

土木学会地震工学委員会

断層変位を受ける 地中管路の設計手法に関する研究小委員会

WG2 成果報告

報告者：WG2主査 小野祐輔（鳥取大学）

WG2 委員構成

会務	氏名	所属
副委員長	鈴木 崇伸	東洋大学
幹事長	長谷川 延広	JFEエンジニアリング（株）
WG2主査	小野 祐輔	鳥取大学
委 員	庄司 学	筑波大学
委 員	宮島 昌克	金沢大学
委 員	宮本 勝利	（株）日水コン
幹 事	岸 正蔵	（株）クボタ
幹 事	西川 源太郎	積水化学（株）
委 員	坂下 克之	大成建設（株）
委 員	森本 皓一	（株）栗本鐵工所
委 員	田中 努	メトロ設計（株）
委 員	有賀 義明	弘前大学
委 員	小田 圭太	（株）クボタ
委 員	森 健	JFEエンジニアリング（株）

報告書（案）の目次（抜粋）

1. 断層変位を受ける地中管路の設計手法の提案
 - 1.1 はじめに
 - 1.2 地中管路の各種設計指針における断層変位の扱いについて
 - 1.3 断層変位
 - 1.3.1 断層変位の予測式
 - 1.3.2 断層変位の分布
 - 1.4 断層と地盤と管路の変位挙動の関連性について
 - 1.5 断層変位を受ける地中管路の変形の特徴
 - 1.5.1 構造・材質の違いによる変形の特徴
 - 1.5.2 地中管路に作用する地盤反力

報告書（案）の目次（抜粋）

1.6 断層変位を受ける地中管路の変形の特徴

1.6.1 設計フロー

1.6.2 設計条件の設定

1.6.3 要求性能

1.6.4 設計手法

1.6.5 設計事例

3. 数値解析手法

3.1 設計に際して考慮すべき要素と解析評価法の基本的考え方

3.2 利用できる数値解析手法の整理

1.2 地中管路の各種設計指針における断層変位の扱いについて

調査の対象とした設計指針のリスト

1. 地下構造物の耐震性能照査と地震対策ガイドライン（案），平成23年9月，土木学会
2. 下水道施設の耐震対策指針と解説－2014年版－，日本下水道協会
3. 水道施設耐震工法指針・解説－2009年版－，日本水道協会
4. 道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編，平成29年10月，日本道路協会
5. 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，平成24年9月，鉄道総合技術研究所
6. Seismic Guidelines for Water Pipelines (American Lifelines Alliance-ALA, March 2005)

1.3 断層変位

1.3.1 断層変位の予測式

(1) 松田式による断層変位量の推定

松田（1975）で扱われた8事例に，6事例（★）を加えて最大断層変位量と断層出現距離の関係式を更新．

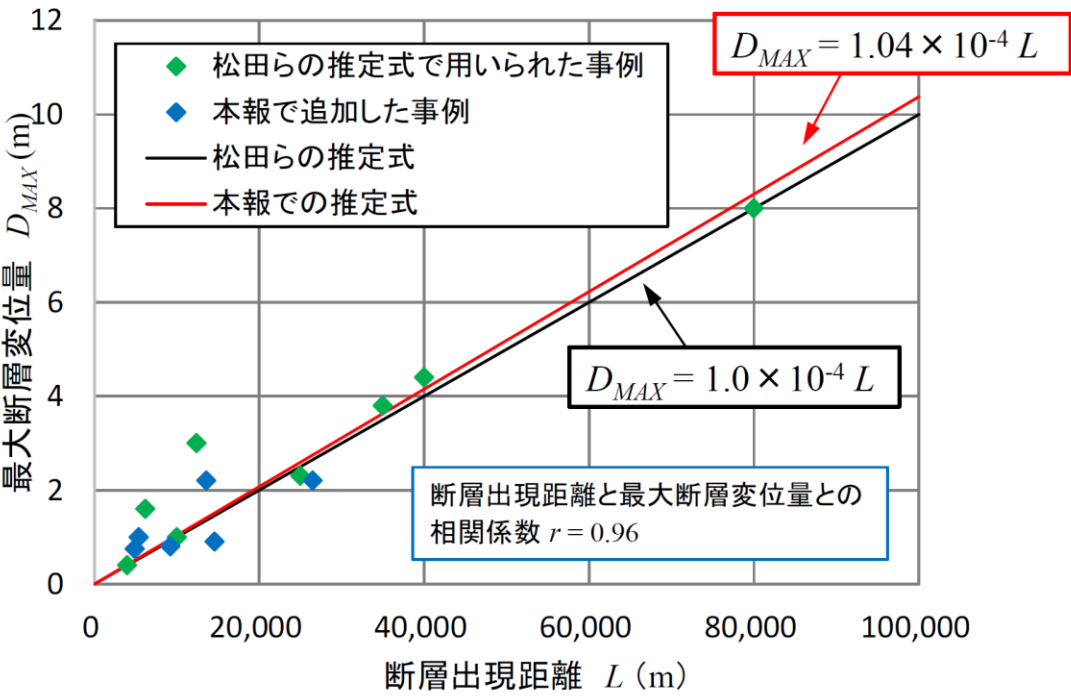


表1-3-1 予測式提案に用いた日本の14事例

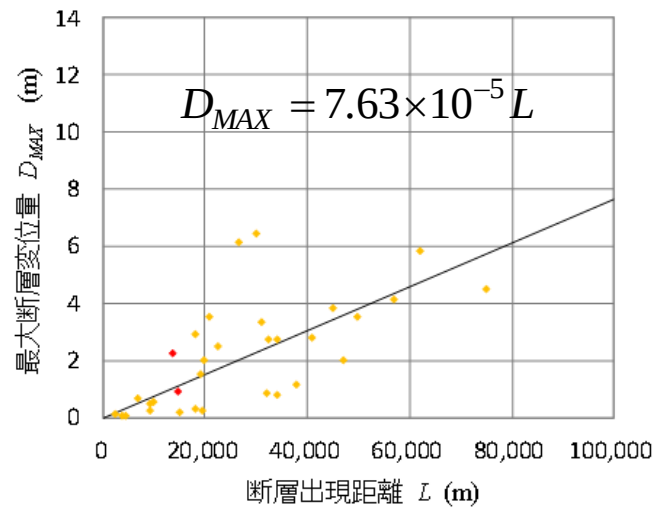
発生年	地震	断層のタイプ	断層	断層出現距離 L (m)	最大断層変位量 D_{MAX} (m)
1891	濃尾地震	横ずれ	根尾谷断層	80,000	8
1894	庄内地震	逆	矢流沢断層	10,000	1
1896	陸羽地震	逆	横手盆地東縁断層帯	40,000	4.4
1927	北丹後地震	横ずれ	郷村断層	12,400	3.0
1930	北伊豆地震	横ずれ 逆	丹那断層	35,000	3.8
★ 1943	鳥取地震	横ずれ	鹿野断層	6,200	1.6
★ 1943	鳥取地震	横ずれ	吉岡断層	5,400	1.0
1948	福井地震	横ずれ	福井平野東縁断層帯	25,000	2.3
1974	伊豆半島沖地震	横ずれ	石廊崎断層	4,000	0.4
★ 2011	福島県浜通り地震	正	湯ノ岳断層	14,600	0.9
		正	井戸沢断層	13,600	2.2
★ 2014	長野県北部地震	逆	神城断層	9,200	0.8
★ 2016	熊本地震	横ずれ	布田川断層	26,500	2.2
		横ずれ	日奈久断層	4,900	0.8

1.3 断層変位

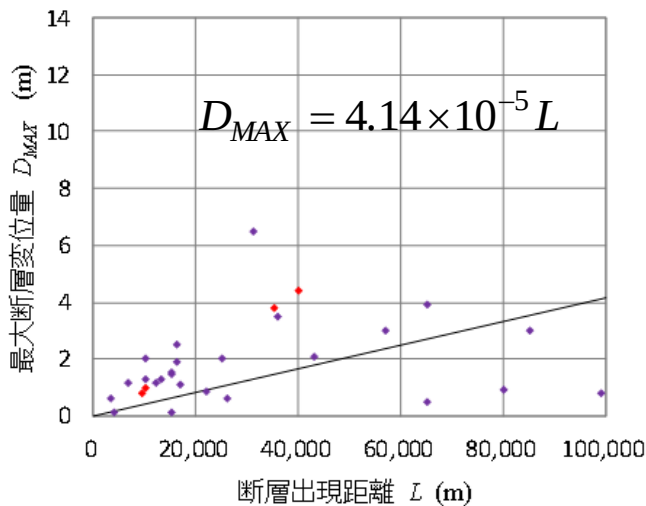
1.3.1 断層変位の予測式

(1) 松田式による断層変位量の推定

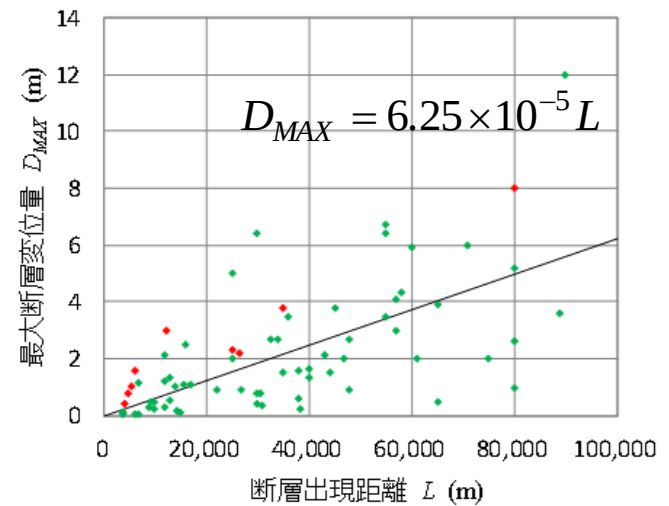
海外の事例を加えて断層タイプ別に最大断層変位量と断層出現距離の関係式を更新



(a) 正断層



(b) 逆断層



(c) 横ずれ断層

図 1-3-3 断層タイプ別の断層変位量 D_{MAX} [m]と断層出現距離 L [m]の関係
(日本の事例は赤色で表示)

