

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

研究中間成果報告書

2019年8月

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

はじめに

地下埋設管路の耐震安全性を確保するためには、現行の地下構造物の耐震設計に供用されている入力地震動に対する耐震性は最低限担保しつつ、今後高い確率で起こるであろう南海トラフの巨大地震等の長周期・長継続時間地震動への対応や、首都直下地震や日本のどこでも起こりうると思われるべき都市直下の地震等の大振幅の揺れや地盤の大ひずみへの対応、地下管路を横断する断層や直下の断層による撓曲の影響への対応等、様々な重要な課題をひとつずつ解決していかなければならない。

地震動の揺れや液状化等の地盤変状によって地中管路に甚大な被害を与えた地震は 1995 年兵庫県南部地震以降の地震だけでも、2004 年新潟県中越地震、2007 年新潟県中越沖地震、2011 年東北地方太平洋沖地震、2016 年熊本地震等が挙げられ、また被害規模は小さいものの 2014 年長野県神城断層地震では断層変位による地中管路被害も発生している。

日本における地中管路の設計手法基準では、断層変位を受ける地中管路について、対策の必要性は挙げられているが、設計手法および対策工法が確立されていないため、断層変位の予測や対策工法の選定などすべて個別設計の段階に留まっているのが現状である。

ここではこのような背景に鑑み、2018 年 4 月～2020 年 3 月までの 2 年間の予定で、土木学会地震工学委員会の中に『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』を立ち上げた。

本研究小委員会では、断層変位を受ける地中管路の耐震に関わる性能を評価・照査するために必要とされる工学的な研究課題について、共同研究および技術情報の交流を図り、地中管路の変形性能を踏まえた断層対策の考案および設計手法の構築を目的としている。

そのため、断層変位を受ける地中管路の設計手法の確立を念頭に、以下の 3 つのワーキンググループを立ち上げ、活動を行っている。

- ①WG1：断層近傍の断層変位を含む地震動の推定
- ②WG2：断層変位を受ける地中管路の設計手法
 - ・断層変位予測式の設定
 - ・断層の対策（影響）範囲の設定
 - ・断層変位を受ける地中管路の設計手法および評価方法の確立
- ③WG3：断層変位を受ける地中管路の対策方法および維持管理方法
 - ・断層対策工法の考案および選定
 - ・維持管理方法の提案

本報告は、本年 1 月に行われた第 9 回「インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム」における断層変位に関する小委員会関連セッションでの成果発表を含む形で、これまでの小委員会での議論を基に中間とりまとめを行ったものである。

2019 年 8 月

『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』委員長
清野 純史

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 委員構成

会務	氏名	所属	WG*
委員長	清野 純史	京都大学	
副委員長	鈴木 崇伸	東洋大学	1,2
幹事長	長谷川 延広	JFE エンジニアリング (株)	2
WG1 主査	野津 厚	港湾空港技術研究所	1
WG2 主査	小野 祐輔	鳥取大学	2
WG3 主査	鎌田 泰子	神戸大学	3
委員	庄司 学	筑波大学	2
委員	宮島 昌克	金沢大学	2,3
幹事	古川 愛子	京都大学	1
委員	宮本 勝利	(株) 日水コン	2
幹事	大嶽 公康	(株) NJS	3
幹事	岩田 克司	(株) エイト日本技術開発	1
幹事	岸 正蔵	(株) クボタ	2
幹事	金子 正吾	(株) クボタ	3
幹事	西川 源太郎	積水化学 (株)	2
幹事	中園 隼人	JFE エンジニアリング (株)	3
委員	坂下 克之	大成建設 (株)	2
委員	森本 皓一	(株) 栗本鐵工所	2
委員	岩楯 徹広	首都大学東京	1
委員	田中 努	メトロ設計 (株)	2
委員	有賀 義明	弘前大学	2
委員	矢澤 修一	日鉄住金 P & E (株)	3
委員	小倉 均	日鉄住金 P & E (株)	3
委員	小田 圭太	(株) クボタ	2
委員	副島 紀代	大林組	3
委員	大室 秀樹	(株) クボタケミックス	3
委員	森 健	JFE エンジニアリング (株)	2

※ 1：断層近傍の断層変位を含む地震動の推定

2：断層変位を受ける地中管路の設計手法

3：断層変位を受ける地中管路の対策方法および維持管理方法

目 次

1. 断層変位を受ける地中管路の設計手法の提案	1
1.1 はじめに	1
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	2
1.3.断層変位	3
1.3.1 断層変位の予測式	3
(1) 松田式による断層変位量の推定	3
(2) 食い違い弾性理論に基づく地表断層変位の推定	5
(3) 文献調査	8
1.3.2 断層変位の分布	9
(1) 地表に出現する位置のばらつき	9
(2) 模型実験による地表地震断層	13
(3) 海外事例	17
1.4 断層と地盤と管路の変位挙動の関連性について	20
1.5 断層変位を受ける地中管路の変形の特徴	22
1.5.1 構造・材質の違いによる変形の特徴	22
1.5.2 地中管路に作用する地盤反力)	26
1.6 断層変位を受ける地中管路の設計手法	29
1.6.1 設計フロー	29
1.6.2 設計条件の設定	31
1.6.3 要求性能	35
1.6.4 設計手法	37
(1) 一体構造管路	37
(2) 継手構造管路	40
1.6.5 設計事例	42
(1) 一体構造管路	42
①鋼管	42
②ポリエチレン管	43

(2) 継手構造管路	46
2. 断層変位を受ける地中管路の対策方法および維持管理方法	50
2.1 はじめに	50
2.2 これまでの断層対策事例	50
2.3 断層変位に追従した事例	63
2.4 アンケート調査	64
3. 数値解析手法	67
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	67
3.2 利用できる数値解析手法の整理	70
3.3 動的解析手法	74
3.3.1 耐震設計上の動的解析の扱いについて	74
3.3.2 永久変位成分を含む地震動の計算手法について	75
3.3.3 永久変位成分を含む地震動の計算事例について	76
参考資料	
SPH 法について	80
分岐断層及び副断層の考え方	81

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

本章では断層変位に対する地中管路の設計に対する基本的な考え方を示し、具体的な手順について示す。また、可撓性・伸縮性を有する継手や曲げ変形性能に優れた管を用いた対策がすでに実用化されており、具体的な設計方法についても紹介する。

断層変位に対する地中管路の設計では、対象とする断層が活動した際に管路周辺で発生する地盤変形を想定し、その地盤変形に対する管路の応答を評価する必要がある。断層変位に伴い管路周辺の地盤が受ける変形は、断層が活動したときの食い違い発生量を設定した上で、管路周辺の周辺地盤の変形を設定することで評価される。原子力施設を除く一般のライフライン施設では、地表付近の比較的軟弱な地盤中に管路が設置されることも多いため、軟弱な地盤における断層変位の伝播について評価する必要がある。

地盤変形に対する管路の応答は、地盤との相互作用の結果として生じるため、管路と地盤を一体化した解析を行うことになる。従来の耐震設計では、管路と地盤の相互作用は、地盤ばねを用いることで取り扱われてきた。断層変位を受ける管路に対しても、地盤ばねを用いた解析法は適用可能であると考えられるが、地盤ばねの設定法については不明な点が残されている。すなわち、従来の耐震設計で想定するよりも大きな管路と地盤の間の相対変位を考慮する必要があるため、地表面あるいは基礎地盤の存在や管と地盤の間に生じる空隙の影響にも配慮が必要となる可能性がある。また、管路の変形も大きくなるため、管体に生じる曲げモーメントと軸力の連成効果についても無視できない。さらに、断層と管の交差角によって管に生じる軸力の向きが変わる点にも注意が必要である。

これまで、断層変位への対策として、可撓性・伸縮性に優れた継ぎ手や、曲げ変形性能に優れた管を用いることが実用化されている。これらの対策法に対しては、具体的な断層変位が与えられた場合に具体的な設計が可能となっている。これらの設計法について、その概要を紹介する。なお、以下に示す内容については、研究・開発途中の技術が多々含まれているため、技術的な制約もある、これらの制約について、今後の課題を含めて可能な限り明らかにしておく

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

各種基準における断層変位の設計上の扱いについて、以下の設計基準について断層変位の扱いを整理した。

- 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¹⁾
- 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²⁾
- ③水道施設耐震工法指針・解説－2009 年版－，日本水道協会³⁾
- 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⁴⁾
- 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⁵⁾
- ⑥Seismic Guidelines for Water Pipelines（American Lifelines Alliance-ALA，March 2005⁶⁾

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）」は、活断層調査などにより地表地震断層の存在が想定され、それを横断して構造物を建設せざるを得ない場合は、その規模に応じて影響変位量を吸収する構造あるいは追従する構造により対処することとしている。ただし、影響変位量が大きく、そのままの構造では対処が困難な場合は、構造物の位置やルートの見直しにより地震断層を避けるとしている。

②「下水道施設の耐震対策指針と解説」は、断層変位を「吸収する」、「追従する」ことは困難であることから、「避ける」ことを基本とし、やむを得ず位置やルート変更ができない場合は震後において構造物の機能を代替するシステムや復旧方策などを検討しておく必要があるとしており、積極的な構造的対処は想定していないようである。

③「水道施設耐震工法指針・解説」は、水道施設の建設地点の選定において活断層を避けて選定することを基本としているが、管路等の線状構造物は活断層を横断して布設することがあるため、想定される断層変位に対応可能な変形性能の確保やバックアップルートの確保等の対策を講じるとしている。そして、想定される断層変位に対応可能な変形性能を埋設管路に確保される事例や断層変位の算定方法を紹介しており、具体的に構造的な対処を想定しているようである。

④「道路橋示方書・同解説」は、断層変位の影響を受けないような架橋位置や橋梁形式を選定することを標準とし、やむを得ず影響を受ける場合は少なくとも致命的な被害が生じにくくなるような構造とするとしている。橋梁構造物は数 m におよぶ断層変位を受けた場合は落橋という致命的な被災が想定されることや、断層変位に対する設計手法が確立されていないことが構造的な対策を困難としている要因であると考えられる。

⑤「鉄道構造物等設計標準・同解説」は、断層変位についてはその影響を受けないように路線計画をするのがよいとしている。しかし、やむを得ず活断層と交差させる場合は断層方向とできるだけ直交させたり、橋梁の場合は落橋防止対策の強化や山岳トンネルの場合はインバート設置等の対策があげられている。なお、断層の位置は「線」として明確に取り扱うことが難しいことから、対策を要する区間は一般には数 m～数十 m の幅を有する「帯」として取り扱わざるを得ないことに言及している。

⑥「Seismic Guidelines for Water Pipelines」では、断層横断箇所での設計方法について記述されているが、断層を避けるもしくは影響を少なくするといった記述はない。設計手法としては数値解析の実施を基本としており、入力値の算出方法が詳細に記述されている。

上述のように、数 m に及ぶ断層変位に対しては各基準とも影響を受けないように「避ける」ことを基本としている。埋設管路については、下水道はやむを得ず避けることができない場合は震後において構造物の機能を代替するシステムや復旧方策を検討するとしているのに対して、上水道は想定される断層変位に対応可能な変形性能の確保やバックアップルートの確保等の積極的な対処に言及しているのが特徴的ある。

1.3 断層変位

1.3.1 断層変位の予測式

埋設管路に作用する断層変位量の予測式の候補として、日本内陸の断層に対して歴史地震の資料より定められた松田 (1975) による式 (松田式) と、食い違い弾性論に基づく Okada (1985) の式 (Okada 式) があげられる。これらの2つの式の意味を概説するとともに、適用性について考察することとする。

(1) 松田式による断層変位量の推定

松田 (1975) の論文では、1) 断層系のディメンジョン L 、2) 第四紀後期における断層の平均変位速度 S 、3) 断層運動におけるその断層またはその部分区間での単位変位量 D_0 の諸量と、地震の規模・発生周期との関係を主に以下のように考察している。

「断層 (または断層系) のディメンジョンを断層線 (またはその集合体) の長さ L [km] で」あらわした場合に、「 L とそれに対応する地震のマグニチュード M との関係として、歴史地震の地震断層の長さ とマグニチュードの」データに基づき、図 1.3.1 左図と次式を得る。

$$\log L = 0.6M - 2.9 \quad (1.3.1)$$

図中の○印が地表にあらわれた断層線の長さのデータであり、9 地震 9 データである。これより、日本内陸の活断層を対象とした場合、マグニチュード M から断層線の長さ L [km] を推定することができる。

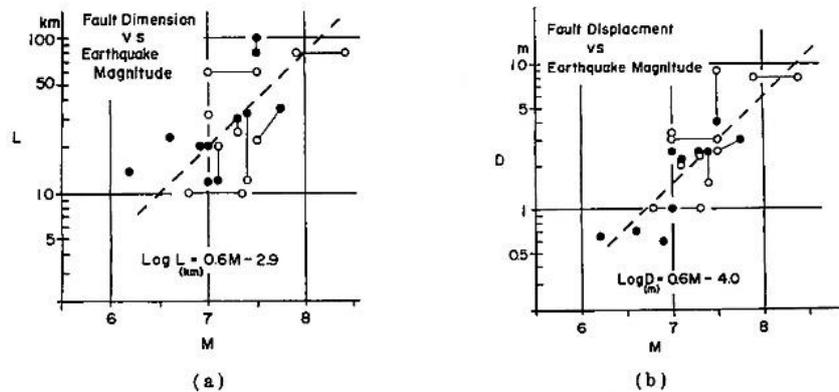


Fig. 1. Magnitude-fault dimension relation and magnitude-displacement relation in historic earthquakes in Japan (inland). ○: values observed on the surface. ●: values estimated from seismological or geodetic data. For data, see Table 1.

図 1-3-1 地震のマグニチュード M と断層線の長さ L [km]並びに断層変位量 D [m]の関係 (松田 (1975) ⁷⁾ の Fig.1.)

次に、断層の平均変位速度 S とその断層の地震発生周期 R との間には、 D を 1 回の地震に伴う断層変位量、 C を平時のクリープ性断層変位速度とすれば、次のような関係がある (Wallace (1970)).

$$R = \frac{D}{S - C} \quad (1.3.2a)$$

上式において、日本内陸の場合は $C = 0$ と考えることができ、

$$R = \frac{D}{S} \quad (1.3.2b)$$

となる。また、 D と地震の規模 M の関係は、歴史地震の資料によると、図 1.3.1 右図と次式のようになる。

$$\log D = 0.6M - 4.0 \quad (1.3.3)$$

これより、色々な平均変位速度 S の断層に対して、その R と M の関係を求めると次式のようになる。

$$\log R = 0.6M - 4.0 - \log S \quad (1.3.4)$$

式(1.3.1)から式(1.3.4)の適用に当たって基本となる考え方は、「1 回の地震時の断層変位量や地震の規模は一般に断層ごとにことなっているものの、1 つの断層あるいはその部分区間を指定すれば、そこから発生する地震の規模もその時の変位量も最近地質時代を通じてほ

ぼ一定」と見なせるといふものである。「すなわち断層（またはその特定の部分区間）ごとに発生する地震の規模と地震変位量に固有値がある」と考える。そのように考えた時の地震規模をその断層（または部分区間）の固有地震規模 M_0 、1 回の地震変位量を単位変位量 D_0 とよぶ。このように、その断層系またはその部分区間から、歴史地震が発生している場合には、そのマグニチュード M とその時の断層変位量 D をそれぞれその断層の固有地震規模 M_0 と単位変位量 D_0 とみなすことができ、 M か D の一方が知られている場合には、上式によって他方が求められる」と考えることができる。

図 1.3.1 右図のデータのプロットによれば、式(1.3.3)による断層変位量は限られたデータに基づく平均的な値とみなされるので、対象とする埋設管路設計において第 1 義的な参照値としては活用することができると思われる。

(2) 食い違い弾性論に基づく地表断層変位の推定

Okada (1985) の論文⁸⁾では、断層のすべり量及び開口量が点震源（図 1-3-2）及び矩形震源の形式で 3 次元的に与えられた場合の半無限媒質中の自由表面の変位、ひずみ、及び、傾斜角の解析解が示されている。

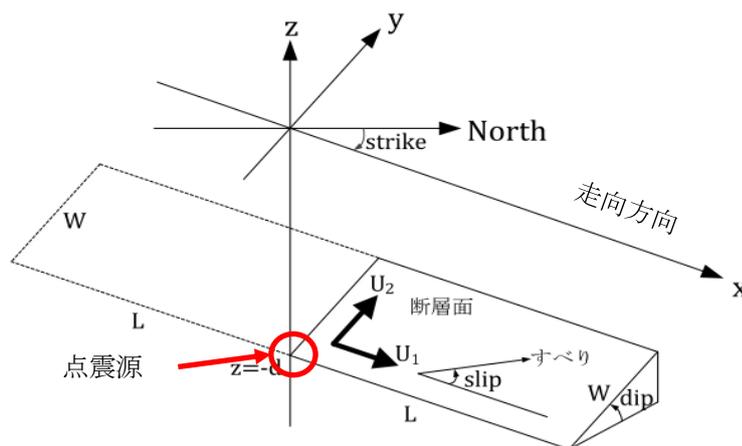


図 1-3-2 点震源の場合のモデル

これらの中でも、特に横ずれ断層並びに縦ずれ断層の場合の地表面での変位量は、 x, y, z : 計算対象位置の座標、 d : 点震源の深さ、 U_1, U_2 : 点震源のすべり量、 δ : 断層面の傾斜角、 $\Delta\Sigma$: 断層表面要素とすると、次式のように求められる。

$$\text{For strike-slip} \begin{cases} u_x^0 = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{3x^2q}{R^5} + I_1^0 \sin \delta \right] \Delta\Sigma \\ u_y^0 = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{3xyq}{R^5} + I_2^0 \sin \delta \right] \Delta\Sigma \\ u_z^0 = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{3xdq}{R^5} + I_4^0 \sin \delta \right] \Delta\Sigma \end{cases} \quad (1.3.5a)$$

$$\text{For dip-slip} \begin{cases} u_x^0 = -\frac{U_2}{2\pi} \left[\frac{3xpq}{R^5} - I_3^0 \sin \delta \cos \delta \right] \Delta\Sigma \\ u_y^0 = -\frac{U_2}{2\pi} \left[\frac{3ypq}{R^5} - I_1^0 \sin \delta \cos \delta \right] \Delta\Sigma \\ u_z^0 = -\frac{U_2}{2\pi} \left[\frac{3dpq}{R^5} - I_5^0 \sin \delta \cos \delta \right] \Delta\Sigma \end{cases} \quad (1.3.5b)$$

なお、 p, q, R は次式より求められる幾何学的諸量である。

$$p = y \cos \delta + d \sin \delta \quad (1.3.6a)$$

$$q = y \sin \delta - d \cos \delta \quad (1.3.6b)$$

$$R^2 = x^2 + y^2 + d^2 = x^2 + p^2 + q^2 \quad (1.3.6c)$$

また、式(1.3.5)における $I_1^0 \sim I_5^0$ は、 μ, λ : ラメ定数を用いて、次式により表わされる。

$$I_1^0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} y \left[\frac{1}{R(R+d)^2} - x^2 \frac{3R+d}{R^3(R+d)^3} \right] \quad (1.3.7a)$$

$$I_2^0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} x \left[\frac{1}{R(R+d)^2} - y^2 \frac{3R+d}{R^3(R+d)^3} \right] \quad (1.3.7b)$$

$$I_3^0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} y \left[\frac{x}{R^3} \right] - I_2^0 \quad (1.3.7c)$$

$$I_4^0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} y \left[-xy \frac{2R+d}{R^3(R+d)^2} \right] \quad (1.3.7d)$$

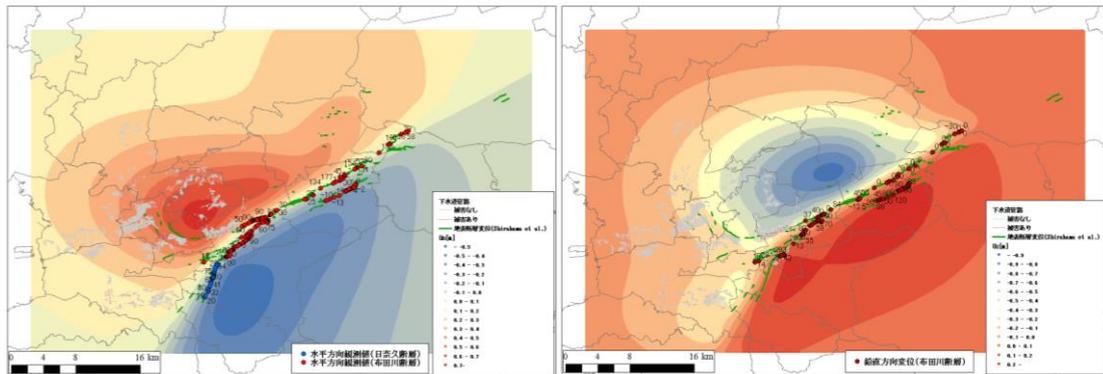
$$I_5^0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} y \left[\frac{1}{R(R+d)} - x^2 \frac{2R+d}{R^3(R+d)^2} \right] \quad (1.3.7e)$$

以上より、埋設管路が敷設されている対象地域において、点震源（図 1.3.2）及び矩形震源のモデルのすべり量及び開口量が想定されている場合には、これらの式を適用することによって地表面の断層変位量を想定することが可能となる。

ここでは、2016年熊本地震を対象とした Asano and Iwata (2016)⁹⁾の震源モデルを適用し、表 1-3-1 のパラメータ設定のもと Okada 式で地表面の断層変位量である南北方向変位 U_n 、東西方向変位 U_e 、及び、鉛直方向変位 U_z の3方向の変位を算出した。算定結果を図 1-3-3 に示す。

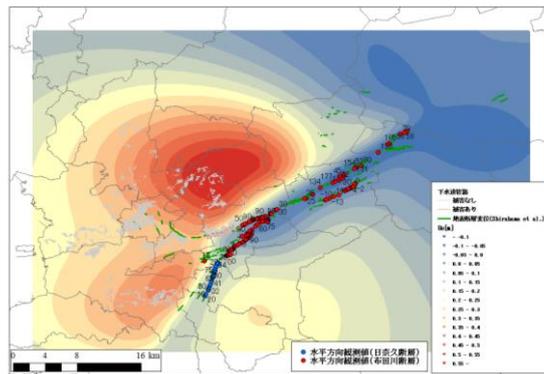
表 1-3-1 Okada 式の適用に当たってのパラメータ設定

		Asano & Iwata	
		布田川断層(#2)	日奈久断層(#1)
断層の数		189	
		9×14	9×7
計算格子数		1040×800	
断層の幅, 長さ[km]		2×2	
断層パラメータ[°]	走向	235	205
	傾斜	65	72
	すべり角	177~263	
上端深さ[km]		1.988~17.205	
P波, S波速度[km/s] ⁴⁾	P波	5.8	
	S波	3.4	
メッシュサイズ[m]		50	



(a) U_n

(b) U_e



(c) U_z

図 1-3-3 Okada 式による地表面の断層変位量の算定事例(Asano and Iwata (2016)の震源モデル)

このように、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を行なうことが可能となる。しかし、Okada 式は、震源位置でのすべり量及び開口量に基づく半無限弾性体の自由表面における変位を算定するものであり、断層すべりが地表面まで及んだ場合のような弾塑性変形をそもそも考慮したものではない。すなわち、特に、不連続面となる断層面近傍においては、塑性変形のみで変位量を過少評価したものになっている。よって、このような式を適用するに当たっての限界を適切に認識した上で、Okada 式を適用する必要がある。

(3) 文献調査：高性能数値解析手法の適用に基づく地表断層変位の推定

羽場ら (2017)¹²⁾は、主断層及び副断層の変位評価を目的とした 3 次元非線形有限要素法に基づく高性能数値解析手法を開発している。上述した食い違い弾性論により得られた変位場を分析対象とする構造物モデルの境界に強制変位として作用させる解析方法が汎用的であろうが、本来、不連続となる断層面を挟む 2 つの節点に同じ変位を与えることになり、この境界におけるずれ変位の入力方法の提案がなされている。重要構造物に接続する管路や重要構造物周辺部の管路に対しては、このような高性能数値解析手法の実装が今後益々求められてくるものと考えられる。

1.3.2 断層変位の分布

(1) 地表に出現する断層線のばらつき

内陸型地震では、地震の規模や地盤条件などにより、地表面に地表地震断層が現れることがある。また、活断層地図では、空中写真や文献調査をもとに、想定される断層線が表記されており、地震発生前後での想定および実際に地表面に現れた断層線を比較することができる。

本項では、この活断層地図をもとに、もともと想定されていた断層線から、実際に地表に出現した断層線との位置関係を整理し、想定されていた断層線に対して実際の地震では、断層線がどの程度の幅（誤差）を持って出現するかをまとめる。

1) 活断層地図

現在、日本で使われている活断層地図は、主に活断層図（国土地理院）¹³⁾、活断層データベース（産総研）¹⁴⁾、活断層詳細デジタルマップ（東京大学出版会）¹⁵⁾などがある。これらの活断層地図は、インターネットから入手できるもの、市販されているものがあるが、どの地図からも、日本全国の想定される断層線の情報を容易に知ることができる。

今回の想定される断層線は、活断層デジタル詳細マップを用いて、実際に地震によって出現した断層線との比較を行う。

2) 対象とする断層

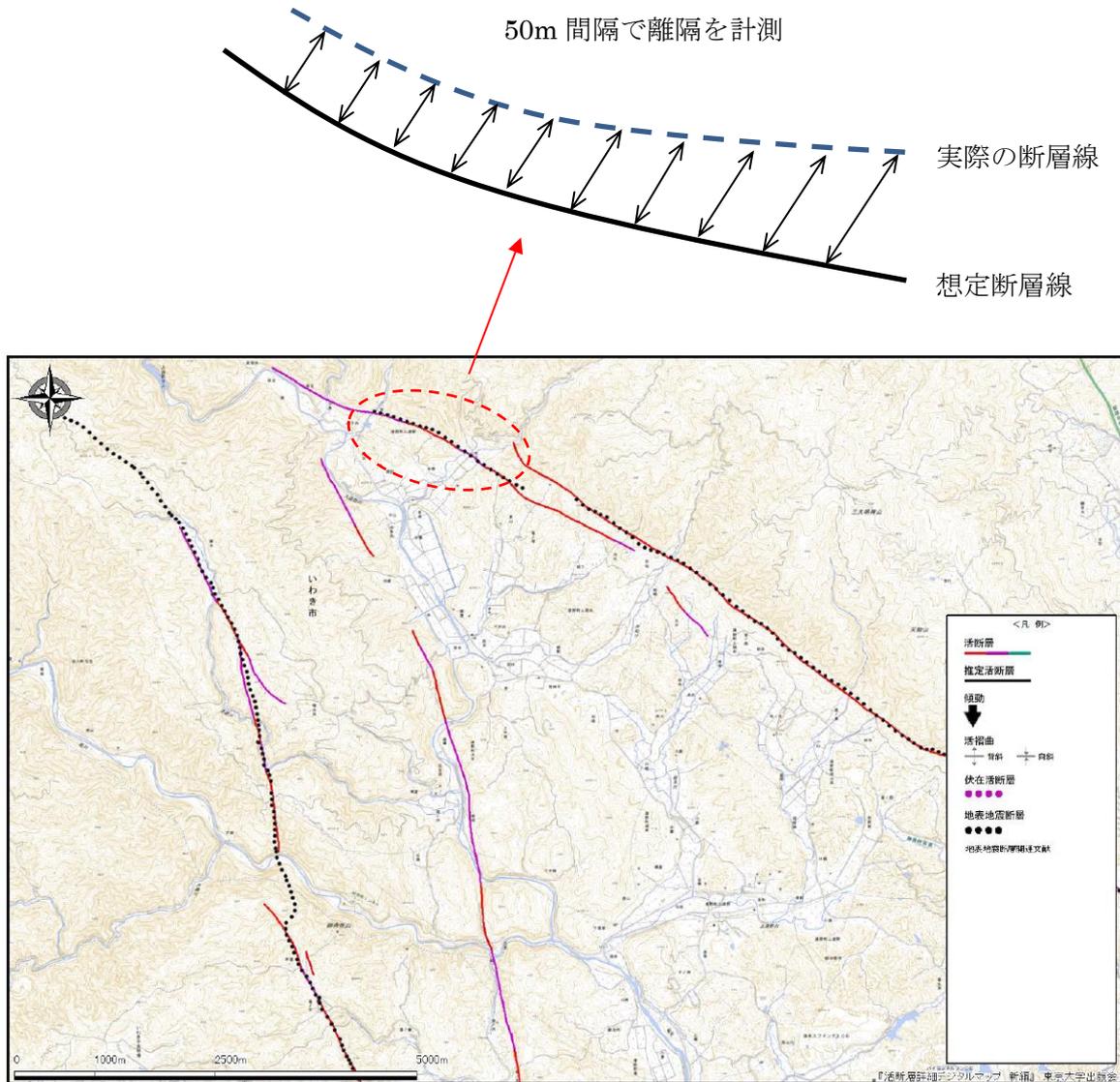
今回対象とする断層は、表 1-3-2 に示すように、1995 年の兵庫県南部地震以降に起きた地震で、地表に地表地震断層が現れた断層についてまとめる。

