

## 合理的な下水道複合管耐震設計手法のための研究

### Study for Rational Seismic Design Method of Composite Sewage Pipe

鍬田 泰子 江角 勇貴

Yasuko Kuwata Yuki Esumi

#### 1. はじめに

わが国の下水道施設は1970年代に急速に整備されたため、2020年以降急激に耐用年数50年を超える管路が増大することが見込まれ<sup>1)</sup>、老朽化施設の維持管理の面からも下水道施設の早急な改良・更新が求められている。その改良方法の一つとして下水道の分野では非開削で管路内部を改良させる更生工法<sup>2)</sup>が着目されている。しかし、我が国の地震発生頻度や地震動のレベルからみて、これらの改良・更新に合わせて耐震性能の向上を併せ持つことが有効な地震対策につながる。2008年には現行の下水道施設の耐震設計指針である「下水道施設耐震計算例―管路施設編―」<sup>3)</sup>や「下水道施設の耐震対策指針と解説 2006年度版」<sup>4)</sup>に準拠し、最新の知見や実施可能な検証方法を整理した、(社)日本下水道協会から「管きよ更生工法の耐震設計の考え方(案)と計算例」<sup>5)</sup>(以下、ガイドラインと呼ぶ)が発行された。これは一般的な更生工法の耐震設計法を記したもので、種々の材料や形成方法が異なる個々の工法に適用するには、それぞれの工法について実験や解析で多くの知見を蓄積して、より合理的な耐震設計法が必要とされている。そのため、各工法で構造特性を明らかにするための実験や解析が行われている<sup>6),7)</sup>。

本研究は口径800mm以上の中大口径既設管を対象とした更生管である複合管を研究対象としている。複合管とは、既設管内に硬質塩化ビニル製の管体を新たに形成し、既設管と硬質塩化ビニル管との空隙に充填材を注入して一体化させた構造物である。著者らは、この構造特性を明らかにするために要素実験を実施し、ガイドラインに従って更生管きよの鉛直断面の耐震性を評価してきた<sup>8)</sup>。しかし、複雑な構造物でありながら等価な一層の管路として評価する方法や、大口径管であるために相対変位の影響が出てくると考えられる周面せん断力の欠如、曲げ耐力のみの照査方法など、現行のガイドラインには複合管の耐震設計を行う上で多くの課題が残されている。とくに、シールドトンネルのように比較的中～大口径の管きよでは、外周面に沿って作用する周面せん断力の影響が懸念されるので、鉛直断面の計算に取り入れた方がよいとも記されている<sup>9)</sup>。そこで、本稿では、構造解析モデルや外力条件、照査方法で検討されていない項目が耐震設計時に与える影響について定量的に明らかにするため、著者らの既往研究<sup>8)</sup>を発展させて下水道複合管の地震応答解析を行う。そして、種々の更生工法がある中で、中大口径の複合管に適した合理的な耐震設計方法について明らかにすることを目的としている。

#### 2. 下水道複合管鉛直断面の耐震性評価法の検討項目

##### 2.1 ガイドラインの規定事項

下水道複合管の耐震性の評価法を検討するにあたり、現行のガイドラインの内容を整理し、本研究の検討事項を示す。ガイドライン<sup>5)</sup>では、管きよ本体には管の材質に応じた破壊耐力について照査することが検討項目に挙げられている。また、安全照査に用いる複合管の性能は、レベル1地震動(以下、L1地震動)については使用限界状態設計法または許容応力度法、レベル2地震動(以下、L2地震動)については終局限界状態設計法とすることが規定されている。管本体の設計方法は、既設管の呼び径ごとに区分されており、呼び径が $\phi 800\text{mm}$ 未満の場合は、地震時の応答が軸方向に影響



3. 解析モデルと解析条件

3. 1 管きよのモデル化

3. 1. 1 管路の諸元

本研究では上述の通り、φ1350mmのヒューム管を管きよ更生工法により更新した複合管を対象としている。対象とする管きよ（既設管ならびに更生部材）の寸法ならびに使用材料の特性値は、拙著論文<sup>8)</sup>の条件と同じとする。更生部材の特性値については、充填材料特性試験の結果に基づいて充填材の種類をA～Cで設定を行う。

充填材の種類 A～C は、充填材の設計圧縮強度をそれぞれ 10 N/mm<sup>2</sup>、20 N/mm<sup>2</sup>（通常施工の充填材を想定）、40 N/mm<sup>2</sup>と設定して得られた実験結果の値を用いる。それぞれの圧縮強度、静弾性係数、割裂引張強度、せん断付着強度、引張付着強度を測定した結果のまとめを表-3. 1に示す。基盤コンクリートの粗度係数推定結果より解析に用いるせん断付着強度・引張付着強度は粗面の値とした。

当解析で用いる応答変位法を用いた地中管路の横断方向の擬似静的解析モデルを図-3. 1と図-3. 2に示す。ガイドライン<sup>5)</sup>に則し、既設管と充填材を合わせた特性をもつ一層のはりとして設定した等価一層はりモデルを図-3. 1に示す。管路をはり要素とし、地盤との相互作用は法線方向と接線方向について弾性床の上はり理論に基づく分布ばねで評価した。次に二層モデルを図-3. 2に示す。既設管と更生管を別々のはり要素として与え、その接合面をジョイント要素で接続したモデルに、一層モデルと同様の地盤ばねを配したものとする。

解析モデルは円形断面を48分割したものとする。等価一層はりのモデルでは、管頂部から時計回りに節点番号1～48でモデル化を行った。また、二層モデルでは、管頂部から時計まわりに節点番号1～48が既設管、49～96が充填材と設定した。尚、二層モデルの管頂部（節点番号49-52、94-96）には充填材を注入するために配した付属部材（スペーサー）が存在していると仮定してモデル化を行った。

表-3. 1 充填材の実験結果<sup>8)</sup>

試験項目	充填材種類					
	A : 10N/mm <sup>2</sup>		B : 20N/mm <sup>2</sup>		C : 40N/mm <sup>2</sup>	
圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	11.2		35.6		58.5	
静弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	3,788		9,370		14,875	
割裂引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	0.78		1.34		2.65	
せん断付着強度 (N/mm <sup>2</sup> )	滑	粗	滑	粗	滑	粗
	0.39	0.64	0.34	3.42	0.31	4.12
引張付着強度 (N/mm <sup>2</sup> )	滑	粗	滑	粗	滑	粗
	1.25	0.66	1.5	3.43	※	1.77

