断層変位を受ける地中線状構造物の 挙動に関する基礎的検討

坂下 克之¹・畑 明仁²

¹正会員 大成建設株式会社 技術センター (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)
katsuyuki.sakashita@sakura.taisei.co.jp

²正会員 大成建設株式会社 技術センター (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)
hata@ce.taisei.co.jp

断層およびその周辺におけるトンネル等の被害事例が報告されている一方で、断層変位が地中構造物に及ぼす影響について、解析的にパラメトリックな検討がなされている例は少ない。本論文では、円形断面の地中構造物を対象とし、地盤-構造物一体3次元解析により、断層角度・変位角度ならびに地盤と構造物の剛性比等を変動させたパラメータスタディを実施し、断層変位の諸元が地中構造物の挙動に与える影響について検討を行った。検討の結果、正断層側・逆断層側に角度がつくに従い、それぞれ構造物長手方向に引張力・圧縮力が卓越し、その最大値は45°で緩やかなピークとなること等がわかった。

Key Words : fault displacement, underground structure, 3D FEM, parametric study

1. はじめに

トルコ・コジャエリ地震や台湾・集集地震で注目を集めた地表付近まで露頭した断層のずれによる構造物被害は、建物やダムといった地上構造物が目立っているものの、トンネル等の地中構造物の被害もいくつか報告されている¹⁾。断層変位を受ける地中構造物の挙動に対する解析的アプローチによる既往の検討例としては、大塚らによる断層変位を受ける地中構造物の免震対策の検討²⁾、あるいは樋口らによる断層上の地中構造物に材料非線形特性を考慮した検討³⁾等が挙げられるが、これらはある程度スペックが特定された構造物を対象としており、条件を変動させたケース数も比較的少数にとどめている。数多くのパラメータスタディを実施することにより、断層変位の様々な諸元が構造物の挙動に与える感度を分析・整理している検討事例はこれまで見受けられない。そこで本論文においては、構造物は特に対象を限定しない円形断面を有する線状地中構造物という一般的なものとして設定し、断層が構造物を横切る角度、断層変位方向、地盤と構造物の剛性比といった要因を変化させたパラメータスタディを実施し、断層諸元が地中構造物の挙動に与える影響を評価した。

2. 検討条件

(1) 検討の概要

本論文では円形断面を有する線状地中構造物に対し、地盤-構造物一体3次元解析によるパラメータスタディを実施し、断層諸元が地中構造物の挙動に与える影響を評価する。検討の基本条件を以下に示す。

- 直径10mの中空円形断面を有する線状地中構造物を対象とする。
- 周辺地盤の物性は一様とする。
- 断層は弱層等の特定の幅を持つ領域で大きなせん断ひずみが生じるという概念ではなく、一様地盤中に存在する摩擦抵抗のない平面がずれる状態として想定する。
- 地表面は設定しない。また自重解析は実施しない。すなわち、地盤・構造物とも常時応力は考えず、断層ずれによる増分応力のみを評価する。
- 構造物は線形材料とする。
- 地盤と構造物間の剥離・滑動を考慮する。

図-1に断層角度 θ および変位角度 ϕ の向きを示す。たとえば $\theta = 30^\circ$ のとき、 $\phi = 0^\circ$ により正断層、 $\phi =$

180°により逆断層を表現できる。また上述したように、地表面は設定せず自重解析も実施しないので、解析上はどの方向が上かという概念はない。したがってたとえばy軸正方向を上とみなせば、 $\theta = 30^\circ$ で $\phi = 0^\circ$ あるいは180°のケースは、横ずれを生じている鉛直の断層に地中構造物が斜めに横切っているという状況を表現しているとみなすこともできる。また $\theta = 0^\circ$ のときは ϕ を変動させても、構造物が円形断面であることから挙動場の座標系が変わるだけである。

本論文では「断層角度 θ 」「変位角度 ϕ 」「地盤と構造物の剛性比(地盤の V_s)」を変動させてパラメータスタディを実施する。

(2) 解析モデル

地盤-構造物一体3次元解析の解析モデルについて、 $\theta = 30^\circ$ の例を図-2に示す。断層角度 θ を変数としたパラメータスタディを実施するが、 θ により解析モデルの要素分割数や分割の要領は変えることなく、各節点の構

