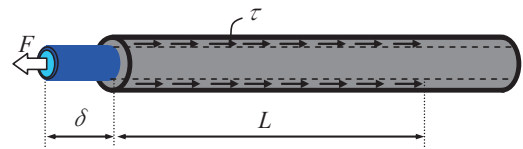


図3 内管引抜き時の抵抗力モデル

$$2\delta = \frac{F^2}{\pi \cdot D \cdot \tau \cdot A \cdot E} \quad (1)$$

ここで、 $D$ ：内管の外径、 $A$ ：内管の断面積、 $E$ ：内管の弾性係数である。呼び径 $\phi 300\text{mm}$ の鋳鉄管内に設置する内管として、本研究では単独管として埋設された状態での耐震性能が確認されている日本水道協会(JWWA)規格の呼び径 $\phi 200\text{mm}$ PE管( $D=250\text{mm}$ 、 $A=16209.7\text{mm}^2$ 、 $E=1000\text{N/mm}^2$ )を対象とする。本条件で(1)式より得られる $2\delta$ (継手引抜き量) -  $F$ (抵抗力)関係と、それをバイリニア近似した継手引張り特性を図4(a)に示す。周面摩擦力： $\tau$ については、内管が外管内に真直ぐに設置されないことを考慮するために、ガス指針の分岐や継手張り出しのある場合の地盤拘束力の割り増し係数を採用し、図2の実験値の最大値を2倍した値： $0.0334\text{N/mm}^2$ を採用した。外管の継手が離脱する場合、充填モルタルが抵抗すると考えられるが、本工法で採用している充填モルタルは強度が期待されているものではなく、引張り強度は極めて低い。したがって、その抵抗力に関しては無視している。

継手押し込み特性については、 $0.5\text{mm}$ の押し込みで挿し口が受け口内に衝突すると考え、同図(b)のように設定した。曲げ特性については不明であるため、NTTの鋳鉄管継手の特性<sup>3)</sup>を参考に同図(c)のように仮定した。

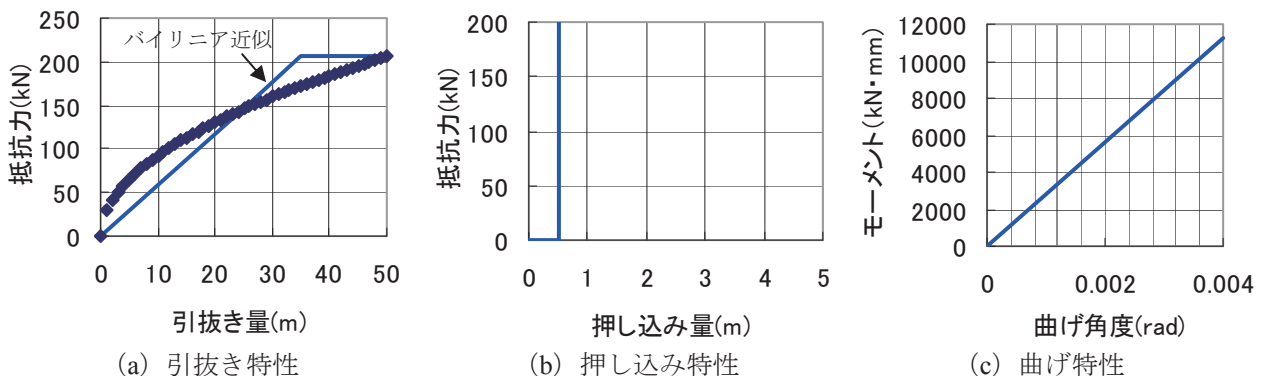


図4 内管がある場合の本願寺水道継手特性の設定

### (3) 地震波動を受ける外管と内管の挙動解析

図4に示す継手特性を有する鋳鉄管(外管)が地震波動を受ける挙動を解析し、管路の変位分布を算出する。次に、得られた外管変位を入力として、充填モルタル-内管間の摩擦抵抗を考慮した解析により内管のひずみ分布を算出する。

#### a) 地震波動の設定

水道施設耐震工法指針<sup>4)</sup>(以下「水道指針」と称す)では、管軸(地表面)に対して $45$ 度の入射角を有する正弦波を地震波動として想定している。その波長と振幅は、表層地盤の $N$ 値と表層地盤厚により定まる。本節での解析は、外管継手の伸縮量と内管ひずみとの対応関係を調べることを目的としているため、地震波動による地盤ひずみが最大となる条件を設定した。図5は $N$ 値を $1 \sim 20$ 、表層地盤厚を $5\text{m} \sim 50\text{m}$ まで変化させて得られる地震波動の波長と地盤ひずみの関係を示している。地盤ひずみの最大は $0.62\%$ (図中□印)で、

