

断層変位を受けるRCボックスカルバートの挙動に関する解析的検討

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)
E-mail: 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)
E-mail: hata@ce.taisei.co.jp

断層変位を受ける地中構造物としてRCボックスカルバートを対象とした解析的検討を実施した。断層は傾斜角度 67.5° の逆断層とし、平面上で構造物が断層を横切る角度を変動させたパラメータ解析を実施し、構造物の挙動に与える影響を検討した。検討の結果、縦断方向軸力は断層交差角度が直交に近いほど大きく、横断方向曲げモーメントは断層交差角度が小さくなるほど大きくなることがわかった。今回の検討条件においては、断層変位0.1m時にはコンクリートは圧縮強度以下で鉄筋は降伏しないが、断層変位0.2m時にはコンクリートは圧縮強度に達し鉄筋降伏するケースがあることが確認された。

Key Words : fault displacement, underground structure, 3D FEM, nonlinear

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到達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⁾。筆者らは断層変位を受ける地中線状構造物に対し、3次元解析を用いたパラメータスタディにより、断層角度や地盤の剛性といった諸元あるいは断層変位緩衝のための対策工の有無・種類が構造物の挙動に与える影響を検討してきた^{2),3)}。これまでは対象を中空円形断面RC地中構造物とし構造物は線形材料として扱っていたが、今回RCボックスカルバートを対象として、構造物の非線形特性を考慮した検討を実施した。

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⁴⁾、あるいは樋口らによる断層上のRCボックスカルバートに材料非線形特性を考慮した検討⁵⁾等が挙げられるが、これらの検討では断層角度等の条件を変動させたケース数については比較的少数にとどめている。そこで今回の検討においては、構造物が断層を横切る角度を変動させたパラメータ解析を実施し、構造物の挙動に与える影響を検討した。

2. 検討条件

(1) 基本条件

検討の対象とする地中構造物は、原子力発電所屋外重要土木構造物の取水ダクトとする。構造条件として、図-1に検討対象構造物の全体図を、図-2に構造物の配筋図を示す。これらは参考文献6)および参考文献7)等を参考として設定した。本論文の解析では後述するように構造物の非線形要素として積層Mindlinシェル要素を用いており、同要素は面外せん断に対する非線形挙動は考慮されない。

表-1に主な検討諸元を示す。コンクリートの非線形特

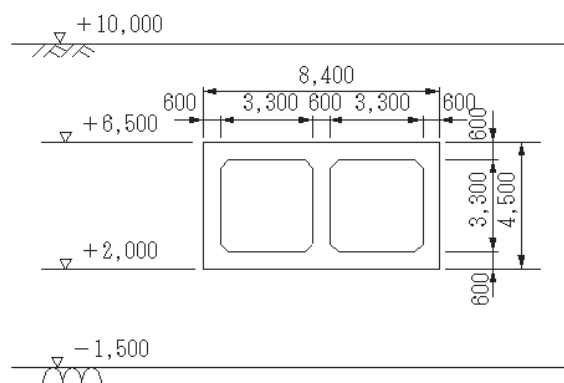


図-1 検討対象構造物

性はコンクリート標準示方書⁸⁾に示されるコンクリートの応力-ひずみ曲線にて、鉄筋の非線形特性はバイリニアにてモデル化する。地盤は、モデル化される範囲においては初期剛性一定の一樣地盤とし、非線形性を考慮する。地盤の非線形特性を図-3に示す。これは参考文献7)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ある。地盤と構造物間には剥離・滑動を考慮する。断層は傾斜角度 67.5° の逆断層とし、摩擦抵抗のない平面がずれる事象として想定する。本検討の目的が構造物の破

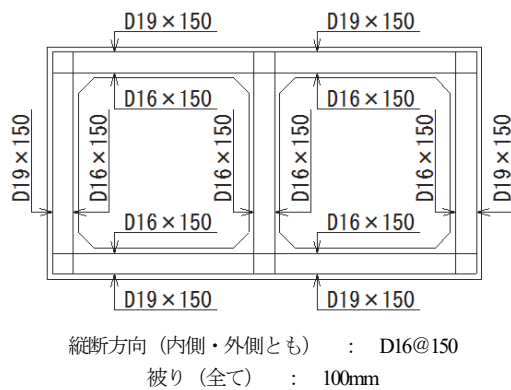


図-2 配筋図

表-1 主な検討諸元

構造物	コンクリート	圧縮強度	24 N/mm ²
		引張強度	0 N/mm ²
	鉄筋	降伏強度	345 N/mm ²
地盤	初期剛性		V _s 300m/s 相当
	ポアソン比		0.40
地盤－構造物間摩擦係数			0.5
断層	傾斜角度		67.5°
	変位方向		逆断層
	ずれ量		0.2m
	断層面摩擦係数		0.0