造物長手方向(x方向)の座標を θ に応じてシフトすることにより各解析モデルを作成する。半径方向のモデル化範囲については、地盤と構造物の相互作用を構造物径の10倍程度と十分な大きさの範囲で吸収させることを想定して設定した。長手方向については、地盤と構造物が一体となって動き、構造物に発生する応力等がほぼなくなると考えられる範囲までをモデル化した。

地盤をソリッド要素で、構造物を線形シェル要素でモデル化する。構造物は壁厚0.6mの鉄筋コンクリート構造を想定しているが、本検討においては線形材料として扱う。断層面は抵抗のない(粘着力・摩擦係数ともゼロの)ジョイント要素でモデル化する。地盤-構造物間も剥離・滑動を表現するジョイント要素でモデル化する。

荷重は図中に示したように、解析モデル外周の節点に断層変位方向の強制変位を静的に与える。断層ずれ量は、有限要素法の適用が可能と考えられる範囲できりの良い数値として、0.1mと設定する。

解析諸元を表-1に示す。表中の諸元のうち、地盤のせ

図-1 断層角度 θ および変位角度 ϕ の向き

表-1 解析諸元

構造物	直径(m)	100
	壁厚(m)	0.6
	弾性係数E(kN/m ²)	25.0×10 ⁶
	ポアソン比	0.20
地盤	せん断波速度 V_s (m/s)	150, 300, 700
	ポアソン比	0.48
	単位体積重量(kN/m ³)*	20.0
断層面	せん断方向粘着力(kN/m ²)	0.0
	摩擦係数	0.0
地盤-構造物間	引張強度(kN/m ²)	0.0
	せん断方向粘着力(kN/m ²)	0.0
	摩擦係数	0.5
	初期圧縮応力(kN/m ²)	200.0
荷重	断層ずれ量(m)	0.1

*) せん断波速度からせん断弾性係数を算定するときのみに使用。

図-2 地盤-構造物一体3次元解析モデル $\theta = 30^\circ$ の例

図-3 地盤の非線形特性 (R-Oモデル)

ん断波速度 V_s をパラメータとして150, 300, 700m/sと変化させて比較する。表中のその他の諸元は、共通の値として不変とする。地盤-構造物間 (ジョイント要素) の初期圧縮応力については、本検討では地表面位置は特に定義せずまた自重解析も実施しないが、完全にゼロでは相互作用が少しでも引張側に働くと剥離するため、実現象や数値解析上の安定性等を考慮して、10m程度の土被りに相当する値として200.0kN/m²と設定する。

地盤の非線形特性を図-3に示す。これは参考文献4)に示される設計条件をもとにR-Oモデルで近似したもので、各 V_s で共通に用いる。断層変位を受ける地中構造物と地盤の相互作用は、地盤が構造物を押す、あるいは構造物が地盤を押すといった軸差応力成分が主要となるが、本検討では数値解析上の安定性等の理由から、地盤のせん断ひずみ成分のみに依存する非線形特性として考慮する。ただし本検討において地盤の非線形性を考慮するのは、3章(3)節の地盤と構造物の剛性比によるパラメータスタディにおいてのみとし、それ以外の検討では地盤は線形とする。

解析コードはTDAPⅢを使用する。

3. 検討結果

(1) 断層角度によるパラメータスタディ

地盤の $V_s=300$ m/s, 変位角度 $\phi=0^\circ$ の場合について、断層角度 θ を変化させたパラメータスタディの結果として、変形図および構造物の長手方向軸力のコンター図を図-4に示す。本検討においては地盤は線形とする。

$\phi=0^\circ$ は右側の地盤がせり上がる方向であり、 θ が負の場合は逆断層、正の場合は正断層を表現する。地盤要素については構造物中心軸線を通る鉛直面を横切る要素のみピックアップしている。

各ケースとも、地盤と構造物間には剥離・滑動を表現するジョイント要素を設けているため、断層面付近で地盤が構造物から離れる側では、地盤と構造物間に隙間が

生じている。

$\theta=0^\circ$ のケースでは、構造物がS字状に変形することにより、凸となる部分で引張、凹となる部分で圧縮が生じる。

θ が負側および正側に角度がついていくに従い、変位の方角として構造物に圧縮および引張を生じさせる成分が生じてくるため、それぞれ圧縮・引張が卓越するようになる。 θ が $\pm 30^\circ$ 以上ではほぼ全域で圧縮・引張状態となり、角度がつくほどに圧縮・引張領域は広範囲に及んでいく。