その際の波長は100m、振幅は0.28mであった。

**b) 外管の挙動**

外管モデルの管路全長は141mとし、管路中央に最大引張りひずみが生じる位相で地盤変位を与えた。管1本の長さが不明であるので、現在の铸铁管の標準長さである5.5mに設定した。管路の両端は地盤変位がゼロとなるので、管路両端の拘束条件は地盤に固定としている。解析は、弾性床の上のり理論に基づく地中管路の挙動解析プログラムERAUL<sup>5)</sup>を用いた。

外管の変位分布を図6に、外管継手の伸縮量分布を図7に示す。管路中央の外管継手の最大伸び出し量は49.8 mmであった。

**c) 内管の挙動**

図6、図7のように得られた外管変位を入力として、内管へのひずみ分布を算出した。充填モルタル-内管間の相互作用を表す地盤ばねについては、最大拘束力（最大摩擦力）を中低圧ガス導管耐震設計指針で規定される管路-地盤間の標準地盤拘束力（0.0098N/mm<sup>2</sup>）を基準に、その0.5倍、1.0倍、2.0倍および5.0倍と変化させ、これをパラメータとしたひずみ分布を算出した。この時、充填モルタルと外管の間には相対変位が生じないものと考えている。これは、腐食した外管内面に対する充填モルタルの物理的な固着力が高いと考えられるためである。外管継手部が離脱する場合、モルタルには継手部で引張り破壊が生じ分離する。

内管ひずみ分布を図8に示す。地盤ひずみは前述のように0.62%である。PE管が直接地盤に埋設されていた場合、管路ひずみの最大値は地盤ひずみ以下となる。本解析の結果、充填モルタル-内管間の摩擦力が標準地盤拘束力の5.0倍を超えると、内管のひずみは直に埋設された状態よりも高くなっている。