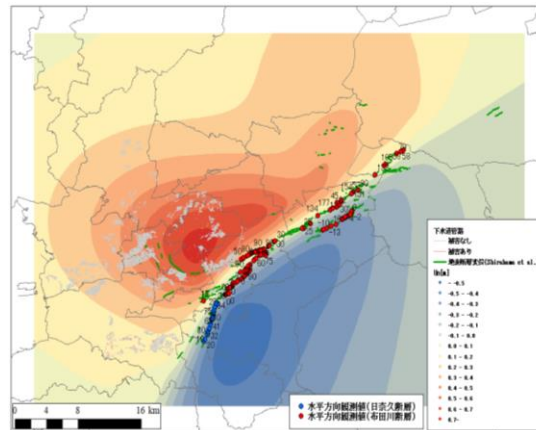
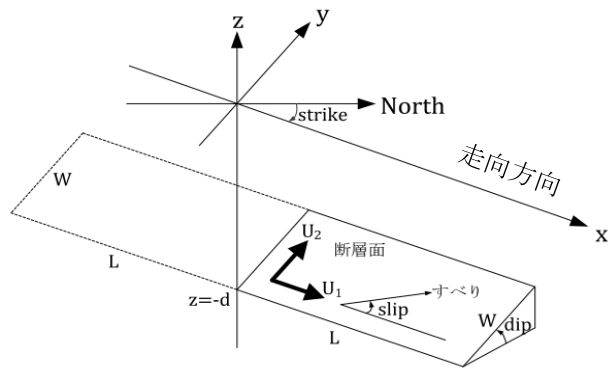
1.3 断層変位

1.3.1 断層変位の予測式

(2) 食い違い弾性理論に基づく断層周辺地盤変位分布の推定

Okada (1985) 式の利用

- 与えた断層（点震源，矩形震源）のすべり量に対する半無限弾性体の自由表面の変位，ひずみ，及び傾斜角の解析解



熊本地震の実測地表面変位
との比較（庄司ら）

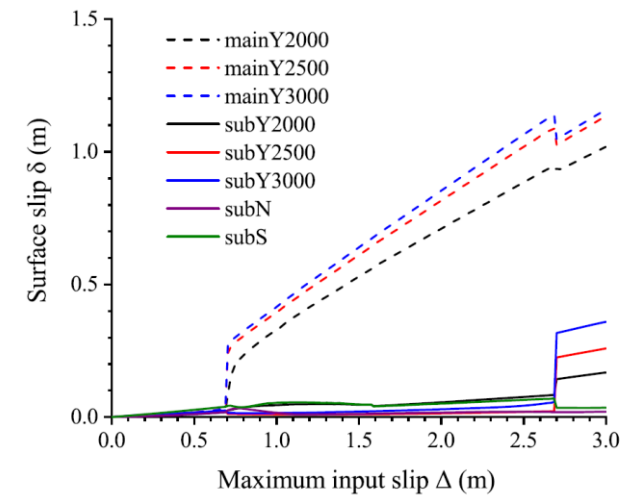
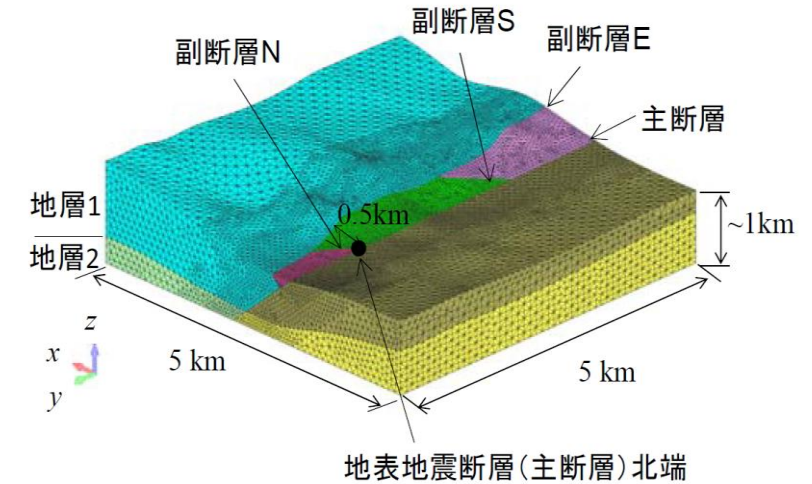
- Okada式で得られた埋設管路位置での地盤変形量を埋設管路モデルの境界に強制変位として作用させることで，分析対象とする埋設管路の断層変位による影響評価

1.3 断層変位

1.3.1 断層変位の予測式

(3) 高性能計算の適用および副断層の評価

- 澤田ら(2018)
 - 主断層及び伏在断層の地表断層変位評価を目的としたHPCによる3次元数値解析手法を開発
- 1. 主断層に想定される滑り分布を与え、食い違い弾性論により、主断層の滑りによる広域の地盤変位を算出する.
 - 副断層の存在も考慮
- 2. 1で求めた変位量を地下1kmの3次元解析モデル境界に強制変位として漸増的に入力し、3次元FEM解析により地表断層変位を評価する.



澤田昌孝, 羽場一基, 堀宗朗: 地表地震断層を伴う実地震を対象とした高性能計算による地表断層変位評価, 土木学会論文集A2(応用力学), Vol.74, No.2, pp.I_627-I_638, 2018.

澤田ら (2018)

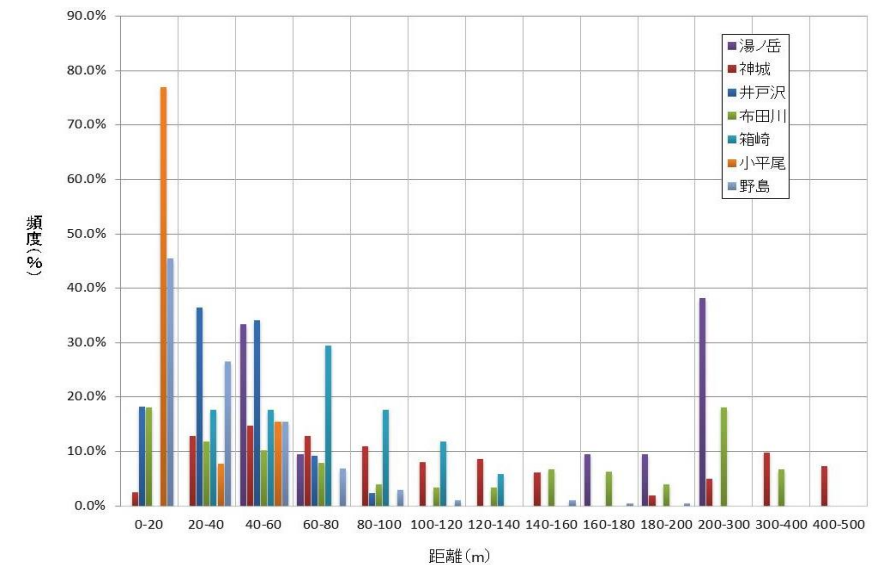
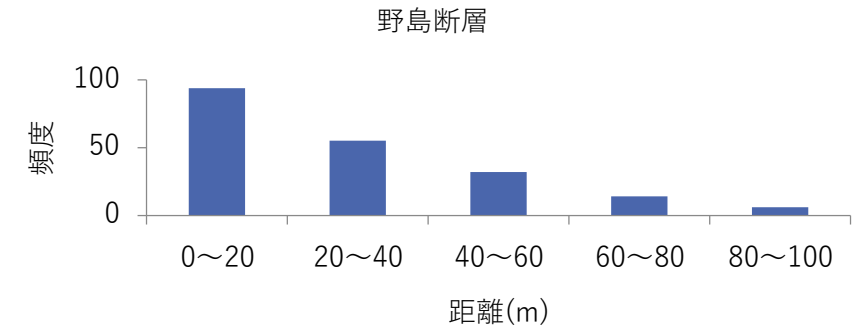
1.3 断層変位