壊過程を追うものではなく、断層条件による比較に主眼をおくことから、断層ずれ量は実現象あるいは設計的には小さめの値の0.2mと設定する。

(2) 解析モデル

検討は、解析コードTDAP III⁹⁾による地盤-構造物一体3次元解析により行う。図-4に、後述する検討ケースのうち代表として断層交差角度が 90° のケースの解析モデルを示す。ここで断層交差角度とは上から見た平面的な交差角度を意味し、鉛直面で見れば構造物と断層面は断層傾斜角度分の 67.5° で交差している。

構造物は積層Mindlinシェル要素にてモデル化する。積層Mindlinシェル要素はファイバー要素の概念をMindlinシェル要素に拡張して伸縮および曲げに対する非線形挙動を評価するもので、要素を厚さ方向に層分割し、各層でコンクリートは面内の主応力2方向で、鉄筋は配筋方向でそれぞれ非線形構成則に適合するように応力-ひずみ履歴を追跡するものである。本検討ではコンクリートは6層に分割している。地盤は非線形ソリッド要素でモデル化し、軸差ひずみに基づく非線形性が考慮できるR-O型Shawkyモデル¹⁰⁾を適用する。構造物と地盤間および断

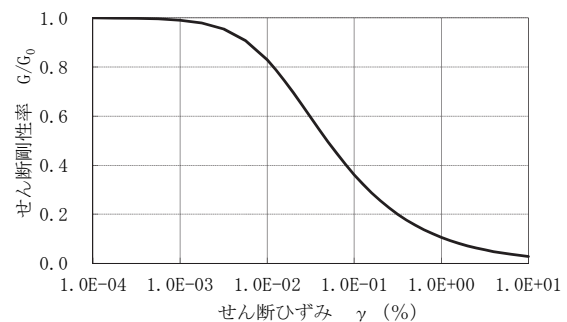


図-3 地盤の非線形特性

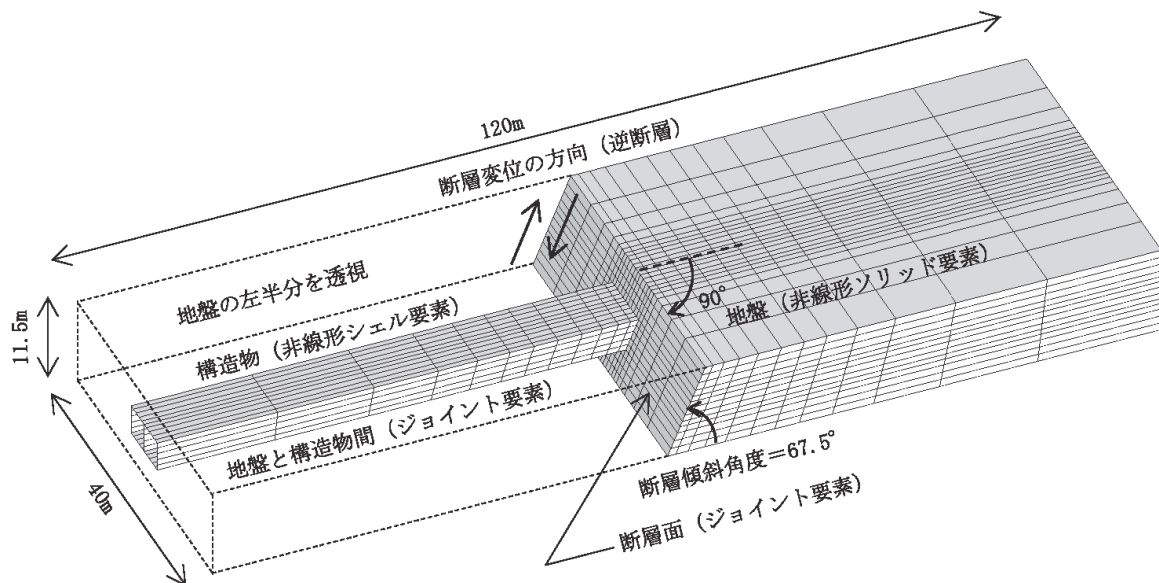


図-4 解析モデル 断層交差角度 90° のケース

層面はジョイント要素でモデル化する。

荷重条件は、自重解析を実施した後、断層変位0.2mまでを地表を除く地盤外周節点に強制変位として静的に漸増させる。すなわち解析モデル外周以遠では断層は主動的に動き、解析モデル領域内では構造物との相互作用等に依存して受動的に挙動するという考え方となる。

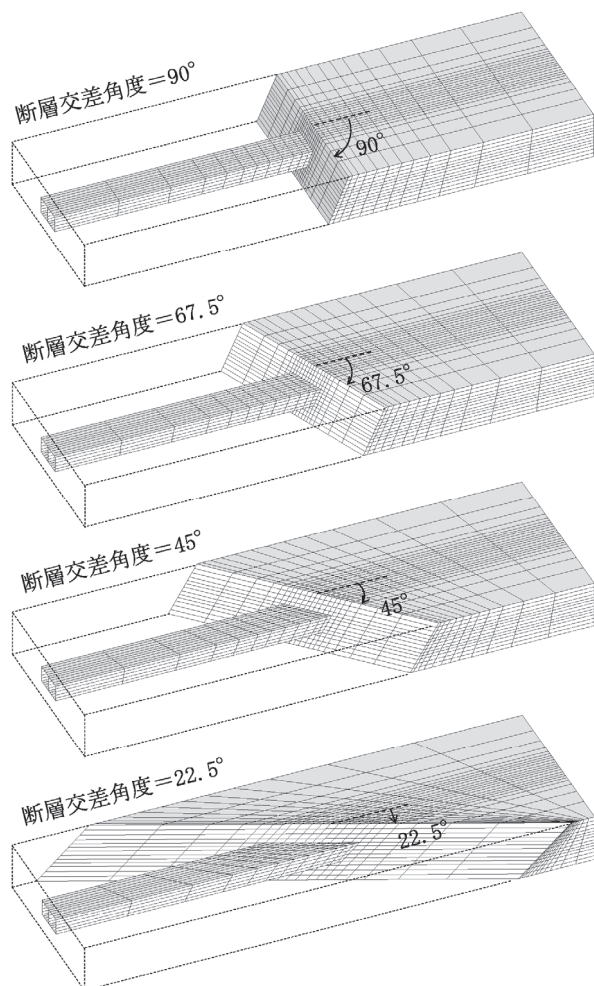


図-5 検討ケース

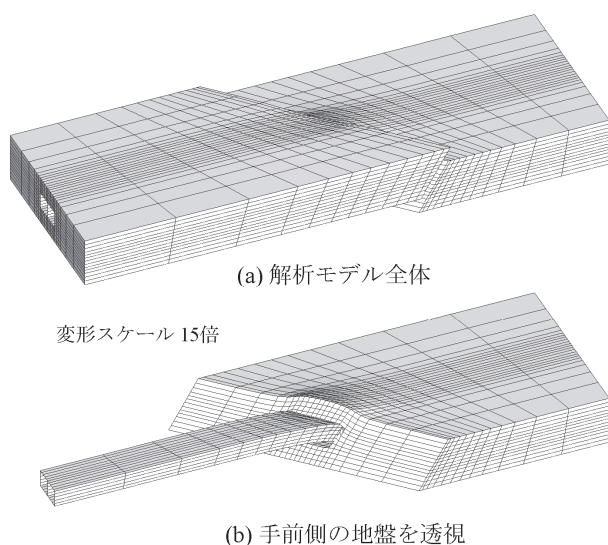


図-6 変形図 断層交差角度=45° 断層変位 0.2m

(3) 検討ケース

図-5に検討ケースを示す。パラメータとして構造物が平面上で断層を横切る角度が、 90° 、 67.5° 、 45° 、 22.5° の4ケースを設定し、断層交差角度が構造物の挙動に与える影響を検討する。