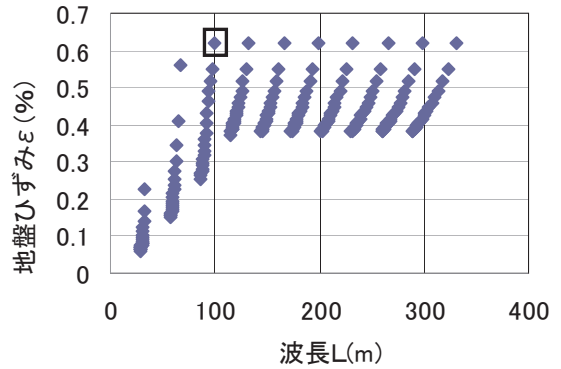


図5 地震波動の設定

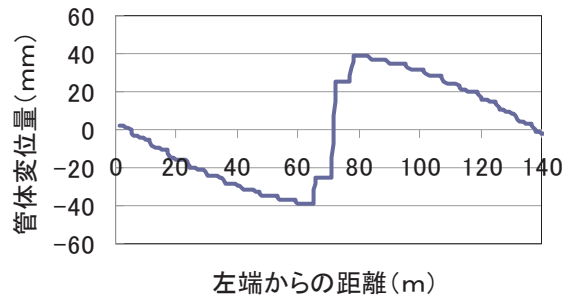


図6 外管の変位分布

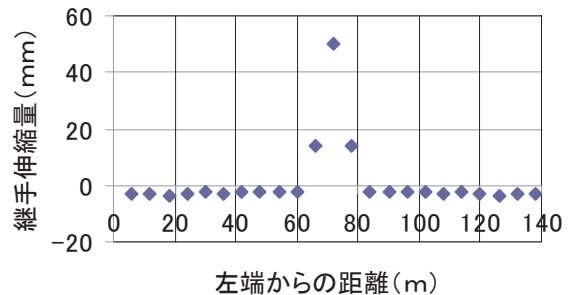


図7 外管継手の伸縮量分布

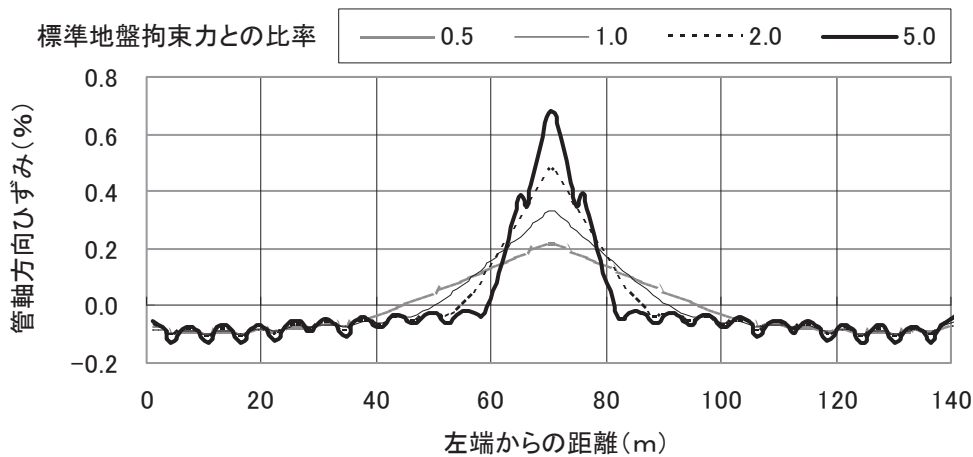


図8 内管管軸方向ひずみ分布

### 3. 内管最大ひずみの簡易算定式

図8に示すように、内管のひずみは外管継手の伸縮量により定まり、またその量は充填モルタル—内管間の最大摩擦抵抗力により変化する。地震波動を受ける外管継手の伸縮量については、地震波動による地盤ひずみが算定された場合、数値解析を用いなくとも、直線管路であれば下水道施設の耐震対策指針と解説<sup>6)</sup>に示される式 (2) により、簡易的に算出することが可能である。

$$\delta = \varepsilon \cdot L \quad (2)$$

ここで、 $\delta$ ：継手伸縮量、 $\varepsilon$ ：地盤ひずみ、 $L$ ：管1本の長さである。

そこで、本章では外管継手の伸縮量から内管最大ひずみを概略的に算出する計算モデルを検討する。

#### (1) 内管最大ひずみの簡易計算モデル

外管の継手の伸縮に対する内管の挙動については、地割れを対象としたガス指針の考え方を基準にし、図9のようにモデル化することができる。図中の $\delta$ ：外管継手の伸縮量、 $\tau$ ：充填モルタルと内管間の摩擦抵抗力、 $L_p$ ：摩擦抵抗力の伝達範囲および $\varepsilon_{max}$ ：内管最大ひずみである。本モデルから、 $\varepsilon_{max}$ の算出式が式(3)のように得られる。

$$\varepsilon_{max}^2 = \frac{\delta \cdot \tau \cdot \pi \cdot D}{EA} \quad (3)$$

ここで、 $D$ ：内管の外径、 $A$ ：内管の断面積、 $E$ ：内管の弾性係数、 $\delta$ 、 $\tau$ ：前述のとおりである。

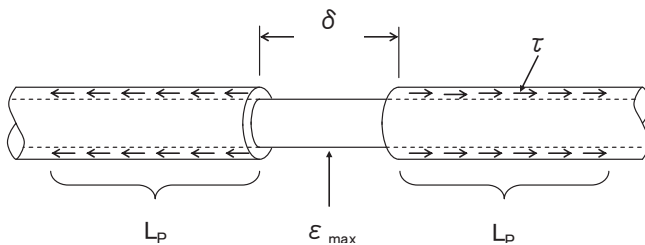


図9 内管ひずみの計算モデル

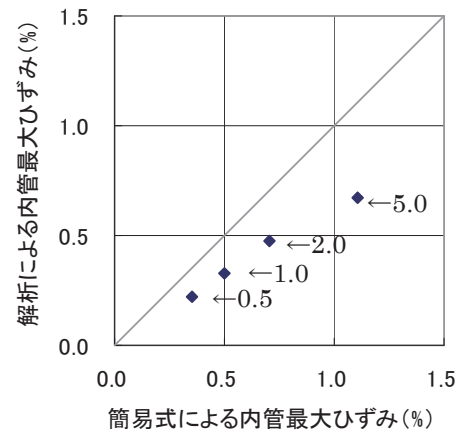


図10 内管最大ひずみの計算値

#### (2) 内管最大ひずみの簡易計算式の妥当性検証

図10は、2章(3)で示した詳細解析による内管最大ひずみと、式(3)を用いて外管継手の伸縮量から算定した内管最大ひずみを比較している。図中の数値は、充填モルタルと内管間の摩擦抵抗力( $\tau$ )の標準地盤拘束力(0.0098N/mm<sup>2</sup>)に対する比率である。2章で述べた実験の結果、 $\tau$ は0.0068~0.0167N/mm<sup>2</sup>の範囲であった。内管が外管内に真直ぐに設置されないことを考慮し、ガス指針の管路に分岐がありかつ継手部に張出し部がある場合の地盤拘束力の割り増し係数2を考慮しても、上記の比率は3.4である。この条件では、式(3)による内管ひずみの簡易推定値は解析値の1.5倍程度となり、大きめの値を与え過小な値を算出することがなく、簡易的な推定式としては妥当であると考えられる。