1.3.2 断層変位の分布

(1) 地表に出現する位置のばらつき

- 活断層地図で想定されている断層線から、実際に地表に出現した断層線との位置関係を整理

発生年月日	地震名	規模	主な地表地震断層
1995年1月17日	兵庫県南部地震	M _j 7.3	野島断層
1998年9月3日	岩手県内陸北部の地震	M _j 6.2	篠崎地震断層
2004年10月23日	新潟県中越地震	M _j 6.8	小平尾断層
2011年4月11日	福島県浜通りの地震 (東日本大震災余震)	M _j 7.0	湯ノ岳断層 井戸沢断層
2014年11月22日	長野県北部地震	M _j 6.7	神城断層
2016年4月16日	熊本地震	M _j 7.3	布田川断層



1.3 断層変位

1.3.2 断層変位の分布

(2) 模型実験による地表地震断層

「重力場での模型実験」を中心に文献調査

(3) 海外事例

2002年デナリ地震 (M7.9, 米国)

1999年収集地震 (M7.6, 台湾)

2015年パキスタン地震 (M7.6, パキスタン)

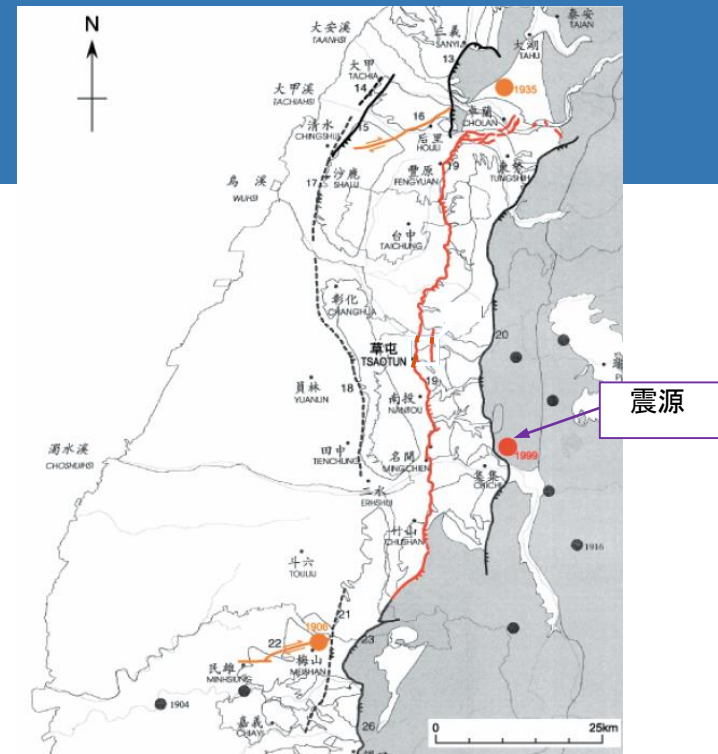


図1-3-17 地震断層の出現位置（地震断層を赤線で示す）

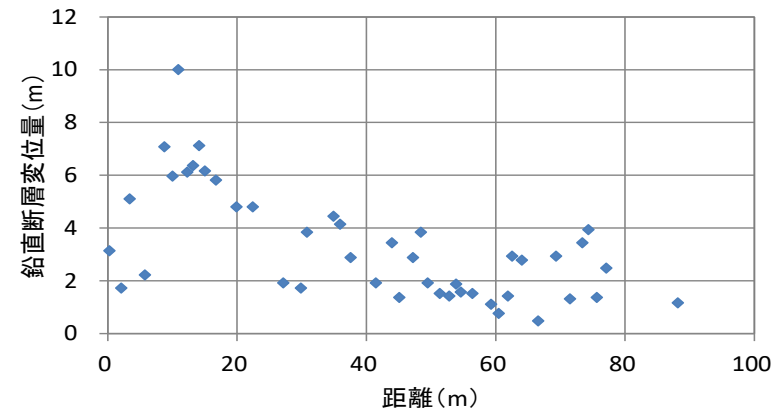


図1-3-18 断層変位量分布

1.4 断層と地盤と管路の変位挙動の関連性について

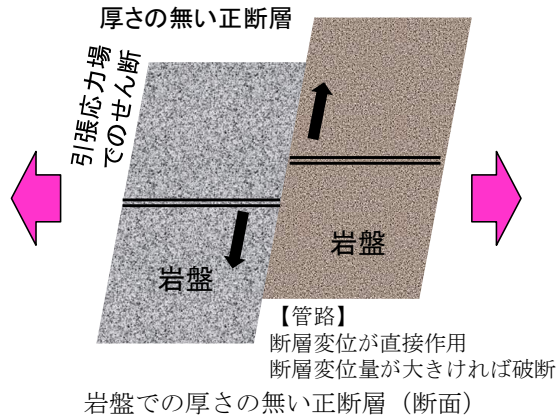


図 1-4-1 岩盤で厚さの無い正断層を想定した場合の地中管路の変位挙動

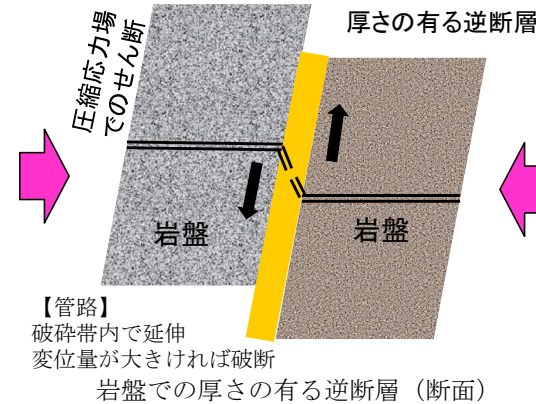


図 1-4-2 岩盤で厚さの有る逆断層を想定した場合の地中管路の変位挙動

- 被災した際に社会的影響度が甚大なライフライン施設に関しては、精度の高い評価が必要
- 断層・地盤・構造物連成系の応答・挙動が複雑な場合は、二次元の解析評価は、三次元の解析評価よりも危険サイドの解析評価になりえることに注意

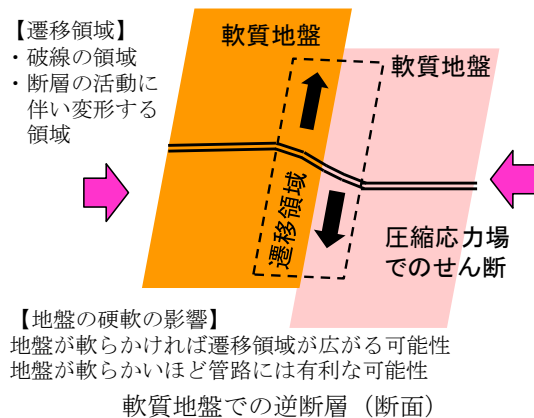


図 1-4-3 軟質地盤で逆断層を想定した場合の地中管路の変位挙動

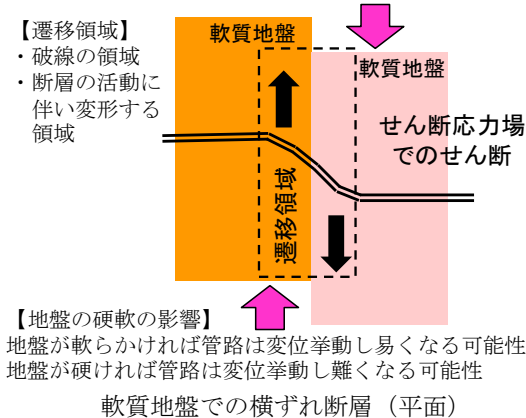


図 1-4-4 軟質地盤で横ずれ断層を想定した場合の地中管路の変位挙動

1.5 断層変位を受ける地中管路の変形の特徴

1.5.1 構造・材質の違いによる変形の特徴

① 耐震型ダクタイル鉄管

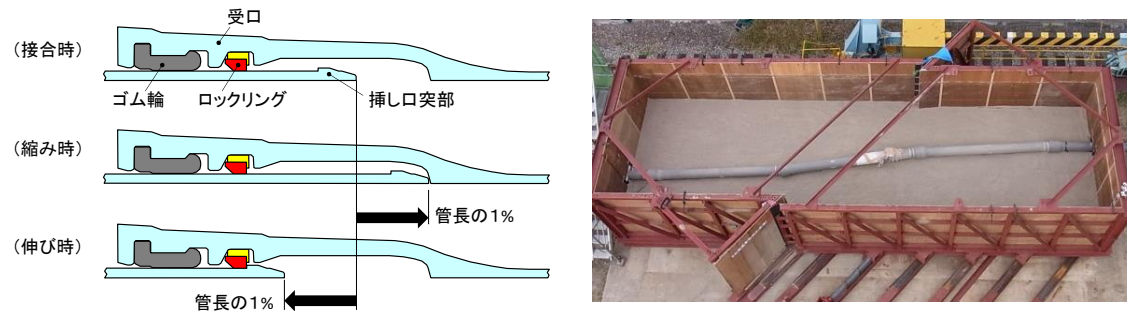


図1-5-1 耐震型ダクタイル鉄管の挙動 (GX形ダクタイル鉄管の例) 22)