注) ※：付着破断する前に材料が破断したため実験値が欠損している。

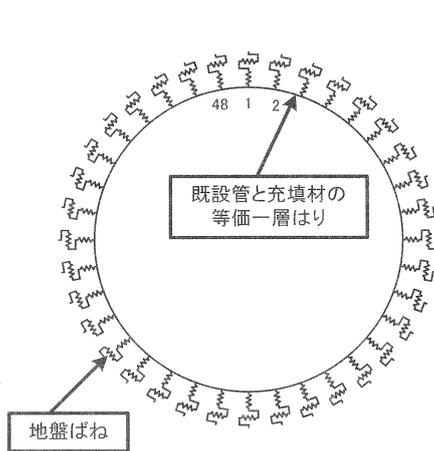


図-3. 1 等価一層はりモデル

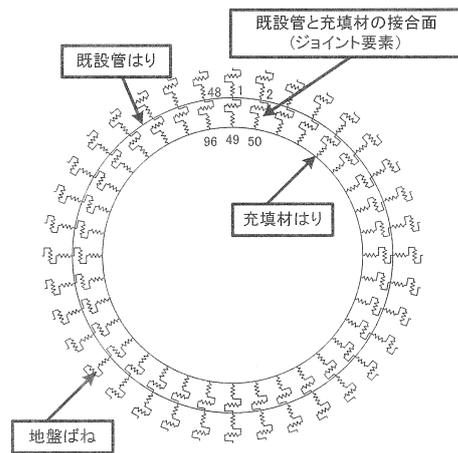


図-3. 2 二層はりジョイントモデル

3. 1. 2 はり要素のモデル化

等価一層の解析モデルは、既設管と充填材（スペーサー）を一体構造と仮定する等価一層はりモデルとする。等価一層はりの軸線は既設管の軸線に沿って配置する。はり特性の算出方法は以下の式によるものとする。

$$A_{eq} = B_0 \cdot t + B_b \cdot t_b \tag{1}$$

$$I_{eq} = \frac{1}{3} \{ B_0 \cdot e^3 - (B_0 - B_b)(e - t)^3 + B_b \cdot (H - e)^3 \} \tag{2}$$

$$e = \frac{1}{2} \times \frac{B_b \cdot H^2 + (B_0 - B_b) \cdot t^2}{B_b \cdot H + (B_0 - B_b) \cdot t} \quad (3)$$

ここに、 $A_{eq}$ ：断面積、 $I_{eq}$ ：断面2次モーメント、 $B_0$ ：既設管の幅、 $t$ ：既設管の断面厚、 $t_b$ ：充填材の断面厚、 $B_b$ ：充填材の換算幅で、次式により求める。

$$B_b = B_0 \cdot \frac{E_b}{E_c} \quad (4)$$

ここで、 $E_c$ ：既設管コンクリートのヤング率、 $E_b$ ：充填材のヤング率、 $e$ ：既設管外面から断面図心までの距離

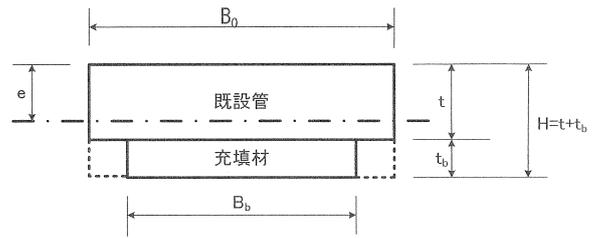


図-3.3 等価一層はりモデル要素概念図

二層モデルについては、既設管はりと同充填材はりの鉄筋コンクリート断面部分は、コンクリートのひび割れ、軸方向鉄筋の降伏、かぶりコンクリートの剥離等による影響を考慮し、曲げモーメントと曲率の関係をトリリニアモデルで非線形性を表現する。また、充填材はりの無筋断面部分は、はり要素の曲げモーメントと曲率の関係をひび割れ発生時を折れ点とするバイリニアモデルで表現する。

なお、鉄筋コンクリート断面のひび割れ曲げモーメント  $M_c$  とその曲率  $\varphi_c$  は、次式により求める。

$$M_c = (f_{td} + \frac{N_d}{A})W \quad (5)$$

$$\varphi_c = \frac{M_c}{E_c I} \quad (6)$$

ここに、 $f_{td}$ ：コンクリートの引張強度、 $N_d$ ：断面に作用する軸力、 $A$ ：軸方向鉄筋を考慮した断面積、 $W$ ：軸方向鉄筋を考慮した断面係数、 $E_c$ ：コンクリートのヤング係数、 $I$ ：軸方向鉄筋を考慮した断面2次モーメント

鉄筋コンクリート断面の初降伏耐力  $M_y$  とその曲率  $\varphi_y$  は、断面の最も外側に配置された軸方向引張鋼材の図心位置における応力度が図-3.4に示す降伏応力度  $f_{yd}$  に達した時の曲げモーメントと曲率とし以下の三つの仮定に基づいて算定する。維ひずみは、中立軸からの距離に比例する。コンクリートの引張応力は無視する。コンクリートの圧縮応力度の分布は三角形分布（維ひずみに比例）とする（図-3.5）。

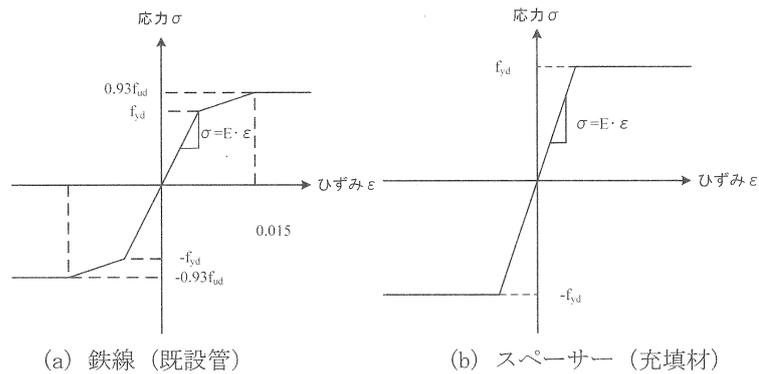


図-3.4 鋼材の応力-ひずみ曲線

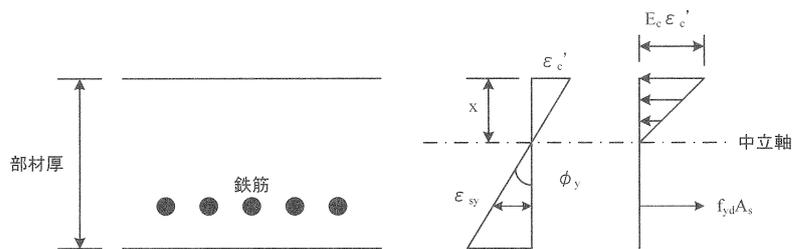


図-3.5 初降伏時のひずみ分布と力のつり合いモデル概念図

鉄筋コンクリート断面の曲げ耐力  $M_u$  と曲率  $\phi_u$  は、断面の圧縮縁におけるコンクリートのひずみが終局ひずみ  $\varepsilon'_{cu}$  に達した時の曲げモーメントと曲率とし、以下の4点の仮定に基づいて算定する。維ひずみは、中立軸からの距離に比例する。コンクリートの引張応力は無視する。鋼材の応力-ひずみ曲線は図-3.6の通りとする。また、コンクリートの圧縮応力度の分布は長方形分布（等価応力ブロック）とする。