表 1-3-2 対象地表地震断層

発生日	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

3) 地震前後の断層線の離隔測定

対象とする断層について、活断層詳細デジタルマップを元に、想定されていた断層線および実際に出現した断層線との離隔を計測し、整理を行った。断層線間の離隔の計測は図1-3-4が示すように、想定されていた断層線から、実際に出現した断層線の距離を50m間隔で実施し度数分布表により、想定および実際の断層線がどの程度の誤差で出現しているかの評価を行う。



※活断層デジタル詳細マップ（2018）より引用

図 1-3-4 想定および実際の断層線（井戸沢断層，湯ノ岳断層）

4) 度数分布

想定および実際の断層線を，図 1-3-5～図 1-3-11 に示すように，断層別に度数分布グラフ表した．また，全断層をまとめたグラフを図 1-3-12 に示す．

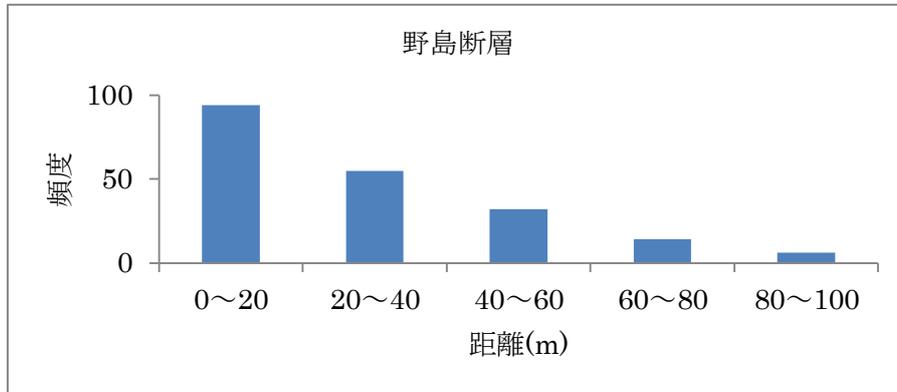


図 1-3-5 断層線の比較（野島断層）

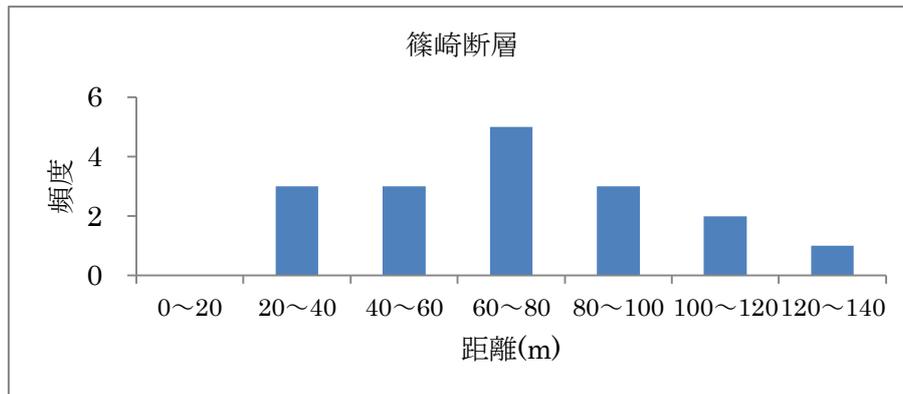


図 1-3-6 断層線の比較（篠崎断層）

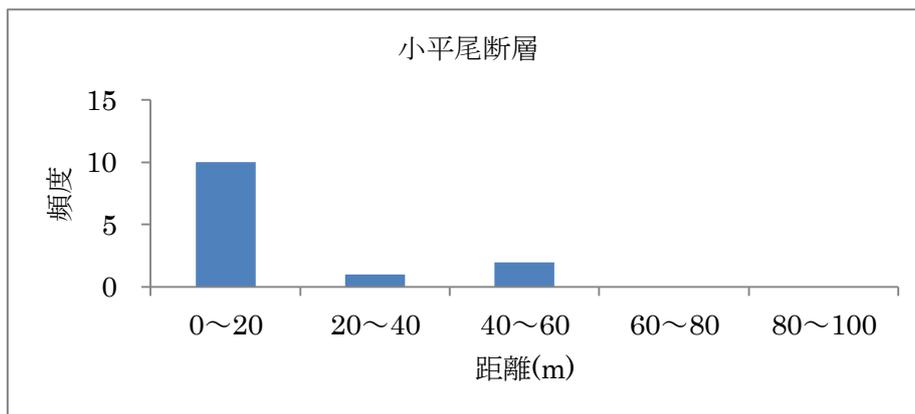


図 1-3-7 断層線の比較（小平尾断層）

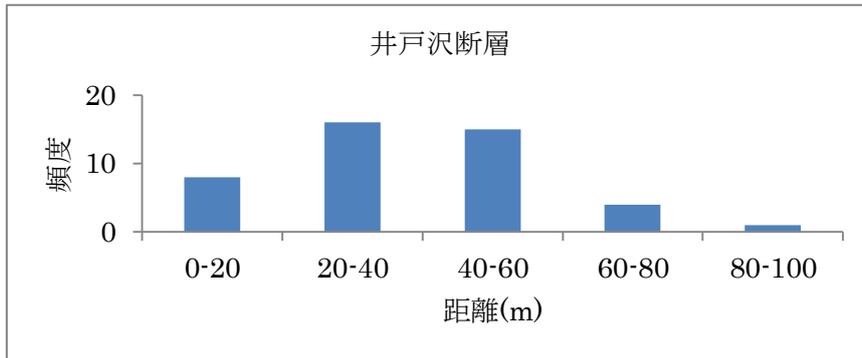


図 1-3-8 断層線の比較 (井戸沢断層)

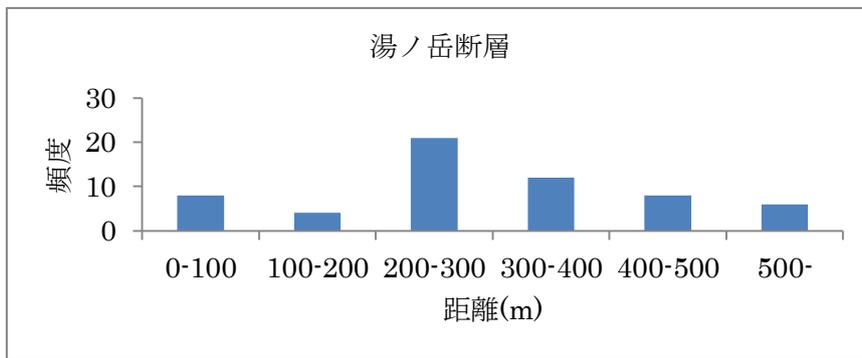


図 1-3-9 断層線の比較 (湯ノ岳断層)

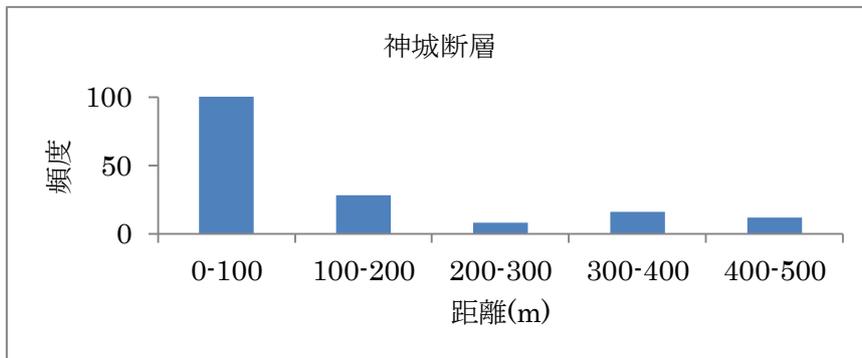


図 1-3-10 断層線の比較 (神城断層)

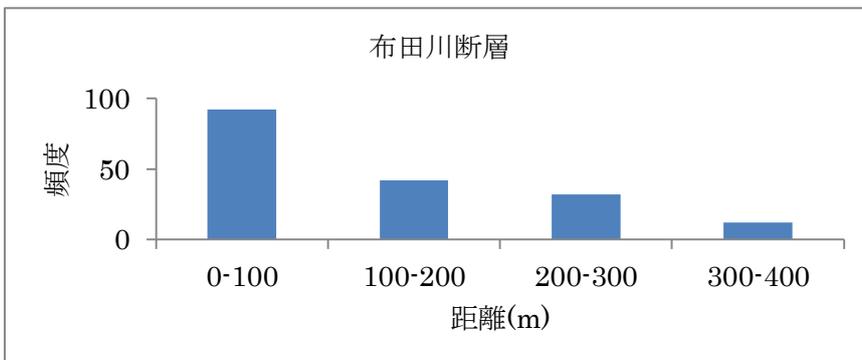


図 1-3-11 断層線の比較 (布田川断層)

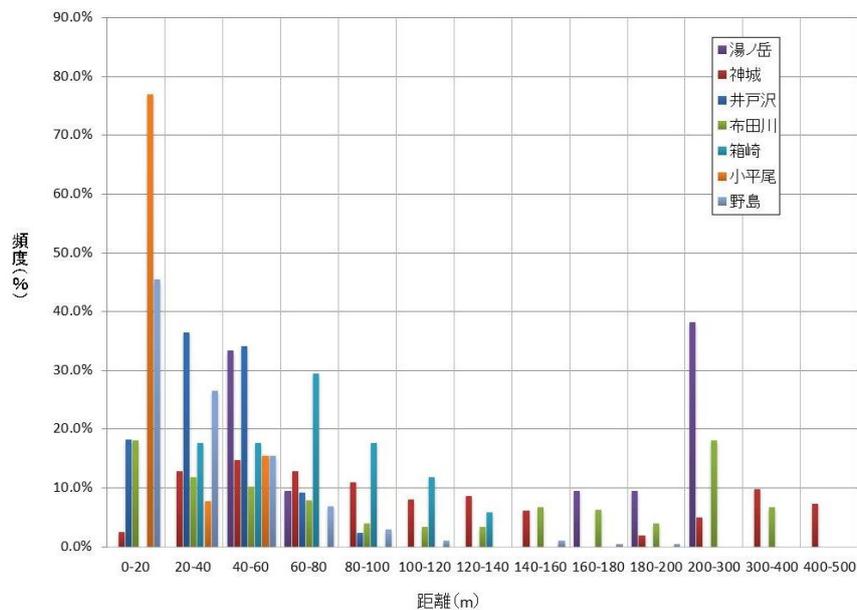


図 1-3-12 断層線の比較（全断層）

5) まとめ

断層出現位置のばらつきでは、実際に地表に出現した断層線の位置は、想定していた断層線に対してある程度の幅を持って地表面に出現していることが分かる。この出現幅では、数 100m も離れて出現しているものもあるものの、全 644 箇所のデータ中、約 72% (461 箇所) が、100m 以内に分布しており、管路の設計等で活断層地図を利用する場合には、100m 程度のばらつきを考慮する必要がある。

(2) 模型実験による地表地震断層の分布

地中深部の断層線のおおよその位置が分かっても、水道管路が布設されている地表付近にどのように現れるか、また、断層線から離れていても地表付近で接近してしまうことも考えられるため、基本的な挙動を把握しておくことが重要である。

そこで、「断層変位評価小委員会 研究報告書 2015年7月 土木学会原子力土木委員会」¹⁶⁾の模型実験に関する報告から、地表断層に関する知見を調べた。

模型実験は、大きく「重力場での模型実験」と「遠心力模型実験」とに分かれる。後者の「遠心力模型実験」は、地中深部の地中応力が再現できるため、砂質系地盤の実際に近い挙動を再現できるメリットがあるが、「重力場で行う模型実験」に比べて、载荷装置が大型でかつ模型が小型になってしまうデメリットがある。ここでは、比較的豊富に研究事例が見られる「重力場での模型実験」を中心に調べた。

1) 重力場での断層ずれ模型実験の特徴

① 模型実験の対象範囲

検討の対象は、ほとんどが表層地盤（土質地盤）の変形性状（主にせん断帯の発達）であり、断層位置の岩やその上部の軟岩まで対象としたものは極わずかである。

② 模型の規模と地盤材料

模型地盤の最大厚さは2.0m程度であり、地中応力のレベルは小さい。そのため、低拘束圧下の力学特性に基づいて実験結果を解釈すれば定量的な評価も可能と考え、特性の明確な乾燥砂を用いた研究が多い。

一方、二次元DEM 解析の検証のためにアルミ棒を用いた鬼塚らの実験も多数ある。このような地盤模型は、相似性の観点から実地盤との対応は不明瞭で、実験結果の解釈は定性的なものになると言われる。

③ 模型地盤の形状と変位の与え方

模型の形状は、底面も地表面も水平で、地盤は均質・一様な一層モデルである。地盤の断層変位を与えて、表層地盤の中を地表面に向かって発達するせん断帯の形状と地表面ずれの位置や、その周囲の撓曲の状況等を調べている。

④ 断層の種類

断層の種類は、多くが「縦ずれ断層」が対象で、「横ずれ断層」の研究事例は少ない。

「縦ずれ断層」については、地盤の断層の角度と地盤内に発生するせん断帯の形状・位置や発達過程の関係が詳細に調べられている。ほとんどの実験では、矩形の土槽の二分割した底盤の片方を準静的に断層面に沿ってスライドさせ、アクリルないしガラスで製作した側面を通して地盤内部に発達するせん断帯の性状や地盤内部のひずみ分布を観察・計測している。やや特殊なものとしては、「落し戸方式（鉛直断層）」を採用して動的な影響を調べたものや、土槽底面の土圧計で応力分布を比較したものがある。

「横ずれ（斜めずれ）断層」の実験は、地盤に発達する3次元の変形性状が複雑で、観察も困難なため、事例が少ない。小山・谷らは層厚0.4m までの実験を行って地表面に発達する網目状のせん断帯を調べている。

2) 断層が地表の現れる範囲に関する知見

水道幹線等の設計において特に重要な、地表に現れる断層の範囲については、重力場での砂質土地盤の模型実験から、次のような知見が得られている。

①縦ずれ断層の場合

「縦ずれ断層」については、大規模な実験が精度と信頼性が高いと評価され、そのような実験を行った電中研の実験結果¹⁷⁾より、そこから次の知見が得られる。

せん断層地表到達位置 W と豊浦標準砂の層厚 H の比 W/H のせん断型・断層傾斜角・層厚による変化が、図1-3-13のように示されている。

これによると、断層の地表到達位置 W と層厚 H の比は、層厚に依存せず、逆断層の場合は傾斜角に依存し、 30° の場合 $W/H=2$ （断層直上から地盤厚の2倍の離れ）程度の地表に現れ、 60° の場合 $W/H=1$ （断層直上から地盤厚の離れ）程度である。また正断層の場合は角度によらず、ほぼゼロ（断層直上）に現れる。

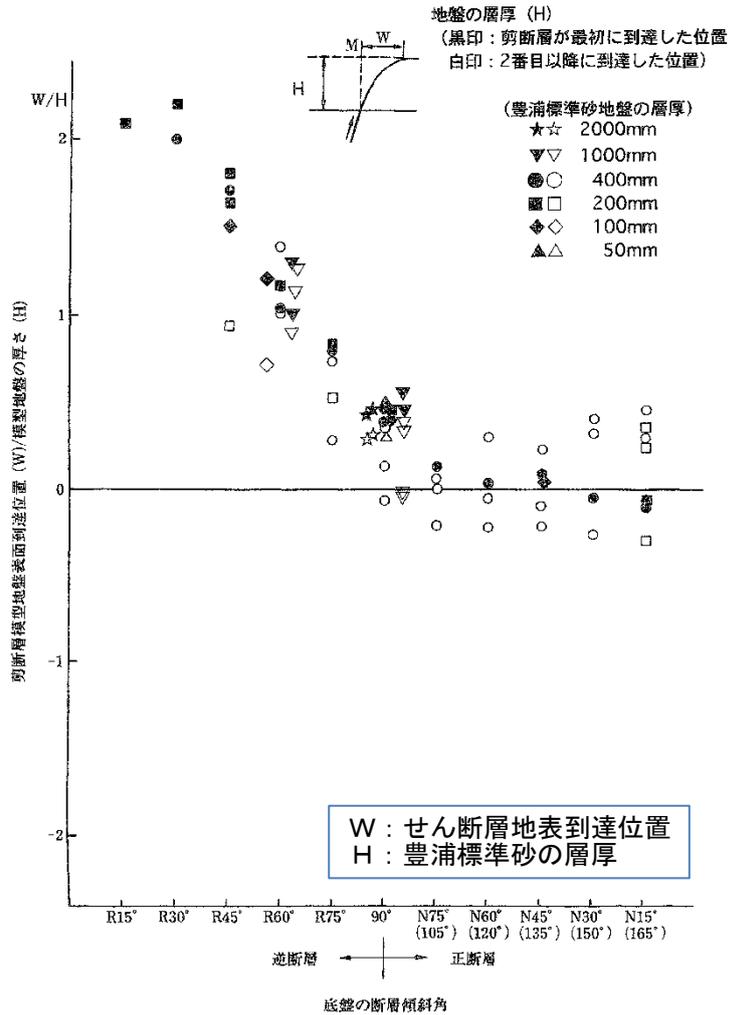


図 1-3-13 W/H のせん断型・断層傾斜角・層厚による変化

②横ずれ断層の場合

「横ずれ断層」については、数が少ないが、影響が大きく現れると言われる土槽厚の厚さを変えて行っている実験結果¹⁸⁾より、そこから次の知見が得られる。

横ずれ断層のずれに伴って地表に現れる「リーデルせん断帯」の伸びる範囲 DR の地盤厚 H による変化が、図1-3-14のようにまとめられている。30~400mmの地盤厚では、せん断帯の範囲 DR は地盤厚さの1~2倍の範囲にある。地盤厚 H は薄いと広め、地盤厚が厚いと地盤厚に近づく。

また、せん断帯の幅は、地盤材料の粒度に依存するが、せん断帯の大局的な形状は、模型地盤の層厚と地盤材料の平均粒径の比の影響を余り受けないことが分かっている。しかし、その詳細な形状は、小規模な実験では粒径効果が大きくなるので、大規模な実験結果が精度と信頼性が高い。

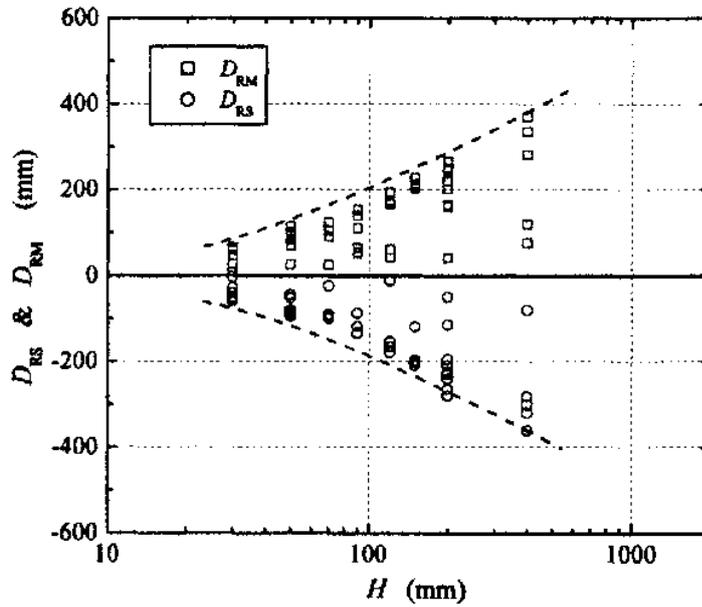


図 1-3-14 DR と H の関係

3) 今後の課題

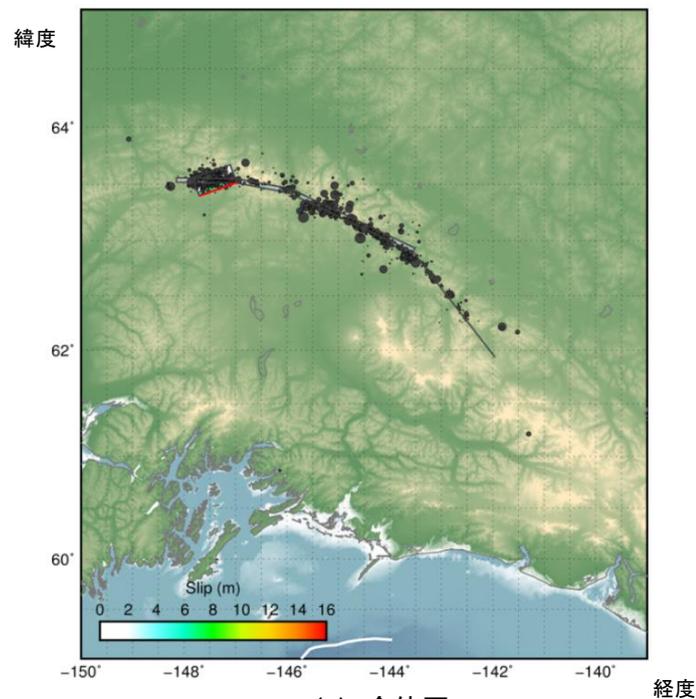
既往の模型実験は均質・一様な土質地盤を対象としていたが、シールドトンネル内に敷設する水道管は、軟岩の内部を通過することも有り、また、堆積層と岩盤の境界部での変形性状は三次元となるので、実験の境界条件の設定や計測・観測も容易ではない。したがって、実験を対象に検証された数値モデルを用いて、表層モデルの数値実験を行う取り組みと併せて検討する必要がある。

(3) 海外事例

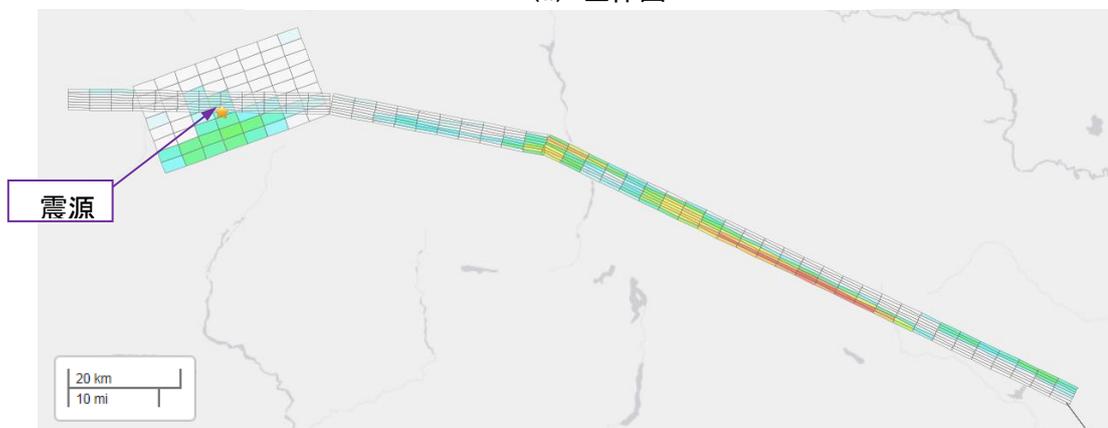
本項では、海外において地表に出現した地震断層の変位量分布について示す。海外では、近年日本で出現した地表地震断層よりも変位量大きい断層が出現している。以下に、アメリカ、台湾、パキスタンで発生した地表地震断層の事例について説明する。

1) アメリカ

2002年11月3日にアメリカ アラスカ州で発生したマグニチュード7.9のデナリ地震では、長さ336kmにわたり地表に地震断層が出現した。図1-3-15に、断層付近における滑り分布の地表面投影図¹⁹⁾を示し、図1-3-16に地表面滑り量の分布を示す。図1-3-16は、図1-3-15(b)の滑り分布図を参照し、震源を起点として震源から240km区間における代表的な地表面滑り量をプロットしている。図1-3-16より、最大15m程度、地表面に滑りが生じていることがわかる。



(a) 全体図



(b) A部詳細図

図 1-3-15 滑り分布の地表面投影

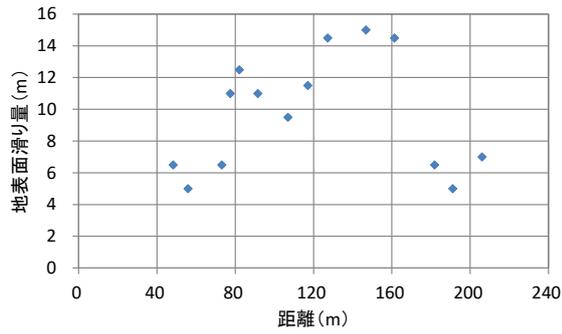


図 1-3-16 地表面滑り量分布

2) 台湾

1999年9月21日に台湾中部で発生したマグニチュード7.6の集集地震では、車籠埔断層に沿って長さ80kmにわたり地表に地震断層が出現した。図1-3-17に断層出現位置²⁰⁾を示し、図1-3-18に鉛直方向の断層変位量分布を地震断層北端を起点として示す。図1-3-18より、断層北端に近い位置で最大10m程度の鉛直方向の断層変位が出現したことがわかる。

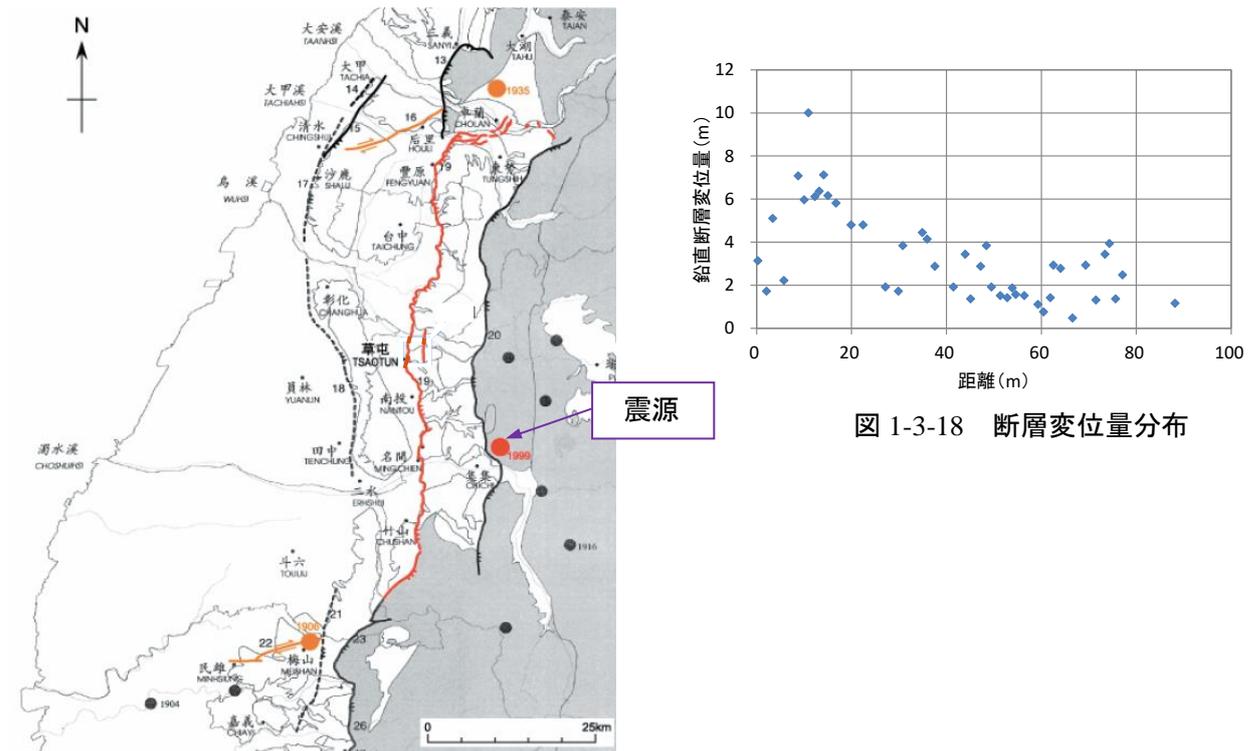


図 1-3-18 断層変位量分布

図 1-3-17 地震断層の出現位置 (地震断層を赤線で示す)