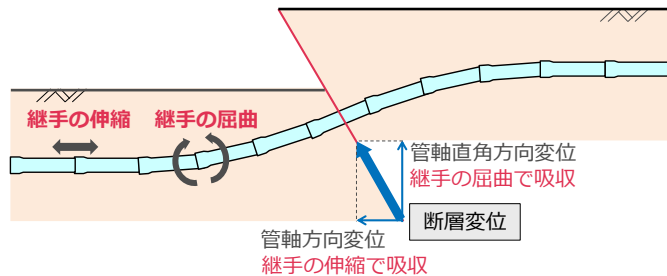


図1-5-2 断層変位を受けた耐震型ダクタイル鉄管の挙動 22)

- 継手の伸縮により、管の圧縮、引張のいずれの断層変位にも追従可能。
- 直管部では継ぎ輪や長尺継ぎ輪を使用

甲切管	長尺継ぎ輪	乙切管	伸縮量
			直管継手
			管長の±1%
			長尺継ぎ輪
			管長の+10% (または、-10%)

図1-5-4 長尺継ぎ輪

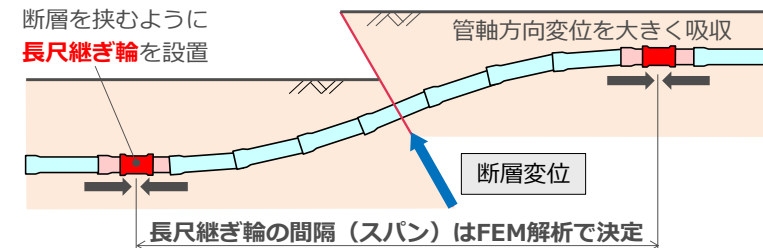


図1-5-5 長尺継ぎ輪を使用した管路

1.5 断層変位を受ける地中管路の変形の特徴

1.5.1 構造・材質の違いによる変形の特徴

② 鋼管

- 断層面で地盤のせん断力によって断層面付近で管が座屈するのではなく、まず管全体で「S型」の変形
- さらに変形が進むと、断層面からある程度離れた箇所では塑性ヒンジを形成し、「Z型」に変形



図 1-5-6 断層による管路被害（台湾集集地震²⁵⁾）



図 1-5-7 鋼管の変形（地中実験）

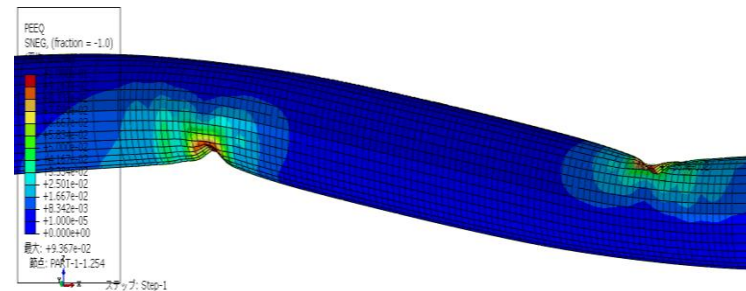


図 1-5-8 鋼管の変形（FEM 解析）

1.5 断層変位を受ける地中管路の変形の特徴

1.5.1 構造・材質の違いによる変形の特徴

③ 水道配水用ポリエチレン管

- 2014年に発生した長野県神城断層地震における水道配水用ポリエチレン管（口径75mm）の変形状況
 - ✓ 管の変形は鉛直変位70cm, 水平変位30cm
 - ✓ 管はS字状に大きく変形する形で断層変位に追従
 - ✓ 漏水することなく通水機能を維持
 - ✓ 局所的な白化やネッキングによる異常なし
- FEMによるシミュレーション解析
 - 管と地盤との境界で滑りが生じたことで、管体に発生するひずみは2.6%程度



鉛直変位 70cm



水平変位 45cm

図 1-5-9 長野県神城断層地震における水道配水用ポリエチレン管の変形状況

1.5 断層変位を受ける地中管路の変形の特徴

1.5.1 構造・材質の違いによる変形の特徴

④ 塩化ビニル管

- 片側が隆起する土槽を用い，縦ずれ断層を模擬した実験(*)
 - ✓ 硬い地盤（相対密度80%）の方が軟らかい地盤（相対密度20%）よりも変形が土槽中央に集中し，上盤側に局所的に大きなひずみが発生（左下図）
 - ✓ 埋設深さが深い方が浅い方よりも上盤側で大きなひずみが発生（右下図）

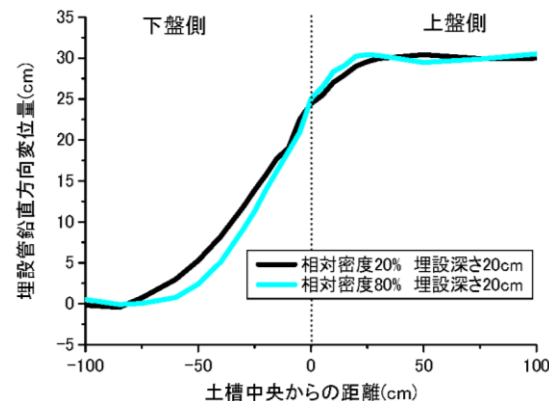


図 1-5-10 埋設管の鉛直方向変位量

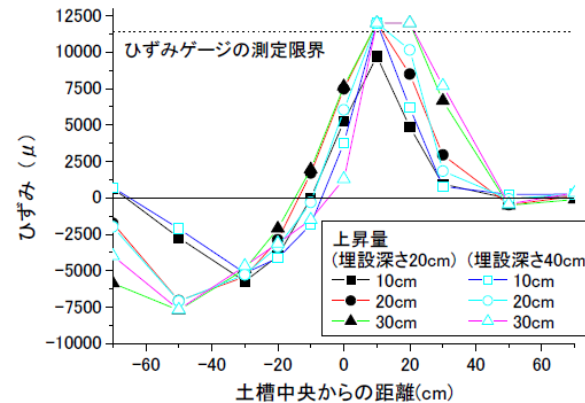


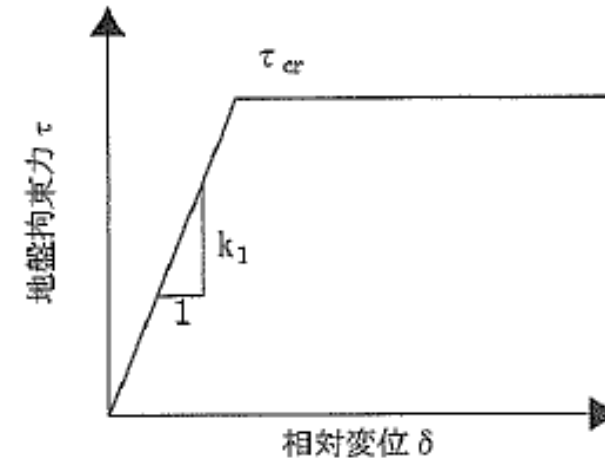
図 1-5-11 埋設管のひずみ量

(*) 宮島昌克，吉藤裕也，北浦勝：断層変位による地中埋設管の挙動に関する隆起土槽を用いた実験，土木学会地震工学論文集，Vol.27，No.104，2003.