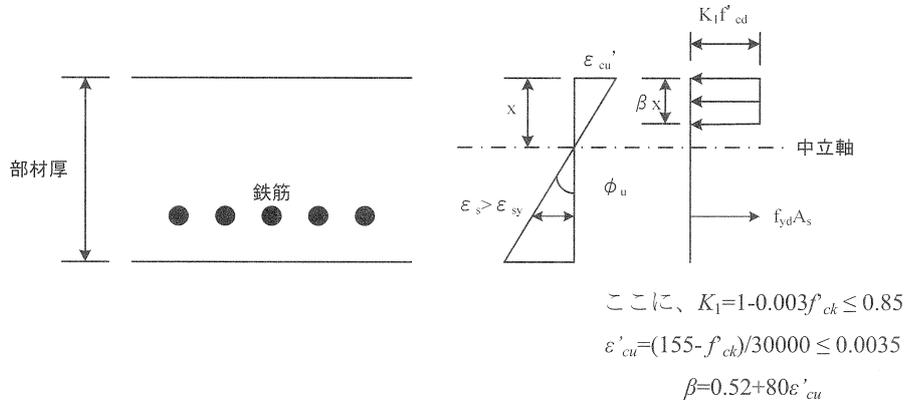


図-3.6 曲げ耐力時のひずみ分布と力のつり合いモデル概念図

### 3.1.3 既設管はりと充填材はりの接合面のモデル化

複合管が二層モデルである場合、既設管はりと充填材はりの接合面はジョイント要素により表現する。ジョイント要素の力学特性モデルを図-3.7に示す。ジョイント要素の材料パラメータは、表-3.1で示した充填材料特性試験の結果に基づいて設定する。界面に垂直な方向の強度は、圧縮側は無限大とし、引張側は最初に剥離強度に到達したとき以降は引張力に抵抗しないものとする。一方、界面に沿った方向のせん断強度は、次式により表現する。

$$\tau_f = C - \mu \cdot \sigma_n \quad (7)$$

ここに、 $\tau_f$ : せん断強度、 $C$ : 付着強度、 $\mu$ : 摩擦係数で、0.6 とする。 $\sigma_n$ : 界面に垂直な方向の直応力度で、引張応力度を正符号とする。

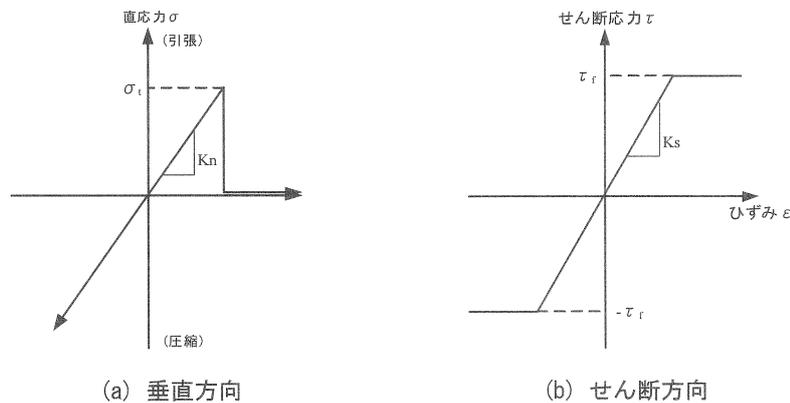


図-3.7 ジョイント要素の力学特性モデル

## 3.2 管きよの埋設環境と外力条件

### 3.2.1 地盤条件

複合管の耐震性を検討するにあたり、ガイドライン<sup>5)</sup>の設計例に用いられている地盤条件を参考にする。管路の埋設条件は耐震設計上の基盤層までが24.7m、管頂部の土被りは2.0mとする。地盤の各層の詳細は拙著論文<sup>8)</sup>と同じとする。

### 3.2.2 作用外力

設計外力は基本的にはガイドライン<sup>5)</sup>に即して設定するが、本研究では実際の埋設状況を考慮した外力条件での挙動についても検討を行うため、以下に示すような設計外力の設定を行う。

常時荷重には、自重  $W$ 、鉛直土圧  $P_v$ 、水平土圧  $P_h$ 、底面地盤反力  $P_r$ 、活荷重による鉛直土圧  $P_{t+i}$  の 5 つの荷重があり、フレームモデルを主とする解析においては図-3. 8 に示すように荷重を作用させる。ガイドライン<sup>5)</sup>では活荷重による鉛直土圧を除く 4 つの荷重を作用させ検討するように定められているが、本検討においては実際の埋設状況を考慮して、活荷重による鉛直土圧を常時荷重照査時に作用させ、その影響について分析する。前者の 4 つの荷重の算出方法については、拙著論文<sup>8)</sup>で示している。

活荷重による鉛直土圧は、次式により算定する。

$$P_{t+i} = \frac{2P(1+i)}{l(0.2+2H_p \tan \theta)} \cdot \beta \quad (8)$$

ここに、 $P_{t+i}$ : 活荷重による鉛直土圧 (kN/m<sup>2</sup>)、 $H_p$ : 土被り厚 (m)、 $i$ : 衝撃係数、 $P$ : 輪荷重 (kN)、 $l$ : 車両占有幅 (m)、 $\theta$ : 活荷重の分散角で、 $\theta=45^\circ$  とする。 $\beta$ : 断面力の低減係数で、 $\beta=0.9$  とする。