### 4. 本願寺水道鑄鉄管路の応答解析と内管の安全性照査

本章では、4.6kmにわたる本願寺水道3次元配管モデル化し、ERAULを用いた数値により外管である鑄鉄管継手の伸縮量を算定する。次に、(3)式により内管であるPE管の最大ひずみを算出し、PE管の許容ひず

みと比較することでその安全性を評価する。

### (1) 入力地震波動の設定

地震波動については、本願寺水道が通る五条大橋付近3地点のボーリングデータ(図11)をもとに、水道指針に準拠して波長と振幅を定めた。

計算の結果、地盤の固有周期：1.64(s)、波長：156.1(m)、変位振幅(レベル2地震動)：33.25(cm)および地盤歪み：0.67(%)となった。なお、当該地域は一様地盤であると考え、地盤の不均一度係数は考慮していない。

### (2) 外管のモデル化

本願寺水道の3次元配管モデルを図12に示す。図の縦軸は東本願寺からの高さを示している。本管路内に5.5mごとに、図4に特性を示した継手を配置している。上記の地震波動は、図12のx軸を基軸として、入射角を0度～180度まで45度間隔で変化させた。また、入射波の位相については東本願寺の節点を1とし、節点番号を蹴上に向けて順次増加させている。これらの節点1～節点11まで地震波動の入射位置を移動させることで、管路に対する入力位相を変化させている。節点1～節点11の間隔は60.5mである。

### (3) 外管継手の伸縮量と内管の最大ひずみ

図13は、地震波動の入射節点毎の最大継手伸縮量を示している。外管継手の最大伸び出し量は49mmである。入力している地震波動による地盤ひずみは0.67%であり、管1本の長さが5.5mであることから、直線管路であれば継手伸び出し量の最大値は36.85mmとなる。本願寺水道は多くの屈曲部を有するが、屈曲部近傍では入射波と管路の方向が直角の場合その管路には変位が生じず、それに直角に接続され、地震波動の入射方向に近い角度を持つ管路との間に地盤ひずみの集中が生じる。波動の入射角に応じて外管継手伸縮量の分布は変化するが、基本的には管路屈曲部で伸び出し量が高くなる。

図14は、地震波動の入射節点毎の内管ひずみを示している。内管の最大ひずみは、2章(3)で示した数値解析を3次元配管で実施することが実用的でないために、本論で提案する(3)式で簡易的に算定した。充填モルタルと内管間の摩擦抵抗力 $\tau$ は、外管内に真直ぐに配管されない条件を考慮すべく、ガス指針の最大割り増し係数2を考慮して、実測最大値の2倍の0.0334N/mm<sup>2</sup>とした。その結果、内管である呼び径 $\phi$ 200mmPE管の最大ひずみは1.2%となった。下水道用更生管の耐震設計法に準拠し、PE管が直に埋設された状態での直線配管の管体ひずみは地盤ひずみ0.67%以内である。本法による計算値はその約2倍の結果を与えている。