1.5 断層変位を受ける地中管路の変形の特徴

1.5.2 地中管路に作用する地盤反力

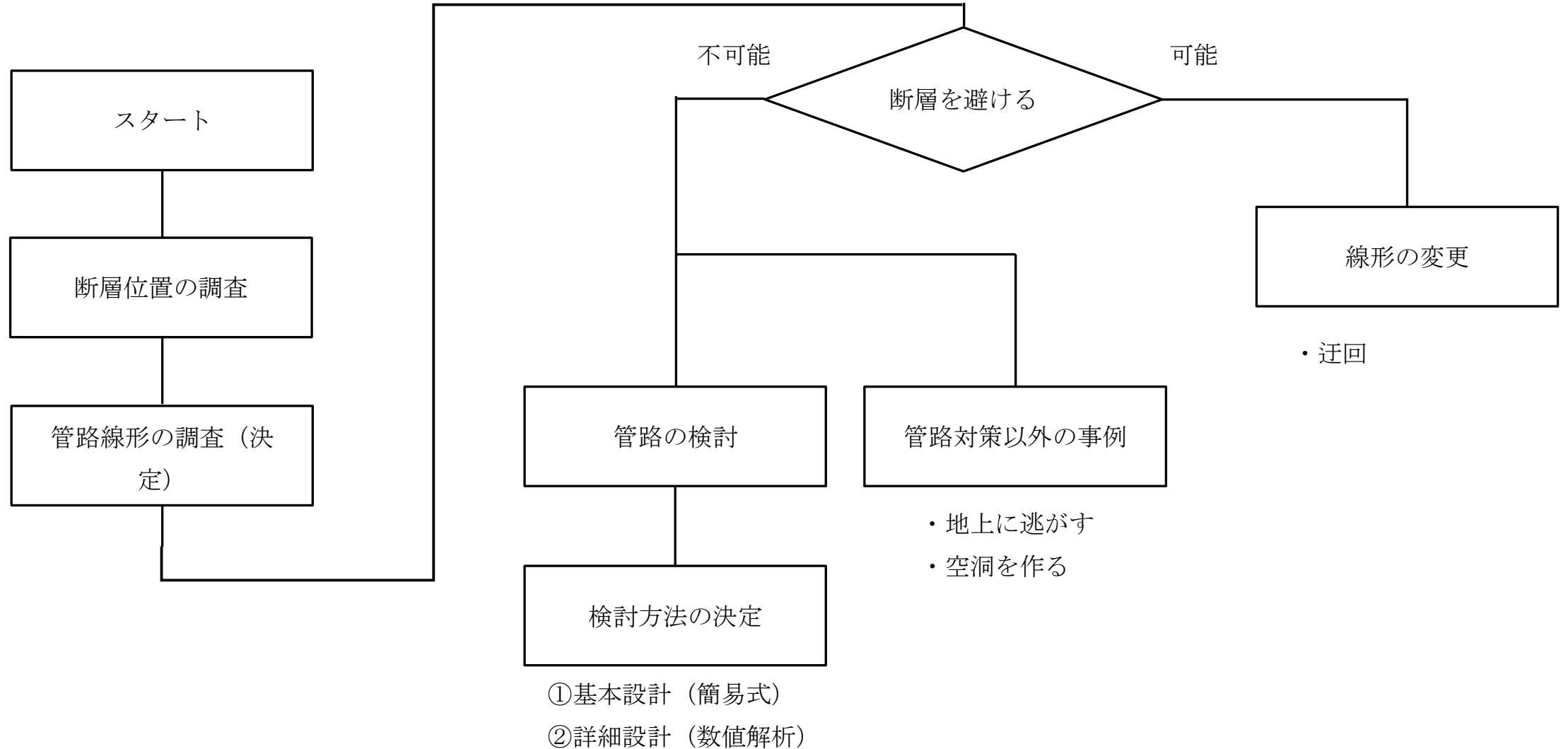
- 断層変位を受ける管路の設計に必要な管軸方向、管軸直角方向の非線形ばね特性の設定法を調査
- 地盤ばね係数と、非線形性が現れる最大地盤拘束力の設定法を整理



- ① 「水道施設耐震工法指針・解説」 (日本水道協会, 2009年)
- ② 「高圧ガス導管耐震設計指針(JGA指-206-13)」 (日本ガス協会, 2013年4月)
- ③ 「中低圧ガス導管耐震設計指針(JGA指-209-13)」 (日本ガス協会, 2013年4月)
- ④ 「Seismic Guidelines for Water Pipelines」 (American Lifelines Alliance-ALA, March 2005)
- ⑤ 「Guideline for the Design of Buried Steel Pipe」 (ALA, July 2001)

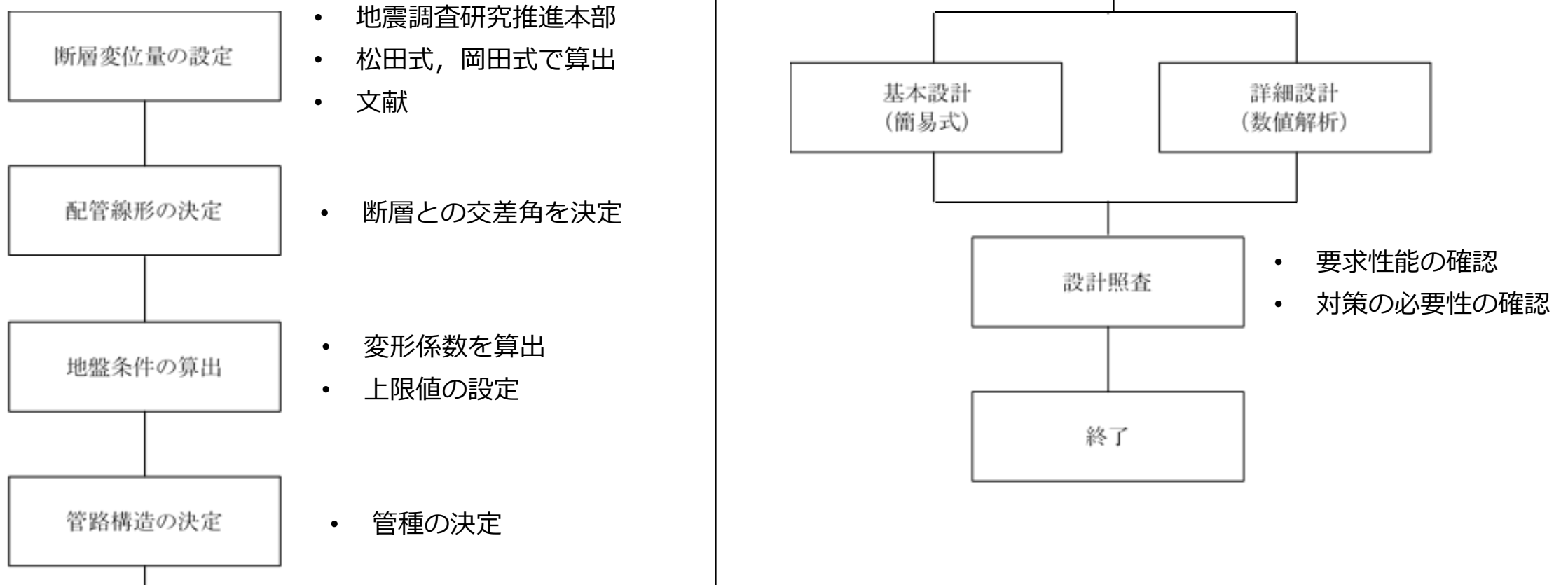
1.6 断層変位を受ける地中管路の設計手法

1.6.1 設計フロー



1.6 断層変位を受ける地中管路の設計手法

1.6.1 設計フロー



1.6 断層変位を受ける地中管路の設計手法

1.6.2 設計条件の設定

表1-6-1 断層横断管路の設計に必要な断層，地盤，管路の情報

項目		概要
断層条件	位置	断層と管路が交差する位置
	位置のばらつき	断層線が出現すると想定される範囲
	走向	断層線の方角
	傾斜	断層面の水平面に対する角度
	ずれ方の形態①	正断層、逆断層または横ずれ断層
	ずれ方の形態②	断層または撓曲（たわみ）
	厚さ	破碎帯の幅
	変位量（単位変位量）	1回の地震活動で動く断層変位量
	変位の向き	逆断層の場合、どちらが隆起するか
地盤条件	地盤係数	管路位置の地盤特性
	内部摩擦角	
	粘着力	
管路条件	断層との位置関係	-
	土被り	管の埋設深さ
	呼び径	-
	材質	-
	管厚	-
	継手の有無	一体構造管路、継手構造管路

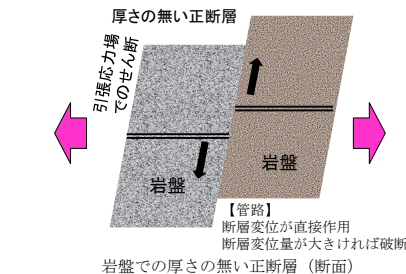


図 1-4-1 岩盤で厚さの無い正断層を想定した場合の地中管路の変位挙動

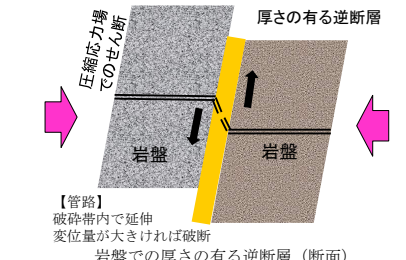


図 1-4-2 岩盤で厚さの有る逆断層を想定した場合の地中管路の変位挙動

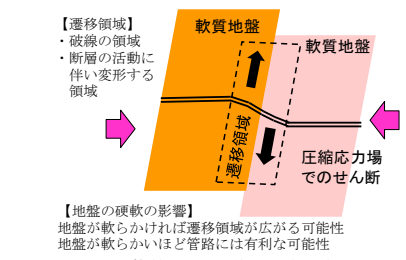


図 1-4-3 軟質地盤で逆断層を想定した場合の地中管路の変位挙動

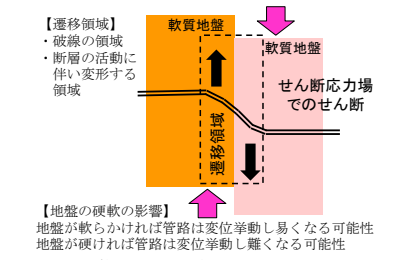


図 1-4-4 軟質地盤で横ずれ断層を想定した場合の地中管路の変位挙動

1.6 断層変位を受ける地中管路の設計手法

1.6.2 設計条件の設定

表1-6-2 断層に関する文献・データベース（○内の数字は優先順位）

設計条件	文献
・位置 ・走向	①「活断層図（都市圏活断層図）」、国土地理院 ②「活断層詳細デジタルマップ」、東京大学出版会 ③「活断層データベース」、産業技術総合研究所 ③「新編 日本の活断層」、東京大学出版会 ③「主要活断層帯の長期評価」、地震本部
・傾斜 ・ずれの形態① [逆断層・横ずれ断層等] ・ずれの形態② [断層・撓曲] ・変位量 ・変位の向き（隆起側）	①「主要活断層帯の長期評価」、地震本部 ②「活断層データベース」、産業技術総合研究所