3) パキスタン

2015年10月8日にパキスタン北部で発生したマグニチュード7.6のパキスタン地震では、既存の活断層に沿って長さ65kmにわたり地表に地震断層が出現した。図1-3-19に断層出現位置²¹⁾を示し、図1-3-20に鉛直方向の断層変位量を地震断層北端を起点として示す。図1-3-20より、断層の中間部で最大5.5m程度の鉛直方向の断層変位が出現したことがわかる。

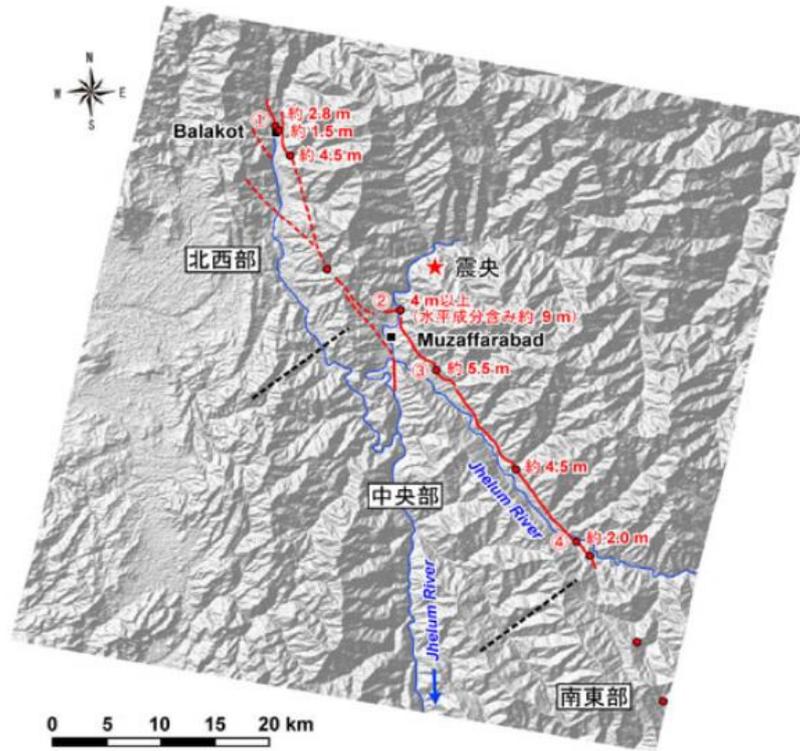


図 1-3-19 地震断層の出現位置（地震断層を赤線で示す）

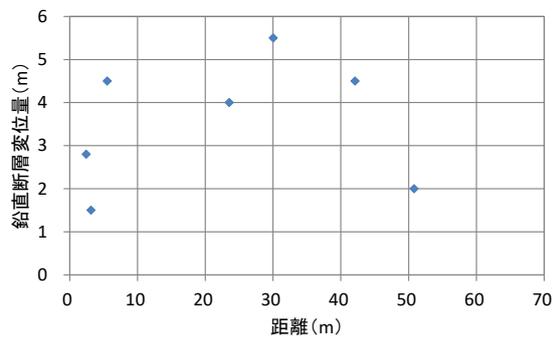


図 1-3-20 断層変位量分布

1.4 断層と地盤と管路の変位挙動の関連性について

(1) 概要

断層変位を受けた地中管路の変位挙動は、管路の形状・寸法・材料・継手構造、断層の形態・規模・変位量・変位速度、周辺地盤の構成・変形特性・土被り・地圧、断層と管路の位置関係等々、様々な要因の影響を受ける。これらの要因の内、ここでは、断層の形態と周辺地盤の変形特性に着目して地中管路の変位挙動との関連性について検討した。

(2) 検討の着目点と検討ケース

断層の形態に関しては、正断層、逆断層、横ずれ断層を想定し、断層の厚さ（断層幅）については、厚さが無い場合と有る場合を想定した。厚さが無い場合とは、断層破碎帯や弱層等が存在せず、断層が面と面の接触面で構成される場合であり、断層変位がそのまま地中管路に作用することが想定される。厚さが有る場合は、断層破碎帯等が存在する場合であり、断層破碎帯等の区間で断層変位が吸収・緩和される可能性が考えられる。周辺地盤の変形特性に関しては、剛性の高い岩盤と剛性の低い軟質地盤を想定した。剛性の高い岩盤は、水源地域や河川上・中流域等、内陸の山岳地域や丘陵地域を想定した場合であり、剛性の低い軟質地盤は、河川下流域や大都市平野部の軟弱地盤等を想定した場合である。剛性の高い堅硬な岩盤では、断層変位が直接的に地中管路に作用すると想定され、剛性の低い軟質・軟弱地盤では、地盤による断層変位の吸収・緩和という現象も想定される。これらの点を勘案し、①岩盤で厚さの無い正断層、②岩盤で厚さの有る正断層、③岩盤で厚さの無い逆断層、④岩盤で厚さの有る逆断層、⑤岩盤で厚さの無い横ずれ断層、⑥岩盤で厚さの有る横ずれ断層、⑦軟質地盤で正断層、⑧軟質地盤で逆断層、⑨軟質地盤で横ずれ断層を想定した場合の9ケースについて検討した。ここでは、上記の内、下線を付した4ケースを紹介する。

(3) 断層の形態と周辺地盤の硬軟に応じた地中管路の変位挙動

堅硬な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の想定を図1-4-1に示す。正断層の場合、管路は引張応力場でせん断され、堅硬な岩盤では断層面で断層変位が直接管路に作用することになる。断層変位量が小さければ管路の被害は免れるが、断層変位量が大きければ管路で被害が生じる危険性が高まる。管路にとっては厳しい状況設定になる。

同様に、岩盤で厚さの有る逆断層を想定した場合の管路の変位挙動の想定を図1-4-2に示す。この場合、管路は圧縮応力場でせん断されることになり、断層の層厚や剛性等が重要な影響要因になると考えられる。断層の剛性が低ければ、断層の区間で管路が挙動し易くなり、層厚が厚ければ、管路に作用する単位長さ当たりの断層変位量が小さくなると想定され、厚さの無い場合比して厚さの有る断層では、断層変位の影響が緩和される可能性が考えられる。

次に、軟質地盤で逆断層を想定した場合の管路の変位挙動の想定を図1-4-3に示す。図中、断層の動きに連動して地盤が変形するエリアを遷移領域として破線で示した。この領域の広さは、地盤の剛性や断層の変位速度等に応じて変化すると考えられるが、地盤が軟質であれば、

遷移領域によって管路に対する断層変位の影響が吸収・緩和される可能性が考えられる。

同様に、軟質地盤で横ずれ断層を想定した場合の管路の変位挙動の想定（平面）を図 1-4-4 に示す。この場合、管路はせん断応力場でせん断変位を受けることになり、管路の変位挙動に対する初期地圧の影響をチェックしておくことが必要になると考えられる。

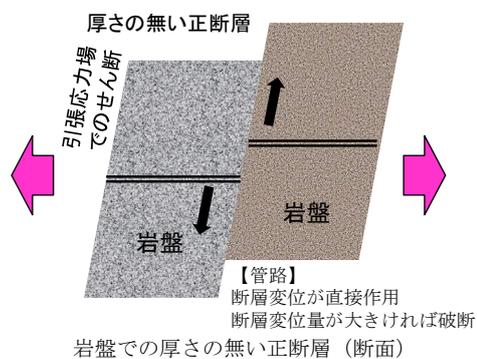


図 1-4-1 岩盤で厚さの無い正断層を想定した場合の地中管路の変位挙動

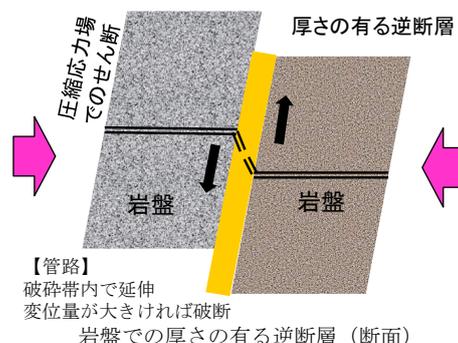


図 1-4-2 岩盤で厚さの有る逆断層を想定した場合の地中管路の変位挙動

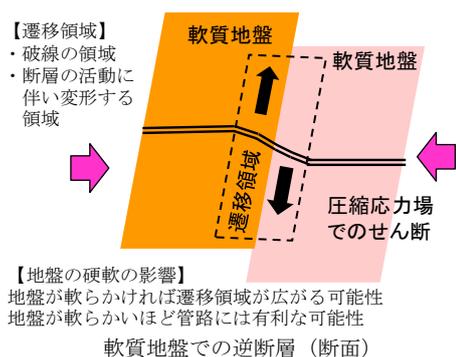


図 1-4-3 軟質地盤で逆断層を想定した場合の地中管路の変位挙動

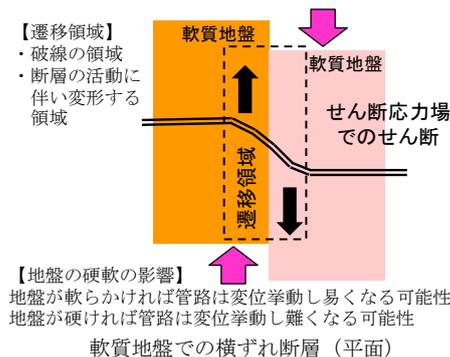


図 1-4-4 軟質地盤で横ずれ断層を想定した場合の地中管路の変位挙動

(4) 実現象に即した評価の重要性

ここでは、断層と地盤と地中管路を理想化して、断層変位に対する地中管路の変位挙動をシンプルに二次元で模式的に示した。実際の断層では、横ずれ成分と縦ずれ成分を共に含む複合型の断層も多く、地盤に関しても、複雑な地形、複雑な地盤構造の場合も多い。管路に関しても、レイアウトが複雑な場合、構造・形状・材質が多様な場合も多い。断層と管路が直角に交差するとは限らず、斜めに交差する場合も多々ある。初期地圧の状況も岩盤地帯と沖積平野部では異なることもある。このように地点依存性の強い構造物の変位挙動と健全性を適確に評価するためには、実現象（実際の状況）に即した評価が必要になる。特に、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である。

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ることがあるので留意が必要である。

1.5 断層変位を受ける地中管路の変形の特徴

1.5.1 構造の違いによる変形の特徴

管路の構造は、継手構造管路（ダクタイル鉄管等）と一体構造管路（溶接継手による鋼管等）に分類することができる。本項では、ダクタイル鉄管、鋼管、ポリエチレン管、塩ビ管について、断層変位を受ける管路の変形の特徴を示す。

① 耐震型ダクタイル鉄管

図 1-5-1 に耐震型ダクタイル鉄管の伸縮挙動と継手性能を示す。耐震型ダクタイル鉄管の継手部は管長の±1%の伸縮性能、所定の屈曲性能（GX 形の場合は 8°）、3DkN（D：呼び径[mm]）の離脱防止性能を有しており、継手が限界まで伸び出しても挿し口突部とロックリングが引っ掛かることで、抜け出さない構造になっている。

図 1-5-2 に断層変位を受けた耐震型ダクタイル鉄管の挙動を示す。継手が伸縮するため、管路が圧縮状態となる場合、引張状態となる場合のいずれの断層変位にも追従可能な管路を設計することができる。また、複数の継手が伸縮・屈曲するため、通常の直管管路でも、ある程度の断層変位に追従することができる。

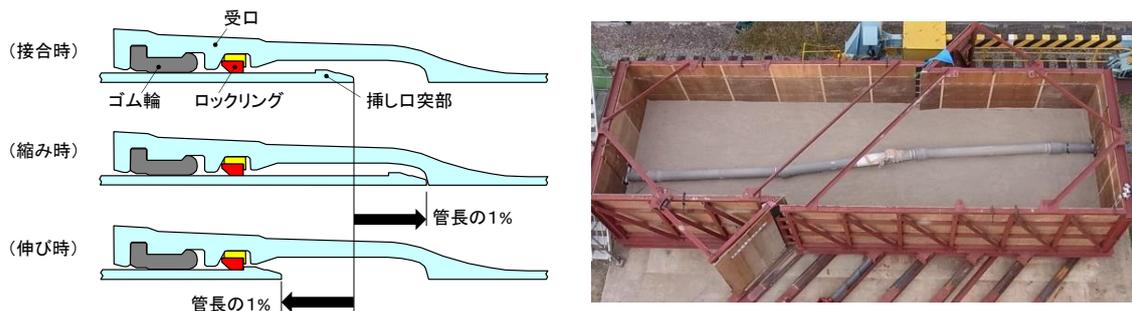


図 1-5-1 耐震型ダクタイル鉄管の挙動（GX 形ダクタイル鉄管の例）²²⁾

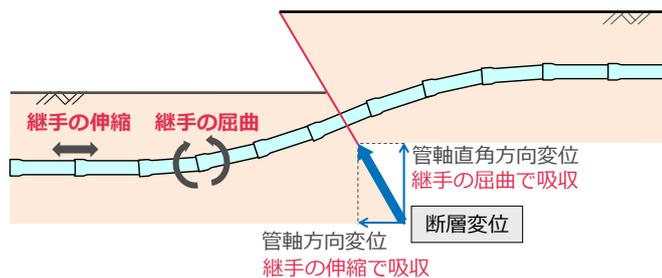


図 1-5-2 断層変位を受けた耐震型ダクタイル鉄管の挙動²²⁾

また、図 1-5-3 に示すように、活断層による地震が発生した際に、「段差」を伴った地表地震断層（例えば、兵庫県南部地震(1995 年)の野島断層²³⁾）が出現するほか、地表が軟らかい堆積物に覆われている場合に段差ではなく「たわみ」として現れる場合がある。このように断層活動によって形成された「たわみ」を「活撓曲」と呼ぶ²⁴⁾。

「段差」状の変位の場合、局所的な地盤変位が生じるため、想定される断層変位の大きさに

よって、短尺管や継ぎ輪・長尺継ぎ輪を用いた対策が必要となる場合がある。

「たわみ」状の変位の場合、広い範囲に緩やかに地盤変状が生じるため、広い範囲で継手の伸縮が可能な鎖構造管路であれば、基本的に断層対策は不要である。

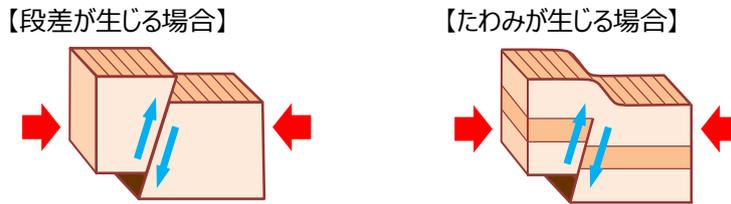


図 1-5-3 断層の種類（断層，撓曲）

直管で断層変位に追従できない場合、継ぎ輪や長尺継ぎ輪の使用も有効である。継ぎ輪は直管継手 2 継手分の伸縮・屈曲性能、長尺継ぎ輪は直管継手 10 継手分の伸縮性能を有している（図 1-5-4）。したがって、継ぎ輪、長尺継ぎ輪を使用することで、管路の変形性能を大幅に向上させることができる（図 1-5-5）。

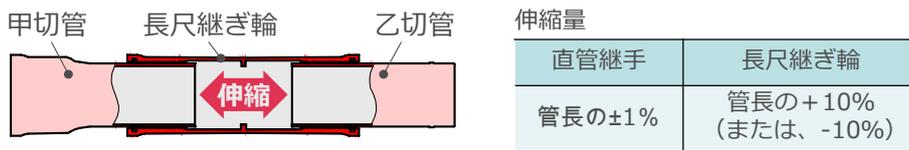


図 1-5-4 長尺継ぎ輪

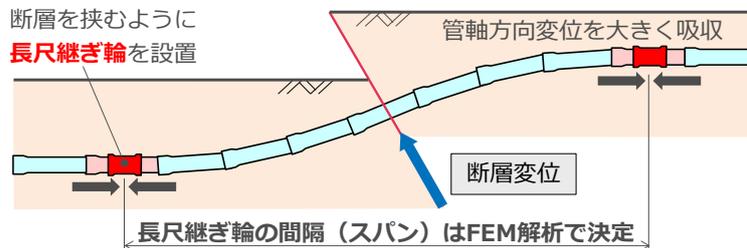


図 1-5-5 長尺継ぎ輪を使用した管路

② 鋼管

断層変位を受ける鋼管の変形の特徴として、図 1-5-6 に示すように、1999 年に発生した台湾集集地震における埋設鋼管の変形事例では、管路の変形は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」の変形を生じ、さらに変形が進むと、断層面からある程度離れた箇所で塑性ヒンジを形成し、「Z 型」に変形する特徴を持っていることを示している。



図 1-5-6 断層による管路被害（台湾集集地震²⁵⁾）

また、断層変位を模擬した実験²⁶⁾では外径 114.3mm、材質 SS400 の鋼管を対象として、地中実験および FEM 解析を実施しており、実験結果および FEM 解析結果とも、断層変位が進むと管路は S 字状に変形し、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座屈するという挙動となっていることを確認している。



図 1-5-7 鋼管の変形（地中実験）

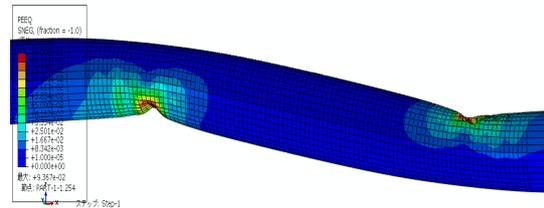


図 1-5-8 鋼管の変形（FEM 解析）

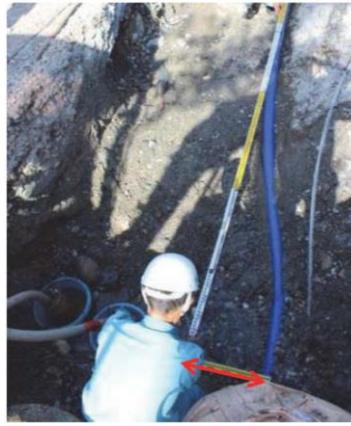
③ 水道配水用ポリエチレン管

水道配水用ポリエチレン管の変形の特徴として、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）の変形状況を図 1-5-9 に示す。変形は鉛直変位 70cm、水平変位 30cm であり、変形は概ね 3m の範囲に収まっていた。管は S 字状に大きく変形する形で断層変位に追従しており、漏水することなく通水機能を維持していた。また局所的な白化やネッキングによる異常な様子も確認されなかった。水道配水用ポリエチレン管の引張降伏ひずみ・圧縮降伏ひずみは、いずれも 8～11%であることが確認されている。

検討では、FEM によるシミュレーション解析を実施しており、管と地盤との境界で滑りが生じたために、管体に発生するひずみが概ね 2.6%程度となり、大きなダメージを受けなかったと分析している。また、地盤の固さを変更すると管体の変形状況が異なることも解析で別途確認していることに言及している。²⁷⁾



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

④ 塩化ビニル管

断層変位を受ける塩化ビニル管の変形の特徴として、実験²⁸⁾では片側が隆起する土槽を用い、縦ずれ断層を模擬した実験を実施している。地盤には表乾状態の珪砂 5 号を用い、落下高さを変えることにより、相対密度 80%と 20%のケースを設定している。埋設管には呼び径 13mm (外径 18mm)、長さ 3,800mm の水道用硬質塩化ビニル管 (JIS K 6742) を用い、埋設深さ 20cm と 40cm のケースを設定している。なお予備実験により、対象とする埋設管は曲げひずみが卓越することを把握している。

実験結果より、図 1-5-10 に示すように、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する。また図 1-5-11 に示すように、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生ずる。

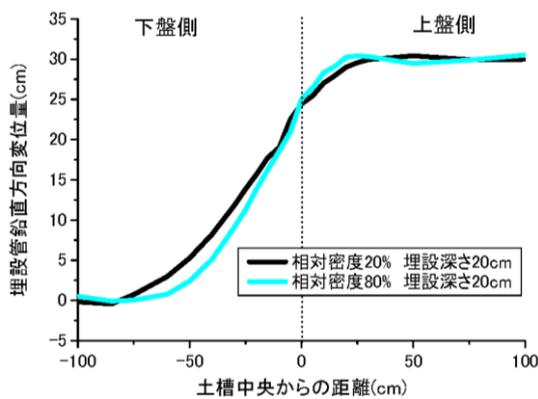


図 1-5-10 埋設管の鉛直方向変位量

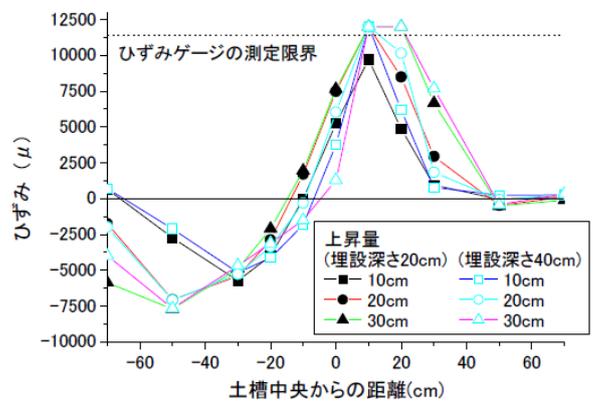


図 1-5-11 埋設管のひずみ量

1.5.2 地中管路に作用する地盤反力

地中管路に関する研究は、主に横断面内の変形挙動と長手方向の変形挙動の問題に分類される。横断面内の変形挙動の問題は、管断面に作用する土圧による変形・応力計算や管壁の耐荷力といった管断面の設計手法に関連し、今回対象とする断層変位を受ける地中管路の変形挙動とは別途で考える必要がある。これに対し地中管路としての長手方向の変形挙動の問題は、横断面の変形挙動と等しく重要な問題である。地中管路は地盤に直接埋設された線状構造物であることから、地盤の変形に敏感であり地盤に局部的な変形や沈下が作用すると、地盤の変形に追従し地中管路は変形し管体や接手部などに損傷を及ぼす場合がある。地盤の変形が地中管路に与える影響を把握するには管軸方向、管軸直角方向の地盤ばねの設定が重要となる。

断層変位を受ける地中管路の評価といった比較的大きな変形を受ける強度評価の際に必要な地盤ばねの設定には、管と地盤の相互作用を設定する必要があり、管軸方向、管軸直角方向に対して、それぞれ非線形ばね特性で設定されることが多い。

本項では、関連する指針における地盤ばねの扱いについて整理する。

①「水道施設耐震工法指針・解説」（日本水道協会，2009年）³⁾

「水道施設耐震工法指針・解説」では、埋設管路の応答変位法による耐震設計に用いる地盤ばねはせん断弾性波速度より次式で算出する。また、管軸方向について管路と地盤の滑りを考慮した耐震計算を行う場合は、管路と地盤の摩擦力を概ね 0.01MPa 前後とするとしている。一方、管軸直角方向については、地盤ばねの上限値に関する規定はなく、非線形地盤ばね（バイリニア）として考える場合は、上限値の設定が別途必要となる。

$$K_{g1}=C_1 \cdot \gamma_s/g \cdot V_s^2 \quad (1.5.1)$$

$$K_{g2}=C_2 \cdot \gamma_s/g \cdot V_s^2 \quad (1.5.2)$$

ここで、 K_{g1} ：埋設管路の管軸方向の単位長さ当たりの地盤の剛性係数 (Pa)

K_{g2} ：埋設管路の管軸直角方向の単位長さ当たりの地盤の剛性係数 (Pa)

γ_s ：土の単位体積重量 (N/m³)

g ：重力加速度 (9.8m/s²)

V_s ：表層地盤のせん断弾性波速度 (m/s)

C_1 ： K_{g1} に対する定数 (1.5)

C_2 ： K_{g2} に対する定数 (3.0)

ただし、せん断弾性係数で求められる地盤ばねは微小ひずみレベル (10⁻⁶ オーダー) を想定していることから、数 m に及ぶ断層変位に対してはその適用性に課題があると考えられる。また、管軸直交方向の地盤ばねの上限値については、例えば受働土圧強度相当とすることも考えられるが、これについても断層変位のような大きな変形状態を想定したものではないため、これらについては今後の課題であると考えられる。

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)²⁹⁾

「高圧ガス導管耐震設計指針」では, 地盤ばねを呼び径に応じてバイリニアで規定されている. 管軸方向の地盤拘束力 τ は, 図 1-5-12 に示すように導管単位表面積あたりの限界せん断応力 τ_{cr} 及び地盤ばね係数 k_1 を用いてバイリニアで近似し, 限界せん断応力 $\tau_{cr} = 1.5\text{N/cm}^2$ の値は, 表 1-5-1 に示す 1982 年の同指針作成時に実施された導管加重実験, 1995~1996 年度にかけて実施された東京ガスの実験及びガスパイプライン保安対策調査の実験の3つの実規模実験のほぼ平均値をとったものとなっている. 地盤ばね係数 $k_1=6.0\text{N/cm}^3$ の値は, 1982 年の同指針作成時に実施された導管加重実験結果のほぼ平均値を採用している.

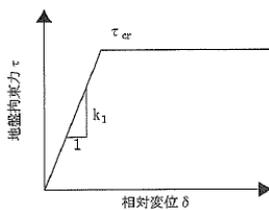


表 1-5-1 管軸方向の地盤拘束力の実験の結果

	データ数等	τ_{cr} の平均値
1982年同指針の実験	呼び径 150A~600A の 8 ケース	1.9N/cm ²
東京ガスの実験	呼び径 150A 及び 300A の 15 ケース	0.9N/cm ²
ガスパイプライン保安対策調査の実験	呼び径 600A の 2 ケース	1.4N/cm ²
平均	—	1.4N/cm ²

図 1-5-12 管軸方向の地盤ばね特性

管軸直角水平方向の地盤拘束力 σ は, 図 1-5-13 に示すように単位投影面積あたりの最大地盤拘束力 σ_{cr} 及び降伏変位 δ_{cr} を用いてバイリニアまたはバイリニアの初期勾配を用いた直線で近似している. 最大地盤拘束力 σ_{cr} の値は, 導管の呼び径の他に, 埋戻土の締め固め度や埋設深さによっても異なるため, Trautmann らが内部摩擦角 ϕ をパラメータとして整理した実験結果のうち実際の埋戻土の ϕ は 40 度相当であることから $\phi=40$ 度の場合を引用して, 土の単位体積重量 $\gamma_t=17.6\text{ kN/m}^3$, 埋設深さ $H_{po}=1.8\text{m}$ とした値を採用している.

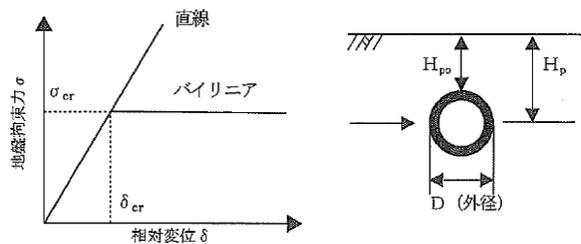


図 1-5-13 管軸直角水平方向の地盤ばね特性

③ 「Seismic Guidelines for Water Pipelines」(American Lifelines Alliance-ALA, March 2005)⁶⁾

地盤モデリングのガイドラインとして非線形地盤ばね特性が管軸方向, 管軸直角水平方向, 管軸直角鉛直下向き方向, 管軸直角鉛直上向き方向それぞれについて記載されている. 下式の通りの粘性土および砂質土に応じた設定がなされている.