図11 五条大橋付近のボーリング図

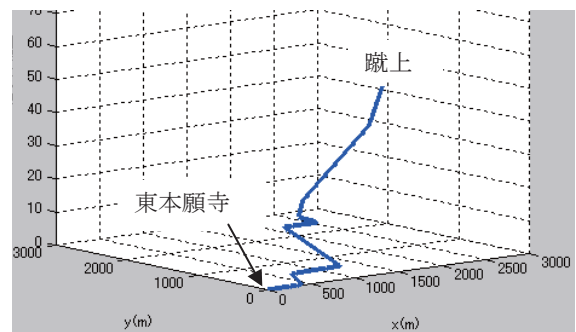


図12 本願寺水道の3次元モデル

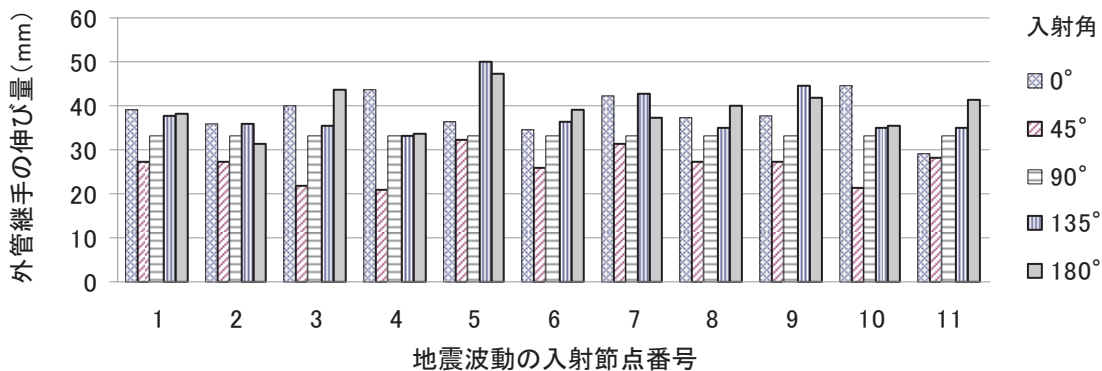


図13 地震波動の入射位置・入射角度と外管継手伸びだし量の関係

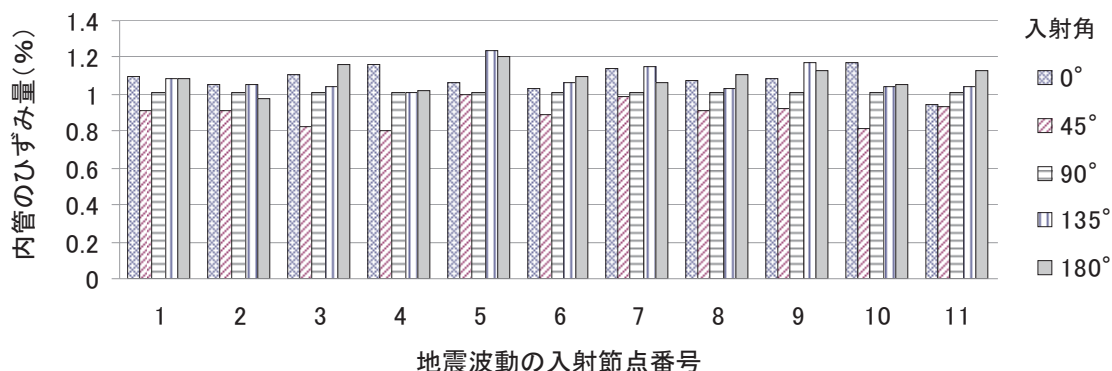


図14 地震波動の入射位置・入射角度と内管ひずみ量の関係

下水道用更生管では、外管の存在を無視しており、また3次元的配管を考慮していない。本論で用いた計算法は、これらの条件を勘案しているため、高い内管ひずみを算出している。しかしながら、PE管の許容ひずみはレベル2地震動対応で6.0%であり、これと比較すると本願寺水道をPE管Pipe-in-Pipe工法で更生した場合の内管は、十分な耐震性を有していることが明らかとなった。

## 5. まとめ

本稿では、近代歴史遺産としての価値が高くその保存が望まれ、また機能を回復することにより東本願寺・防災消火施設のバックアップ施設としての機能が期待される本願寺水道を対象として、これをPE管Pipe-in-Pipe工法で更生した場合耐震性能について検討した。得られた結果を以下に要約する。

- ① 充填モルタル内管間の摩擦抵抗力特性を外管継手の伸び抵抗特性として与えることで、内管の存在を考慮した外管の地震時応答計算を行った。
- ② Pipe-in-Pipe工法での外管の応答を求めれば、内管の最大ひずみを簡易的に算定することが出来る計算モデルを提案した。本モデルによる計算値は、直線管路を対象とした解析値に対してやや高めひずみ値を算出するため、簡易的な耐震判断には十分に適用できると考える。
- ③ 本願寺水道の応答解析を行い、その結果として得られた鋳鉄管継手部の伸縮量から、Pipe-in-Pipe工法で施工された内管（PE管）の最大ひずみを、本稿で提案する簡易計算式により算定した。その結果、最大ひずみは1.2%程度であり、レベル2地震動を対象としたPE管の許容ひずみ6.0%を下回り、十分な耐震安全性を有することが検証された。

## 参考文献

- 1) 社団法人日本下水道協会：管きょ更生工法における設計・施工管理ガイドライン（案），20011.
- 2) 社団法人日本ガス協会：中低圧ガス導管耐震設計指針，2004.
- 3) 財団法人地震予知総合研究振興会：地下構造物の地盤変状対策に関する調査研究，1987.
- 4) 社団法人日本下水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，2009.
- 5) 高田至郎：ライフライン地震工学、共立出版株式会社、1991.
- 6) 社団法人日本下水道協会：下水道施設の耐震対策指針と開設、2006.