1.6 断層変位を受ける地中管路の設計手法

1.6.3 要求性能

① 鋼管

表1-6-4 鋼管の断層変位に対する耐震性能

条件	要求性能	内容	照査値
断層変位	耐震性能3 (終局限界)	断層変位により、管路は局部的に变形するが、漏水は発生せず通水機能を保持できる性能	① 管体発生歪み $\epsilon_s = 5\%$ ϵ_s : 座屈開始歪み ② 変形後の通水断面積 $A \geq 0.8 \cdot A_a$ A : 変形後の最小通水断面積 A_a : 直管部の通水断面積

1.6 断層変位を受ける地中管路の設計手法

1.6.3 要求性能

② 耐震型ダクタイル鉄管

表1-6-5 耐震型ダクタイル鉄管の断層変位に対する耐震性能

条件	要求性能	内容	照査値
断層変位	耐震性能1	断層変位によって、健全な機能を損なわない性能	① 管体応力 $\sigma \leq 270 \text{ MPa}$ ② 軸力 $F \leq 3 D \text{ kN}$ (D : 呼び径[mm]) ③ 継手屈曲角度 $\theta \leq \theta_a$ θ : 変形後の継手屈曲角度 θ_a : 地震時に曲がり得る最大屈曲角度(継手による)

1.6 断層変位を受ける地中管路の設計手法

1.6.3 要求性能

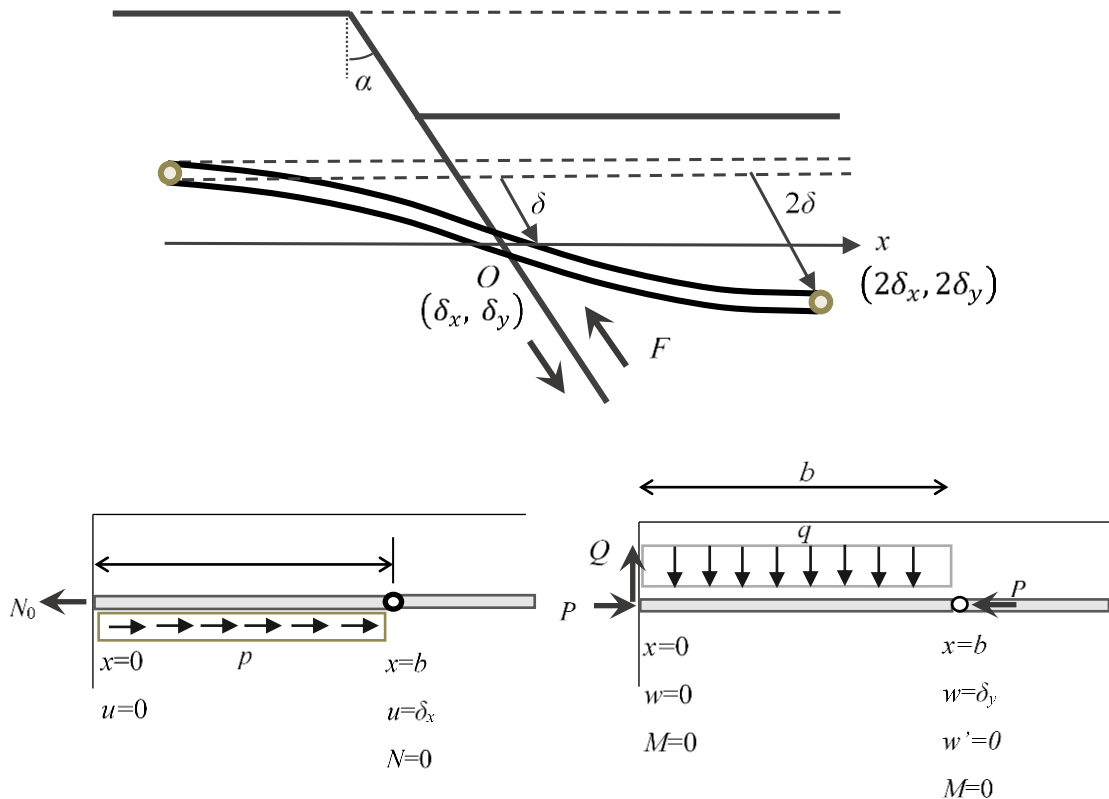
③ 水道配水用ポリエチレン管

条件	要求性能	内容	照査値
断層変位	耐震性能2	断層変位により、機能に 重大な影響を及ぼすことの なく、漏水しない状態	管体発生歪み $\epsilon_s = 6\%$ ϵ_s : 地盤変状に対する許容歪み

1.6 断層変位を受ける地中管路の設計手法

1.6.4 設計手法

(1) 一体構造管路



- 軸力 $N_0 = \text{sign}[\alpha] \sqrt{2EA p \delta \sin|\alpha|}$

- 曲げ変形に関する地盤の降伏範囲(b)

$$b^2 = \frac{12N_0\delta\cos\alpha}{\pi^2 q} + 2 \sqrt{\frac{6EI\delta\cos\alpha}{q} + \left(\frac{6N_0\delta\cos\alpha}{\pi^2 q}\right)^2}$$

- 最大曲げモーメント

$$M_{max} = \frac{1}{4} \sqrt{6EIq\delta\cos\alpha + \left(\frac{6N_0\delta\cos\alpha}{\pi^2}\right)^2} - \frac{3N_0\delta\cos\alpha}{2\pi^2}$$