地震時増分荷重には、地盤変位による地震水平力、慣性力、周面せん断力の 3 つの荷重がある。このうち、周面せん断力はガイドライン<sup>5)</sup>において、その適用条件の設定への検討が十分でないことから、現段階で考慮しないと定められているが、本検討においては実際の埋設状況を考慮して、周面せん断力を地震時の検討時に作用させ、その影響について分析する。地震水平力の算出方法は拙著論文<sup>8)</sup>で示す通りである。慣性力と周面せん断力の算出方法は以下の通りである。

$$F_e = \sum W_{di} \cdot K_{hf}(1-0.015z_i) \quad \text{ただし、}(1-0.015z_i) \geq 0.5 \quad (9)$$

ここに、 $F_e$ : 既設管及び充填材の慣性力 (kN/m)、 $W_{di}$ :  $i$  番目の要素の自重 (kN/m)、 $K_{hf}$ : 地表面における設計水平震度、 $z_i$ : 地表面から  $i$  番目の要素の中心までの深さ (m)

周面せん断力は、図-3. 8 のように斜め  $45^\circ$  の位置で作用方向が異なるものとして、下式により算定する。

$$\tau(z) = \frac{\pi}{2h} \cdot G_D \cdot U_{hf} \cdot \sin\left(\frac{\pi z}{2h}\right) \leq c + \sigma'_n \cdot \tan \phi \quad (10)$$

ここに、 $\tau(z)$ : 地表面から深さ  $z$ (m) における周面せん断力 (kN/m<sup>2</sup>)、 $U_{hf}$ : 地表面における地震時変位振幅 (m)、 $h$ : 表層地盤の層厚 (m)、 $G_D$ : 地盤の動的せん断弾性係数 (kN/m<sup>2</sup>) で、式 (11) により算定する。 $c$ : 地盤の粘着力 (kN/m<sup>2</sup>)、 $\phi$ : 内部摩擦角 ( $^\circ$ )、 $\sigma'_n$ : 既設管外面に作用する地盤の有効直土圧 (kN/m<sup>2</sup>)

$$G_D = \frac{\gamma}{g} V_s^2 \quad (11)$$

ここに、 $\gamma$ : 地盤の単位体積重量 (kN/m<sup>3</sup>)、 $V_s$ : 地盤の地震時せん断弾性波速度 (m/s)、 $g$ : 重力加速度で、 $g=9.8$  (m/s<sup>2</sup>)

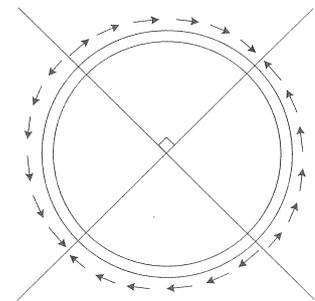


図-3. 8 周面せん断力作用図

### 3. 2. 3 性能照査方法

#### (a) 安全係数

照査及び限界値の算定に用いる安全係数を表-3. 2 に示す。各係数の設定理由を示す。材料係数は、材料強度のばらつきのうち、材料強度の特性値  $f_k$  を設定することにより考慮される不確定要因以外の要因 (材料実験データからばらつきを判断できない要因) を考慮するための係数であり、材料ごとに設定する。部材係数は、設計断面耐力の算定で考慮する安全係数であり、複合構造として不健全な既設管きよ部材も含めて評価する更生管きよであることを考慮し、安全側となる 1.3 を適用する。構造解析係数は設計断面力の算定で考慮する安全係数であり、線形解析を用いた断面力計算の場合には一般的に 1.0 が用いられるが、本検討で用いる非線形モデルに対しては安全側の余裕を考慮して常時荷重検討時には 1.1 を適用する。荷重係数は、地中構造物に対しては主な永久荷重である土圧に対する評価が不確定であることを考慮し、安全側を適用するのが一般的であるが、本検討では耐震設計指針に用いられている荷重の適用性について検討するため、荷重の割増は行わないこととし 1.0 を適用する。構造物係数は、構造物の重要度、および限界

状態に達した時の社会的影響、再建あるいは補修に要する費用等の経済的要因を考慮して設定される係数であり、確実度の高い更生管きよの構築を確保する意味で、常時荷重検討時には安全側の 1.1 を適用する。

表-3. 2 部分安全係数まとめ

		材料係数 $\gamma_m$		部材係数 $\gamma_b$	構造解析係数 $\gamma_a$	荷重係数 $\gamma_f$	構造物係数 $\gamma_i$
		コンクリート $\gamma_c$	鋼材 $\gamma_s$				
		常時荷重 (終局限界状態)	応答値	1.0	1.0	1.0	1.1
	限界値	1.3	1.0	1.3	-	-	-
L1地震時 (使用限界状態)	応答値	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	限界値	1.0	1.0	1.0	-	-	-
L2地震時 (終局限界状態)	応答値	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	限界値	1.3	1.0	1.3	-	-	-

#### (b) 照査方法

本研究では、常時検討時、地震時検討時ともに限界状態設計法を用いて耐震設計を行うため、以下に示す手法で耐震性能照査を行う。なお、ガイドライン<sup>5)</sup>では、L2地震動に対して曲げモーメントに対する照査のみが行われているが、本研究では、せん断力に対する照査も加え、複合管の耐震性能について合理的な評価を行う。

##### a) 曲げに対する照査

曲げモーメント及び曲げモーメントと軸力を受ける RC 断面部材の安全性と耐震性の照査は、下式により判定する。

$$\gamma_i \cdot \frac{S_d}{R_d} \leq 1.0 \quad (12)$$

$$S_d = \gamma_a \cdot S \quad (13)$$

$$R_d = \frac{R}{\gamma_b} \quad (14)$$

ここに、 $S_d$ ：設計応答値、 $R_d$ ：設計限界値、 $S$ ：部材（要素）の応答値で、要素中央位置の曲げモーメントとする。 $R$ ：部材（要素）の限界値で、解析に用いた M- $\phi$  関係における曲げ耐力、初降伏曲げ耐力とする。なお、常時及び L2 地震時は、曲げ耐力  $M_u$ 、L1 地震時は初降伏曲げ耐力  $M_{y0}$ 、 $\gamma_i$ ：構造物係数、 $\gamma_a$ ：構造解析係数、 $\gamma_b$ ：部材係数

##### b) せん断に対する照査

RC 部材のせん断に対する照査は、下式により判定する。

$$\gamma_i \cdot \frac{V_d}{V_{yd}} \leq 1.0 \quad (15)$$

$$V_d = \gamma_a \cdot V \quad (16)$$

ここに、 $V_d$ ：設計せん断力、 $V_{yd}$ ：せん断耐力の限界値（設計せん断耐力）、 $V$ ：部材（要素）のせん断力で要素中央位置におけるせん断力とする、 $\gamma_i$ ：構造物係数、 $\gamma_a$ ：構造解析係数