[管軸方向]

$$t_u = \begin{cases} \pi D \alpha S_u D \dots\dots\dots \text{粘性土} \\ \frac{\pi D}{2} \bar{\gamma} H K_0 \tan k \phi \dots \text{砂質土} \end{cases}$$

$$x_u = \begin{cases} 0.1 \sim 0.2 \text{ インチ} \dots \text{締まった} \sim \text{緩い砂質土} \\ 0.2 \sim 0.4 \text{ インチ} \dots \text{硬い} \sim \text{軟らかい粘性土} \end{cases}$$

ここで、
 t_u : 単位長さあたりの管軸方向最大地盤拘束力
 x_u : 最大地盤拘束力における管軸方向変位
 D : 管外径, α : 付着係数
 S_u : 土の非排水せん断強度, $\bar{\gamma}$: 土の有効単位体積重量
 H : 管中心までの埋設深さ, K_0 : 静止土圧係数
 ϕ : 内部摩擦角, k : 土と管の摩擦を表す係数

[管軸直角(水平)方向]

$$P_u = \begin{cases} S_u N_{ch} D \dots\dots \text{粘性土} \\ \bar{\gamma} H N_{qh} D \dots \text{砂質土} \end{cases}$$

$$y_u = \begin{cases} 0.07 \sim 0.10 H + D/2 \dots\dots\dots \text{緩い砂質土} \\ 0.03 \sim 0.05 H + D/2 \dots\dots\dots \text{中位の砂質土} \\ 0.02 \sim 0.03 H + D/2 \dots\dots\dots \text{締まった砂質土} \\ 0.03 \sim 0.05 H + D/2 \dots \text{硬い} \sim \text{軟らかい粘性土} \end{cases}$$

ここで、
 P_u : 単位長さあたりの管軸直角(水平)方向最大地盤拘束力
 y_u : 最大地盤拘束力における管軸直角方向変位
 N_{qh} , N_{ch} : 係数

[管軸直角(鉛直下向き)方向]

$$q_u = \begin{cases} S_u N_c D \dots\dots\dots \text{粘性土} \\ \bar{\gamma} H N_q D \cdot 1/2 \gamma D^2 N_\gamma \dots \text{砂質土} \end{cases}$$

$$z_u = 0.10D \sim 0.15D \dots \text{砂質土} \cdot \text{粘性土}$$

ここで、
 q_u : 単位長さあたりの管軸直角(鉛直下向き)方向最大地盤拘束力
 z_u : 最大地盤拘束力における管軸直角方向変位
 N_c , N_q , N_γ : 係数

[管軸直角(鉛直上向き)方向]

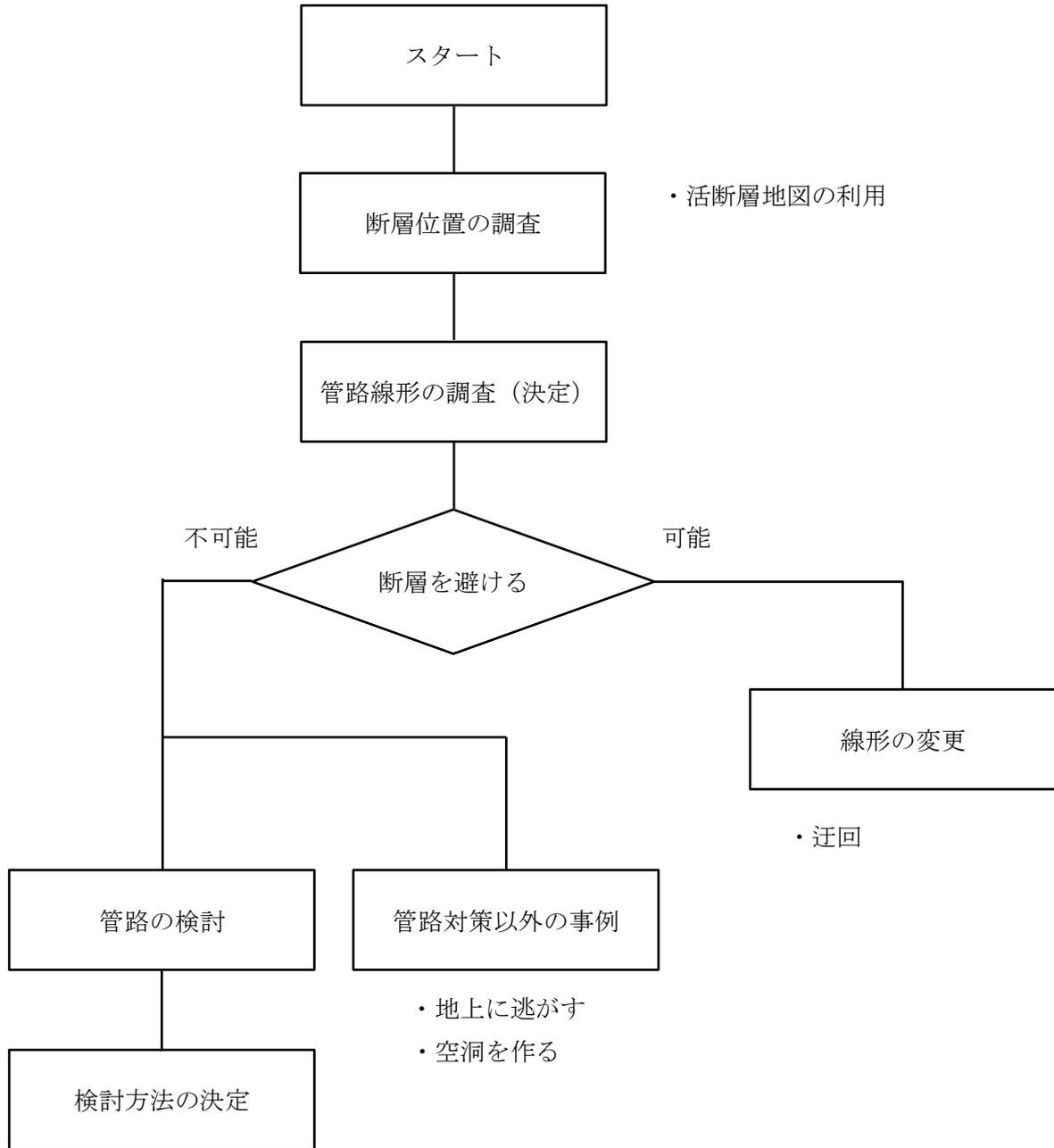
$$q_u = \begin{cases} S_u N_{cv} D \dots\dots\dots \text{粘性土} \\ \bar{\gamma} H N_{qv} D \dots\dots\dots \text{砂質土} \end{cases}$$

$$z_u = \begin{cases} 0.01H \sim 0.015H \dots \text{締まった} \sim \text{緩い砂質土} \\ 0.1H \sim 0.2H \dots\dots\dots \text{硬い} \sim \text{軟らかい粘性土} \end{cases}$$

ここで、
 q_u : 単位長さあたりの管軸直角(鉛直下向き)方向最大地盤拘束力
 z_u : 最大地盤拘束力における管軸直角方向変位 N_{cv} , N_{qv} : 係数

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基本設計 (簡易式)
- ②詳細設計 (数値解析)

図 1-6-1 設計フロー

①基本設計および②詳細設計フロー

基本設計および詳細設計では、1.6.4 設計手法に示す簡易式もしくは数値解析を用いて管路の安全性の照査を行う

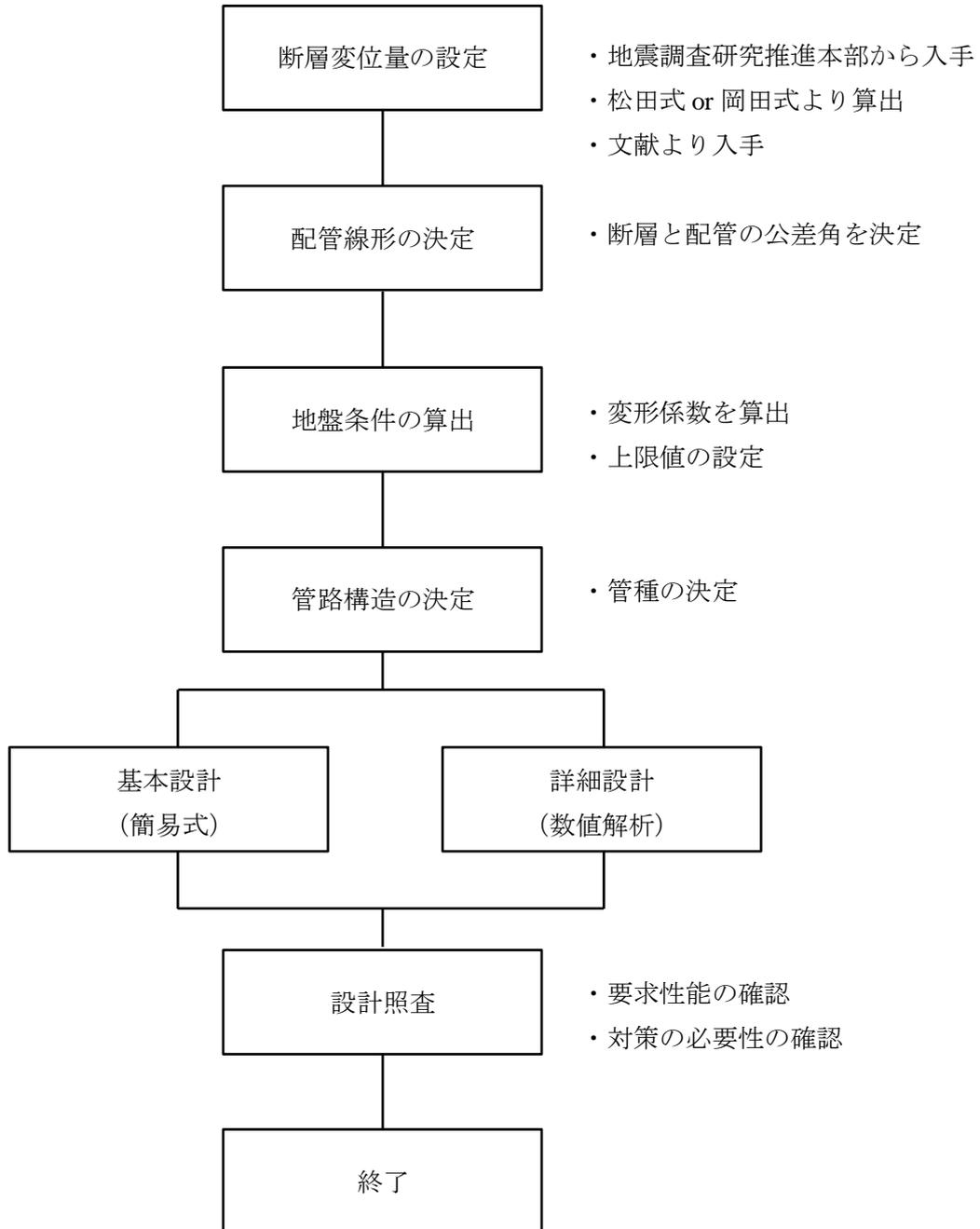


図 1-6-2 設計フロー (基本設計および詳細設計)

1.6.2 設計条件の設定

(1) 基本的な考え方

設計フローに従って、断層変位を受ける地中管路を設計するには、断層の情報、地盤の情報、管路の情報を収集する必要がある。断層の情報や地盤の情報は文献調査により取得し、必要に応じて、詳細な地質調査を行う。

表 1-6-1 に断層横断管路の設計に必要な断層、地盤、管路の情報を示す。

図 1-6-3 に示すように、断層条件、地盤条件によって、想定される管路の挙動は異なるため、各種情報の取得は断層変位を受ける管路を設計する上で重要である。

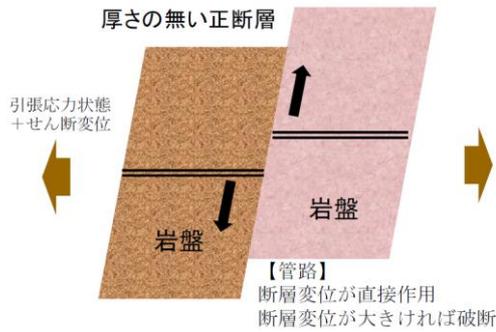
各種情報収集に対する考え方の概要を以下に示す。

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

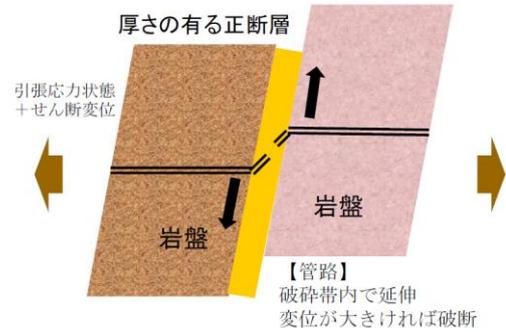
項目		概要
断層条件	位置	断層と管路が交差する位置
	位置のばらつき	断層線が出現すると想定される範囲
	走向	断層線の方位
	傾斜	断層面の水平面に対する角度
	ずれ方の形態①	正断層、逆断層または横ずれ断層
	ずれ方の形態②	断層または撓曲（たわみ）
	厚さ	破碎帯の幅
	変位量（単位変位量）	1回の地震活動で動く断層変位量
	変位の向き	逆断層の場合、どちらが隆起するか
地盤条件	地盤係数	管路位置の地盤特性
	内部摩擦角	
	粘着力	
管路条件	断層との位置関係	-
	土被り	管の埋設深さ
	呼び径	-
	材質	-
	管厚	-
	継手の有無	一体構造管路、継手構造管路

断層の厚みによる差異

(a)厚さの無い正断層

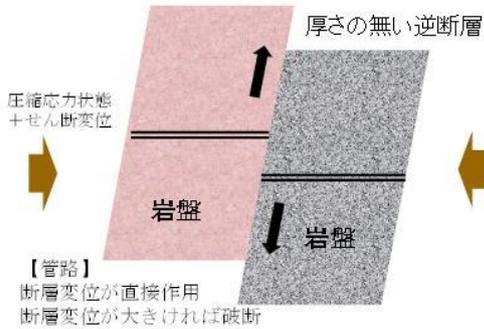


(b)厚さの有る正断層



地盤の硬さによる差異

(c)岩盤での逆断層



(d)軟質地盤での逆断層

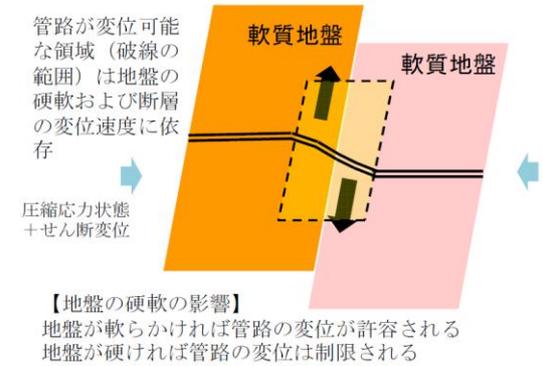


図 1-6-3 断層条件, 地盤条件による管路挙動の違い

(2) 断層に関する文献

表 1-6-2 に断層に関する文献・データベースを示す.表中の優先順位はその文献の正確度,精度から決定した.なお,対象の断層について詳細に調査した文献があれば,それを含めて総合的に評価することが望ましい.

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

表 1-6-3 に「主要活断層帯の長期評価（地震本部）」³⁰⁾と「活断層データベース（産業技術総合研究所）」²³⁾に記載されている布田川断層と上町断層の諸元を示す。データベースにより差異があるため、これらを総合的に評価して、断層条件を決定する必要がある。

表 1-6-3 断層条件の参考となる文献（○内の数字は優先順位）

項目	布田川断層	
	「主要活断層帯の長期評価」、地震本部 (2013年2月1日)	「活断層データベース」、産業技術総合研究所 (2019年4月25日時点)
活動セグメント名	布田川断層帯・布田川区間	布田川活動セグメント
長さ[km]	19	24
一般走向	N 55°E	N 60°E
一般傾斜	地表近くでは高角	60 ° N
断層型	右横ずれ	右横ずれ
変位の向き（隆起側）	SE	S
単位変位量[m]	2	2.8

項目	上町断層	
	「主要活断層帯の長期評価」、地震本部 (2013年2月1日)	「活断層データベース」、産業技術総合研究所 (2019年4月25日時点)
活動セグメント名	上町断層帯	上町活動セグメント
長さ[km]	42	36
一般走向	N 10°E	N 20°E
一般傾斜	65 – 70°E	60 ° E
断層型	逆	逆
変位の向き（隆起側）	E	E
単位変位量[m]	3	4.8

(3) 断層位置特定のための地質調査方法

断層位置を特定するための地質調査の例を以下に示す¹⁶⁾。

①地表地質調査

地表地質調査は、活断層の疑いのある地形・地質構造について、断層・撓曲の存否、位置、性状及び活動性を明らかにすることを目的とする。

地表地質調査においては、特に断層露頭や地層が変形している露頭の発見と、その露頭観察による断層活動時期の特定が重要であり、露頭と活断層の疑いのある地形・地質構造との位置関係、断層破碎帯の性状、地層の変位・変形構造を詳細に把握する。

地表地質調査により断層の分布が確認できない場合、あるいは、断層の活動履歴が明確でない場合には、より詳細な情報を得るために、ボーリング調査等を追加実施し、断層の存否及び活動性の解明に努める。

②ボーリング調査（斜めボーリング）

ボーリング調査は、推定される断層位置付近で実施するものであり、第四紀層下に伏在している断層の位置と断層近傍の地質構造を把握することを主な目的とする。ボーリング調査は本来一次元的な地質情報であるため、三次元的な断層運動を解明するには相当数のボーリング調査（群列ボーリング、グリッドボーリングなど）を実施するか、後述する地球物理学的調査により孔間の情報を補完する必要がある。

ボーリング調査により断層活動を解読する方法は基本的に2つある。1つは、直接断層近傍で断層を挟んで両側の地層の対比や基盤岩の落差・破碎構造等により活動履歴を解読する方法であり、もう1つは、間接的ではあるが、近傍の断層運動により生じた大地震からもたらされた堆積物の記録を解読する方法である。後者は、近年その試みが盛んに行われてきているが、洪水等の突発的な堆積物との区別が難しい上に、実際に動いた活断層の特定が困難であるといった問題点を有している。

ボーリング掘削箇所は、想定された断層通過位置の両側にそれぞれ1箇所以上配置する。数m程度のトレンチ掘削では基盤岩の断層を確認することができないような第四紀層の厚い地域では、地球物理学的調査結果を特に重視する。両孔における基盤岩の破碎の程度も詳細に観察し、破碎帯の幅を推定するうえでの重要なデータとする。この際に、ボアホールカメラを利用して地層の走向傾斜等を計測することも有効である。

また、ボーリング調査において、破碎帯の位置および角度をおおむね把握した後に、破碎帯に垂直となるように、斜めボーリング調査を行うことで、破碎帯の幅を調査することができる。

③地球物理学的調査（反射法地震探査等）

地球物理学的調査は、断層の地下構造及び褶曲等の広域的な地下構造を明らかにすることを目的とする。前述の通り、基盤岩の断層を確認することができないような第四紀層の厚い地域では、地球物理学的調査結果が特に重視される。

平野等において、新しい時代の堆積物の変形を明らかにして活断層の存否を確認する必要がある場合には、主に浅部構造探査を行い、深部の断層形状や褶曲構造を解明する必要がある場合には、主に深部構造探査を行う。

地球物理学的調査には、反射法地震探査、屈折法地震探査、重力探査、電気探査、電磁探査等の手法があり、調査対象とする地域の地質・地質構造、調査目的、現地状況等を踏まえて、適切な手法を選択して実施する。なお、他機関のデータが利用可能な場合は、必要に応じてデータの入手、再解析を行い、その上で、調査者独自の地球物理学的調査の必要性を検討する。

地球物理学的調査の結果については、地表地質調査等によって想定される地表の活断層や地表付近の地質構造の特徴と、相互に矛盾なく合理的に説明できることを確認することが重要である。

(4) 地盤条件の決定

管路設計に用いる地盤の弾性係数（剛性係数）を決定できるよう、地盤調査を行う。「水道施設耐震工法指針・解説」³⁾では、表面地層のせん断波速度 V_s から、地盤の弾性係数を求める方法が示されている。

(5) 管路の情報

断層変位を受ける管路を設計する際には、管路線形の変更により断層変位を避けることができないか検討の上、管路線形、埋設位置（深さ）、管種、口径を決定する。

断層との交差角（傾斜、走向）および管路に作用する変位量を算出し、概算および簡易設計のための入力値とする。

(6) 対策範囲の設定

断層対策範囲は、岡田式による地表面での断層の分布計算（1.3.1）および既往地震における地表地震断層の分布（1.3.2）を参考に決定する。

1.6.3 要求性能

管路に要求される耐震性能を管種別に以下に設定する。

(1) 鋼管

鋼管における断層変位に対する耐震性能

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、管路は局部的に変形するが、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

鋼管は、一様伸びが 20%以上あり、また 5%以上の圧縮ひずみに対しても亀裂が生じない優れた変形特性を有する材料である。しかしながら、 D/t が 100 を超えるような薄肉管では、座屈後の変形が予測しづらいため、ここでは、座屈開始歪み（ $\epsilon_s=5\%$ ）を鋼管の許容歪みに設定する。

(2) 耐震型ダクタイル鉄管

耐震型ダクタイル鉄管における断層変位に対する耐震性能

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	② 管体応力 $\sigma \leq 270\text{MPa}$ ② 軸力 $F \leq 3D\text{kN}$ (D:呼び径[mm]) ② 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)

耐震型ダクタイル鉄管は,継手部が伸縮(管長の $\pm 1\%$),屈曲できるため,優れた変形特性を有する鎖構造管路を構築できる.耐震性能 1 を満足する照査値として,管体応力 σ の照査値はダクタイル鑄鉄の耐力 (270MPa) 以下とする.また,継手部が健全な機能を損なわない性能を確保するために,軸力 F は継手の離脱防止力である 3DkN 以下,継手屈曲角度 θ は地震時に曲がり得る最大屈曲角度 θ_a 以下とする.

(3) 水道配水用ポリエチレン管

水道配水用ポリエチレン管における断層変位に対する耐震性能

表 1-6-6 水道配水用ポリエチレン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 2	断層変位により,機能に重大な影響を及ぼすことなく,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

水道配水用ポリエチレン管は,柔軟性に富んだ材料特性を有し,引張試験における降伏ひずみは 7.8~11% である.同様に圧縮試験における降伏ひずみも約 8%~11% であることから,これらの結果に安全率を考慮し,地盤変状に対する許容ひずみを 6% と定めている.

1.6.4 設計手法

(1) 一体構造管路

(a) 対象とする地盤変状と計算原理

断層変位が埋設した管路に及ぼす作用には軸変形と曲げ変形があり，有限変位の問題として解析するのが望ましい．しかしながら有限変位の問題は数値解析が必要となるため，作用の概略評価として微小変位に基づく解析解を利用するのが便利である．微小変位の場合，軸変形と曲げ変形が別々の方程式になり，地盤変位を与えたときの解を計算できる．この場合軸変形の解は断層変位の管軸方向成分に相当し，曲げ変形は管軸直角方向の成分に相当する．

地盤変位がある程度大きくなり，管周面と地盤が押し合う状態では強度の小さい地盤が降伏して復元力を発揮しなくなることが確認されており，バイリニア型の地盤反力が多く用いられている．地盤反力が増大しなくなれば，軸力・曲げモーメントも増加しなくなり，軸ひずみ・曲げひずみは地盤ばねが弾性である場合よりも小さな応答値となる．地盤ばねが降伏する場合，管の変形する範囲が弾性の場合よりも拡大する．地盤ばねが降伏した状態を等分布力が作用するはりで近似することができる．鈴木は等分布力が作用するはりの境界条件を分析して，埋設管の断面力の近似解を求める方法を提案している．³¹⁾³²⁾

(b) 地割れの計算

地盤が剛体的に水平方向に移動して埋設された管が引き抜かれるモデルを用いて計算式が構築されている．図 1-6-2(a)に計算モデルを示す． 2δ だけ地盤が剛体的に水平方向に移動する問題を考えるが，対称性を考え片側だけ対象にする．管路の口径を D ，軸方向の単位面積当たり地盤拘束力を τ_g とすると，管に作用する軸方向の等分布力は(1.6.1)式となる．

$$p = \pi\tau_g D \quad (1.6.1)$$

地盤が δ だけ右方向に移動する計算であるが，管路の端部に力 F を作用させて引き抜く計算と同じになる．このとき管路の変形は引き抜き点に作用する力 F によって決まる距離 L の範囲で生じ，この範囲よりも右側は変形することなく地盤に固定されている．等分布力が作用する区間では棒の弾性変形を考えればよく，引き抜き量 δ はこの区間の棒の伸び量に一致する．すなわち管の軸剛性を EA として引き抜き量 δ は(1.6.2)式となる．

$$\delta = \frac{pL^2}{2EA} \quad (1.6.2)$$

(1.6.2)式が示すように，変形する範囲 L が引き抜き量 δ の関数として計算できる．表 1-6-6 に軸変形の方程式と最大軸力の式もあわせて示しておく．地盤変位 δ とともに軸方向の地盤拘束力 τ_g が同等に影響する式となっている．

(c) 段差の計算

段差状の地盤変位による曲げ計算においても，地盤変位が大きい場合には一定の地盤反力を考えるモデルの方が，適合性が高いと考えられる．図 1-6-2(b)に計算モデルを示す．

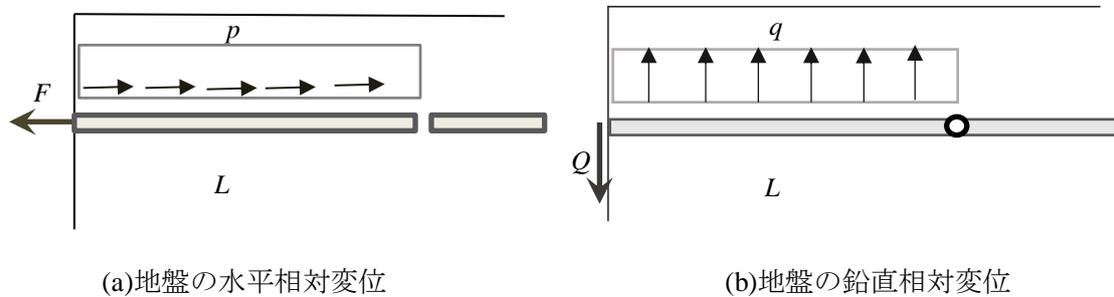


図 1-6-2 地盤反力を等分布力とした計算モデル

段差量 2δ だけ左右の地盤が鉛直方向にずれる問題はあるが，地割れと同様に片側だけをモデル化する．管路の口径を D ，軸直角方向の単位面積当たりの地盤拘束力を σ_g とすると，管に作用する軸直角方向の等分布力は(1.6.3)式となる．

$$q = \sigma_g D \quad (1.6.3)$$

段差の場合，計算モデルの左端が δ だけ下方向に移動する計算であり，管路の端部に横力 Q を作用させて押し下げる計算と同じになる．このとき管路の変形は管端から Q によって決まる距離 L の範囲で生じ，この範囲よりも右側は変形することなく地盤に固定されている

Q を作用させる点の鉛直変位を δ とする．この δ が地盤の強制変位量となる．支点変位によりはりの両端は δ/L の角度で傾くが，はりの弾性曲げ変形により右端のヒンジ点のたわみ角が 0 になる条件から長さ L を決めることができる．すなわち支点変位によるたわみ角と等分布力による右端のたわみ角が一致すれば，変形のない区間となめらかに接続できる．式で表せば管の曲げ剛性を EI とし，単純ばりに等分布力が作用する場合の支点のたわみ角の公式を用いて(1.6.4)式となる．

$$\frac{\delta}{L} = \frac{qL^3}{24EI} \quad (1.6.4)$$

表 1-6-6 に長さ L ，たわみの式，最大曲げモーメントの式を示している．高圧ガス導管液化耐震設計指針³³⁾にはこの考えに基づき，液化化による地盤変位に対する鋼管の設計式が紹介されている．