- 管の最大応力

$$\sigma = \frac{|N_0|}{A} + \frac{M_{max}}{W}$$

1.6 断層変位を受ける地中管路の設計手法

1.6.4 設計手法

(2) 継手構造管路

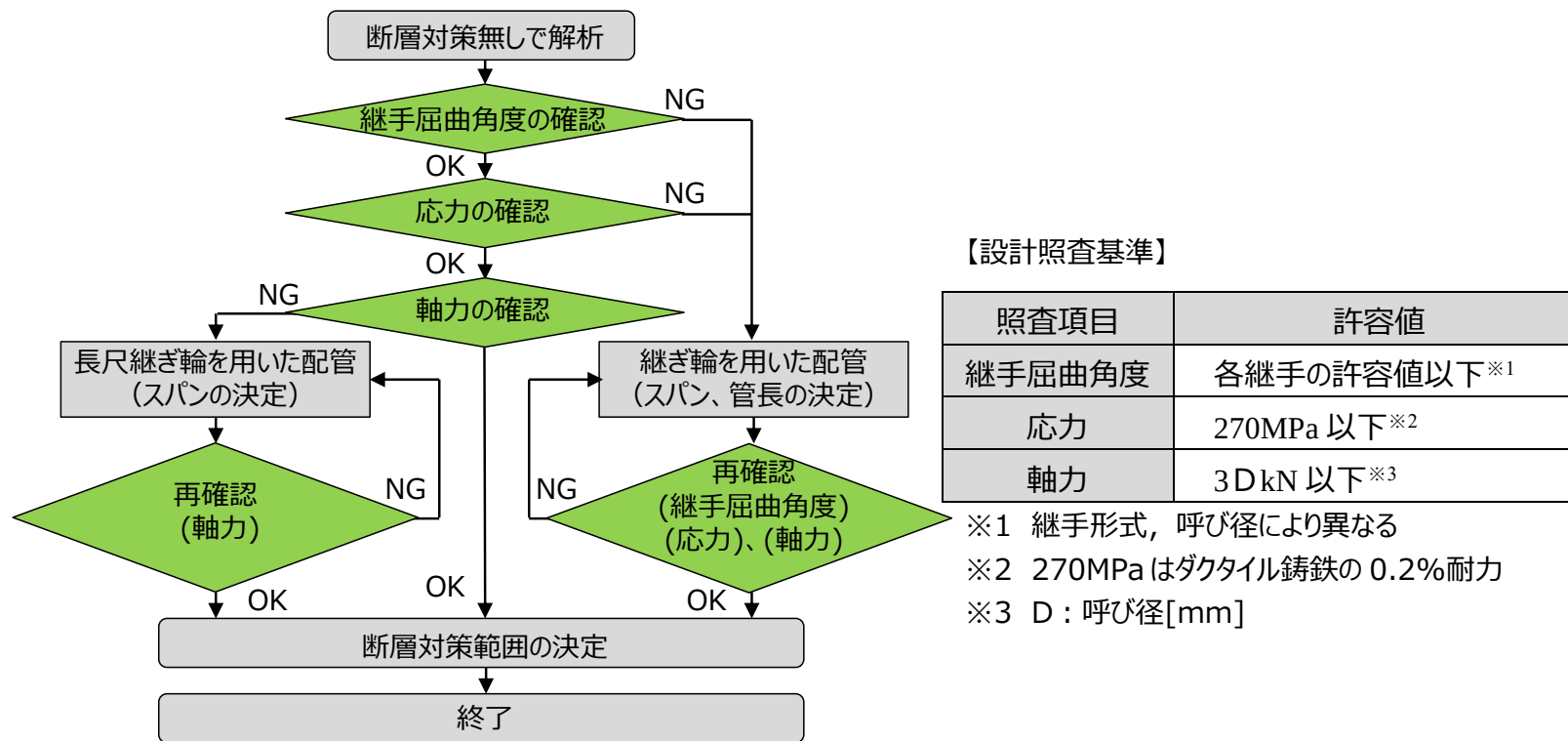


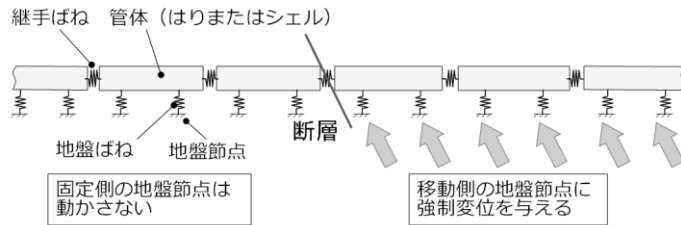
図 1-6-3 鎖構造管路による断層横断管路設計フロー

1.6 断層変位を受ける地中管路の設計手法

1.6.4 設計手法

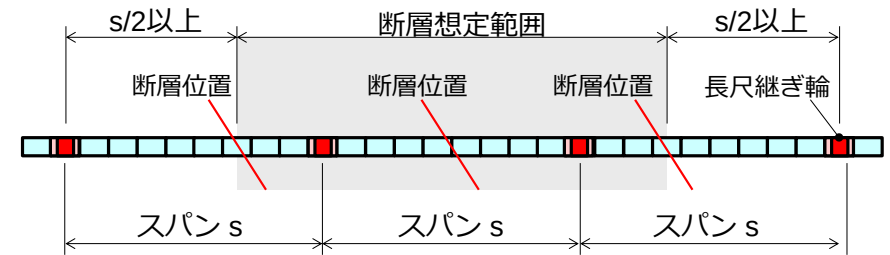
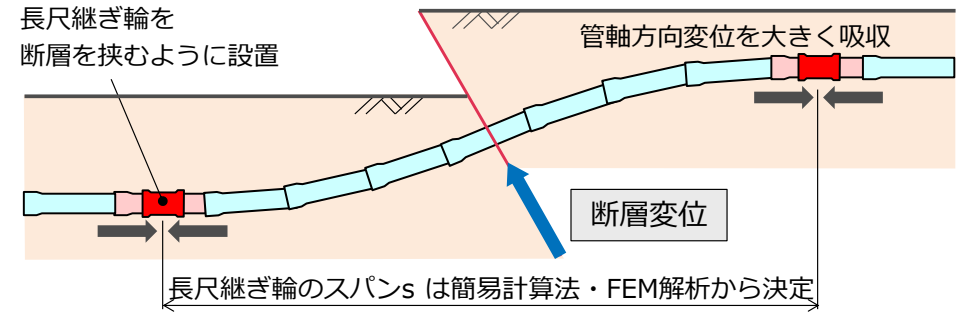
(2) 継手構造管路

① FEM解析



② 簡易計算法(*)

断層変位を管軸直角方向と管軸方向の二成分に分け、「継手屈曲角度」,「応力」,「軸力」を簡易的に算定する方法



(*) 小田圭太, 岸正蔵, 宮島昌克: 耐震型ダクトイル鉄管による断層横断管路の簡易設計手法の研究, 第9回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム講演集, pp.201-208, 2019.

1.6 断層変位を受ける地中管路の設計手法

1.6.5 設計事例

(1) 一体構造管路 ① 溶接鋼管

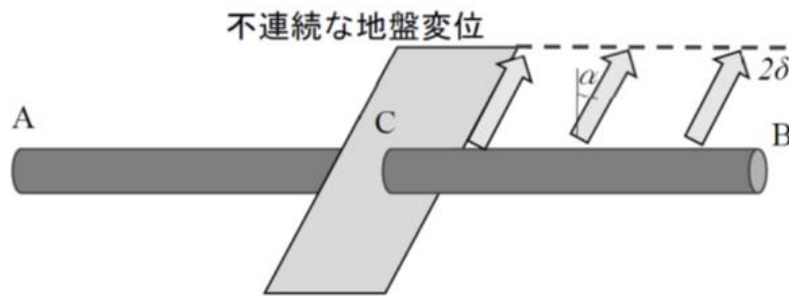


図1-6-8 断層変位により管路に作用する地盤反力

- 溶接鋼管の継手の強度は本管と同等以上
- 一般的に軟鋼（SS400）を使用
 - ✓ 弾性域約0.1%に対して，破断伸びまでには約30%と大きな塑性領域.
 - ✓ 塑性域をうまく利用することで，大規模な地盤変位に対応が可能

最大曲げモーメント $M_{max} = \frac{qL^2}{8} = \frac{1}{4}\sqrt{6qEI\delta}$

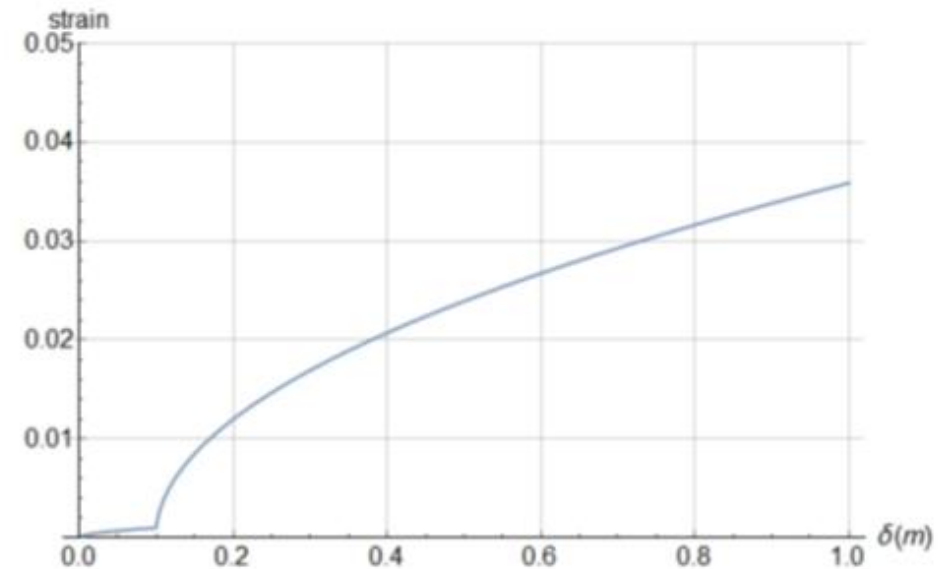


図1-6-9 断層変位と溶接鋼管に発生する歪み

1.6 断層変位を受ける地中管路の設計手法

1.6.5 設計事例

(1) 一体構造管路 ② 水道配水用ポリエチレン管

- ・ 継手部は融着継手（EF接合）
- ・ 降伏ひずみ7.8%~11%
- ・ 許容ひずみは、降伏ひずみに安全率を乗じた6%

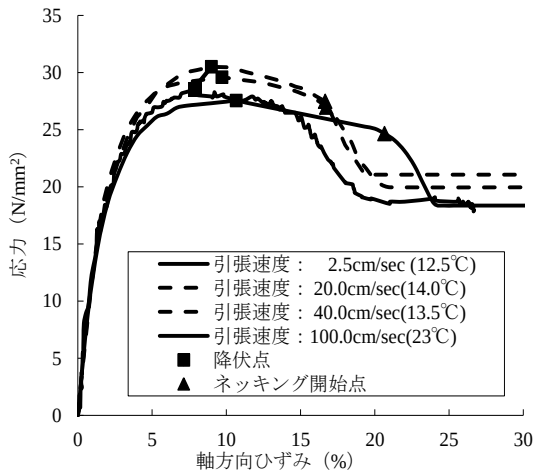


図 1-6-10 HDPE 管の応力-ひずみ曲線³⁵⁾

最大曲げひずみ
$$\varepsilon_{max} = \frac{M_{max}}{EW} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3\sigma_G \delta}{\pi E t}}$$