図-4の構造物上縁のラインに沿った長手方向軸応力の分布を解析モデル全長で示したものを図-5(a)に示す。縦軸値は図-4に示した軸力 (kN/m) を壁厚 (0.6m) で除して応力換算したものである。横軸の座標は、構造物上縁のラインが断層面を横切る位置を0としている。各断層角度のケースとも、端部に向かって軸力はゼロに収束しており、長手方向モデル化範囲が十分であることを裏付けている。

図-5(a)を断層面付近を抽出・拡大したものを図-5(b)に示す。引張側・圧縮側とも、 $\theta=0^\circ$ のときは断層面からある距離離れた位置で最大値が生じているが、 θ が正側あるいは負側に大きくなるほど、最大値発生位置が断層面に近づいてくることがわかる。

図-5で示した軸応力の引張側および圧縮側の最大値を θ 毎にまとめたものを図-6に示す。引張の最大値は θ が正側に大きくなるほど、圧縮の最大値は θ が負側に大きくなるほど大きくなる傾向があるが、いずれも 30° 付近で頭打ちとなり、 45° で緩やかなピークとなる。

長手方向軸力の発生要素は次の2つに分けられる。

① 断層変位の構造物長手方向成分により、構造物が全体的に引張または圧縮を受ける

② 断層変位の構造物直角方向成分により、構造物がS字状に変形し、凸側で引張、凹側で圧縮となる

$\theta=0^\circ$ から角度が大きくなるに従い、図-4で述べたように引張・圧縮領域が拡大したり、図-6で述べたように最大値が大きくなっていくのは、角度が大きくなる毎に断層変位の構造物長手方向成分が大きくなるので、①の効果が増大するためである。一方、図-6で述べたように、角度が大きくなると最大値の増加が鈍ってくるのは、角度が大きくなる毎に断層変位の構造物直角方向成分が小さくなるので、②の効果が減少してくるためと考えられる。図-4を見ても $\theta=0^\circ$ から角度が大きくなるに従い構造物のS字変形が小さくなっていく様子がわかる。

構造物上縁のラインに沿った長手方向せん断応力の分布を図-5(b)と同じ長手方向範囲で示したものを図-7に示す。これは壁の長手方向面外せん断力 (単位: kN/m) を壁厚で除したものである。図-5の軸応力分布と比較すると、せん断応力の分布は、断層面近傍に極めて局所的

図4 変形図および構造物長手方向軸力分布 $V_s=300\text{m/s}$ $\phi=0^\circ$ 変形スケール50倍

(a) 解析モデル全長

(b) 断層面付近拡大

図-5 構造物上縁の長手方向軸応力分布 (引張正) $V_S=300\text{ m/s}$ $\phi=0^\circ$

図-6 構造物上縁の長手方向軸応力最大値 (引張正)
 $V_S=300\text{ m/s}$ $\phi=0^\circ$

図-7 構造物上縁の長手方向せん断応力分布 $V_S=300\text{ m/s}$ $\phi=0^\circ$

図-8 地盤の鉛直方向応力分布 $V_S=300\text{ m/s}$ $\phi=0^\circ$

に発生することがわかる。同図の右に断層面付近をさらに拡大して示しているが、断層面を境に正負が逆転するZ字状の分布となっている。

長手方向せん断応力については、長手方向軸応力の主要な要因であった断層変位の構造物長手方向成分は関与せず、せん断応力の分布や大きさを左右するのは、地盤

が構造物の壁をどのように直角方向に押すかである。図-8に、 $V_S=300\text{ m/s}$ 、 $\phi=0^\circ$ における変形図と地盤の鉛直方向応力のコンターを示す。断層面近傍では、構造物は変形により傾斜するため、構造物と地盤との相互作用として、圧縮側地盤の角における集中的な圧縮力が発生している様子がわかる。したがって構造物上縁のライン

図-9 集中荷重を受ける弾性支承上の梁のせん断力分布

図-10 構造物上縁の長手方向せん断応力最大値
 $V_s=300 \text{ m/s}$ $\phi=0^\circ$

図-11 斜杭を例にした応力集中のイメージ

は、円形断面の構造物自身のアーチ効果等も含め、あたかも集中荷重を受ける弾性支承上の梁の挙動に近い状態になっていると考えられ、図-9に示すようなせん断力分布の形に近い局所的なZ字状の分布になると考えられる。

