# 断層パラメータによる埋設管路応答への影響評価

神戸大学大学院工学研究科 准教授 鍬田泰子

## 1. 研究の目的

地震時の断層変位対策として、断層近傍での建築物の建設に規制を掛けることは一つの手段として行われる。一方、水道やガスなどの埋設管は、計画上の布設箇所で断層を横断する場合、それを回避して布設することが一つの対策になっているものの、現実には困難である。現在の地震対策では、活断層地図等の地盤資料を基にして断層との横断箇所を特定し、その断層の想定される断層変位に対して、断層を境界に地盤がブロック状にずれ動いた場合の地盤ブロック内の埋設管の挙動を数値解析で確認する手法が良く行われている。地表に断層が達しないで地盤変状だけが生じる場合も十分あることを考えると、断層変位だけでなく、断層運動に起因した地表の地盤ひずみ分布を踏まえた上で埋設管の応答特性を把握することが重要である。そこで、本研究では、食い違い弾性理論を用いて断層のすべり方向、すべり量などの断層パラメータによる地表の地盤変状を算出し、埋設管の地盤ひずみ分布を評価する。さらに、表層地盤の変形特性も踏まえて、断層境界から埋設管にとって危険な範囲を特定し、空間的に埋設管の断層変位リスクを評価することを目的としている。

地震学の分野では、断層ずれに伴う地表変位の理論式を Steketee (1958)<sup>1</sup>が提案して以降、点震源から矩形震源へと次々に弾性理論に基づく理論式が提案されてきた。これらの理論は震源断層域を含めた地盤が均質な弾性体と仮定したもので、原子力施設の設計等にも広く利用されている。埋設管の設計では、図-1 に示すように断層に地表が現れない場合には、地盤の変位量ではなく管路の軸方向、軸直角方向に作用する地盤ひずみが重要な指標となるが、断層からどの範囲において、これらのひずみが卓越するのか検討した事例はない。そこで、本研究では断層パラメータやアスペリティの位置に応じて、地表の地盤ひずみ分布の特性を踏まえる。

さらに、地震工学分野において食い違い弾性理論を応用 する場合には、表層地盤の不均質性を考慮し、より詳細な連 続体力学に基づく数値解析による検討が必要である。近年、 地表断層変位の解析技術の高精度化が進められている(例え ば、澤田(2018)<sup>2)</sup>)。本研究では、食い違い弾性理論によっ て求められた硬地盤における地盤ひずみ分布の特徴を踏まえ、 さらに、表層地盤の変形特性については FEM 解析用いて地 盤ひずみの増減の影響についても評価した。



ける埋設管の概念モデル

## 2. 断層変位による管路ひずみの評価方法

地震学の分野では、断層周辺の地表変状を論じるのに食い違い弾性理論が用いられてきた。Steketee<sup>1</sup>は、 材料学や結晶構造学の分野で用いられていた転位の概念を初めて断層研究に導入し、地震断層を結晶構造 のような不連続転位ではなく、連続した均質な地球媒体中の著しい転位と見なした。そして、Chinnery<sup>3</sup> や Okada<sup>4</sup> は、理論式を点源から矩形断層に拡大した。例えば、平野・羽田<sup>5</sup> は、神戸地震で発生した 甲陽断層まで神戸南部が断続的に移動したことを、水平変位量を Chinnery の式と比較することで検証し ている。この式による推定では、甲陽断層の震源断層は地下 0.2~0.5km に到達していることが示唆され た。 Okada<sup>4)</sup> が提案した食い違い弾性理論は、地表は水平で、堆積物は均質で連続した地質構造をなし、均 質で等方的な半無限弾性体を仮定している。さらに、断層は震源断層とみなし、その平面の形状は矩形で あり、断層面内のすべりは一様と仮定している。そこで、大草・谷 <sup>6</sup> は、食い違い弾性理論による課題 として、基盤上の地形や表層地盤の地質構造などを挙げている。さらに、食い違い弾性理論を原子力発電 所などの重要施設における地盤の変形やせん断ひずみの推定に利用している <sup>7</sup>。そのため、将来的には表 層地盤の不均質性や不均一性に関する課題に対して数値解析などによる検証が必要である。このことを前 提に、本研究では、食い違い弾性理論で仮定した等方性半無限弾性体の断層ずれによる地表変形による埋 設管の変形リスクについて考察する.