設計せん断耐力  $V_{yd}$  は、下式により算定する。

$$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd} \quad (17)$$

ここに、 $V_{cd}$ ：せん断補強鋼材を用いない棒部材の設計せん断耐力で以下の式による。

$$V_{cd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b \quad (18)$$

ここに、 $\beta_d = \sqrt[3]{1/d}$  ( $d$ : m) (ただし、 $\beta_d > 1.5$  となる場合は 1.5 とする。)、 $\beta_p = \sqrt[3]{100/p_w}$  (ただし、 $\beta_p > 1.5$  となる場合は 1.5 とする。)

$$p_w = A_s / (b_w \cdot d) \quad (19)$$

ここに、 $A_s$ ：引張側鋼材の断面積、 $f'_{cd}$ ：コンクリートの設計圧縮強度、 $\gamma_b$ ：部材係数

$f_{vcd} = 0.20 \sqrt[3]{f'_{cd}}$  (ただし、 $f_{vcd} \leq 0.72$  (N/mm<sup>2</sup>))、 $\beta_n$  は下式の通り。その他、 $b_w$ ：腹部の幅、 $d$ ：有効高さ

$$\beta_n = 1 + 2M_0 / M_{ud} (N'_d \geq 0) \quad \text{ただし、} \beta_n > 2 \text{ となる場合は} 2 \text{ とする。} \quad (20)$$

$$= 1 + 4M_0 / M_{ud} (N'_d \leq 0) \quad \text{ただし、} \beta_n < 0 \text{ となる場合は} 0 \text{ とする。}$$

ここに、 $N'_d$ : 設計軸方向圧縮力で、要素中央位置における軸力とする。 $M_{ud}$ : 軸方向力を考慮しない純曲げ耐力、 $M_0$ : 設計曲げモーメント  $M_d$  に対する引張縁において軸方向力によって発生する応力を打ち消すのに必要な曲げモーメント

一方、 $V_{sd}$  はせん断補強鋼材により受け持たれる設計せん断耐力で以下の式による。

$$V_{sd} = \{A_w f_{wyd} (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s) / s_s + A_{pw} \sigma_{pw} (\sin \alpha_p + \cos \alpha_p) / s_p\} \cdot z / \gamma_b \quad (21)$$

ここに、 $A_w$ : 区間  $s_s$  におけるせん断補強筋の総断面積、 $A_{pw}$ : 区間  $s_p$  におけるせん断補強用緊張材の総断面積、 $\sigma_{pw}$ : せん断補強鉄筋降伏時におけるせん断補強用緊張材の引張応力度、下式の通り。 $\alpha_s$ : せん断補強筋が部材軸となす角度、 $\alpha_p$ : せん断補強用緊張材が部材軸となす角度、 $s_s$ : せん断補強筋の配置間隔、 $s_p$ : せん断補強用緊張材の配置間隔、 $z$ : 圧縮応力の合力の作用位置から引張鋼材図心までの距離  $d/1.15$  とする。 $\gamma_b$ : 部材係数。

$$\sigma_{pw} = \sigma_{wpe} + f_{wyd} \leq f_{pyd} \quad (22)$$

ここで、 $\sigma_{wpe}$ : せん断補強用緊張材の有効引張応力度、 $f_{wyd}$ : せん断補強筋の設計降伏強度、 $f_{pyd}$ : せん断補強用緊張材の設計降伏強度

#### 4. 解析結果と考察

耐震性照査は、常時荷重および L2 地震動検討時は断面保持を性能目標とし、せん断耐力と曲げ耐力で照査を行う。L1 地震動検討時は使用性の保持を目標とし、曲げ耐力のみで照査を行う。せん断、曲げともに充填材はりの断面力は鉄筋を有する断面のみを対象とする。解析結果は、各節点の変位および断面力を出し、各節点の限界値に対する設計値の比率 (判定指標値) を用いて考察するが、本項ではケース A のケース 1-1、L2 地震動作用時のみ全節点の判定値を提示し、残りのケースについては判定指標値が最も大きく算出された節点のみを提示する。

##### 4. 1 ケース A (既設管の断面が保持されているケース) 解析結果と考察

##### 4. 1. 1 ケース 1

本項では、解析モデルの違いが耐震性能に与える影響について分析を行う。上述の通り、ケース 1-1 の L2 地震動作用時のみ全節点の照査結果を示す。ケース 1-1 の曲げに対する照査結果を表 4. 1 に、せん断に対する照査結果を表 4. 2 に示す。照査応答値が照査限界値以下の場合は判定欄に「OK」、照査限界値を上回る場合は「NG」と表記する。限界値に対する設計値の比率 (以下、判定指標値と呼ぶこととする) が最も大きい要素の枠を塗りつぶしている。せん断に対する判定指標値は 0.41、曲げに対する判定指標値は 0.40 であり、両項目とも限界値以下であり、L2 地震動に対して安全性を持つことが示された。同様にケース 1-2 についても、両項目とも限界値以下であることを確認した。

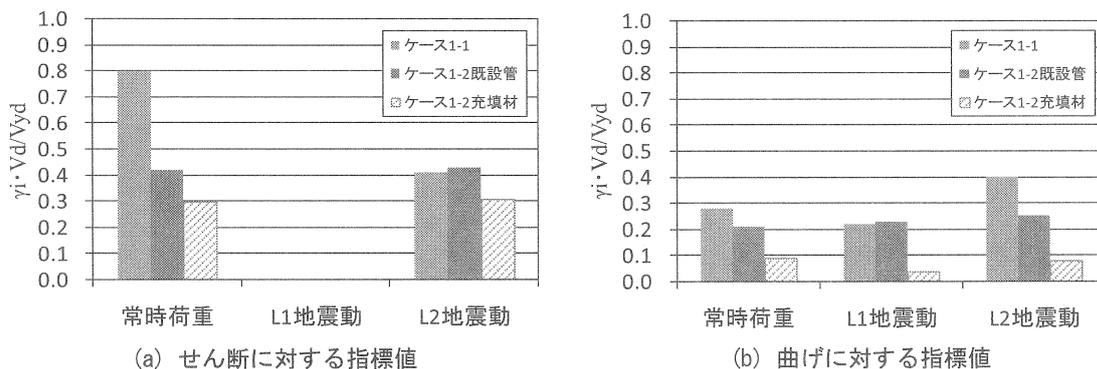
表 4. 1 曲げに対する照査 (ケース 1-1 : L2 地震動作用時)