図-7で示したせん断応力の最大値を θ 毎にまとめたものを図-10に示す。最大値は θ が正側に大きくなるほど大きくなっていくが、 30° 付近で頭打ちとなり、 45° で緩やかなピークとなる。

長手方向せん断力の大きさを左右する要因としては次の2つが考えられる。

- ① 構造物を押す地盤の角の形状（先細りの度合い）
- ② 断層変位の構造物直角方向成分

①の意味は、 θ が負側に大きくなるに従い、鋭角に先細りした角で押すことになるので、角が変形して大きな力が伝えられなくなるということである。図-8でも、 θ が負側になるほど角部での地盤の圧縮応力が小さくなることがわかる。イメージ的には、図-11に示すように、斜杭の杭頭を傾斜側（左）に動かすのと反対側（右）に動かすのでは、後者の方がたやすく動かせる、言い換えると鋭角側の角よりも鈍角側の角の方が応力集中が大きくなることは想像に難くない。

図-10に示したように、 θ が正側に大きくなるほどせん断力が大きくなっていく、すなわち θ が負側に大きく

なるほどせん断力が小さくなっていくのは、主に上記①の効果によると考えられる。角度がある程度大きくなるとせん断力の増加が鈍ってくるのは、②により角度が大きくなる毎に断層変位の構造物直角方向成分が小さくなるためと考えられる。

(2) 変位角度によるパラメータスタディ

地盤の $V_s=300 \text{ m/s}$ 、断層角度 $\theta=45^\circ$ の場合について、変位角度 ϕ を変化させたパラメータスタディの結果として、変形図および構造物の長手方向軸力のコンター図を図-12に示す。本検討においては地盤は線形とする。

ϕ を $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$ と変化させており、

- ・ $\phi=0^\circ$ の場合は正断層
- ・ $\phi=45^\circ$ の場合は正断層と横ずれ断層の複合
- ・ $\phi=90^\circ$ の場合は横ずれ断層
- ・ $\phi=135^\circ$ の場合は逆断層と横ずれ断層の複合
- ・ $\phi=180^\circ$ の場合は逆断層

を表現する。 $\phi=0^\circ$ のケースは図-4の $\theta=45^\circ$ のケースと同じであり、 $\phi=180^\circ$ のケースは図-4の $\theta=-45^\circ$ のケースの左右を反転したのと同じである。このパラメータスタディでは変位方向が2方向で変わっていくため、図の表示としては、それぞれの ϕ について、上から見た図と横から見た図を併記する。

地盤要素については、「上から」の図は構造物中心軸線を通る水平面を横切る要素のみ、「横から」の図は構造物中心軸線を通る鉛直面を横切る要素のみピックアップしている。

$\phi=0^\circ$ の場合、 $\phi=180^\circ$ の場合は既に図-4に示したように、それぞれ引張および圧縮が卓越し、 $\phi=90^\circ$ の場合は図-4の $\theta=0^\circ$ のケースと概ね似た挙動となり、 $\phi=45^\circ, 135^\circ$ ではその中間的な挙動として推移する。すなわち長手方向軸力の大きさという点で見れば、引張で最も厳しくなるのは $\phi=0^\circ$ のとき、圧縮で最も厳しくなるのは $\phi=180^\circ$ のとき、ということになる。

図-12に示した各ケースについて、変形図および構造物の周方向曲げモーメント（横断面内曲げモーメント）のコンター図を図-13(a)に示す。周方向曲げモーメントについては、断層角度を固定（ここでは 45° ）した場合、変位角度は $\phi=90^\circ$ （横ずれ）のときに最も大きな値が発生していることがわかる。変位角度を $\phi=90^\circ$ （横ずれ）と固定して、断層角度 θ を変えて比較したものを図-13(b)に示す。断層角度が大きくなるほど、発生する周方向曲げモーメントは大きくなることわかる。

図-13に示した各ケースの構造物周方向曲げモーメントの最大値を抽出してグラフ化すると図-14のようになる。

断層面付近の構造物横断面の変形を見るために、代表として「 $\theta=0^\circ, \phi=90^\circ$ 」「 $\theta=45^\circ, \phi=90^\circ$ 」「 $\theta=$