表 1-6-6 地割れと段差の計算式

地割れの計算式	段差の計算式
$L = \sqrt{\frac{2EA\delta}{p}}$ $u(x) = \delta \left(-\left(\frac{x}{L}\right)^2 + 2\left(\frac{x}{L}\right) \right)$ $N_{max} = \sqrt{2pEA\delta}$	$L = \sqrt[4]{\frac{24EI\delta}{q}}$ $w(x) = \delta \left(\left(\frac{x}{L}\right)^4 - 2\left(\frac{x}{L}\right)^3 + 2\frac{x}{L} \right)$ $M_{max} = \frac{qL^2}{8} = \frac{1}{4}\sqrt{6qEI\delta}$

(2) 継手構造管路

(a) 設計フロー

図 1-6-3 に鎖構造管路による断層対策管路の設計フローを示す。管路挙動解析は後述する FEM 解析か、簡易設計式により行う。管径、地盤条件によるが、おおむね断層変位が 1.6m 程度であれば、断層対策無しで断層変位に追従できることが判っている³⁴⁾。

後述の FEM 解析もしくは簡易計算式により、継手屈曲角度、応力および軸力を算定し、すべてを満足するものとする。

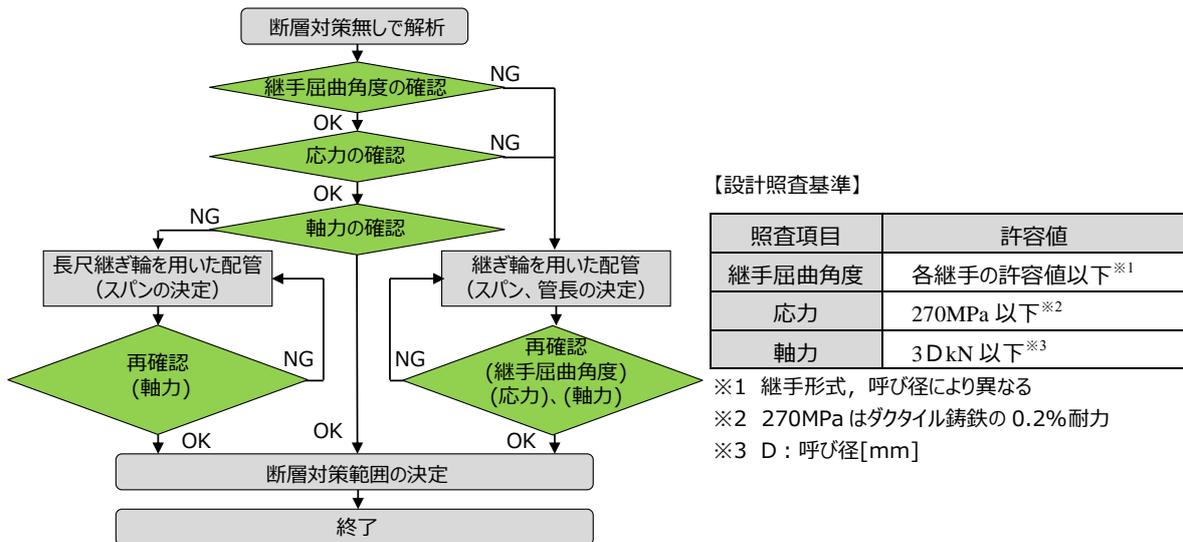


図 1-6-3 鎖構造管路による断層横断管路設計フロー

(b) 入力条件

1. 6. 2 に示す断層条件、地盤条件に加え、継手構造管路の照査には継手特性が必要となる。一般的に管軸方向ばね、管軸直角方向ばね、回転ばねとして継手特性を入力する。

(c) 解析手法 I - FEM 解析-

図 1-6-4 に解析モデルを示す。管路ははり要素またはシェル要素とし、地盤特性はばね要素としてモデル化する。移動側の地盤節点に強制変位を与えることで、断層変位を再現する。1. 6. 3 に FEM 解析を用いた設計事例を示す。

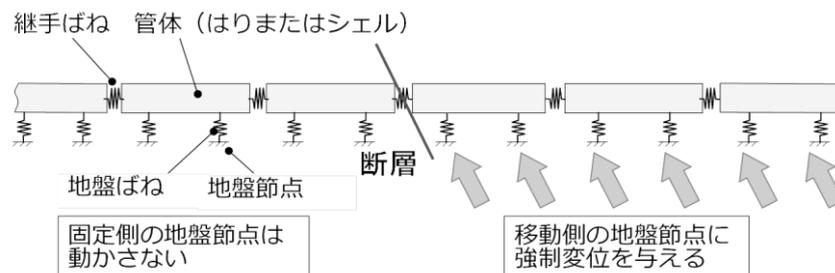


図 1-6-4 解析モデル

(d) 解析手法Ⅱ - 簡易設計式 -

簡易計算法は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である。²²⁾ 簡易計算法は,様々な仮定により,安全側の値が出力される式であるため,詳細検討が必要な場合は FEM 解析を行う。

簡易設計式の詳細については文献 22)を参照のこと。

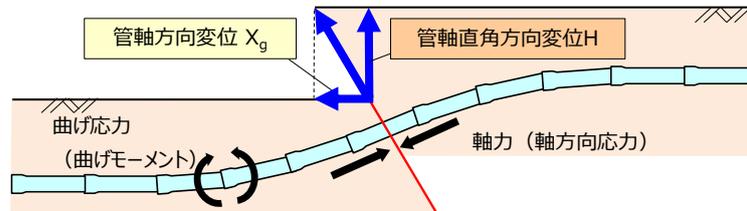


図 1-6-5 簡易設計式の概要

(e)断層対策管路の設計 (定尺管で評価基準を満足しない場合)

「継手屈曲角度」,「応力」が超過する場合は継ぎ輪を用いた配管,「軸力」が超過した場合は,長尺継ぎ輪を用いた配管にて再検討を行う.図 1-6-6 に配管例を示す。

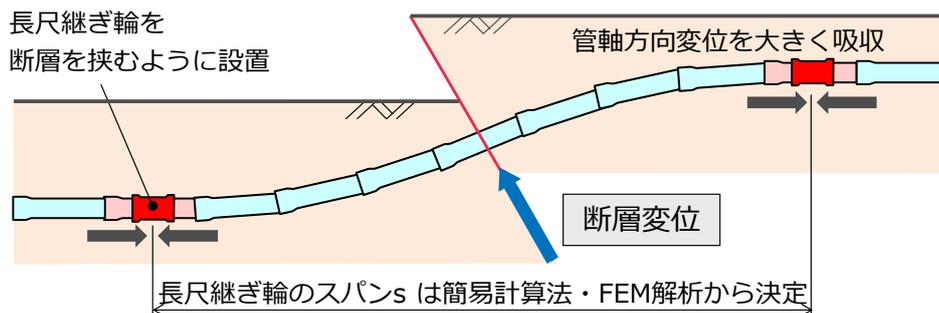


図 1-6-6 長尺継ぎ輪を用いた配管例

(f)断層対策範囲の決定

断層によるずれの位置は,幅を持って示される.そこで,断層が出現すると想定される範囲のどこに断層が生じても問題ないように,断層想定範囲を挟むように断層対策を施す必要がある.図 1-6-7 に長尺継ぎ輪を用いた配管の例を示す.断層想定範囲を挟むように長尺継ぎ輪を配置する。

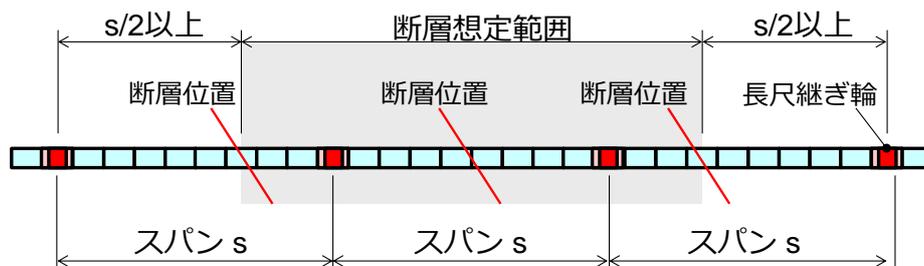


図 1-6-7 断層想定範囲と断層対策範囲

1.6.5 設計事例

(1) 一体構造管路

① 溶接鋼管

溶接鋼管は、継手部は溶接により接合するため、継手の強度は本管と同等以上を有し、一体構造管路に種別される。溶接鋼管は一般的に軟鋼（SS400）を使用しており、弾性域こそ約 0.1% と小さいものの、破断伸びまでには約 30% と、大きな塑性領域を持っている。この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である。ここでは、「1.6.4 設計手法」で提案された簡易式を用いた断層変位を受ける溶接鋼管の設計事例を紹介する。

断層変位を受ける溶接鋼管は、土圧により図に示すような荷重が作用する。ここでは、断層変位が地盤の降伏変位に比べ非常に大きく、管路に断層変位が生じると地盤はすぐに降伏し、一定の地盤反力しか作用しない。

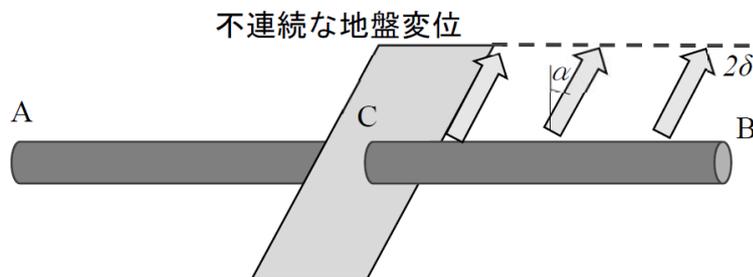


図 1-6-8 断層変位により管路に作用する地盤反力

断層変位を受ける溶接鋼管に発生する最大曲げモーメントは、(1.6.5) 式で計算される。

$$M_{max} = \frac{qL^2}{8} = \frac{1}{4}\sqrt{6qEI\delta} \quad (1.6.5)$$

ここで、 q : 地盤反力、 δ : 地盤変位、 E : 弾性係数、 I : 断面 2 次モーメント

この式より、断層変位と溶接鋼管に発生する歪みの関係は図 1-6-9 が示すように、降伏棚があるため、弾性域および塑性域で異なる曲線となる。

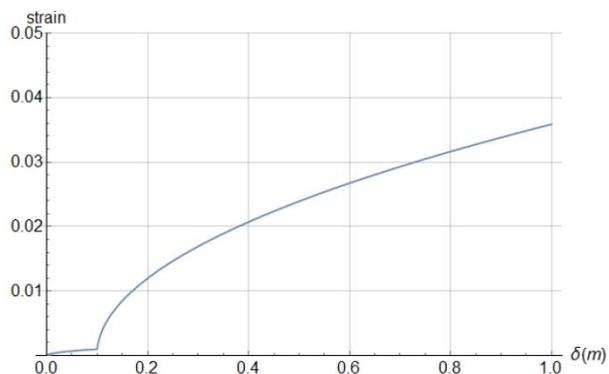


図 1-6-9 断層変位と溶接鋼管に発生する歪み

②水道配水用ポリエチレン管

一般的に水道配水用ポリエチレン管（以下 HPPE 管）は、継手部が融着継手（EF 接合）によって連続的に配管がなされるため、鋼管と同様に一体構造管路と種別される。図 1-6-10 に HPPE 管の実管における応力-ひずみ曲線を示すが³⁵⁾、降伏ひずみ 7.8%~11%であり、それまでは明瞭な降伏点が無いことから、弾性挙動で近似できるものと仮定し、(1.6.6) 式を用いて断層変位時の最大曲げひずみの算定を行った。また、HPPE 管の地盤変状に対する許容ひずみは、降伏ひずみに安全率を乗じ 6%、弾性係数を 1000MPa としている³⁶⁾。

断層変位を受ける HPPE 管に発生する最大曲げひずみは、(1.6.6) 式で計算される。

$$\varepsilon_{max} = \frac{M_{max}}{EW} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3\sigma_G \delta}{\pi E t}} \quad (1.6.6)$$

ここで、 σ_G ：管軸直角方向の最大地盤拘束力、 δ ：地盤変位、 E ：弾性係数、 t ：管厚

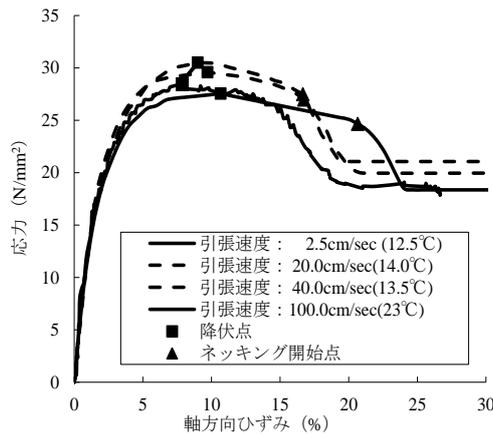


図 1-6-10 HPPE 管の応力-ひずみ曲線³⁵⁾

管軸直角方向の最大地盤拘束力に関しては、高圧ガス導管耐震設計指針に実管路の埋設実験を行うことで、管径と土被り、砂の締固めに応じた値が提案されている²⁹⁾。同口径であれば、土被りが深い方が地盤拘束力が大きくなる結果となる。一般的に高圧ガス導管で使用される管種が鋼管であることを考慮すると、弾性係数が小さい HPPE 管では提案された値より最大地盤拘束力が小さくなることが想定されるが、ここでは地盤反力を大きく見積もる方が安全側の設計であるため、鋼管の実験データを HPPE 管にも採用し、実験との整合は今後の課題とした。

図 1-6-11 では高圧ガス導管耐震設計指針²⁹⁾に示された最大地盤反力算定図を示す。本図を用いて、HPPE 管が一般的に埋設される浅層埋設基準 0.6m に合わせて最大地盤拘束力を算定すると表 1-6-7 に示す、概ね 140~230kN/m²（砂の内部摩擦角 $\phi=45$ 度）であることが確認できる。HPPE 管のように弾性係数が小さい管材料では、図 1-6-12 に示すよ

うに地盤変位に滑らかに管体が曲げられることで変形することが特徴であり、軸方向の変形範囲の中心部で曲率が最も大きくなり、最大ひずみを迎える。ここでは、表 1-6-7 に示す管軸直角方向の最大地盤拘束力を用いて HPPE 管の最大曲げひずみを(1.6.6)式で計算し、その結果を地盤変位量とひずみの関係として図 1-6-13 にまとめる。(1.6.6)式における地盤変位 δ が断層片側であるため、断層変形量としては 0.8m (呼び径 50~5m (呼び径 200 までの断層に対して HPPE 管の許容ひずみ 6%以下に収まることが確認できた。今後は FEM 解析との比較を行い、計算結果の妥当性を検討していく。

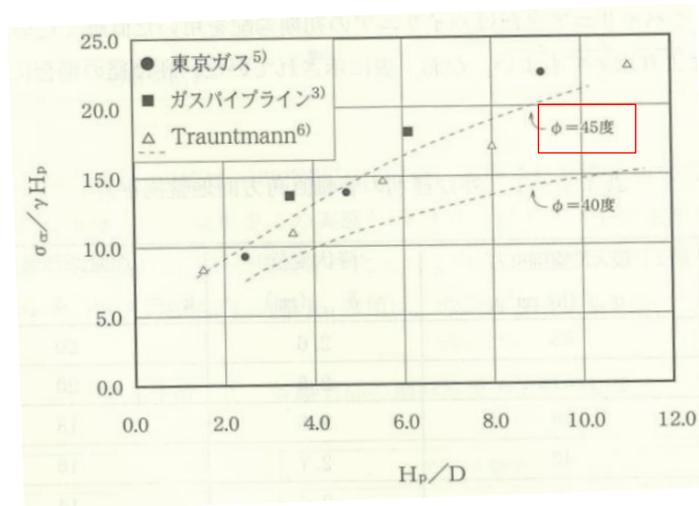


図 1-6-11 高圧ガス導管耐震設計指針で提案された最大地盤拘束力²⁹⁾

表 1-6-7 HPPE 管の管軸直角方向の最大地盤拘束力 σ_G
(土被り 0.6m $\phi=45$ 度)

呼び径	外径 (m)	H_p/D	σ_G (kN/m^2)
50	0.063	10.02	233
75	0.090	7.17	204
100	0.125	5.30	175
150	0.180	3.83	158
200	0.250	2.90	140

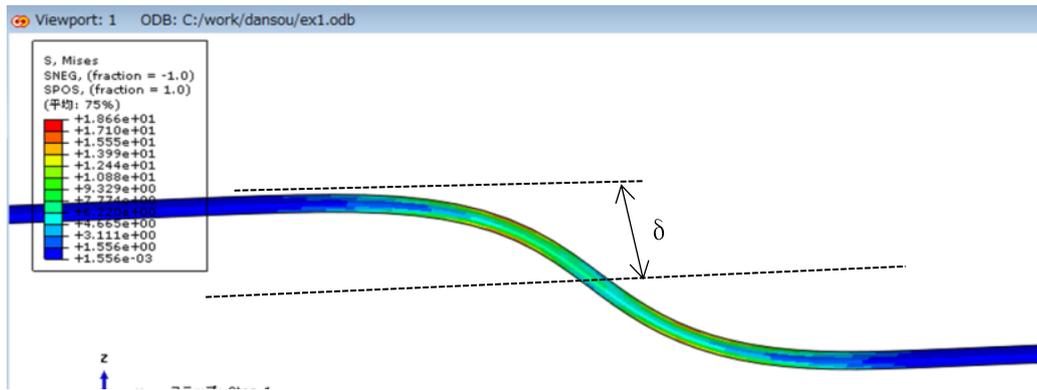


図 1-6-12 断層変位による HPPE 変形イメージ (FEM 解析より)

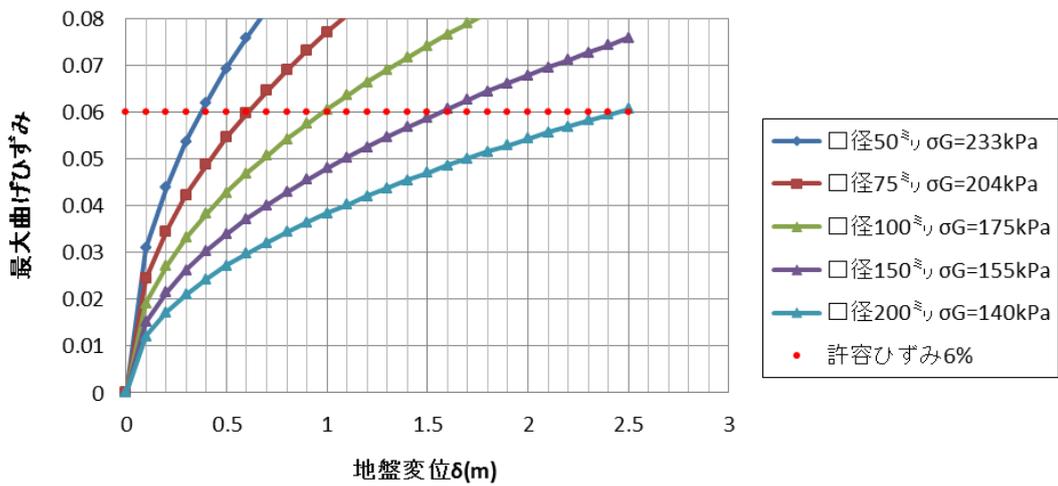


図 1-6-13 HPPE 管の地盤変位 δ と最大曲げひずみ

表 1-6-8 HPPE 管の地盤変位吸収量

呼び径	地盤変位量 δ (m)
50	0.4
75	0.6
100	1.0
150	1.6
200	2.5

注 1) 地盤変位量 δ は断層片側の変位

注 2) HPPE 管の許容ひずみ 6%として算定

(2) 継手構造管路（耐震型ダクタイル鉄管）

継手構造管路による断層対策管路の設計事例として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 送水管の設計事例を示す³⁷⁾。

1) プロジェクト概要

図 1-6-14 に管路と断層の位置関係を示す。地点 A～O の複数の箇所で、約 3.2km にわたり断層と管路布設予定箇所が交差している。今回は想定断層変位量が最大（3.0m）の地点 J の設計例を報告する。図 1-6-15 に地点 J の解析条件、図 1-6-16 に継手ばね、地盤ばねを示す。断層は変位量 3.0m、断層交差角度は 64°の左横ずれ断層である。まず、断層対策無し of 管路（呼び径 1350 S 形ダクタイル鉄管の定尺 6m 管）で管路挙動解析を行った。

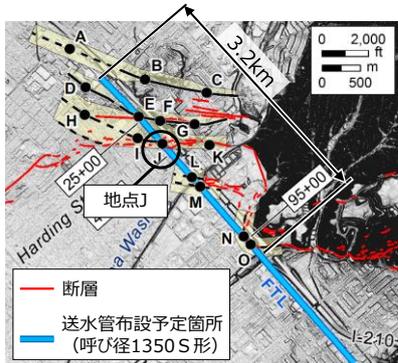


図 1-6-14 プロジェクト概要

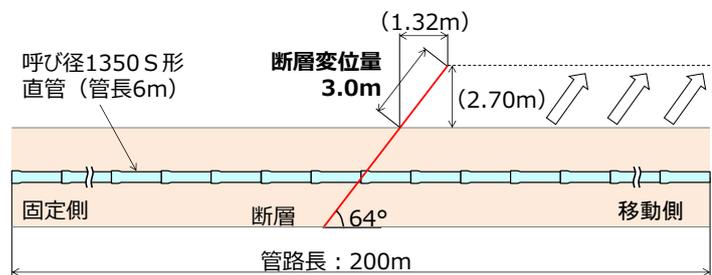
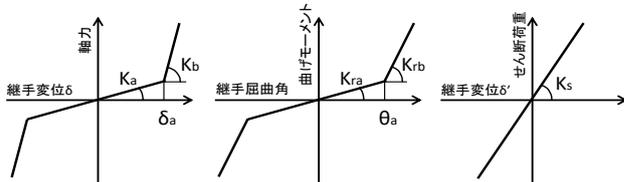


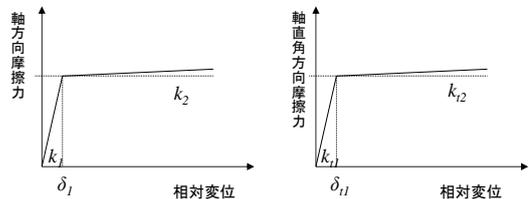
図 1-6-15 地点 J の解析条件

【継手ばね】



管軸方向ばね		回転ばね		管軸直角方向ばね	
Ka	9.20×10^3 (kN/m)	Kra	1.66×10^2 (kN-m/deg)	Ks	2.00×10^6 (kN/m)
Kb	1.98×10^6 (kN/m)	Krb	4.28×10^2 (kN-m/deg)		
δ_g	0.0475 (m)	θ_a	3.2 (°)		

【地盤ばね】



管軸方向ばね		管軸直角方向ばね	
k1	3.66×10^6 (kN/m)	kt1	5.26×10^4 (kN/m)
k2	3.66×10^1 (kN/m)	kt2	5.26×10^1 (kN/m)
δ_a	0.002 (m)	δ_{t1}	0.002 (m)

図 1-6-16 継手ばね・地盤ばね

2) 解析結果

表 1-6-9 に解析結果を示す。断層変位量が 1.8m まで、軸力が許容値である 3DkN を超過しなかった。今回の条件では 1.8m までの断層変位には特別な対策を施さなくても追従することが判った。今回は想定断層変位が 3.0m であるため、設計フロー（図 1-6-3）にしたがい、通常の耐震管の 10 倍の伸び量を有する長尺継ぎ輪を配置し、再確認を行った。

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

3) 解析結果（長尺継ぎ輪を使用した場合）

図1-6-17に示すように、長尺継ぎ輪のスペンを42mとした管路で再確認を行った。表1-6-10に解析結果、図1-6-18に軸力の比較を示す。長尺継ぎ輪を使用した結果、軸力が大幅に低減された。

断層変位量3.0mを受けた後も、軸力が3DkNを超過せず、すべての項目で評価目標を満足したため、長尺継ぎ輪のスペンは42mに決定した。

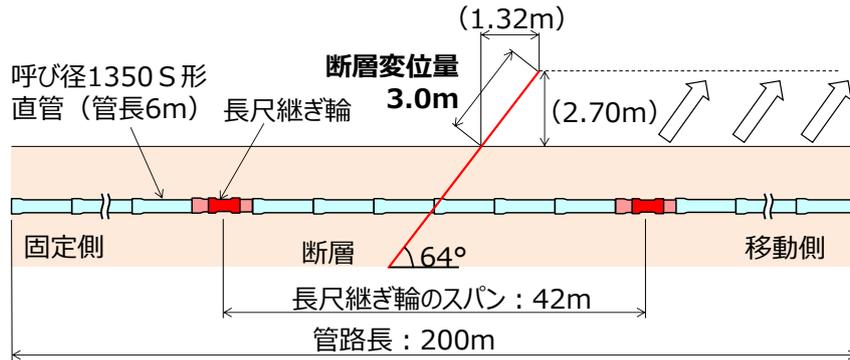


図 1-6-17 解析条件（長尺継ぎ輪を使用した管路）

表 1-6-10 解析結果（長尺継ぎ輪を使用した場合）

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

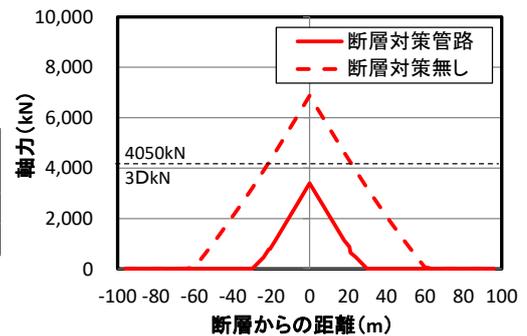


図 1-6-18 解析結果の比較
（軸力，断層変位量 3.0m）

4) 断層対策範囲の決定

地点Jでの断層想定範囲（地表断層が出現すると考えられる範囲）は50mであった。そこで、図 1-6-19 に示すように、断層想定範囲のどこに断層が生じても、長尺継ぎ輪で断層想定範囲を挟むように、42m スペンで3本の長尺継ぎ輪を配置することとした。

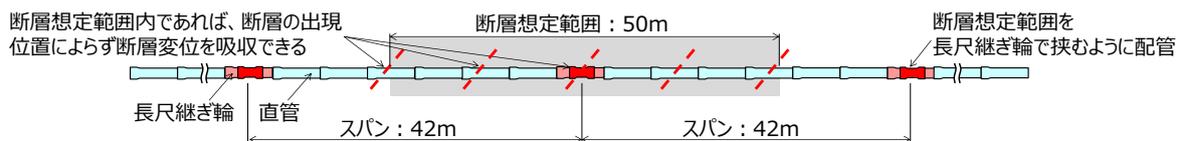


図 1-6-19 断層対策範囲の決定

【参考文献】

- 1) 土木学会,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
- 2) 日本下水道協会,下水道施設の耐震対策指針と解説,2014
- 3) 日本水道協会,水道施設耐震工法指針・解説,2009
- 4) 日本道路協会,道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 平成 29 年 10 月
- 5) 鉄道総合技術研究所,鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 平成 24 年 9 月
- 6) Seismic Guidelines for Water Pipelines (American Lifelines Alliance-ALA, March 2005
- 7) 松田時彦: 活断層から発生する地震の規模と周期について, 地震, 第 2 輯, 第 28 巻, pp.269-283, 1975.
- 8) Okada, Y. : Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 75, No. 4, pp. 1135-1154, 1985.
- 9) Asano, K. and Iwata, T. : Source rupture processes of the foreshock and mainshock in the 2016 Kumamoto earthquake sequence estimated from the kinematic waveform inversion of strong motion data, *Earth, Planets and Space*, 68:147, DOI 10.1186/s40623-016-0519-9, 2016.
- 10) Shirahama, Y., Yoshimi, M., Awata, Y., Maruyama, T., Azuma, T., Miyashita, Y., Mori, H., Imanishi, K., Takeda, N., Ochi, T., Otsubo, M., Asahina, D., and Miyakawa, A. : Characteristics of the surface ruptures associated with the 2016 Kumamoto earthquake sequence, central Kyushu, Japan, *Earth, Planets and Space* 68:191, DOI 10.1186/s40623-016-0559-1, 2016.
- 11) 文部科学省: 平成 28 年熊本地震を踏まえた総合的な活断層調査 平成 28 年度成果報告書, 3.1 章, https://www.jishin.go.jp/main/chousakenkyuu/kumamoto_sogochousa/h28/h28kumamoto_sogochousa_3_1.pdf
- 12) 羽場一基, 園部秀明, 澤田昌孝, 堀宗朗: 断層変位評価への高性能数値解析手法の適用に関する検討, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.73, No.2, pp.I_821-I_830, 2017.
- 13) 国土地理院,地理院地図,電子国土 web, <http://maps.gsi.go.jp/>,2019 年 7 月閲覧
- 14) 活断層データベース, <https://gbank.gsj.jp/activefault/>, 2019 年 7 月閲覧
- 15) 活断層詳細デジタルマップ,東京大学出版会,2018
- 16) 土木学会 原子力土木委員会,断層変位評価小委員会 研究報告書, 2015 年 7 月
- 17) 上田圭一, 谷和夫: 基盤の断層変位に伴う第四紀層及び地表の変形状況の検討 (その2) —正断層, 逆断層模型実験—, 電力中央研究所 研究報告, U98048, 1999a.
- 18) 小山良浩, 谷和夫: 横ずれ断層の模型実験で観察された砂地盤の表面に発達するせん断帯の構造分析, 土木学会論文集, No.750/III-65, pp.171-181, 2003.
- 19) USGS, <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000bg0m/finite-fault>, 2019 年 6 月閲覧

- 20) 杉山雄一, 李元希, 関口春子, 宍倉正展, 太田陽子, 吾妻崇, 荻谷愛彦, 渡辺満久, 齋藤英二, 渡辺和明, 佐々木俊法, 車籠埔断層の活動性及び集集地震時変位量と台湾西部のアクティブテクトニクスに関する研究, 活断層・古地震研究報告, No.1, pp.301-313, 2001
- 21) 栗田泰夫, 金田平太郎, 2005年パキスタン地震で出現した地震断層, 産総研 TODAY 2006年6月号, pp.22-23, 2006
- 22) 小田圭太, 岸正蔵, 宮島昌克: 耐震型ダクタ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.
- 23) 活断層データベース, <https://gbank.gsj.jp/activefault/>, 2019年7月閲覧
- 24) 活断層データベース, https://gbank.gsj.jp/activefault/question_gmap.html, 産業技術総合研究所, 2019年7月閲覧
- 25) 日本水道産業新聞社: 断層を横断するパイプラインの被害写真集-最近の地震被害の分析-, 2003.
- 26) 長谷川延広, 中園隼人: 断層変位を受ける埋設鋼管の設計式の提案, 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.214-217, 2019.
- 27) 西川源太郎, 鈴木剛史, 塩浜裕一, 大沼博幹: 断層変位を受けた水道配水用ポリエチレン管の挙動解析, 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.218-222, 2019.
- 28) 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.
- 29) 日本ガス協会, 高圧ガス導管耐震設計指針, 2013
- 30) 地震調査研究推進本部, https://www.jishin.go.jp/resource/terms/tm_active_fault_research/, 2019年6月閲覧
- 31) 鈴木崇伸: 非線形なばねで支持されたはりの近似解析法, 土木学会論文集 No.689/I-57, pp.109-116, 2001.
- 32) 鈴木崇伸, 高田至朗, 小池武, 小川安雄, 松本真明: 液状化による側方流動を受ける埋設鋼管の塑性ヒンジ解析, 土木学会論文集 No.710/I-60, pp.79-90, 2002.
- 33) 日本ガス協会, 高圧ガス導管液状化耐震設計指針 2016 改定版, 2016
- 34) 小田圭太, 岸正蔵, 宮島昌克, 耐震型ダクタイル鉄管を用いた断層横断部の管路設計方法の研究, 第38回地震工学研究発表会講演論文集, C21-1288, 2018
- 35) 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, pp.26-49, 1998.
- 36) 水道配水用ポリエチレンパイプシステム協会: 水道配水用ポリエチレン管の耐震設計の手引き, pp.103-119, 2018.
- 37) 小田圭太, 金子正吾, 岸正蔵: 耐震型ダクタイル鉄管を用いた断層対策管路の設計事例, 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.209-216, 2019.