	要素 番号	照査応答値 Sd=Md	照査限界値 Rd=M <sub>u</sub> /γ <sub>b</sub>	γ <sub>i</sub> ·Sd/Rd	判定		要素 番号	照査応答値 Sd=Md	照査限界値 Rd=M <sub>u</sub> /γ <sub>b</sub>	γ <sub>i</sub> ·Sd/Rd	判定
		kNm/m	kNm/m					kNm/m	kNm/m		
等価 一層 はり	1	2.74	24.79	0.11	OK	等価 一層 はり	...	...	...	...	...
	2	1.95	24.76	0.08	OK		39	0.47	10.49	0.05	OK
	3	1.06	23.60	0.04	OK		40	1.33	10.40	0.13	OK
	4	0.13	10.40	0.01	OK		41	2.15	10.31	0.21	OK
	5	-0.77	-26.54	0.03	OK		42	2.87	10.24	0.28	OK
	6	-1.57	-24.49	0.06	OK		43	3.47	10.19	0.34	OK
	7	-2.24	-22.22	0.10	OK		44	3.89	10.18	0.38	OK
	8	-2.70	-19.96	0.14	OK		45	4.11	10.20	0.40	OK
	9	-2.96	-17.91	0.17	OK		46	4.10	23.60	0.17	OK
	10	-2.99	-16.19	0.18	OK		47	3.85	24.23	0.16	OK
...	...	...	...	...	...	48	3.39	24.16	0.14	OK	

表一 4. 2 せん断に対する照査（ケース 1-1：L2 地震動作用時）

	要素 番号	$\beta_n$	$\beta_p$	$\beta_d$	Vcd	Vsd	設計せん断力 Vd	せん断耐力限界値 Vyd	$\gamma_i \cdot Vd/Vyd$	判定
					kN	kN	kN	kN		
等価一層はり	1	1.00	0.37	1.50	32.39	0.00	4.85	32.39	0.15	OK
	2	1.00	0.37	1.50	32.25	0.00	6.60	32.25	0.20	OK
	3	1.00	0.37	1.50	31.97	0.00	7.87	31.97	0.25	OK
	4	1.00	0.36	1.50	31.56	0.00	8.49	31.56	0.27	OK
	5	1.00	0.35	1.50	31.03	0.00	8.41	31.03	0.27	OK
	6	1.00	0.35	1.50	30.40	0.00	7.66	30.40	0.25	OK
	7	1.00	0.34	1.50	29.67	0.00	6.33	29.67	0.21	OK
	8	1.00	0.33	1.50	28.91	0.00	4.46	28.91	0.15	OK
	9	1.00	0.32	1.50	28.17	0.00	2.24	28.17	0.08	OK
	10	1.00	0.31	1.50	27.51	0.00	0.17	27.51	0.01	OK
	・	・	・	・	・	・	・	・	・	・
	・	・	・	・	・	・	・	・	・	・
	・	・	・	・	・	・	・	・	・	・
	39	1.00	0.31	1.50	27.51	0.00	11.22	27.51	0.41	OK
	40	1.00	0.32	1.50	28.17	0.00	11.48	28.17	0.41	OK
	41	1.00	0.33	1.50	28.91	0.00	11.21	28.91	0.39	OK
	42	1.00	0.34	1.50	29.67	0.00	10.37	29.67	0.35	OK
	43	1.00	0.35	1.50	30.40	0.00	8.93	30.40	0.29	OK
	44	1.00	0.35	1.50	31.03	0.00	7.09	31.03	0.23	OK
	45	1.00	0.36	1.50	31.56	0.00	4.88	31.56	0.15	OK
46	1.00	0.37	1.50	31.97	0.00	2.41	31.97	0.08	OK	
47	1.00	0.37	1.50	32.25	0.00	0.17	32.25	0.01	OK	
48	1.00	0.37	1.50	32.39	0.00	2.63	32.39	0.08	OK	

ケース 1 のせん断および曲げに対する判定指標値が最も大きい箇所（要素）を抽出し、解析ケース毎の関係を表したものを図一 4. 1 に示す。等価一層モデルであるケース 1-1 と二層モデルであるケース 1-2 を比較すると、せん断、曲げともに等価一層モデルの方が高い、もしくはほぼ同等の値が得られた。等価一層モデルは既設管と充填材を一層のはりと仮定するため、二層モデルと比べはり要素の断面積が大きくなり、断面力が高く算出されたと考えられる。等価一層モデルを採用している現行の耐震設計指針では、詳細にモデル化を行った二層モデルよりも安全側での設計が行われていることがわかる。また、せん断の判定指標値と曲げの判定指標値を比較すると概ねせん断の判定指標値が高く算出されている。とくに、曲げに対する充填材の安全余裕は十分であり、現行の耐震設計指針では行われていないせん断力に対する照査の必要性が確認された。



図一 4. 1 判定指標値の最大値（ケース 1）

#### 4. 1. 2 ケース 2

本項では、作用外力の違いが与える影響について分析を行う。ケース 1 と同様に限界値に対する設計値の比率（判定指標値）を用い、耐震性能照査を行ったが、ケース 2-1、2-2 とともに常時、地震時に安全性を有することが確認された。

ケース 2 のせん断および曲げに対する判定指標値が最も大きい箇所（要素）を抽出し、解析ケース毎の関係を表したものを図一 4. 2 に示す。ガイドライン<sup>5)</sup>に示されている荷重を与えたケース 2-1 と比べ、活荷重および周面せん断力

を新たに加えたケース 2-2 の方が、既設管、充填材ともに全てのケースで判定照査値が高くなることが確認された。埋設状況を考慮した場合には判定指標値が 2 倍程度になるケースもあり、現行の耐震設計指針で採用されている外力条件による安全余裕は大きい。また、せん断の判定指標値と曲げの判定指標値を比較した場合、ケース 1 と同様に、せん断の判定指標値が大きくなり、曲げに対する充填材の余裕が十分となる傾向が確認された。