図-12 変形図および構造物長手方向軸力分布 $V_s=300 \text{ m/s}$ $\theta=45^\circ$ 変形スケール50倍

図-13 変形図および構造物周方向曲げモーメント分布 $V_S=300\text{m/s}$ 変形スケール50倍

45° , $\phi=0^\circ$ 」のケースについて図-13に示すA-A断面でカットして左から見た図を図-15に示す。煩雑を避けるため、地盤と構造物に分けて示す。(a)に示す断層が構造物に直交する場合は、断層面付近の構造物横断面は、今回の検討では地盤-構造物間の剥離を考慮しているため、圧縮側の地盤からの力により、円環が楕円につぶれるように変形する。(b)に示す断層角度が斜めの場合の横ずれのケースでは、上記の相互作用力に加えて、地盤のみの抽出図を見てわかるように、構造物横断面を地盤の角が押すような作用が加わり、極端に言えば楕円ではなく瓢箪型に変形させて、大きな周方向曲げモーメントを発生させると考えられる。断層角度が斜めの場合でも(c)に

示す正断層（あるいは逆断層）の場合は、上記の「地盤の角」が押す方向が構造物軸方向や周方向に流れるために、横ずれの場合ほど大きな周方向曲げモーメントが発生しないと考えられる。

(3) 地盤と構造物の剛性比によるパラメータスタディ

地盤と構造物の剛性比によるパラメータスタディとして、構造物の諸元は不変とし、地盤の V_s を150 m/s, 300 m/s, 700 m/sと変化させて結果を比較した。本節の検討では、断層角度・変位角度はそれぞれ $\theta=0^\circ$, $\phi=0^\circ$ のみを対象とし、地盤の非線形性の考慮の有無の影響についても検討した。

変形図および構造物の長手方向軸力のコンター図を図-16に示す。地盤線形の $V_s=300$ m/sのケースは図-4に既示したものである。地盤線形・地盤非線形とも、地盤の剛性が大きくなるに従い、構造物が断層面近傍で局所的に変形するようになり、応力集中も顕著になっていく様子がわかる。図には後述する最大軸圧縮力発生位置、最大軸引張力発生位置も併記している。なお軸圧縮力・軸引張力は要素単位での評価となるため、最大軸圧縮力発生位置・最大軸引張力発生位置は最大値発生要素の要素中央にプロットしている。

構造物上縁のラインに沿った長手方向軸応力の分布を図-17に示す。地盤線形の $V_s=300$ m/sのケースは図-5に既示したものである。地盤線形・地盤非線形とも、地盤の剛性が大きくなるほど圧縮側・引張側での最大値が大きくなり、その発生位置が断層面位置に近づいてくる。

図-16, 図-17について、地盤線形と地盤非線形を比較すると、地盤非線形の方が応力がわずかに小さくなり、

図-14 構造物周方向曲げモーメントの最大値

図-15 図-13のA-A断面でカットして左から見た変形図

図-16 変形図および構造物長手方向軸力分布 $\theta=0^\circ$ $\phi=0^\circ$ 変形スケール50倍

図-17 構造物上縁の長手方向軸力分布 (引張正)

図-18 杭頭に水平荷重を受ける杭の挙動

分布も左右にわずかに伸びる傾向が認められるが、極めて微量であり、実質的には差がないと言える。

道路橋示方書・同解説IV下部構造編⁵⁾では、弾性床上の梁理論に基づき、図-18に示すように、回転を自由(曲げモーメントがゼロ)とする杭頭に水平荷重を受け

る場合の、杭の最大曲げモーメント発生深度 l_m が、以下の式により算定できることが示されている。

$$l_m = \frac{\pi}{4\beta} \quad (1)$$

ここで

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_H D}{4EI}} \quad (2)$$

$$k_H = k_{H0} \left(\frac{B_H}{0.3} \right)^{-\frac{3}{4}} \quad (3)$$

$$k_{H0} = \frac{1}{0.3} \alpha E_0 \quad (4)$$

$$B_H = \sqrt{\frac{D}{\beta}} \quad (5)$$

ここに D : 杭径 (m)

E : 杭の弾性係数 (kN/m^2)

I : 杭の断面二次モーメント (m^4)

E_0 : 地盤の弾性係数 (kN/m^2)

$$E_0 = 2G(1 + \nu) \quad G = \frac{\gamma}{g} V_s^2$$

G : 地盤のせん断弾性係数 (kN/m^2)

ν : ポアソン比

γ : 単位体積重量 (kN/m^3)

g : 重力加速度 (m/s^2)