埋設管路の耐震設計では、地盤変動による地盤ひずみによって発生する埋設管路の管路ひずみと地盤変 形によって耐震性能を確認する.本研究では、横ずれ断層と逆断層について検討した.断層に直交する埋 設管の軸方向ひずみの分布特性について、断層パラメータを変化させて検討した.埋設管と地盤の間にす べりや降伏がなく、地盤のひずみが直接埋設管に伝達されると仮定する。また、埋設管は地表から約 1m 下に埋設されているが、管のひずみは地表のひずみと同じとみなす.

水平な xy 平面上に x 軸方向に断層が走行し、その断層と直交する y 軸方向に管路があると設定する。 また、xy 平面の垂直方向に z 軸をとる。横ずれ断層の場合の x 軸、y 軸、z 軸方向の地表変位をそれぞれ  $u_x$ 、 $u_y$ 、 $u_z$  と仮定すると、x 方向の変位が z 方向の変位より卓越していることから、管路ひずみ  $\varepsilon$  は次のように評価することができる。

$$\varepsilon = \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \cdot \frac{D}{2}$$
(1)

ここで、D は管路の直径である。

一方,逆断層の管路ひずみの評価では,管軸直角方向では z 方向の変位が x 方向の変位より大きいと 仮定し,以下の式で評価する.

$$\varepsilon = \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} \cdot \frac{D}{2}$$
(2)

上記2式において、右辺の第1項は軸ひずみ、第2項は曲げひずみを表している。本研究では、地表に 断層が現れず、管路に局所的なせん断変形が生じない場合を想定している。

3. 食い違い弾性理論による管路のひずみ分布

(1) パラメータ設定

様々なマグニチュードにおける断層長さとすべりの経験的な関係から、表-1、表-2 に示すように断層パ ラメータを設定した。断層長さを 40 km、断層幅を 20 km とし、断層すべりを 2 m とした。媒質の Lane 定数である  $\lambda_0$ 、 $\mu_0$  はそれぞれ 32 GPa と仮定した。断層の傾斜角は 90°、計算範囲は xy 平面上で 120×120 km とした(図-2)。断層下端から地表までの鉛直距離  $Z_{s,b}$ をケーススタディのパラメータとし て 20.2, 20.5, 21.0, 22.0, 25.0 km とした。これらの計算条件として、全てのケースで地表に断層が現れな いことが前提になっている。管路は断層と 90°で交差し、半無限長に設定されている。すべり角が 0°の 場合には断層は右横すべり、90°の場合には逆断層のケースとなる。

さらに、管路の曲げひずみを計算する際には、計算パラメータの1つとして口径が必要となる。そのため、管路の口径は100 mm と 800 mm の2つのケースを設定した。管路の位置については y-軸に平行な管

路について論じ、xy-平面投影上の断層中点を通過させる。この他、管路ひずみコンター図を用いて、最 大管路ひずみが発生する位置から検討したが、本報告からは割愛する。拙著論文 8)を参考にされたい。

表-1	断層パラメータ	
Length of fault, $L$ (km)		40
Width of fault, $W(\text{km})$		20
Dip angle of fault, $\delta$ (deg.)		90
Rake angle,	Strike-slip fault	0
$\theta$ (deg.)	Reverse fault	90
Lame constant, $\lambda_0$ (GPa)		32
Lame constant, $\mu_0$ (GPa)		32
Elementary dislocation, $U(m)$		2

表-2 検討ケースの断層下端から地表までの距 離 Z<sub>s,b</sub>(km)

Case 1	20.2
Case 2	20.5
Case 3	21.0
Case 4	22.0
Case 5	25.0



図-2 本研究で想定する断層モデル

(2) 断層の投影直線の中点を管路が直交する場合の計算結果

## a) 横ずれ断層

図-3 は  $Z_{s,b}$ =20.2 km の時の水平変位の絶対値とその方向を示している。水平変位は断層を境界として左 右対称に発生する。一方、管路が断層の中点を横切る場合には、管路に沿った水平変位  $U_x$  が発生しない。 したがって、横ずれ断層の場合、管路のひずみは水平変位  $U_x$  による曲げひずみが優位になる。図-4 に、 ケース 1~5 の管路に沿った水平変位  $U_x$ を示す。横ずれ断層の断層面が地表に近いほど、断層変位による 地表変形が大きくなっていることがわかる。

横ずれ断層の場合の管路ひずみ分布を、口径 100 mm と 800 mm で比較した(図-5、図-6)。両図とも、 断層近傍の長さ2 km の範囲の管路ひずみを示している。断層線から20 km 以内ではある程度の変位が見 られるが(図-4)、断層線から 0.5 km 以内(y=0)では大きな管路ひずみが発生していることがわかる。 ピーク時の変位の位置は、ピーク時の管路ひずみの位置と対応している。断層の上端が地下 200 m にあ る断層と地下 500 m にある断層では、断層が地表に近い方が最大ひずみは大きく、値にして 3 倍以上の 差がある。