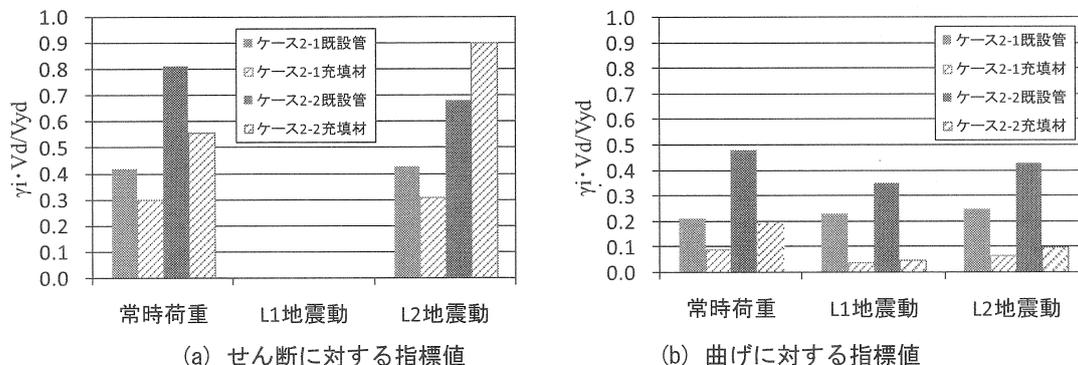


図-4. 2 判定指標値の最大値（ケース 2）

#### 4. 1. 3 ケース 3

本項では、充填材料特性値の違いによる影響を行う。ケース 1、2 と同様に限界値に対する設計値の比率（判定指標値）を用いて耐震性能照査を行ったが、ケース 3 の全ケースで常時、地震時に安全性を有することが確認された。

ケース 3 のせん断および曲げに対する判定指標値が最も大きい箇所（要素）を抽出し、解析ケース毎の関係を表したものを図-4. 3 に示す。ケース 3 では充填材特性の違いが与える影響について分析したが、ケース 1、ケース 2 と比べ、判定指標値の差異は小さく、充填材強度が与える影響は軽微であるといえる。ケース 3-3 のせん断に対する判定指標値は 0.97 であり、安全余裕は見込めないが、L2 地震作用時においても安全性能は確保されることが確認された。

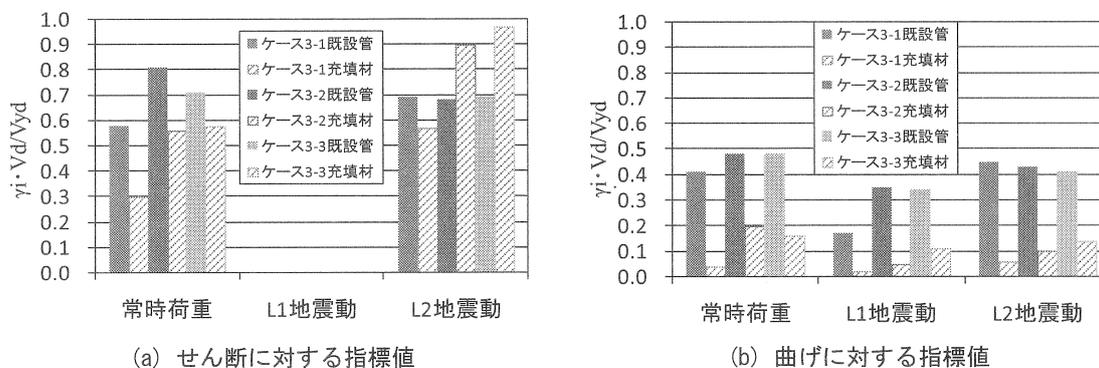


図-4. 3 判定指標値の最大値（ケース 3）

### 4. 2 ケース B（既設管の内面コンクリートが減肉しているケース）解析結果と考察

#### 4. 2. 1 ケース 1

ケース A と同様に限界値に対する設計値の比率（判定指標値）で比較を行った。解析ケース毎の判定指標値の関係を表したものを図-4. 4 に示す。本ケースでは、ケース 1-1 のせん断照査において設計値が限界値を上回り、耐震性能を有さない結果が算出された。既設管自体は剛性が高く、減肉が生じて強度を保ち、内側の充填材の断面力を軽減することができるため、二層モデルではケース A と比べても判定指標値の増加は著しくなかった。一層モデルでは、管厚の厚い管頂部と管厚の薄い管底部で管厚の減少割合が異なるため、減少割合の高い管底部周辺での負担分が大きくなり、判定指標値の著しい増加が確認されたと考えられる。減肉が生じた管を更生する際は、本ケースのようにモデルの違いで耐震性能の有無判定が変わる可能性があるため、ガイドラインで示されている一層モデルではなく材料毎の断面力負担の分析が可能な二層モデルを用いて照査することが示唆される。

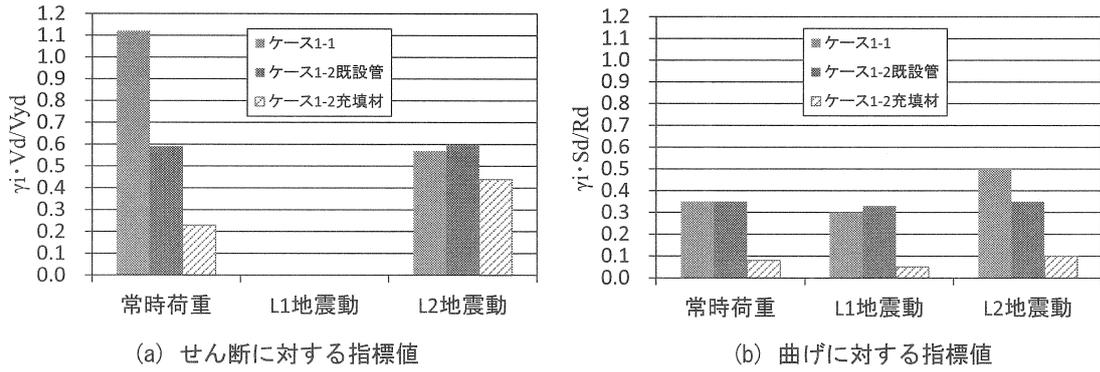


図-4.4 判定指標値の最大値 (ケース1)

4.2.2 ケース2

ケース2のせん断および曲げに対する判定指標値が最も大きい箇所(要素)を抽出し、解析ケース毎の関係を表したものを図-4.5に示す。ケースAと同様にガイドライン<sup>5)</sup>に示されている荷重を与えたケース2-1と比べ、活荷重および周面せん断力を新たに加えたケース2-2の方が、既設管、充填材ともに全てのケースで判定照査値が高くなり、特に、せん断に対する指標値では0.9を超えることが確認されたが、すべてのケースで判定指標値は1.0以下となっており、減肉管の更生管においても耐震性は保持しているといえる。本ケースもケース1と同様で、全体的に判定指標値は高く算出されているが、その傾向に変化はなく、地震時挙動の変化はないと考えられる。