V_s : 地盤のせん断波速度 (m/s)

α : 換算係数 (=1.0)

本論文の断層変位を受ける円形断面の地中構造物の挙動は、断層面を中心に逆対称であり断層面では曲げモーメントがゼロとなることから、回転自由の杭頭に相当する。上記推定式を地中構造物に適用する場合は地表の影響が考慮されないことになるが、本検討は2章(1)節で述べたように地表を想定していないことから、曲げに伴う軸力が大きくなる位置の断層面からの距離は式(1)による距離と対応すると考えられる。また長谷川らの検討⁶⁾でも、同様の式で、断層変位を受ける埋設鋼管の塑性ヒンジ位置を簡易評価できることが示されている。

地盤の V_s と最大軸力発生位置の関係を、式(1)による最大曲げモーメント発生位置推定値と V_s の関係と併記して図-19に示す。地盤非線形グラフの方も、式(1)に

よる曲線は地盤の初期剛性を代入したものである。図より、地盤線形の場合、圧縮側については、最大軸力発生位置は式(1)による最大曲げモーメント発生位置の推定値とほぼ一致している。引張側については、 $V_s=150\text{m/s}$ のケースではほぼ一致しているが、 $V_s=300\text{m/s}$ 、 $V_s=700\text{m/s}$ のケースでは、最大軸引張力発生位置の距離の方が、推定値よりも大きくなる。これは、図-16の変形図からわかるように、今回の解析は、地盤と構造物間にジョイント要素を設けているので引張側では剥離が生じ、断層面付近への応力集中が剥離により緩和され、地盤の剛性が大きく応力集中の大きいケースほどその効果が顕著になるためと考えられる。地盤線形と地盤非線形の比較では、図-16、図-17でも差がほとんどないことを示したように、地盤非線形で $V_s=700\text{m/s}$ のときの最大圧縮力発生位置がわずかに（1要素分）外側に動くだけで、それ以外は変わらない。

構造物上縁のラインに沿った長手方向せん断応力の分布を図-20に示す。地盤線形の $V_s=300\text{m/s}$ のケースは図-7に既示したものである。地盤線形・地盤非線形とも、地盤の剛性が大きくなるほど、最大値が大きくなる。 V_s の増加に伴う図-17の軸応力の最大値の増加と図-20のせん断応力の最大値の増加の割合を比較すると、せん断応力の方が感度が高く顕著に増加することがわかる。地盤線形と地盤非線形の比較では、地盤非線形の方がせん断応力は小さくなり、 $V_s=700\text{m/s}$ のケースで半分程度になる。

図-21に $V_s=700\text{m/s}$ のケースの変形図および地盤の鉛

— 最大曲げモーメント発生位置推定値(式(1)) ○ 解析結果 最大軸圧縮力発生位置 △ 解析結果 最大軸引張力発生位置

図-19 最大値発生位置の比較

図-20 構造物上縁の長手方向せん断応力分布

図-21 変形図および地盤の鉛直方向応力分布 $V_S=700\text{m/s}$ 変形スケール50倍

直方向応力分布を示す。地盤非線形の方が断層面圧縮側の地盤の角のつぶれが顕著になり、圧縮応力も小さくなる（地盤線形：約 -15000kN/m^2 ，地盤非線形：約 -10000kN/m^2 ）様子がわかる。

地盤の非線形性の有無の影響が、構造物長手方向軸力にはほとんど表れず構造物長手方向せん断力に顕著に表れる理由は以下のように考えられる。地盤の非線形性による軟化が顕著となるのは、図-21でも見たように断層面の圧縮側の角であり、その部分の圧縮応力も低減する。したがって図-8～図-9で考察したように、地盤と構造物の局所的な相互作用力が直接反映する構造物長手方向せん断力には、地盤の非線形性の有無が大きく影響すると考えられる。一方、構造物長手方向軸力に寄与するのは構造物の全体的な伸縮変形および曲げ変形である。地盤の非線形性により局所的な相互作用力が変わっても、図-21を見てわかるように構造物の全体的な曲げ変形はそれほど変わらない。したがって地盤の非線形性の有無が構造物長手方向軸力に与える影響は小さいと考えられる。

なお構造物の挙動は、地盤の剛性およびその非線形特性、地盤－構造物間（ジョイント要素）の初期圧縮応力、断層ずれ量等に左右されるので、それらを本検討における条件から変えた場合には、本節で示した定性的な傾向等が多少変わってくることも考えられる。