2. 断層変位を受ける地中管路の対策方法および維持管理方法

2.1 はじめに

1995年の兵庫県南部地震や1999年の台湾集集地震、同年トルココジャエリ地震で確認された地表地震断層の変位を受けて、国内外では地震時の断層変位に対する地中管路の対策について検討されてきた。地盤変位に対する弾性はりモデルの管路挙動の理論解や高度な有限要素モデルによる応答解析など、設計方法として確立されつつあるが、実設計となると断層位置、変位量、断層のすべり方向の想定から各種管路の設計まで詳細な検討を必要とする場合が多く、重要度が高く、口径が大きい管路の対策事例に限られている。本章においては、既設の対策事例を収集し、設計・施工時の技術的な検討事項と工夫された点について整理した。

さらに、断層変位に限らず、これまでに地盤変状対策などで使用されているダクタイル鉄管、鋼管、ポリエチレン管、伸縮可とう管についてアンケート調査を実施したので、その結果を整理する。

2.2 これまでの断層対策事例

地中構造物に限らず、既往の対策事例は少ないが、少しずつ事例が増えているのが実情である。下表については、可能な範囲で収集した既往の対策事例であるが、上水道パイプライン、トンネルなどに対する事例を中心に整理する。

表 2-2-1 国内外の水道事業における断層対策事例

No	構造物	国名	場所等	新・既	断層名	断層形態	想定断層変位量		施工時期	対応策	対象口径
							水平(m)	鉛直(m)			
1	石油パイプライン	米国	アラスカ	新設	デナリ断層	右横ずれ断層 正断層	6	1.5	1977 年竣工	滑動支杓	不明
2	上水道 (シールド内配管)	日本	横須賀市	新設	武山断層	右横ずれ断層	1.5	-	1996 年	伸縮可とう管 (ステンレス製)	1200
3	不明	米国	サンフランシスコ 湾東海岸地 域水道企業団 (EBMUD)	不明	不明	不明	不明	不明	不明	遮断バルブと送水用 ホース	不明
4	導水トンネル	米国		新設	ヘイワード 断層	右横ずれ断層	2.29	0.15	不明	パイパストンネル, 通水管(鋼管)	1800
5	上水道 (シールド内配管)	日本	大阪府	新設	上町断層帯	逆断層	2.6	2.0	2008 年	耐震型ダクタイル鉄管	1350
6	上水道 (開削配管)	日本	福岡県	新設	警固断層帯	左横ずれ断層	2.1	0.5	2015 年	耐震型ダクタイル鉄管	1200
7	上水道	米国	サンフランシスコ 公共事業委員会	新設	ヘイワード 断層	右横ずれ断層	1.95	-	不明	ポールジョイント	1800
8	上水道 (シールド内配管)	日本	神戸市 大容量送水管	新設	会下山断層	逆断層	1.6	0.32	2015 年	断層用鋼管	2400
9		日本	東京都 多摩南北幹線	新設	立川断層	逆断層 左横ずれ断層	- 3.0	3.0 1.5	2018 年	断層用鋼管	2000
10	上水道	米国	カリフォルニア 州	新設	サンフェル ナンド断層	左横ずれ断層	1.32	2.70	2019 年	耐震型ダクタイル鉄管	1350
11	上水道	日本	金沢市	—	森本—富樫 断層帯	逆断層	2.2	2	—	耐震型ダクタイル鉄管	—

(1) 米国アラスカ 石油パイプライン¹⁾

1) 断層の諸元

アラスカを南北に縦断するパイプラインと交差するデナリ断層面はほぼ鉛直であり、断層の形態は南側が上盤となる正断層の動きを含んだ右横ずれ断層である。想定された断層変位量は、水平方向が 6.0m、鉛直方向が 1.5m である。

2002 年 11 月 3 日に、アラスカで M7.9 の Denali Fault 地震が発生した。この地震では東西方向に全長 650km のデナリ断層の変位は約 334km の範囲に発生し、断層変位は水平方向に最大 8.8m、垂直方向に最大 4m が確認された。

2) 対策事例

図 2-2-2 に示すように、断層を横切る場所には、横方向に Sliderbeam というレールを敷き、その上に Teflon Shoe という台を置いてパイプラインが横滑りしやすいように工夫がなされた。パイプもフレキシブルで、垂直方向の変位にも対応できるように、パイプを支える台にはダンパーがつけられた。想定された断層変位量（垂直方向 1.5m、水平方向 6m）に対し、2002 年の Denali Fault 地震時のパイプライン敷設場所での変位は、垂直方向に 75cm、水平方向に 4.2m であった（USGS, 2003）。上記の対策によりパイプラインの破損は免れ、環境破壊の発生が回避された。図 2-2-2 の左側が地震前、右側が地震後の写真である。

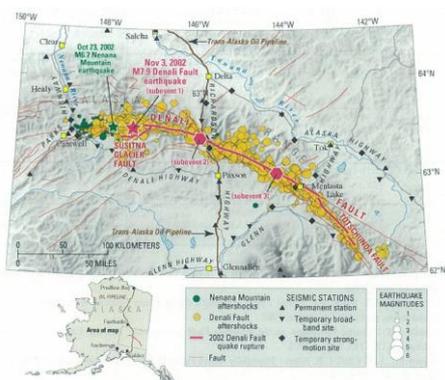


図 2-2-1 パイプラインと断層の位置
(USGS, 2003)



図 2-2-2 アラスカ横断石油パイプラインの活断層対策 (Nyman et al. (2014) に加筆)
(左:地震前, 右:地震後, 赤の破線は断層)

(2) 横須賀市 太田和配水幹線²⁾

1) 断層の諸元

武山断層は活動度 A ランクであり、長さ 10km にわたる右横ずれ断層とされている。この断層が動くことによって発生する地震の規模は M7、断層変位は 1.5m 程度と推定されている。

断層の活動周期は 400~1600 年とされ、非常に発生確率が低い状況にあったが、前回の地震による右ずれ変動の年代特定が困難であったことから、水道幹線の供用期間中に発生する可能性もあると考えられた。そのため、路線の地上踏査やシールド掘削中の土質データの調査を行い、路線と断層が交差する位置の特定を行った。断層周辺の土質は葉山泥岩層の破碎程度と分類され、断層に近くなるにしたがって中度~高度に破碎化されていた。

2) 対策事例

共同溝は延長 2,830m、土被り 9~66m、外径 3,480mm、セグメント内径 3,050mm であり、上半に下水道管 φ900 と通信用サヤ管、下半に水道管 φ1200 が配置されている。シールド断面図を図 2-2-3 に示す。

水道管には、水道用モルタルライニング鋼管が採用され、断層対策箇所には伸縮可とう管が採用され、7箇所を設置された。伸縮可とう管の構造は図 2-2-4 に示す通りで、水道管本管と同径同厚のステンレス製蛇腹管 3 体と鋼管で構成されており、1 基の延長は 18m である。この伸縮可とう管 1 基で、断層 1,600mm の「軸ずれ」および、±80mm の「伸縮」に追従できるとされている。また、伸縮可とう管の稼働を容易にするため、中詰めはコンクリートでなく低強度のエアモルタルが使用された。

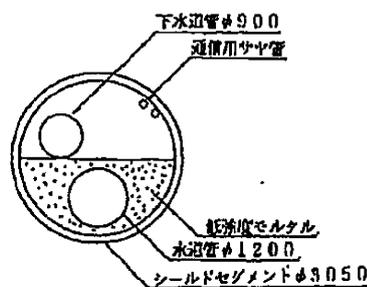


図 2-2-3 シールド断面図(猪狩, 1996)

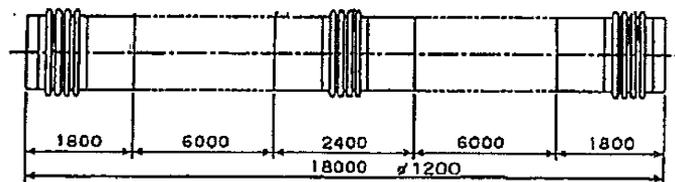


図 2-2-4 伸縮可とう管の組み合わせ(猪狩, 1996)

(3) EBMUD 遮断バルブと送水用ホース (地盤工学会, 2002) ¹⁾

1) 断層の諸元

対策を行う上で考慮されたヘイワード断層の変位量等の緒元については不明.

2) 対策事例

EBMUD (East Bay Municipal Utility District) が管轄する貯水池 (Pardee 湖) からの送水管路で断層変位対策が行われている. 図 2-2-5 に示すように, この送水管路はヘイワード断層とコンコルド断層の2つの活断層を横切っている. 断層との交差位置に, 図 2-2-6 に示す遮断バルブと一次バイパス用の連結ホースが設置され, 断層による地震変位が発生したとしてもバルブ操作により送水遮断を防止する対策が施されている. 断層の両側にそれぞれ遠隔操作で作動する緊急遮断弁, 連結ホースが数条敷設され, 水量損失を最小限に抑えることが意図されている.

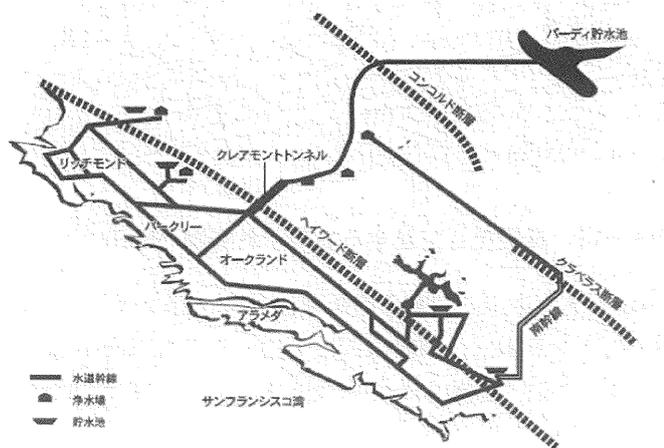


図 2-2-5 送水管と断層の位置関係 (濱田, 2015:Diemer(1998)原図)

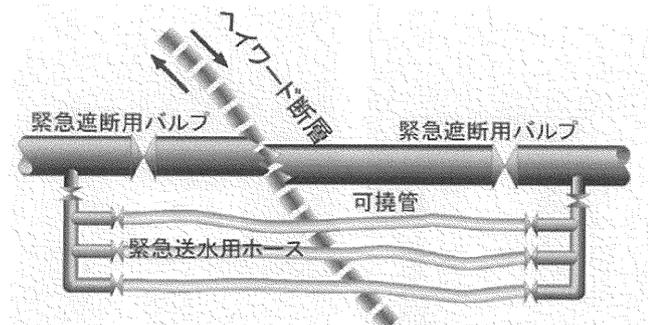


図 2-2-6 緊急時の遮断用バルブと送水用ホース (濱田, 2015:Diemer(1998)原図)

(4) EBMUD クレアモント導水トンネル³⁾

1) 断層の諸元

クリアモント導水トンネルでは、図 2-2-7 のように、地震により右横ずれ断層のヘイワード断層が動き、幅 60ft.(18.3m)の主断層内では 7.5ft.(2.29m)の水平変位と 0.5ft.(0.15m)の鉛直変位が発生し、主断層を挟んだ幅 920ft.(280m)の副断層内では 2.25ft.(0.69m)の誘発的な変位が発生すると推定された。

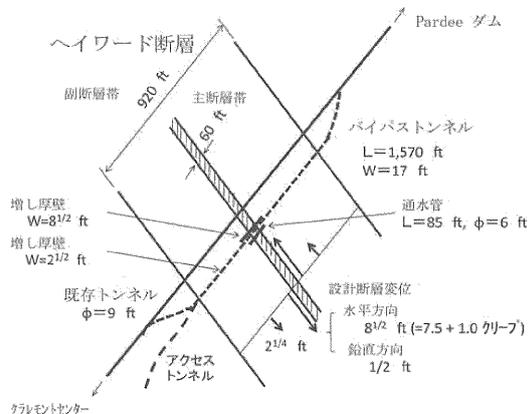


図 2-2-7 ヘイワード断層とクレモントトンネルの概要図

2) 対策事例

対策は、ヘイワード断層との交差部における既存トンネルに並行した 1,570ft.(479m)のバイパストンネルの設置と既設トンネルでのライニング補修と裏込注入である。バイパストンネルは、既設トンネルと平行であり、断層帯とほぼ直角に交差している。図 2-2-8 は交差部のバイパ

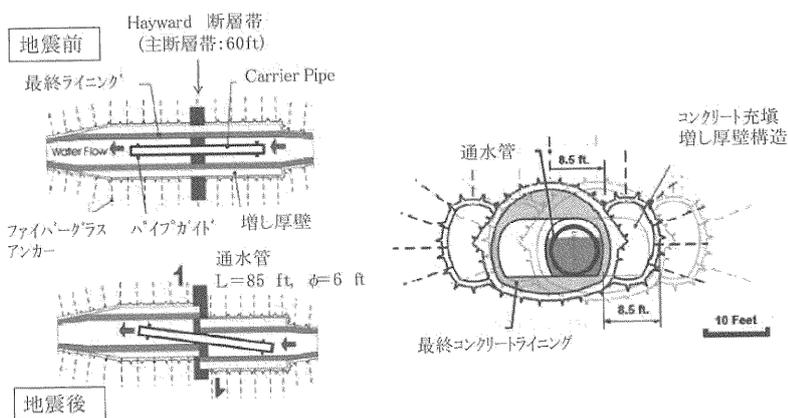


図 2-2-8 主断層との交差部のトンネル構造図

ストンネルの断面であり、断層が 8.5ft.ずれた後、トンネル断面が閉塞しないように、断層変位量を考慮して幅 17ft.(5.2m)とされている。また、断層との交差部には、直径 6ft.(1.83m)、厚さ 3inch(7.62cm)、延長 85ft.(25.9m)の鋼製の通水管も設置され、主断層が変位して土砂が流入した場合でも、130MGDの通水が確保できるようになっている。さらに、バイパストンネルの壁は、拡幅部分ではトンネル左右にコンクリートを充填した 8.5ft.の増し厚構造、副断層部分では 2.5ft.(0.76m)の厚さとして、土砂流入を避けるようになされている。8.5ft.の断層変位が発生した場合は、既設トンネルの機能は喪失するが、バイパストンネルにより通水機能が確保できるとされている。

(5) 上町断層帯を横断するφ1350US形ダクタイトイル鉄管（シールド内配管）⁴⁾

1) 断層の諸元

上町断層帯は大阪平野に位置する断層帯で、豊中市から岸和田市に至る。全体の長さは約42kmでほぼ南北に伸びており、断層帯の東側が西側に38°の傾きで乗り上げる逆断層である。今後30年の間に地震が発生する可能性が、日本の主要な活断層の中で高いグループに属すると想定される。

上町断層帯の長さを約42kmとすると、マグニチュードは7.5程度、断層変位量は最大約3.3m(水平方向2.6m, 鉛直方向2.0m)と推定される。

断層による影響範囲は、850mと設定された。

2) 対策事例

口径1350mmバイパス配水管布設工事において、セグメント外径2206mmのシールド工法による管路が、上町断層帯と交差するように配管された。

内挿管は、断層による影響範囲内に、伸縮離脱防止機構を有するUS形ダクタイトイル鉄管が配管された。セグメント対策としては、レベル2地震動において終局的な破壊が発生しないことが分かったため、可とうセグメントによる対策は行われなかった。

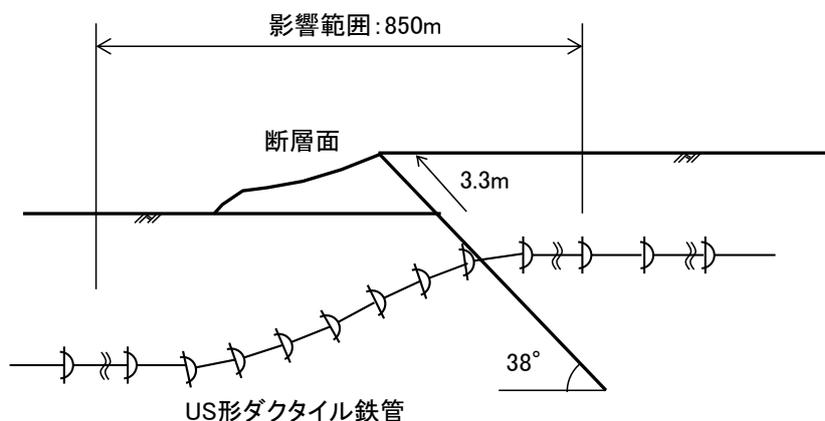


図 2-2-9 断層横断部の配管状況⁴⁾

(6) 警固断層を横断する φ1200S 形ダクタイトイル鉄管（開削配管）⁵⁾

1) 断層の諸元

警固断層帯は、玄海灘から博多湾を経て福岡平野にかけてほぼ北西-南東に分布する長さ約 27km の左横ずれの活断層帯である。地震の規模を示すマグニチュードは 7.2 程度と推定され、地震発生時における断層近傍の地表面では、2.1m の水平変位と 0.5m の鉛直変位（傾き約 13°）、2.16m の合成変位が生じる可能性がある。断層が影響を及ぼす範囲は、警固断層帯の前後 100m（計 200m）区間と設定された。

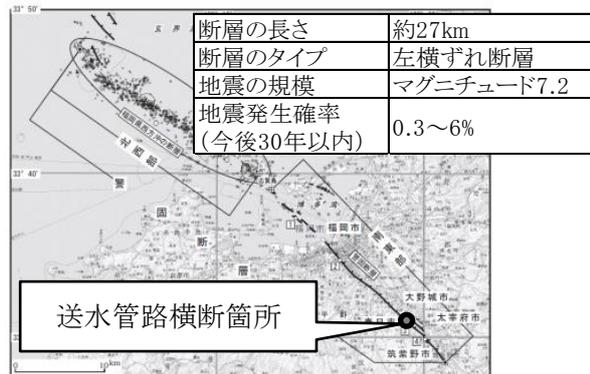


図 2-2-10 警固断層帯⁶⁾

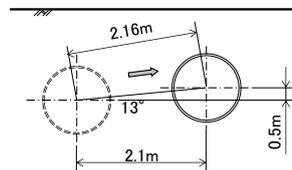


図 2-2-11 想定断層変位⁶⁾

2) 対策事例

断層横断部の影響範囲について、呼び径 1200 の S 形ダクタイトイル鉄管が採用され、FEM 解析により 2.16m の変位でも許容値を超えて屈曲しない配管が検証された。検証の結果、1 本 6m の直管を効率的に利用することとし、地盤が固い区間は管長 1.5m の管及び管長 2.25m の管と継ぎ輪で配管された。比較的柔らかい区間は、管長 4.5m の管と継ぎ輪で配管された。

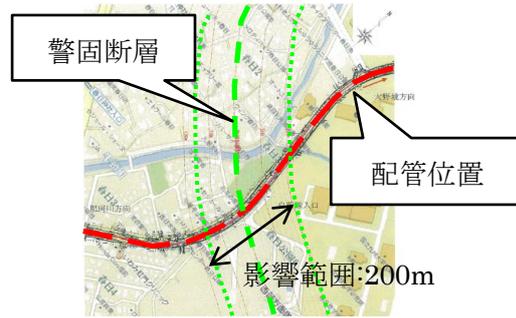


図 2-2-12 断層位置及び配管位置⁶⁾

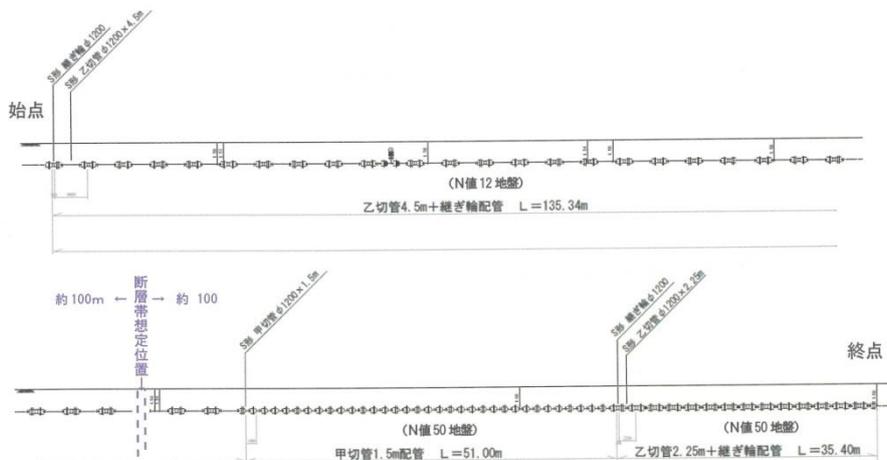


図 2-2-13 警固断層帯横断箇所の配管図⁵⁾

(7) サンフランシスコ ボールジョイント⁶⁾

1) 断層の諸元

サンフランシスコの水道事業者である SFPUC(San Francisco Public Utilities Commission)では導送水管がアメリカの三大活断層であるサン・アンドレアス、ヘイワード並びにカラベラス断層を横断していることで、地震に対する脆弱性が懸念されていた。2008年に米国地質研究所は、今後30年間に3つの断層のいずれかを震源とする大規模地震発生の可能性を63%と発表している。ヘイワード断層では、3つの断層痕跡それぞれの地質調査に基づき、断層変位量が表2-2-2のように設定された。管路と断層の交差角は45°~50°と推定された。

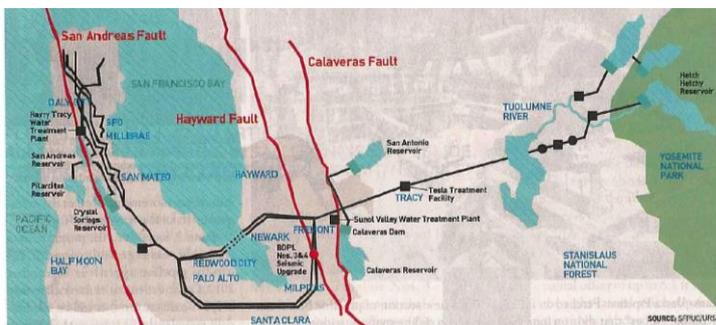


図 2-2-14 断層位置

表 2-2-2 ヘイワード断層

設計変位

断層	変位(m)	
	A	水平
	垂直	2.1
B	水平	1.95
	垂直	0
C	水平	0.15
	垂直	0.15

2) 対策事例

断層 B 部では断層変位を管の回転と伸縮に分けて吸収するため、断層の両端部に距離 60m でボールジョイントが、北端部に伸縮ジョイントが配置され、口径 1,800mm 管厚 25mm の管がセグメント型管防護室内部に配管された。ボールジョイントは最大曲げ角度 12°でヘイワード断層の断層変位 2m に耐え、伸縮ジョイントは 2.7m の圧縮、0.3m の引張に耐えられるものが使用された。

断層 A 部を横断する区間は、管厚 32mm の溶接鋼管を既設 φ2900mm の波形鋼管の内部に布設された。

断層 C 部を横断する区間は、想定される水平及び垂直変位に耐える高強度の、管厚 25mm の送水管が布設された。

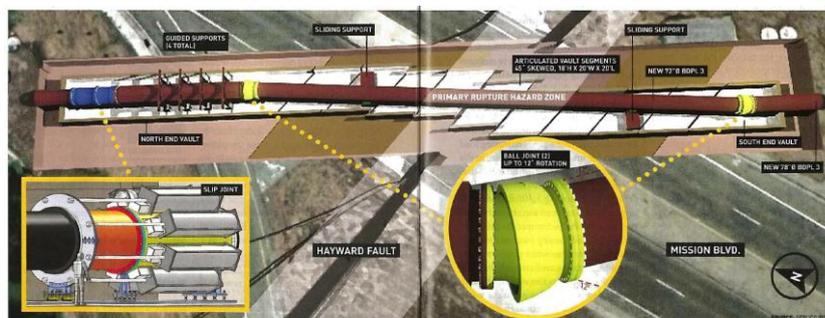


図 2-2-15 断層対策におけるボールジョイントの設置位置

(8) 日本国内（神戸市，水道管路，シールド内配管）⁷⁾

1) 断層の諸元

神戸市内には多数の断層が存在しており，これらのうち「会下山断層」と横断せざるを得ない大容量送水管のルートについては，地形資料等の判読，反射法地震探査およびボーリング調査（約 60m×3 孔（傾斜 2 孔，鉛直 1 孔））によって断層の存在を確認し，横断位置が特定された。