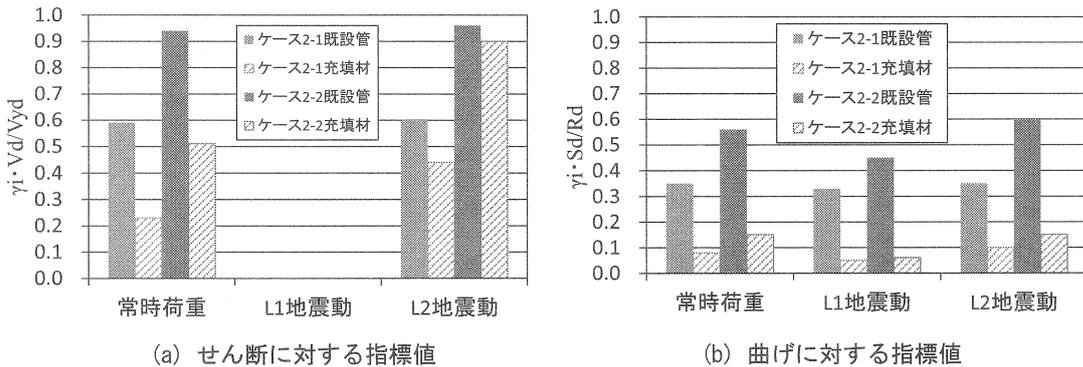


図-4.5 判定指標値の最大値 (ケース2)

4.2.3 ケース3

ケース3のせん断および曲げに対する判定指標値が最も大きい箇所(要素)を抽出した(図-4.6)。本ケースでは、ケースAと同様で、充填材の特性による判定指標値の変化は大きくない。せん断に対する指標値が0.9を超えるケースが多くみられるが、1.0を上回ることはないため、減肉管の更生管は安全余裕を見込めないが、耐震性は有している。

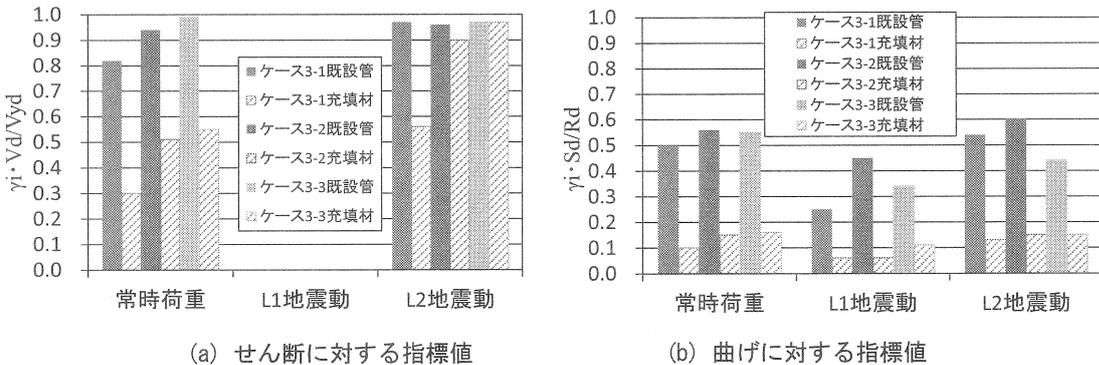


図-4.6 判定指標値の最大値 (ケース3)

## 5. まとめ

本研究は下水道更生管の一工法である複合管に着目し、構造解析モデルや外力条件、更生工法の特徴である下水を流下させたままの現場施工が可能という条件下で施工された管きよの不確実性が、管きよの耐震性能に与える影響について FEM 解析を用いて分析を行った。本研究の結果は以下の通りにまとめられる。

- 現行の更生工法の耐震設計のガイドラインに則した等価一層モデルではせん断、曲げともに高い、もしくはほぼ同等の値を示し、詳細にモデル化するよりも等価一層モデルの方が安全側の設計となる。
- 現行のガイドラインに基づいて外力を作用させた状態に、実際の埋設状況を考慮した荷重（活荷重、周面せん断力）を付加すると、せん断力、曲げともに判定指標値は既設管、充填材ともに高くなり、現行指針の方が安全余裕は大きい。
- 充填材強度が耐震性能に与える影響は解析モデルや外力条件が与える影響に比べると軽微であり、下水を流下させたままの施工により充填材強度に不確実性が生じても、複合管の耐震性能が著しく向上・低下することはない。
- 現行のガイドラインでは L2 地震動作用時の照査は曲げモーメントに対してのみ行われていたが、せん断の判定指標値の方が高くなる傾向がすべてのケースで確認できたため、せん断力に対する照査を行う必要がある。
- 減肉などの経年劣化が生じた管を更生する際は安全余裕が十分に見込めないケースが多く、二層モデルを用いて材料毎の断面力の負担を検討する必要があるといえる。

## 参 考 文 献

- 1) (社)日本下水道協会：日本の下水道（その現状と課題），2000.
- 2) (社)日本下水道協会：管きよ更生工法における設計・施工管理の手引き（案），2008.9.
- 3) (社)日本下水道協会：下水道施設耐震計算例－管路施設編－前編 2001 年版，2001.4
- 4) (社)日本下水道協会：下水道施設の耐震対策指針と解説-2006 年版-，2006.8
- 5) (社)日本下水道協会：管きよ更生工法の耐震設計の考え方（案）と計算例，2008.9
- 6) 東田 淳，吉村 洋，井上裕司，八谷 誠，白井久順，大杉朗隆：FEM 解析による更生下水道管（二層構造管）の構造系検討，第 41 回地盤工学研究発表会，2005
- 7) 中野雅章，師 自海，川瀬貴行，出口敏行：要老朽下水道管渠の補強設計における分離式非線形解析法の導入および設計支援システムの開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，2002
- 8) 鍛田泰子，江角勇貴，高田至郎：充填材強度特性実験に基づく更生管きよの耐震性能に関する研究，建設工学研究論文報告集第 52 号，pp.83-100，2010.11
- 9) 土木学会関西支部シールドトンネルの合理的耐震設計法に関する研究会：シールドトンネルの合理的耐震設計法ガイドライン（案），1999.11

## 著 者

鍛田 泰子      研究員、博士（工学）、地震工学  
 江角 勇貴      元神戸大学大学院生、修士（工学）