管径が 800 mm の場合,地表付近の埋設管の横すべり断層による最大ひずみは約 4.1×10<sup>6</sup>となる.しかし,耐震設計で用いられる管路の降伏ひずみは 10<sup>-3</sup>~10<sup>-2</sup>のオーダである.例えば,WSP029の溶接鋼管耐震設計基準による鋼管の許容ひずみは,通常 0.3~0.4 %である。また,配水用ポリエチレン管および継手に関する調査報告書(日本水道協会,1998)によると,ポリエチレン管の許容ひずみは3%である。し

たがって、本計算モデルのように地表に断層が現れない場合、横ずれ断層による管路ひずみは、管路に損 傷を与えるほどではない.





図-6 横ずれ断層の場合, D=800mmの管路が断層 線の中点を横切るときの管路ひずみ

0 y (km) 0.5

-0.5

### b) 逆断層

逆断層の場合、例えば、 $Z_{sb} = 20.2 \text{ km}$ の場合の水平変位とその方向を図-7 に示す。管路が断層を直交す る場合、管軸方向沿った水平変位  $U_y$  は、管路の軸方向のひずみに直接影響を与える。また、図-8 は断層 の深さによる管路周辺の鉛直変位  $U_z$ を示している。逆断層による鉛直変位  $U_z$ は、全ての断層深度におい て横ずれ断層による水平変位  $U_x$  より大きくなる。断層上端までの深さが浅いほど地表変位は大きくなる。 逆断層の場合、管軸方向の水平変位  $U_y$ を評価上無視することはできず、管路ひずみは  $U_y$  と  $U_z$ の変位に 影響される。逆断層の場合の管路ひずみ分布を、口径 100mm と 800mm で比較した(図-9、図-10)。断 層線から 0.5 km の範囲内 (y = 0) では管路ひずみが大きくなっていることがわかる。これらの図はほぼ 同じである。軸ひずみと比較すると曲げひずみは微小であり、式(2)を考慮すると、逆断層による管路ひ ずみは管の軸ひずみによって決まっているといえる.

-4

-5

-1

60



向  $(Z_{s,b}=20.2 \text{ km})$ 



図-9 逆断層の場合、D=100mmの管路が断層線の中 点を横切るときの管路ひずみ

の z 方向の変位 Uz



図-10 逆断層の場合, D=800mmの管路が断層線の 中点を横切るときの管路ひずみ

c) 各ケースにおけるひずみのピークの座標

断層を横切る埋設管路の設計では、管路ひずみだけでなく、断層からの距離も重要である。断層の深さ が深くなるにつれて、管路ひずみが最大となる位置は断層から離れる(図-5、図-6、図-9、図-10)。最大 管路ひずみと断層からの距離との関係を図-11 に示す。マーカー付近の文字は、断層下端から地表までの 距離を示している。横ずれ断層では、口径によって最大管路ひずみの値が異なる.しかし、最大管路ひず みが発生する位置(横軸)は、口径に依存していないことがわかる。逆断層の場合は、曲げによる管路ひ ずみは全体の管路ひずみにほとんど影響しないので、口径に関わらない。断層の位置が深くなるにつれて、 管路の最大管路ひずみの位置は断層から離れる。また、断層から遠くなるほど、最大管路ひずみは徐々に 減少する。

#### 近畿建設協会研究助成報告書



図-11 管路が断層線の中点で直交する場合の最大管路ひずみとそれが発生する断層からの距離

(3) 断層すべりの不確定性による地盤ひずみの影響

食い違い弾性理論では、これまで断層面に一様なすべりが生じることが想定されている。一方で、近年 の地震学、地震工学の分野では、震源断層においてよく変位が生じるところがあることが認識されている。 そこで、本研究では経験的に知られているアスペリティの面積や幅、長さ、すべり量などを踏まえて、断

層面内にアスペリティがあり、その位置が断層面 内で異なる場合に地表の管路ひずみに与える影響 を明らかにした。この分析結果によると、逆断層 ではアスペリティの上下位置の変動はパイプのひ ずみや設計にほとんど影響せず,アスペリティの ない一様すべりの方が安全側の設計であることが わかった.しかし、横ずれ断層によるアスペリテ ィの水平位置の変動は大きく、横ずれ断層におけ るアスペリティが管路ひずみに与える影響を考慮 する必要がある。