会下山断層は六甲山断層系に含まれる断層で，活動周期が 800～2400 年の右横ずれ断層であり，断層変位が約 1.5m と推定された。

2) 対策事例

会下山断層と大容量送水管との交差角 106° として，断層用鋼管の仕様（波形部形状，塑性ヒンジ間距離，山数）および最適配置位置（波形部の設置間隔，設置個数）が FEM（有限要素法）解析等により検討された。その結果，断層用鋼管の波形部を 4 個×5m 間隔で設置する案が最適案となり，断層用鋼管が採用された。

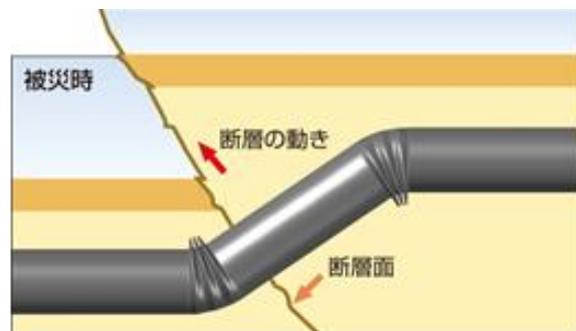


図 2-2-16 断層用鋼管の挙動イメージ

断層用鋼管の FEM 解析による性能確認として，①変形状態の確認（設定許容曲げ角度），②通水断面の照査を行うとともに，断層用鋼管の実管を用いた曲げ性能実験により，妥当性が確認された。

(9) 日本国内（東京都，水道管路，シールド内配管）⁸⁾

1) 断層の諸元

検討対象である立川断層は逆断層又は縦横ずれ断層と推定されており，すべり量は3.0～3.4m（表 2-2-3 参照）と推定されている．立川断層は断層面が表層まで達しない「撓曲」とされた．撓曲層内に鋼管路が布設された場合，主に管軸方向の圧縮変形が作用するほか，地震の規模によっては新たに断層面が形成する場合も想定された．

表 2-2-3 立川断層の諸元

ケース	交差角	すべり量(鉛直)	すべり量(水平)	すべり量(合成)
ケース 1 (逆断層)	60 度	3.0m	-	3.0m
ケース 2 (縦横ずれ断層)	80 度	1.5m	3.0m	3.4m

2) 対策事例

東大和給水所から拝島給水所までの延長約 10.6km の送水管（φ2,000）はシールドトンネル内に布設され，立川断層を横切る計画であった．立川断層は延長 28km におよび，送水管ルートを変更して断層を回避することが困難なため，断層対策工が求められていた．立川断層の地盤は撓曲構造を有しており，軸圧縮変形とせん断変形の両方に対応する必要がある（図 2-2-17，図 2-2-18 参照）とされ，従来型の断層用鋼管を基に開発された撓曲構造対応型断層用鋼管が断層対策工として採用された．

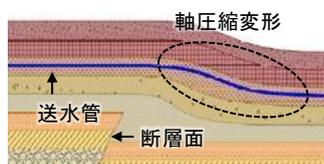


図 2-2-17 撓曲構造による軸圧縮変形

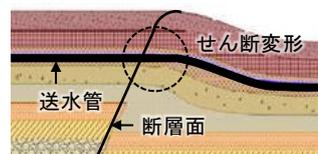


図 2-2-18 断層変位によるせん断変形

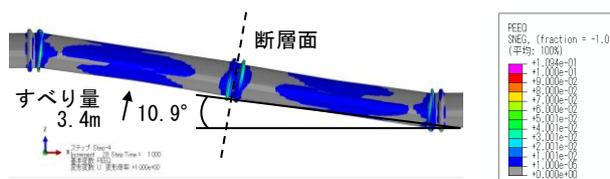


図 2-2-19 解析結果

(10) 米国（カリフォルニア州，水道管路）⁹⁾

1) 断層の諸元

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 送水管について，図 2-2-20 に管路と断層の位置関係を示す．地点 A～O の複数個所で，3.2km に渡り断層と管路布設箇所が交差する．サンフェルナンド断層は左横ずれ断層であり，図中の地点 J で断層変位が最大 3m，断層交差角が 64° と推定された．

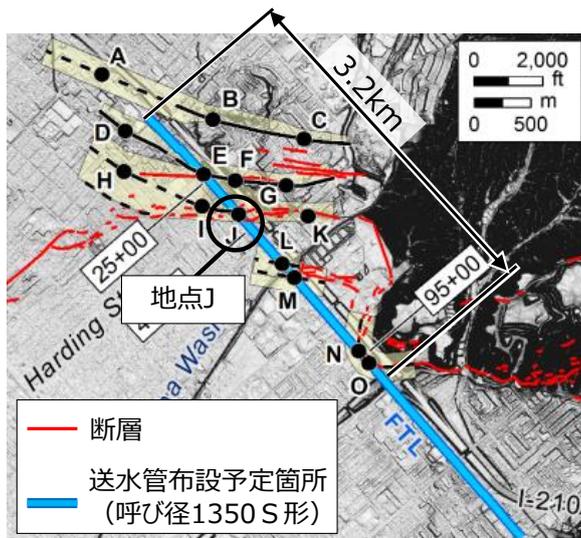


図 2-2-20 サンフェルナンド断層と管路の位置関係

2) 対策事例

図 2-2-21 に示す通り，S 形ダクタイル鉄管を使用すれば，断層変位量が 1.8m までは，軸力は許容値である 3DkN を超えず，特別な対策が不要であるとされた．断層変位量が最大 3m であることから，図 2-2-22 に示すように通常の 10 倍の伸縮量を有する長尺継ぎ輪が 42m 間隔で配置された．断層変位に継手の伸縮・屈曲で追従し管が塑性変形しない設計が行われた．詳細は P46 の「1.6.5 設計事例 (2)継手構造管路」に記載．

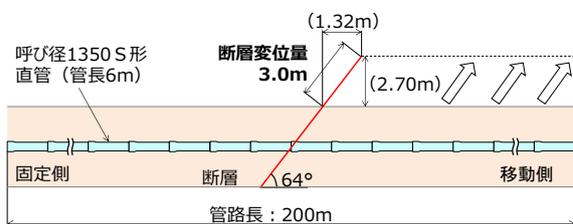


図 2-2-21 S 形ダクタイル管路

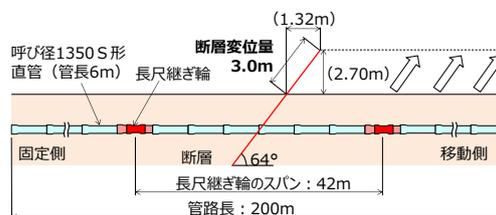


図 2-2-22 S 形ダクタイル管路(長尺継ぎ輪)

(11) 森本－富樫断層帯を横断する水道管路^{10),11),12)}

1) 断層の諸元

森本－富樫断層帯は,金沢市の中心部を通過して南北に約 26km にわたって分布する逆断層である.地震の規模を示すマグニチュードは 7.2 程度と推定され,断層帯の 1 回の活動による変位量は 3m 程度 (水平変位:約 2.2m,鉛直変位:約 2m) とされている.断層帯の長期評価において,今後 30 年以内に大きな地震が起こるリスクは S ランク(高い)を評価されている.表 2-2-4 に森本－富樫断層帯の緒元を示す.

表 2-2-4 森本－富樫断層帯の緒元

長さ	約 26km
傾斜角	40～60°程度
断層の種類	逆断層
想定断層変位量	3m 程度 (水平 2.2m, 鉛直 2.0m)
地震の規模	M7.2 程度
地震発生確率	2-8% (S ランク)

2) 対策検討事例

森本－富樫断層帯が地表面に至る断層位置のずれを考慮した断層影響範囲は 76m と設定され,断層と交差する基幹管路の FEM 挙動解析による安全性評価により,以下のように対策方法が検討された.

- ①断層変位量が 1.6m 程度以下であれば,耐震型ダクタイル鉄管で対応できる.
- ②最大 3m の断層変位が考慮される場合,図 2-2-23 に示す方法で断層対策を行うこととされた.

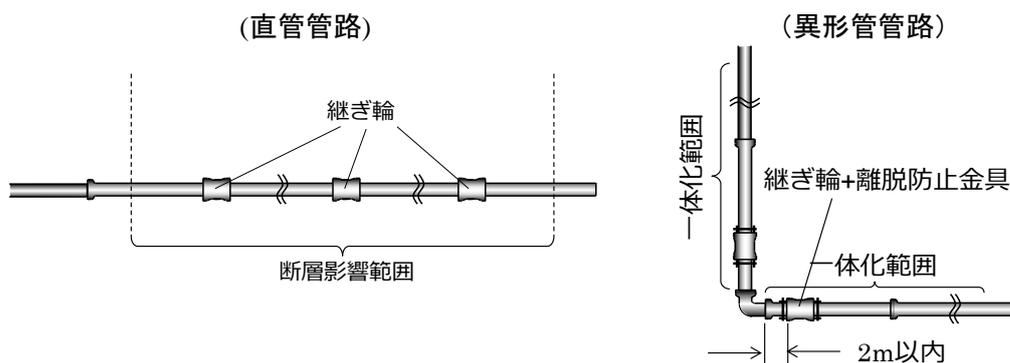


図 2-2-23 管路の断層対策方法

2.3 断層変位に追従した事例

融着継手を用いた水道配水用ポリエチレン管は、比較的小口径の管路に使用されており、現状は1mを超えるような大規模な断層変位を受ける箇所を横断する場合を想定した送水機能までは要求されていないのが実態である。この為、現状では断層横断を想定した特殊継手はラインナップされていない。

但し、ポリエチレン管自体の持つ変形特性により地盤変位に追従することが可能であり、過去にも2014年長野県神城断層地震において長野県白馬村にて約80cmの断層変位を受けたにも関わらず、通水機能を確保していた事例が存在する。以下にその概要を説明する。

<2014年長野県神城断層地震の例>

1)地盤の状況

断層は村道を横断するように存在しており、写真2-3-1に示す約80cmの垂直変位及び約30cmの水平変位が観測された。

2)水道配水用ポリエチレン管の状況

水道配水用ポリエチレン管口径75mmは村道に沿って敷設されていたが、地震発生後も断水や水圧低下は見られずそのまま供用されていた。

一方、水道配水用ポリエチレン管の下に埋設されていた鉄筋コンクリート管口径450mmは破損し、通水機能が維持できていなかった為、本補修工事に合わせて水道配水用ポリエチレン管の掘り上げ調査を行った。その結果、掘り上げ時の水道配水用ポリエチレン管は、写真2-3-2に示すとおり緩やかに変形していることが確認できた。また、水道配水用ポリエチレン管の管頂部高さを測量した結果、断層境界から約300cmの範囲で変形が集中しており、垂直変位差は69.8cmで地表の変位(=80cm)に近い値であった。



写真 2-3-1 塩島地区地表変位
(垂直変位約 80cm)



写真 2-3-2 掘削時に確認できた
旧地表面の変位

2.4 アンケート調査

断層変位に関わる既存の対策事例を把握するため、下記の団体を対象にアンケート調査を実施した。日本水道工業団体連合会については、連合会を經由して、民間企業 6 社から回答を得た。結果として、3 団体と民間企業 6 社から回答があり、その回答内容を以下に示す。

また、下記の 2 つの事項について、本章で盛り込むことができなかつたため、最終成果報告書に向けて、今後で検討していく。

- ・断層変位を受ける地中管路の維持管理方法
- ・上水道パイプライン、トンネル以外の構造物の対策事例

【対象団体】

- ・日本水道工業団体連合会
- ・日本水道鋼管協会
- ・日本ダクタイル鉄管協会
- ・配水用ポリエチレンパイプシステム協会

【アンケート調査実施時期】

- ・2018 年 10 月～2019 年 6 月

【アンケート項目】

(1) 特徴

- ・どのようにして断層変位に対応するのですか
(①管材で変位を吸収, ②継手部で変位を吸収, ③地盤で対応)

(2) 実績

- ・断層対策として採用された実績はありますか
- ・断層変位に耐えた事例はありますか
- ・採用事例

表 2-4-1 アンケート調査結果

項目	断層用鋼管	ダクタイル鉄管	ポリエチレン管	伸縮可とう管			
	日本水道鋼管協会	日本ダクタイル鉄管協会	配水用ポリエチレンパイプシステム協会	ボール型	ベローズ型	クローザー型	ゴム型
特長	<p>どのようにして断層変位に対応するのですか？</p> <p>1. 管材で変位を吸収</p> <p>断層変位が作用する箇所に、予め変形し易い山形の部位(座屈波形部)を設置し、断層変位に対応する</p>	<p>2. 継手部で変位を吸収</p> <p>・各継手が伸縮・屈曲・離脱防止機能を備え、鎖構造管路を構築できることで、断層変位に対応する</p> <p>・大きな断層変位が想定される場合は、長尺継ぎ輪等を適正に配置することで対応可能</p>	<p>1. 管材で変位を吸収</p> <p>水道配水用ポリエチレンは口径 50～300 の範囲で、柔軟性に富む材料特性と管体強度以上の接合部強度を有するEF接合等で一体構造管路を構築できるため、地盤変位に対して管体全体が変形することで吸収可能</p>	<p>2. 継手部で変位を吸収</p> <p>伸縮可とう管の継手がボール構造になっている事で、屈曲性があり、またボール内に伸縮機能を備えている。この構造により大きな曲がりに追従でき、地盤の変位に対応可能</p>	<p>2. 継手部で変位を吸収</p> <p>可動部であるベローズ(蛇腹部)が屈曲性と伸縮性を備えており、想定された地盤変位に対応する</p>	<p>2. 継手部で変位を吸収</p> <p>継手部の屈曲性と伸縮性により、せん断変位を3次的に複合で吸収</p>	<p>2. 継手部で変位を吸収</p> <p>過去の事例において、ゴム型伸縮可とう管で断層を目的として採用された事例無し</p>
実績	断層対策として採用実績	<p>・東京都や神戸市等の大規模事業者で採用・施工実績がある。設計対応中の案件が複数ある</p>	<p>・国内外に採用・施工実績がある。設計検討中の案件もある。</p>	<p>断層対策として採用された実績はないが、結果として断層横断箇所でも機能が発揮できたことを確認している</p>	<p>断層の変位に対応するため、採用された実績はある</p>	<p>横須賀市共同溝(武山断層)</p> <p>断層対策用としての納入実績はない</p>	<p>断層対策用としての納入実績はない</p>
	断層変位に耐えた事例	<p>・断層用鋼管の布設された場所は、断層変位が確認されておらず、具体的な事例はない。但し、性能確認実験等で管路挙動を把握している。京都大学やコーネル大学等で、軸圧縮・軸引張・曲げ・繰り返し・土層実験を行っており、断層用鋼管の安全性を確認している。</p>	<p>・大きな断層変位が生じた位置に埋設されていた耐震型ダクタイル鉄管がなく、事例は未だない</p> <p>・但し、大きな地盤変位を想定した大型土槽実験で、管路挙動が確認されている</p>	<p>・事例はある。長野県神城断層地震において、鉛直80cm、水平30cmの地表変位が見られた箇所に管路が敷設されていたが、地震後も通水機能が確保されていた。上記箇所の掘上調査を実施した結果、管路に局所的な変形は見られず、緩やかに変形することが確認できた</p>	<p>確認していない</p>	<p>確認していない</p>	<p>確認していない</p> <p>断層対策用としての納入実績はない</p>
	採用事例	<p>・2012年 神戸市水道局 2,400A</p> <p>・2018年 東京都水道局 2,000A</p>	<p>・φ1350×850m:断層変位 3.3m (大阪府)</p> <p>・φ1200×200m:断層変位 2.16m (福岡県)</p> <p>・φ1350, φ300×約 3200m:断層変位 3m (Los Angeles)</p> <p>・φ600×約 220m:断層変位 1.8m (Hayward)</p> <p>・φ1200×約 3000m:断層変位 1.5m (Los Angeles)</p> <p>・φ1500, φ1650, φ1800×約 220m:想定地盤変位 2.9m (Santa Clara)</p>		<p>・可撓伸縮管の使用場所は事業者や設計会社にて決定されるため、十分に確認できていない</p>	<p>(採用実績)</p> <p>・Φ1200(横須賀市、武山断層)</p>	<p>・1959年よりクローザー型を多くの自治体に納入設置しており、断層部へ設置した可能性もあるが、十分に確認できていない。</p>

【参考文献】

- 1) 一般財団法人エンジニアリング協会地下開発利用研究センター：平成 28 年度エネルギー関連施設に関する活断層の工学的研究会，平成 29 年 8 月
- 2) 猪狩弘和：活断層を通過する太田和配水幹線築造工事の報告，第 47 回全国水道研究発表会，平成 8 年 5 月
- 3) 常田賢一，片岡正次郎：活断層とどう向き合うか，理工図書，2012.11.10
- 4) 片野ほか，上町断層横断に伴う配水管路の耐震検討について，第 44 回研究発表会講演要旨，2009
- 5) 田中ほか，福岡地区水道企業団における管路整備事業の推進，ダクタイトイル鉄管 98 号，2016
- 6) Engineering News-Record, Slip and Slide, 2014.6.30
- 7) 長谷川延広，長嶺浩，今井俊雄：断層用鋼管の開発，日本工業用水協会，2015
- 8) 中園隼人，長谷川延広，岩田克司，鈴木清久，落合秀光，窪田忠仁：立川断層を横断する送水管の耐震設計，第 11 回水道技術国際シンポジウム，2019
- 9) 小田圭太，岸正蔵，宮島昌克：耐震型ダクタイトイル鉄管を用いた断層横断部の管路設計方法の研究，第 38 回地震工学研究発表会講演論文集，C21-1288，2018.
- 10) 三井弘光ほか，活断層変位による埋設管被害の軽減対策(I)，平成 29 年度全国会議(水道研究発表会)，2017.
- 11) 増田哲史ほか，活断層変位による埋設管被害の軽減対策(II)，平成 29 年度全国会議(水道研究発表会)，2017.
- 12) 増田哲史ほか，活断層変位による埋設管被害の軽減対策，平成 30 年度全国会議(水道研究発表会)，2018.

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

断層変位を受ける構造物に関して、断層変位を受けた際の変位挙動や構造物内に発生する応力等を定量的に評価し、合理的な設計を行うためには、断層、地盤、構造物、数値解析法等の様々な要因を考慮する必要がある。ここでは、断層変位を受ける構造物の健全性の評価や断層対策の合理化を行う場合に解析評価に影響すると考えられる要因を列挙するとともに、想定される事象に応じた数値解析法について概要を整理する。

(1) 基本的流れ

断層変位を受ける構造物の健全性の評価および対策技術の検討の基本的流れを図3-1-1に示す。健全性を定量的に評価し、必要に応じて合理的な対策を講じるためには、地盤、断層、構造物の情報を入手し、想定される事象に応じた解析評価を行うことが必要になる。

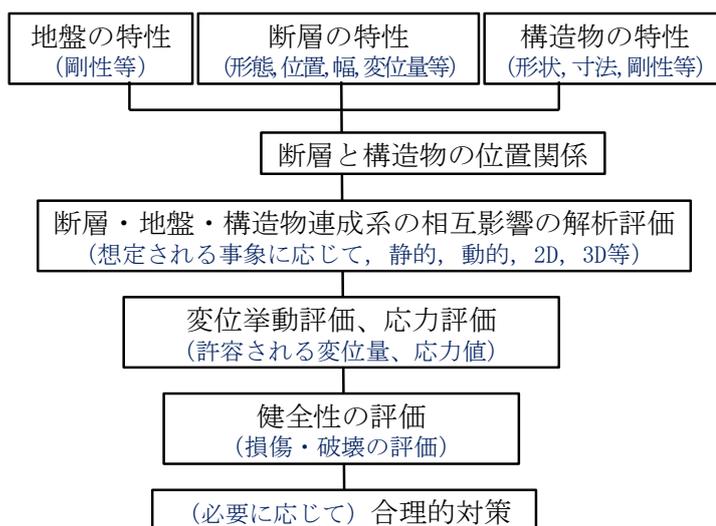


図 3-1-1 断層変位に対する健全性評価と対策検討の基本的流れ

(2) 設計に際して考慮すべき要素 (影響要因)

断層変位に対する健全性評価、対策技術検討に関して影響を及ぼすと考えられる事項を表3-1に示す。強震動に対する耐震設計では、地震動を生み出す主断層（震源断層）が評価対象となるが、断層変位に対する設計では、断層変位を発生する断層が評価対象となり、主断層（震源断層）だけでなく副断層（地震断層）、分岐断層も評価対象となる。従来の活断層研究は、地震動を生み出す主断層に主眼が置かれているため、主断層に関しては出現位置や想定される変位量等についての情報が公表されていることが多いが、副断層、分岐断層に関しては出現位置等の情報が分からない場合が多いとされる。そのため、副断層、分岐断層に関して出現位置が明確ではない場合は、従来の活断層研究の知見のみならず、

リニアメントや確実度の低い断層等の考慮等が必要になる。断層の特性については、断層の形態、厚さ（幅）、変位量が重要な要素となる。断層の形態は、地盤内の応力場の模擬、断層の変位方向の設定に関して、断層の厚さは、構造物に対する断層変位の影響度に関して、断層の変位量は、構造物の損傷・破壊の定量的評価にとって重要な要素になる。

地盤に関しては、地盤の硬軟が重要な要素になる。硬質岩盤であれば断層変位が直接的に構造物の作用する状況を想定する必要があり、軟質地盤であれば地盤による断層変位の吸収・緩和を想定する必要がある。

構造物に関しては、構造、形状、規模・寸法、材質、許容される変位量・応力値等の特性が様々であり、個々の構造物の特質に応じた条件設定と解析評価が必要になる。断層変位に対しては、耐震継手、伸縮継手等の非連続的構造の影響も考える必要が生じるので、継手の配置や性能等の重要な要素になると考えられる。

表 3-1-1 設計に際して考慮すべき要素
(健全性評価および対策技術検討等における影響要素)

項目	要素	概要	備考	
断層	種類	主断層 (震源断層)	分布位置 →従来の活断層研究の主対象	出現位置 ・予測できる場合 ・予測できない場合
		副断層 (地震断層)	出現位置	
		分岐断層	出現位置	
	形態	逆断層	圧縮応力状態での断層変位 ・圧縮応力場でのせん断変位	初期応力状態の影響 ・断層の形態に応じた 初期応力状態の模擬
		正断層	引張応力状態での断層変位 ・引張応力場でのせん断変位	
		横ずれ断層	せん断応力状態での断層変位 ・地中管路との交差角によっ て、圧縮応力場か引張応力場の せん断変位となる。	
		蝶番断層	曲げ応力状態での断層変位 ・曲げ応力場でのせん断変位	
	厚さ	厚さが無い断層	破碎帯や弱層等が無い	断層の厚さの影響 ・構造物に対する断層 変位の影響の緩和効果
		厚さが有る断層	破碎帯や弱層等が介在する断 層	
	変位 速度	低速	断層の変位速度が低速の場合	断層の変位速度の影響 ・高速度下での地盤の 剛性の影響
		高速	断層の変位速度が高速の場合	
	変位量	数 mm オーダー	影響：微小	数十 cm, 数 m オーダの 断層変位に対する健 全性の評価が重要
数 cm オーダ		小規模な構造物では影響：大		
数十 cm オーダ		構造物に及ぼす影響：大		
数 m オーダ		構造物に及ぼす影響：重大		

項目	要素	概要	備考		
地盤	岩盤	岩盤 山間部の構造物	断層変位が構造物に直接的に作用	周辺地盤の硬軟の影響 ・断層変位が直接的に構造物に作用する場合 ・断層変位が間接的に構造物に作用する場合	
	地盤	硬質地盤 内陸部の構造物	地盤による断層変位の吸収／緩和効果⇒小		
		軟質地盤 平野部の構造物	地盤による断層変位の吸収／緩和効果⇒中		
		軟弱地盤 臨海部の構造物	地盤による断層変位の吸収／緩和効果⇒大		
		液状化地盤 臨海部・埋立部	液状化が発生した場合の断層変位の吸収効果		
	土被り	地下浅部		土被り，地圧の影響	
地下深部					
構造物	平面形状	線状構造物	水道，道路，鉄道，トンネル	断層変位に対する線状構造物の特質	
	断面形状	円形			
		矩形			
	規模寸法	小規模，小口径	被災時の社会的影響度：小		想定される破壊形式 許容される破壊形式
		大規模，大口径	被災時の社会的影響度：大		
	材質	RC製	引張破壊，せん断破壊，曲げ破壊		
		鋼製	座屈，引き抜け，非線形		
		FRP製			
	継手	非継手構造	一体構造 →連続挙動		応力評価が主体
		継手構造	耐震継手，伸縮継手 →非連続挙動		非連続的な変位挙動の評価が重要
断層と構造物の位置関係	横断	構造物を横断		断層と構造物の位置関係に応じて三次元性の考慮が重要	
	縦断	構造物を縦断			
	斜めに横断	構造物を斜めに横断 三次元性の考慮が必要			

3.2 利用できる数値解析手法の整理

断層変位のシミュレーションとは、地殻や地盤を通して地表に達する破壊過程を数値解析により求めることである。従って、表層地盤への影響を考慮する際、想定された地震に対して断層が地表に現れるか否か、地表に現れる場合には断層の位置、変位等はどうなるか評価するものであり、浅層地盤を対象とした大変形問題となる（堀，2008）。

シミュレーションの元となる物理モデルは、連続体に基づくモデルと、粒状態に基づくモデルに大別できる。以下に、それぞれのモデルの概要を説明するとともに、表 3-2-1 および表 3-2-2 に「断層変位による地表変動量評価手法」（静的および動的）としてまとめた。

(1) 食い違いの弾性論（断層変位評価小委員会研究報告書¹⁾より抜粋）

食い違いの弾性論（elasticity theory of dislocation）は、断層運動に対する地盤の変位、ひずみ・応力変化量を求める手法として、現在最も広く用いられる手法である。基本的な理論は、Steketee（1958）²⁾により展開された。地盤を弾性体と仮定し、力と食い違いの等価性に基づき、断層のずれと等価な単位点力源と任意の位置での変位を関係づける。さらに点力源を断層面上に与えることにより、変位場を求める積分方程式が得られる。食い違いの弾性論の解析式を与える文献は複数存在するが、いずれも矩形断層を仮定することによりこの積分方程式を利用可能な形式まで展開したものである。その代表的なものである Okada（1985, 1992）^{3,4)}の式は、任意のポアソン比に対する横ずれ断層、縦ずれ断層に加え、割れ目噴火に対応する開口断層による変位、ひずみ、傾斜の式を与えている。このうち Okada（1985）は地表面に対する式であるが、Okada（1992）は地中まで拡張したものである。

食い違いの弾性論により得られる変位等は解析解であるため、計算に要する時間が一般的な数値解法に比較して短く、計算格子間隔に依存しない唯一の解が任意の位置で得られる。断層のすべり量と地盤の変位等に線形の関係があるため、断層面上のすべり量の不均質性は、断層面をすべり量の異なる複数の矩形に分割することにより容易に考慮できる。こうした理由から、断層形状や活動様式の不確かさを想定した多数の計算を実施し、地盤変位やひずみの分布に与える影響を考慮する必要がある場面では、実務上の利点がある。その一方で、半無限均質地盤を仮定しているため、地盤物性の不均質性や地形は考慮されない。また、断層のすべり量と地盤変位の関係に非線形性が強く働く条件では、誤差が大きくなる可能性がある。

(2) 有限要素法（平成 28 年度原子力規制庁委託成果報告書 断層変位評価手法の検討⁵⁾および断層変位評価小委員会研究報告書¹⁾より抜粋）

有限要素法(FEM)では連続体の変形に関する支配方程式に対して、ガラーキン法を用いることで等価な弱形式（仮想仕事の原理）による離散化を行う（Zienkiewicz 他,1996）。この手続きにおいて、要素内の物理量を節点値から補間する内挿関数と要素領域積分を必要とするが、要素内で完結する内挿計算は境界条件の設定などにおいて大きな優位点となっている。