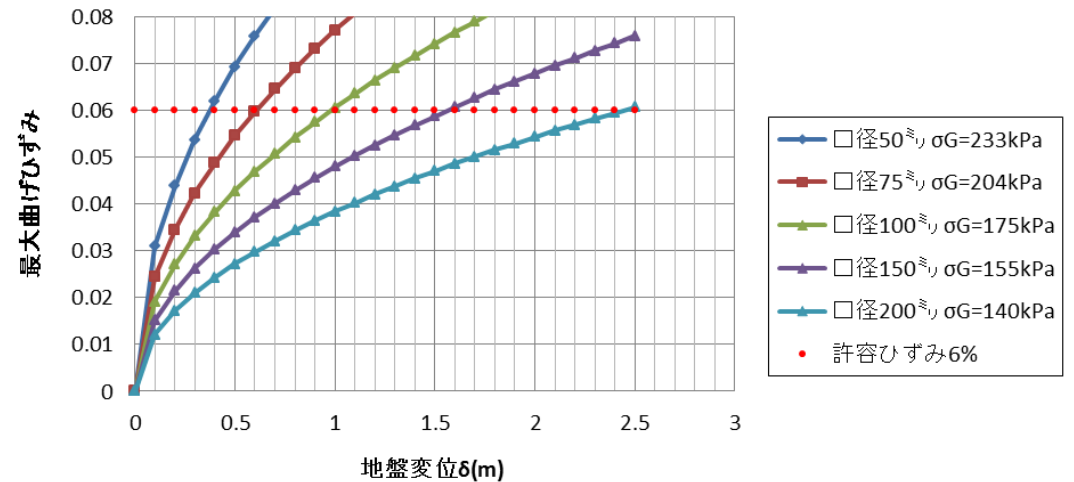


図1-6-13 HDPE管の地盤変位δと最大曲げひずみ

1.6 断層変位を受ける地中管路の設計手法

1.6.5 設計事例 (2) 継手構造管路

米国カリフォルニア州サンフェルナンド断層を横断する呼び径1350送水管の設計事例

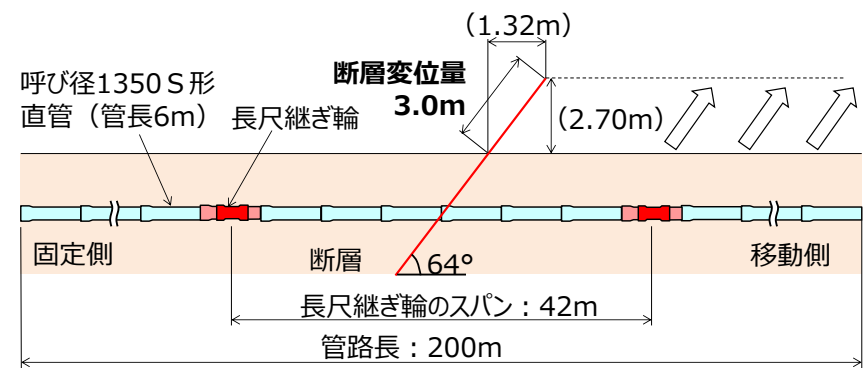
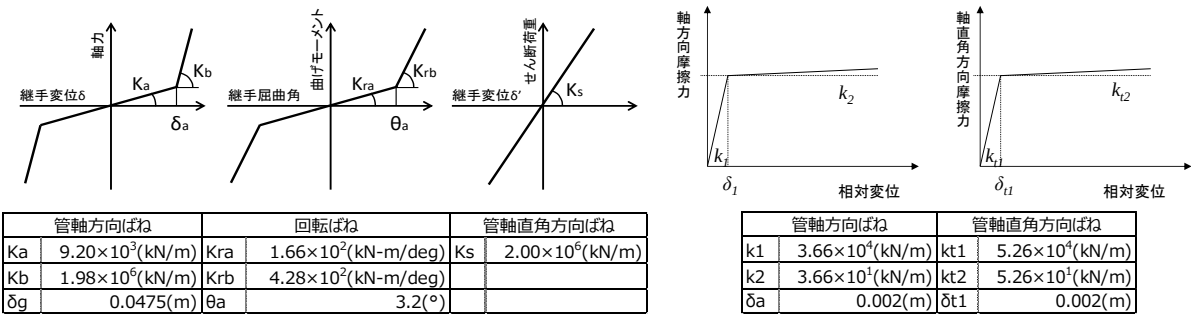


表1-6-9 解析結果

条件	継手屈曲 角度 (°)	応力 (MPa)	軸力 (kN)	許容できる 断層変位※
断層対策無し	3.8	275	6875	1.8m(軸力)
評価基準	≤6.0	≤270	≤4050	≥3.0m

※継手屈曲角度・応力・軸力がすべて評価基準を満足する断層変位量
括弧内はその断層変位で超過した項目

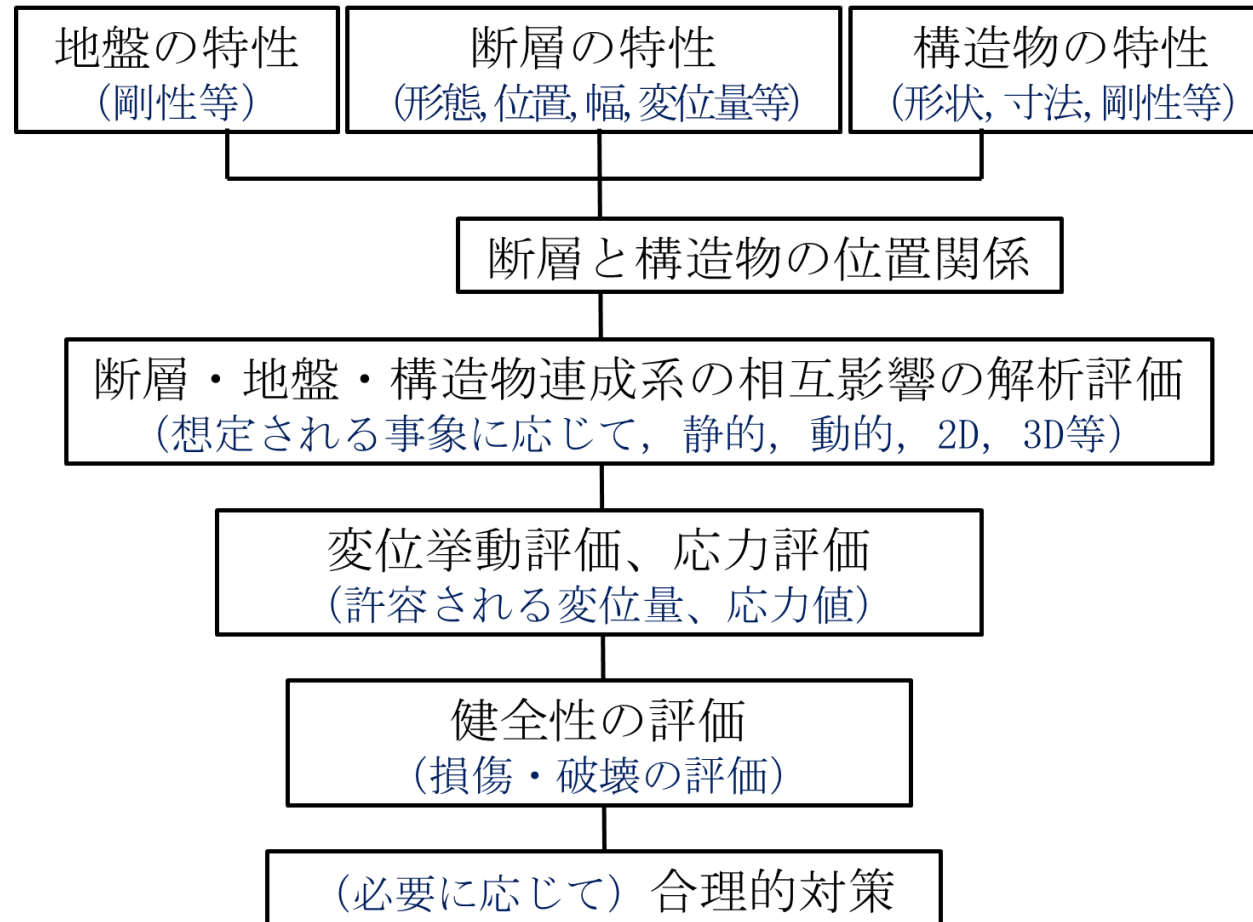
図1-6-17 解析条件（長尺継ぎ輪を使用）



条件	継手屈曲 角度 (°)	応力 (MPa)	軸力 (kN)	許容できる 断層変位
断層対策管路	5.1	210	3397	≥3.0m
評価基準	≤6.0	≤270	≤4050	≥3.0m

3. 数値解析手法

3.1 設計に際して考慮すべき要素と解析評価法の基本的考え方



3. 数値解析手法

3.2 利用できる数値解析手法の整理

(1) 食い違いの弾性論

(2) 有限要素法

(3) 粒子法

- 管路
 - ✓ はり要素, シェル要素, ソリッド要素
- 地盤
 - ✓ ばね要素, ソリッド要素
- 地盤と管路間の接触条件
 - ✓ 接触要素 (ジョイント要素)
- 断層変位
 - ✓ 解析モデル境界に断層変位に伴う荷重を入力
- モデル化の範囲
 - ✓ 境界位置が解析結果に影響を及ぼさないように設定
 - ✓ 管路の断層交差部近傍では軸力が発生するので, 軸方向のモデル化範囲が重要
 - ✓ 地盤の外周に断層変位を強制変位として入力する場合には, モデル化領域が広いほど管路に作用する荷重は小さくなるので, どの範囲までを地盤が強制的に動くのかを決める必要

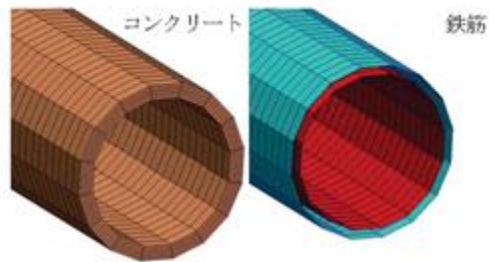


図 4.3.1 トンネルをソリッド要素でモデル化した例⁷⁾