図-12 アスペリティを考慮した断層モデル

4. 有限要素法を用いた表層地盤の断層変位シミュレーション

上記のとおり食い違い弾性理論に基づいて理論的に地盤変位、ひずみ計算を算出したが、実際の表層地 盤は通常緩い堆積層があり,弾性理論に基づく計算は適していない。そのため、食い違い弾性理論の分析 ケースで検討したように断層上端より数 100m から数 km の堆積層があるモデルを用いて、基盤より浅層 の地盤に対して食い違い弾性理論で得られる地盤変位を入力として、表層地盤が地表の地盤変状に及ぼす 影響を数値解析によって検討した。

本論文では、シミュレーション計算のための FEM 解析を行うために汎用解析ソフト Soil Plus を用いた。 ここでは、2 次元モデルにおいて逆断層変位による表層地盤変形について検討する。上述の表層堆積層を 考慮しない食い違い弾性理論に基づく計算と合わせて、両者の一般的な相違点を比較し、断層を通過する 管路の危険範囲について考察することが本研究の目的である。

解析モデルを図-13 に示す。表層地盤の厚さは 2.05 km、長さ1 km、要素サイズは 50 m×50 m である。 モデルの両側はローラー支持で、底面は固定支持である。荷重は自重の他に、底面左側の逆断層による変 位を模擬した上方 2 m の強制変位を与える。図-14 は表層地盤のみの変位を示している。図は例として 1 層一様地盤としているが、今後は層の剛性を変化させたものや、非線形特性による違い、堆積層に特別な モデルを想定した場合などについても検討していく予定である。



図-13 解析モデル



図-14 断層変位を与えた場合の変位

5. まとめ

本研究では、断層の傾斜角が 90 度で表層に断層が達しておらず、断層と直交するように埋設管が設置 された場合を想定し、食い違い弾性理論に基づいて計算される表面変位による管路ひずみについて考察を 行った. 結論として次のようにまとめることができる。

- 食い違い弾性理論に基づくと、断層変位による埋設管路のひずみは、断層近傍で大きなひずみを持つことが定量的に明らかになった。断層の深さが深くなるにつれて、管路ひずみが最大となる位置は断層によりも遠くなる。このように、地表に断層変位が現れない場合でも、断層深さによる断層 危険領域が決定できる。
- 本研究で想定した条件では、逆断層の場合、断層の中間点付近で直交する管路で最大管路ひずみが 発生するが、横ずれ断層の場合、断層中央部よりも断層の端部で管路が直交する方がより軸ひずみ が大きくなるため、管路にとってより危険である。
- 断層面内のアスペリティの位置の変動については、逆断層では上下位置の変動は管路ひずみにほとんど影響せず、アスペリティを考慮しない設計の方が安全である.しかし、横ずれ断層によるアスペリティの水平位置の変動の影響は大きくなる。
- 表層地盤の非線形性も踏まえ、断層変位よりも表層にある地盤変状を有限要素法によって解析的に 検討した。食い違い弾性理論によるひずみよりも大きくなる傾向があるが、これについては断層上 部のモデル化などについても様々考慮した場合について検討する必要がある。

参考文献

- 1) Stekette, J.A.: On Voltrra's dislocation in a semi-infinite elastic medium, Can. J.Phys.Earth., 22, pp.213-221, 1958.
- 2) 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),2018.
- 3) Chinnery, M. A.: The deformation of the ground around surface faults, Bulletin of the Seismological Society of America, 51, 3, pp.355–372, 1961.
- 4) Okada, Y.: Surface deformation due to inclined shear and tensile faults in a half space, Bulletin of the Seismological Society of America, 75, 4, pp.1135-1154, 1985.
- 5) 大草陽太郎、谷和夫:食い違い弾性理論による地震時の地殻変動の問題抽出に関する文献調査、第 39 回岩盤力学に関するシンポジウム論文集、土木学会、2010
- 6) 大草陽太郎、谷和夫:横ずれ断層の断層変位による地表面変形の食い違い弾性理論を用いた検討、第
  40回岩盤力学に関するシンポジウム論文集、土木学会、2011.
- 7) 平野昌繁、波田重熙:兵庫県南部地震と六甲山系の地質構造条件 -地形災害の背景として
- Pan, Y., Kuwata, Y.: Deformation risk of buried pipeline due to fault based on elasticity theory of dislocation, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE)), 2022 Volume 78 Issue 4 (Accepted).