る。なお、計算精度はメッシュ分解能の他に要素種別（内挿関数）や要素形状、積分手法の影響を受けるが、要素変形の小さい変形領域では良質なメッシュと適切な要素選択によって高精度な解析結果が期待できる。一方で、大変形問題においては微小変形問題を有限変形に置き換えれば良いというわけではなく、メッシュ形状の更新などを考慮する必要がある。有限要素法は本来連続体を対象とした解析手法であるが、ジョイント要素を用いることで断層面のモデル化が可能であり、例えば谷山らの研究(1998)に見られるように弾塑性体間の不連続面にジョイント要素を挿入した検討がなされている。また、3次元モデルを用いることで(水本・他,2005)、縦ずれ断層だけでなく横ずれ断層の解析にも適用することができる。実務では食い違い弾性論などにより境界と断層面のずれ量を設定した静力学的モデルによる検討が一般的であるが、動的3次元非線形解析の適用事例(有賀・他,2008)なども行われている。しかしながら、ジョイント要素を用いた古典的な有限要素解析では、解析モデルに予め不連続面を設定する必要があり、破壊によって不連続面や不連続領域が拡大する問題への適用は難しい。また、大変形の発生によって要素の積分精度が低下するため、変形の大きさによりリメッシングが必要となり、この処理に伴う計算コストの増大や物理量の再分配による解析精度の低下などの問題がある。

このような静力学的な解析を用いる場合の課題として、地殻変動と地震動の重畳の影響および断層の破壊進展過程での周辺への影響の評価が挙げられる。この課題解決に向けて動的解析である断層の動学的破壊シミュレーションの適用が考えられる。本手法は主に強震動の予測・評価などの地震動シミュレーション手法として開発・発展してきた方法である。地震動に加えて、近接する断層間での破壊の乗り移りの検討にも用いられている。深度依存の初期応力、不均一な周辺岩盤、縦ずれ・横ずれ断層が共存する断層配置での破壊の乗り移り等の複雑な解析条件にも適用されている。

(3) 粒子法（断層変位評価小委員会研究報告書¹⁾より抜粋）

流体解析で萌芽した粒子法を、地盤の大変形問題に適用する検討が近年盛んに行われている。地盤材料を、円や球または多角形の集合体で表す個別要素法（DEM）も粒子法の一つとする考え方もある。DEMは、通常、接触する要素間のみ相互作用を考慮する二体間の物理を基本とし、イメージ的には実際に岩塊や砂粒子そのものをモデル化する手法であるが、SPH、MPS、MPM等の粒子法はある影響範囲にある要素すべてに対して相互作用を考慮することにより、基本的には連続体をモデル化する手法である。

粒子法によれば、地盤モデルの作成等の作業はFEMに比べて容易であり、並列計算に向いていることから計算時間の節約も可能である。SPH等の粒子法は連続体解析であり、弾性体の挙動は、精度が若干落ちるものの理論解やFEMと同程度の解を得ることができる。また、種々の力学構成モデルを取り込むことが可能である。しかし、粒子法は現在のところ一般にはなじみがないので、単純なモデルの動的計算やFEM解析との比較や、実験結果との比較等の妥当性の検証が求められる。

表 3-2-1 断層変位による地表変動量評価手法（静的）

項目	食い違い変位による評価法（岡田による方法）	静的な強制変位を直接入力する方法
概要	<ul style="list-style-type: none"> 三次元の弾性理論解析 半無限弾性体中の断層変位から，地表並びに任意の深さの変位を食い違い弾性論で算	<ul style="list-style-type: none"> 地盤モデル解析境界に食い違い弾性論で求めた変位分布を強制変位として直接入力
初期条件	<ul style="list-style-type: none"> 正断層，逆断層，横ずれ断層を対象 地中地震断層の断層パラメータ 断層長さ，断層幅，断層深さ，断層の走向と傾斜，断層のすべり角，すべり量等 地盤構造モデル 一層均質地盤，二層不均質モデル 	<ul style="list-style-type: none"> 正断層，逆断層，横ずれ断層を対象 地中地震断層の断層パラメータ 断層長さ，断層幅，断層深さ，断層の走向と傾斜，断層のすべり角，すべり量等 地中地震断層あるいは破砕面ににも変位量を直接入力 地盤構造モデル 複雑な構造を有する不均質地盤も対象．特に破砕帯・シーム等の弱面もモデル化が可能
解析条件	<ul style="list-style-type: none"> 地盤の力学モデル 弾性モデル（密度，ポアソン比，P波速度，S波速度） 	<ul style="list-style-type: none"> 地盤の力学モデル 線形・非線形モデル 数値解析法 二次元，三次元解析 連続体解析（差分法，境界要素法，FEM等） 不連続解析（FEM，DEM，DDA，SPH等）
課題 問題点	<ul style="list-style-type: none"> 地盤内応力の影響を考慮できない 複雑な地盤構造や物性値の影響を考慮できない 	<ul style="list-style-type: none"> 入力条件となる強制変位量の設定が解析結果を左右する 地盤内応力の設定方法の統一的方法が必要特に深部での広域応力場の把握が重要 不連続解析の場合要素分割の寸法が解析結果に影響 模型実験レベルの解析手法の妥当性は検証されているが，実データの検証結果が少ない

表 3-2-2 断層変位による地表変動量評価手法（動的）

項目	加速度，速度，変位の時刻歴波形入力による方法	応力降下量の入力による方法
概要	<ul style="list-style-type: none"> 地盤内モデルにある断層または破砕面に加速度，速度，変位を直接時刻歴に入力 	<ul style="list-style-type: none"> 地中地震断層の応力降下量，すべり速度関数を入力
初期条件	<ul style="list-style-type: none"> 正断層，逆断層，横ずれ断層を対象 地中地震断層の断層パラメータ 断層長さ，断層幅，断層深さ，断層の走向と傾斜，断層のすべり角，すべり量等 地盤構造モデル 複雑な構造を有する不均質地盤を対象．破砕帯・シーム等の弱面もモデル化が可能 	<ul style="list-style-type: none"> 正断層，逆断層，横ずれ断層を対象 地中地震断層の断層パラメータ 断層長さ，断層幅，断層深さ，断層の走向と傾斜，断層のすべり角，すべり量等 地盤構造モデル 副断層を含む単純な構造な均質地盤を対象
解析条件	<ul style="list-style-type: none"> 地盤の力学モデル 線形・非線形モデル 数値解析法 二次元，三次元解析 連続体解析（差分法，境界要素法，FEM等） 不連続解析（FEM，DEM，DDA，SPH等） 	<ul style="list-style-type: none"> 地盤の力学モデル 線形・非線形モデル 数値解析法 二次元，三次元解析 連続体解析（差分法，境界要素法，FEM等） 不連続解析（FEM，DEM，DDA，SPH等）
課題 問題点	<ul style="list-style-type: none"> 入力条件となる強制変位量の設定が解析結果を左右する 地盤内応力の設定方法の統一的方法が必要特に深部での広域応力場の把握が重要 地盤の非線形力学特性の把握が重要 解析の演算時間が大．特に要素分割，波数分割に依存 模型実験レベルの解析手法の妥当性は検証されているが，実データの検証結果が少ない 	<ul style="list-style-type: none"> 震源断層の応力降下量，すべり弱体化則，広域応力場等の設定が重要 地盤内応力の設定方法の統一的方法が必要特に深部での広域応力場の把握が重要 解析の演算時間が大．特に要素分割，波数分割に依存 模型実験レベルの解析手法の妥当性は検証されているが，実データの検証結果が少ない 既往の研究では，地震動の予測結果は観測結果と整合する例は多いが，全般的な地盤変位量はかなり大きくなる傾向にある

3.3 動的解析手法

3.3.1 耐震設計上の動的解析の扱いについて

以下の設計基準について耐震設計上の動的解析の扱いを整理した。

- ①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⁶⁾
- ②水道施設耐震工法指針・解説－2009年版－，日本水道協会⁷⁾
- ③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⁸⁾
- ④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⁹⁾

①下水道施設の耐震計算法は，施設の構造形の分類毎に示されており，埋設管路については応答変位法を標準的な耐震計算法としている。また，耐震計算は静的解析を標準とするが，構造物の形状や設置状況により地震時の挙動が複雑となる場合や，地盤と構造物の相互作用を適切に考慮する場合には，動的解析を用いることができるとされている。

②水道施設の耐震計算法は，基本的には動的解析法を用いた設計によることを目指すものとする。ただし，動的解析を用いた水道施設の耐震設計が設計実務者の間で広く使われるまでには，なお技術の蓄積を要すると考えられる。これらを踏まえて，当面の間は，比較的単純な構造物では静的解析による設計ができるものとする。

埋設管路の耐震計算は地震動の動的な作用を考慮して行うものとする。ここでは地震動による地盤変位を動的解析によって求め，その地盤変位の最大応答値を入力値として，応答変位法を用いて管体発生応力歪み及び継手部の伸縮量等を算定することを原則とする。

③平成29年道路橋示方書V耐震設計編では，道路橋の耐震計算法は動的解析を用いることを標準としている。

④鉄道構造物等設計標準・同解説では，設計地震動に対する応答値を算定するための解析は，地盤と構造物の動的相互作用や非線形性を考慮して，構造物の動力学的特性を適切に表現できる動的解析法によるものとする。

3.3.2 永久変位成分を含む地震動の計算手法について

大地震の際、震源付近では断層運動に伴う永久変位を含む地震動が生じる。1999年台湾集集地震や2016年熊本地震本震のように地表地震断層を伴う大地震では特にそれが著しい。こうした場合に観測されるステップ状の変位波形（図3-3-1）はフリングステップ¹⁰⁾と呼ばれることが多い。

フリングステップは、周期が短く振幅が大きい場合には、免震構造物などに多大な影響を及ぼす恐れのあることが懸念されるようになってきており、特に建築の分野において、構造物への影響が精力的に研究されている¹¹⁾。一方、ライフライン施設の多くを占める地中構造物に対して、断層変位の影響が大きいのは当然としても、フリングステップによる動的な効果がどの程度影響するかは不明な点が多い。しかしながら、近年では地中構造物を対象として動的解析を行う事例も増えてきており、断層変位を受ける地中構造物の耐震設計においても、動的な効果を見込んだ解析を適用する機会が今後は増えるのではないかと考えられる。その際に設定する入力地震動は、次のような条件を満足する必要があると考えられる。

①フリングステップを含むものであること（フリングステップによる動的な効果を考慮するため）

②フリングステップの大きさは静的設計で考慮する断層変位と整合するものであること
こうした条件を満足する地震動を設定するためには、強震動シミュレーション手法の選択やパラメーターの設定に注意を払う必要がある。

現時点で一般に用いられている強震動シミュレーション手法は、フリングステップを考慮できないものが多い。例えば、港湾の分野で広く照査用地震動の評価に用いられている修正経験的グリーン関数法¹²⁾は、兵庫県南部地震の神戸市内の地震動など、永久変位成分が支配的でない場合の震源近傍地震動の計算において実績があるが、そのままではフリングステップを含む地震動を計算することができない。

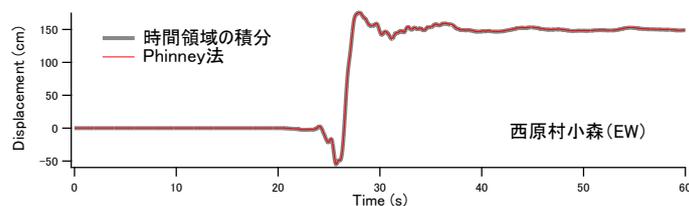


図3-3-1 熊本地震本震の際に西原村小森で得られた強震記録を積分して得られた変位波形

永久変位成分を含む地震動を計算するための手法として代表的なものに離散化波数法¹³⁾¹⁴⁾がある。離散化波数法では、水平成層地盤の任意の位置にせん断食い違い型点震源を置いた場合の波動場を計算することができる。その際、震源から放射される地震波を様々な周波数と様々な波数を有する地震波の重ね合わせで表現する。波数の小さな地震波はテイクオフ・アングル（進行方向と水平面のなす角）の大きい波に対応しており、波数の大きな地震波はテイクオフ・アングルの小さい波に対応している。水平な地層境界に入射した地震波は透過もしくは反射するが、このとき、地層境界が水平であれば地震波の波数は変化しない性質があるため、水平成層地盤であるかぎり、地震波の透過と反射は周波数と波数に対して独立に計算できる。そこで、周波数毎、波数毎に透過と反射の計算を行い、その結果をすべての周波数と波数について重ね合わせることにより、任意の地点での変位や応力が求まる。面的な広がりをもった震源に対する地震動は、点震源による地震動を多数重ね合わせることで計算できる。このとき、永久変位成分を正確に含む地震動を求めるためには、断層面上に十分に密に点震源を配置することが必要である。

永久変位成分を含む地震動を計算するための手法としては離散化波数法以外に波数積分法¹⁰⁾と薄層要素法¹⁵⁾がある。これらは離散化波数法と同様に水平成層地盤を対象とした手法である。一方、差分法や有限要素法のような数値計算手法によっても原理的には永久変位成分を含む地震動は計算可能である。またこれらの手法は不整形な地盤にも適用できる利点があることは良く知られている。ただし、これらの手法においては、ダブルカップルを表現するために格子点や節点に集中荷重を作用させる必要があり、点震源間隔が十分に小さいことに加え、格子点間隔や節点間隔が断層最短距離に対して十分に小さいことが正確な計算のために必要である。差分法や有限要素法の適用にあたってはこれらの点に十分に注意を払う必要があり、当面は、これらの手法により算定される永久変位を他の手法によるものと比較しながら用いることが適切であると考えられる。

3.3.3 永久変位成分を含む地震動の計算事例¹⁶⁾

従来から設計において考慮されているアスペリティの破壊に伴う強震動に加え、フリングステップも考慮できる複合型の震源モデルを用い、熊本地震本震を対象に強震動シミュレーションを実施した事例を示す。複合型の震源モデルは、できるだけ簡便で利用しやすい震源モデルとすることを念頭におき、測地学的データを説明するように設定された国土地理院の震源モデル¹⁷⁾を出発点とし、これに動的な情報を付与することで、フリングステップを計算するための断層モデルとしている。そして、これにアスペリティの寄与を加えることで、複合型の震源モデル（図 3-3-2）を構築している。フリングステップの計算には離散化波数法を用いている。図 3-3-3 に結果を示すように、フリングステップを含む変位波形を精度良く計算することができている。1Hz もしくはそれより高周波側の強震動を計算するためにはアスペリティを考慮することが必要であるが、フリングステップに関しては、ハンドリングの難しい不均質断層モデルを用いなくても、十分に実用的な計算が可能である。

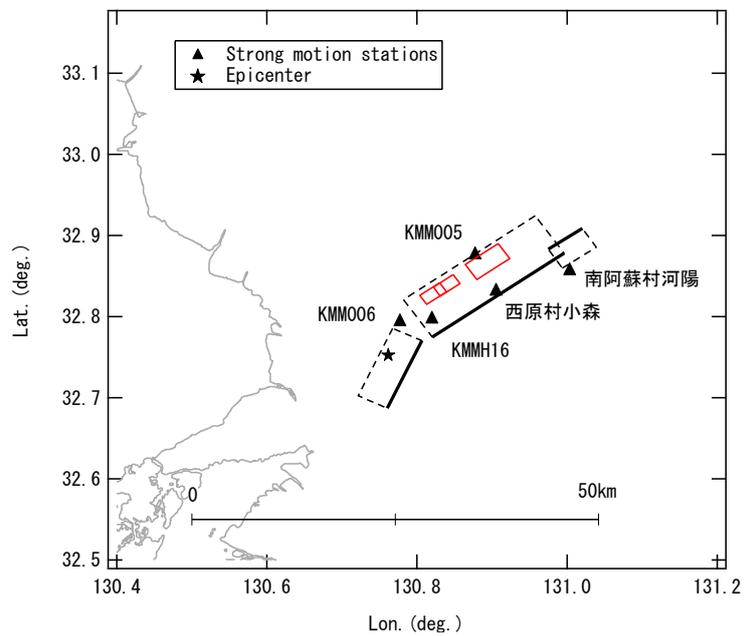


図 3-3-2 2016 年熊本地震本震を対象とした複合型の震源モデル. 黒の長方形は国土地理院による震源断層モデル¹⁷⁾の平面的な位置を示す(西から順に B, A1, A2). 赤の長方形はアスペリティ位置を示す.

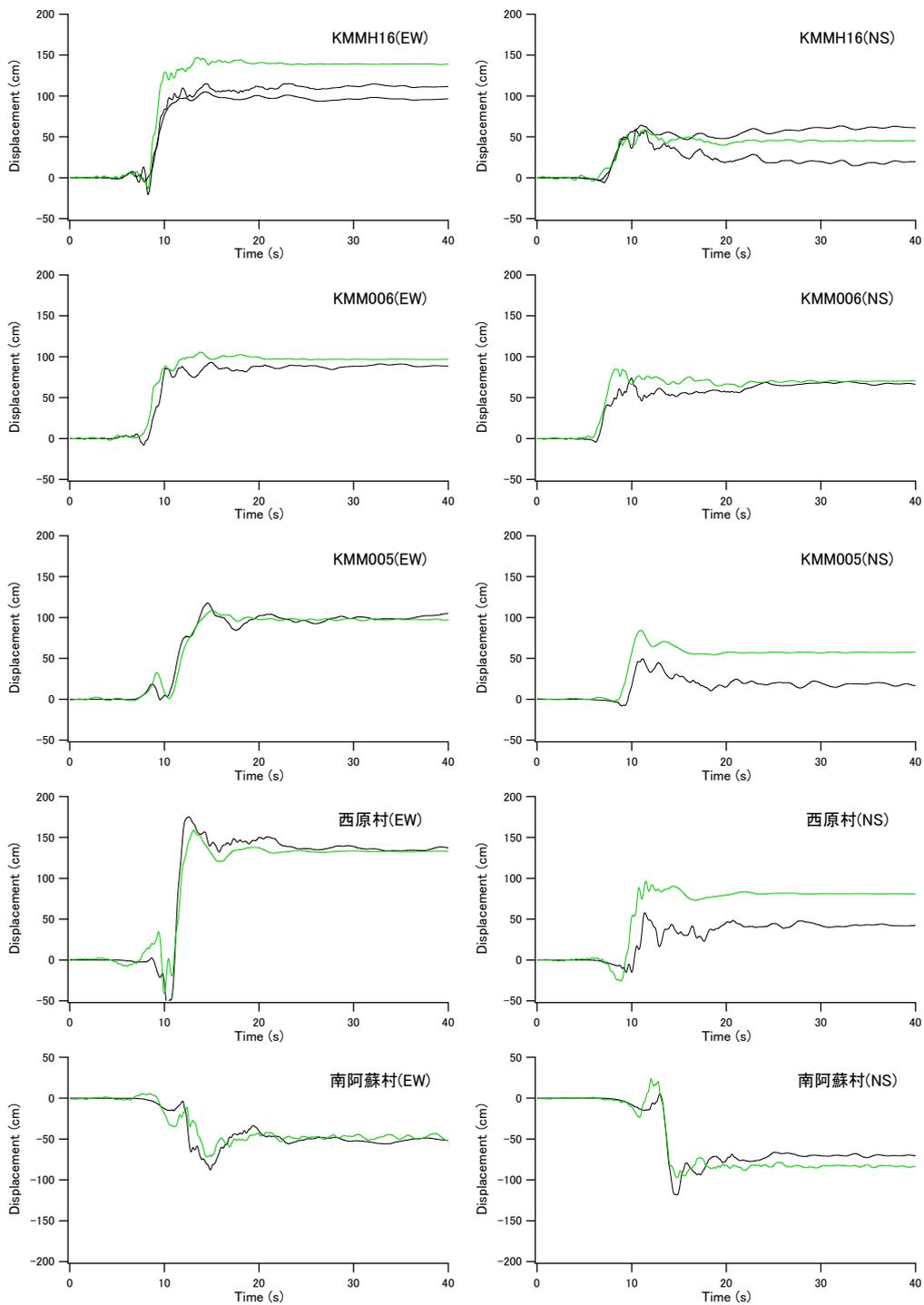


図 3-3-3 複合型の震源モデルによる変位波形の計算結果（黒が観測，緑が計算）（原点は気象庁の発震時刻）

【参考文献】

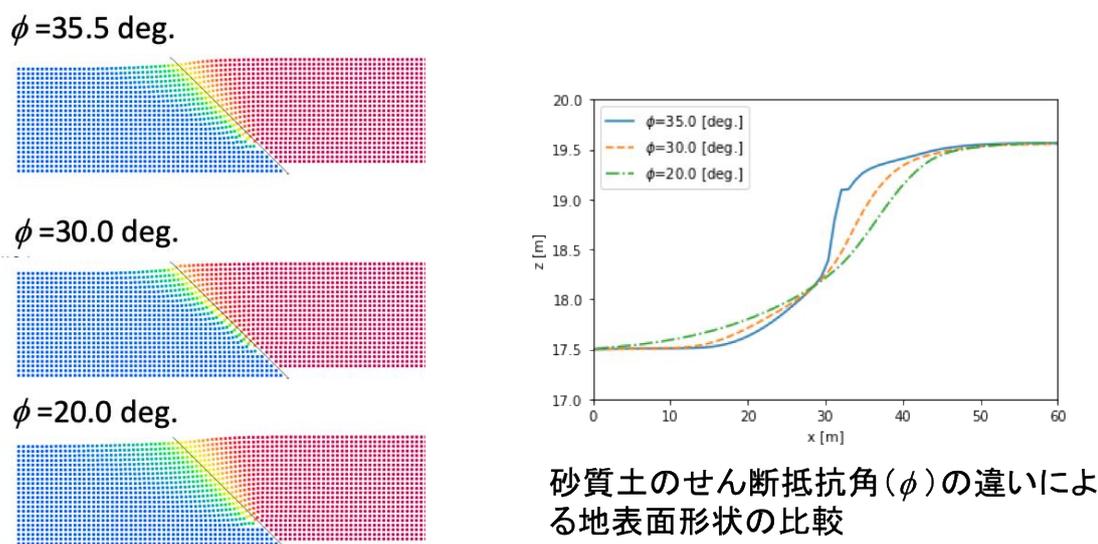
- 1) 土木学会 原子力土木委員会,断層変位評価小委員会 研究報告書, 2015
- 2) Stekette, J.A.: On Volterra's dislocation in a semi-infinite elastic medium, *Can. J. Phys.*, Vol.36, No.2, pp.192-205, 1958.
- 3) Okada, Y.: Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.75, No.4, pp.1135-1154, 1985.
- 4) Okada, Y.: Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.82, No.2, pp.1018-1040, 1992.
- 5) 原子力規制委員会,平成 28 年度原子力規制庁委託成果報告書 断層変位評価手法の検討,2016
- 6) 日本下水道協会,下水道施設の耐震対策指針と解説,2014
- 7) 日本水道協会,水道施設耐震工法指針・解説,2009
- 8) 日本道路協会,道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 平成 29 年 10 月
- 9) 鉄道総合技術研究所,鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 平成 24 年 9 月
- 10) Hisada, Y. and Bielak, J.: A theoretical method for computing near-fault ground motions in layered half-spaces considering static offset due to surface faulting, with a physical interpretation of fling step and rupture directivity, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.93, pp.1154-1168, 2003.
- 11) 林康裕, 杉野未奈: パルス性地震動に対する建物の応答と地震対策, 第 15 回日本地震工学シンポジウム, pp.1025-1034, 2018.
- 12) 野津厚, 長尾毅, 山田雅行: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法の改良—因果性を満足する地震波の生成—, *土木学会論文集 A*, Vol.65, pp.808-813, 2009.
- 13) Bouchon, M.: A simple method to calculate Green's functions for elastic layered media, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.71, pp.959-971, 1981.
- 14) Bouchon, M.: A review of the discrete wavenumber method, *Pure and applied geophysics*, Vol.160, pp.446-465, 2003.
- 15) 永野正行, 小山哲央: 薄層法を用いた理論地震動の計算精度向上とその検証 その 2, *日本建築学会技術報告集*, Vol.17, pp.55-59, 2011 年.
- 16) 野津厚・長坂陽介・呉双蘭: 断層変位に伴うフリングステップを考慮した熊本地震の強震動シミュレーション, 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, 2019.
- 17) 国土地理院: 平成 28 年熊本地震の震源断層モデル (暫定), 2016, <http://www.gsi.go.jp/common/000140781.pdf>

参考資料

参考 1 SPH 法について

断層の活動に伴い生じる断層周辺の地盤の変形は複雑であるため、従来の有限要素法では解析が困難となる現象を含んでいる。そのため、有限要素法や有限差分法に代わる数値解析手法の適用が試みられている。ここでは、連続体と離散体の両者の性質を示す地盤材料に対して、高い適用性を示すと考えられている SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法について紹介する。

SPH 法は粒子法的一种として位置づけられている。粒子法では、連続体を粒子と呼ばれる単位に離散化し、各粒子について応力が評価される。その応力由来する項を含む運動方程式を積分することで、その連続体全体の運動を記述することができる。各粒子の応力の評価では、影響半径と呼ばれる一定の距離内にある粒子との相互作用を考慮する。この相互作用を計算するモデルの違いによって粒子法は分類される。SPH 法では、粒子同士の相互作用はカーネル近似に基づき計算される。参図 1 に、剛基盤に逆断層運動を与えた際に表層地盤に生じる撓曲を SPH 法により計算した例を示す。今後、文献等で示された既往の実験と比較するなどして、この問題に対する SPH 法の適用性を検証していくことが求められる。



参図 1 SPH 法による逆断層により撓曲を受ける砂地盤の変形解析の例

参考2 分岐断層及び副断層の考え方

1) 概要

強震動に対する耐震設計では地震動の予測評価が重要な課題であり、従来の活断層研究では、地震の発生予知を主眼にして、地震を発生する活断層が重要視されてきた。

一方、断層変位に対する設計では、主断層、分岐断層、副断層の区分にかかわらず、また、地震動を発生するか否かにかかわらず、変位を生じる断層は設計において考慮すべき重要な断層となる。上述のように、これまでの活断層研究では、地震を発生する活断層（主断層：震源断層）が重要な研究対象とされ、主断層に関しては出現位置、確実度、活動度等の調査研究結果が多く公表されている。しかし、副断層、分岐断層に関しては、調査研究結果が少なく、断層の出現位置や変位量等についての情報が分からないことが多いのではないかとと思われる。

2) 出現位置等の推定方法

これまでの研究で副断層、分岐断層として判明されている断層については、これまでの調査研究成果を活用することが可能であるが、出現位置や予測変位量が不明な断層については、それらの推定方法の開発が必要になる。試みとしては、①地形学/地質学的なアプローチ、②数値解析的なアプローチ、③構造物への影響に着目したアプローチ等の方法が考えられるが、今後の研究開発が必要な課題であると考えられる。

① 地形学/地質学的なアプローチ

- ・活断層ではないが断層として認定されている断層の情報（形態、位置、変位量等）を活用する方法
- ・確実度の低い活断層の情報を活用する方法（既存の活断層研究の成果の活用）
- ・評価対象地域のリニアメントの情報を活用する方法（既存の地形学/地質学の知見の活用）
- ・評価対象地域の地形図からリニアメント（線状構造）を読み取り活用する方法

② 数値解析的なアプローチ（三次元解析技術を活用した推定法）

- ・評価対象地域を有限要素でモデル化し、三次元静的解析を活用して推定する方法
- ・例えば、広域地盤をFEMでモデル化し、GPS等で明らかとなっている地表の変位挙動を再現した上で、変位を累積的に作用させて時間経過に伴う断層の発生、出現位置等を推定する方法（アイデア段階であり、研究開発が必要）

③ 構造物への影響に着目して設定する工学的アプローチ（逆解析的アプローチ）

- ・ 評価対象構造物にとって最悪の影響を及ぼす位置に断層の出現位置を設置する方法
- ・ 構造物に対する影響を評価し，出現位置を逆解析的に推定する工学的アプローチ
- ・ 評価対象構造物に許容される断層変位量を評価し，それを断層変位量として設定する方法
- ・ 構造物に対する影響を評価し，断層変位量を逆解析的に設定する工学的アプローチ

3) 課題

過去の地震で既に動いた副断層，分岐断層については，分布位置等を知ることが可能と考えられるが，これから発生する地震で動く断層については，事前の予知が難しい。また，内陸部の丘陵部や山岳部では断層の露頭を知ることができるが，内陸の盆地や大都市域の平野部等で堆積地盤に覆われている場合には地下に断層が存在していてもその存在を知ることが難しい。断層変位に対する構造物の健全性，安全性を考える場合は，主断層も副断層も分岐断層も重要な要素であり，分布位置や変位量をどのように想定するか，創意・工夫が必要な課題であると考えられる。