4. まとめ

断層変位を受ける円形断面地中構造物に対し、断層諸元が構造物の挙動に与える影響を、地盤－構造物一体3次元解析を実施して調べた。検討の結果、以下のことが明らかとなった。

○断層角度

- 断層が構造物に直交する場合は、構造物はS字状の曲げ変形となるが、正断層側・逆断層側に角度がつくに従い、それぞれ引張・圧縮が卓越する。

- 長手方向軸力の最大値は、角度がつくほど大きくなるが、ある程度で頭打ちとなり、本検討条件では 45° で緩やかなピークとなる。
- 長手方向せん断力は、断層面付近に集中して発生する。その値は、正断層側に角度がつくほど大きくなるが、ある程度で頭打ちとなり、本検討条件では 45° で緩やかなピークとなる。

○変位角度

- 長手方向軸力（引張または圧縮）は、断層角度が斜めの場合、傾斜方向のずれ（正断層または逆断層）の場合の方が、傾斜直角方向のずれ（横ずれ）の場合よりも、大きな値が生じる。
- 周方向曲げモーメントは、断層角度が斜めの場合、傾斜直角方向のずれ（横ずれ）の場合の方が、傾斜方向のずれ（正断層または逆断層）の場合よりも、大きな値が生じる。またその際、断層角度が大きいほど、値は大きくなる。

○地盤と構造物の剛性比（地盤の剛性）

- 地盤の剛性が大きくなるほど、構造物のS字変形およびそれに伴う長手方向軸力が断層面付近に集中するようになる。
- 長手方向軸力、長手方向せん断力とも地盤の剛性が大きくなるほど大きくなるが、長手方向せん断力の方がその感度が高い。
- 長手方向軸力の最大値発生位置は、圧縮側は回転自由の杭頭に水平荷重を受ける杭の最大曲げモーメント発生位置の算定式に良く一致するが、引張側は、今回の検討条件下においては剛性比が大きくなるほど断層面からの距離が大きめにずれる傾向となる。
- 地盤の非線形性を考慮することにより、構造物長手方向せん断力は大きく低減するが、構造物長手方向軸力は、今回の検討条件下においては分布形状も含めほとんど変わらない。

今後は,

○構造物の長手方向軸力・長手方向せん断力・周方向
曲げモーメント以外の断面力成分の評価

○構造物の非線形性

○断層を弱層など幅を持った領域でモデル化
等も考慮して, さらに検討を続けていく予定である.

参考文献

- 1) 地盤工学会・地震時の断層変位に伴う地盤災害に関する調査委員会：地震時の断層変位に伴う地盤災害に関する調査報告書，2002.
- 2) 大塚久哲，古川愛子，相部岳暁：断層変位を受ける地中構造物の耐震性と免震対策の適用性，土木学会論文集 A1, Vol.66, No.1, pp.188-195, 2010.
- 3) 樋口俊一，渡辺伸和，米澤健次，穴吹拓也，江尻譲嗣：三次元 FEM 解析による断層上の地中鉄筋コンクリート構造物の損傷評価，土木学会原子力土木委員会 断層変位評価に関するシンポジウム講演論文集，pp.91-98, 2015.
- 4) 土木学会：原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・照査例，2005.
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編，2012.
- 6) 長谷川延広，清野純史：断層変位を受ける埋設鋼管の塑性ヒンジ位置の検討，土木学会原子力土木委員会 断層変位評価に関するシンポジウム講演論文集，pp.87-90, 2015.

(2015. 11. 6 受付, 2016. 1. 16 修正, 2016. 2. 20 受理)

FUNDAMENTAL STUDY ON BEHAVIOR OF UNDERGROUND LINEAR STRUCTURE SUBJECTED TO FAULT DISPLACEMENT

Katsuyuki SAKASHITA and Akihito HATA

The damage of underground structures such as tunnels transecting the fault are reported in some recent earthquakes. But there are few papers in which parametric studies about the influence of fault conditions on structure response are conducted. So in this paper, the influence of the fault angle, the displacement angle and the stiffness ratio between ground and structure on the response of circular cross-section underground structure subjected to fault displacement is studied by parametric studies using 3D FEM. As a typical result of studies, it is verified that in cases where the fault angle deviates from perpendicular, the axial stress of structure dominates and its maximum value is given when the fault angle is about 45° .