3. 検討結果

(1) 変形および断面力

図-6に、代表として断層交差角度 45° のケースの変形図を示す。(b)の断層面手前側の地盤を透視した図を見ると、向こう側の地盤が断層面近傍の構造物上部で構造物の変形に伴って盛り上がり、断層面近傍の構造物下面ではジョイント要素が剥離して地盤との間にすきまが生じている様子等がわかる。

地盤要素を除いて構造物を斜め下から見上げた状態の、変形および構造物の縦断方向軸力分布図を図-7に示す。逆断層であるため、各ケースとも全体的に圧縮が卓越し、構造物の上スラブに特に集中する。断層交差角度が小さくなるに従い、縦断方向軸力分布は横断方向左右対称から非対称の分布へと推移していく。また発生値は小さくなっていくが、これは断層変位量の構造物縦断方向成分が小さくなるためと考えられる。

変形および構造物の横断方向曲げモーメント分布図を図-8に示す。この断面力は、前出の縦断方向軸力分布と比べると、断層面付近に局所的に発生するのが特長である。また発生値は縦断方向軸力とは逆に、断層交差角度が小さくなるに従い大きくなっていく。これは図-9に断層交差角度 22.5° のケースで解析モデルを切断表示した例で示すように、断層交差角度が小さくなると構造物横断面と断層面が交差するようになるので、断層ずれにより横断面内に大きな変形が生じるためと考えられる。

(2) 応力およびひずみ

構造物縦断方向軸力が最も大きくなる断層交差角度 90° のケースと、構造物横断方向曲げモーメントが最も大きくなる断層交差角度 22.5° のケースについて、それぞれの最大断面力発生位置における鉄筋およびコンクリートの応力ひずみ関係を図-10に示す。

まず縦断方向鉄筋について見る。断層交差角度 90° のケースでは、上側鉄筋と下側鉄筋で概ね同じような挙動で、縦断方向には一様圧縮状態であることがわかる。断層変位0.1m時には圧縮降伏していないが、断層変位0.2m時には圧縮降伏している。断層交差角度 22.5° のケースでは、圧縮状態ではあるが、抽出箇所は縦断方向軸力の顕著な位置ではないため、値は小さい。

次に横断方向鉄筋について見る。断層交差角度 90° の

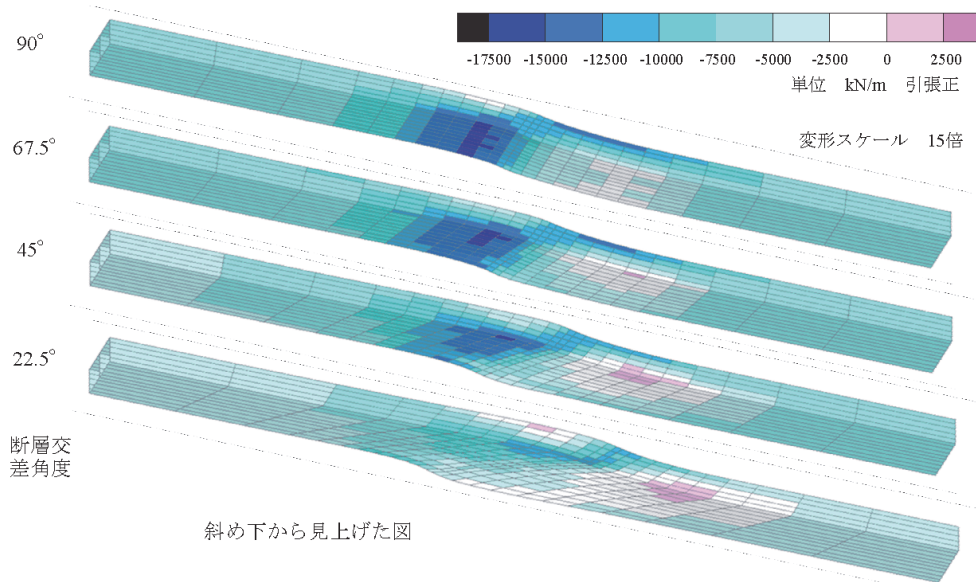


図-7 変形図および構造物縦断方向軸力分布 断層変位0.2m

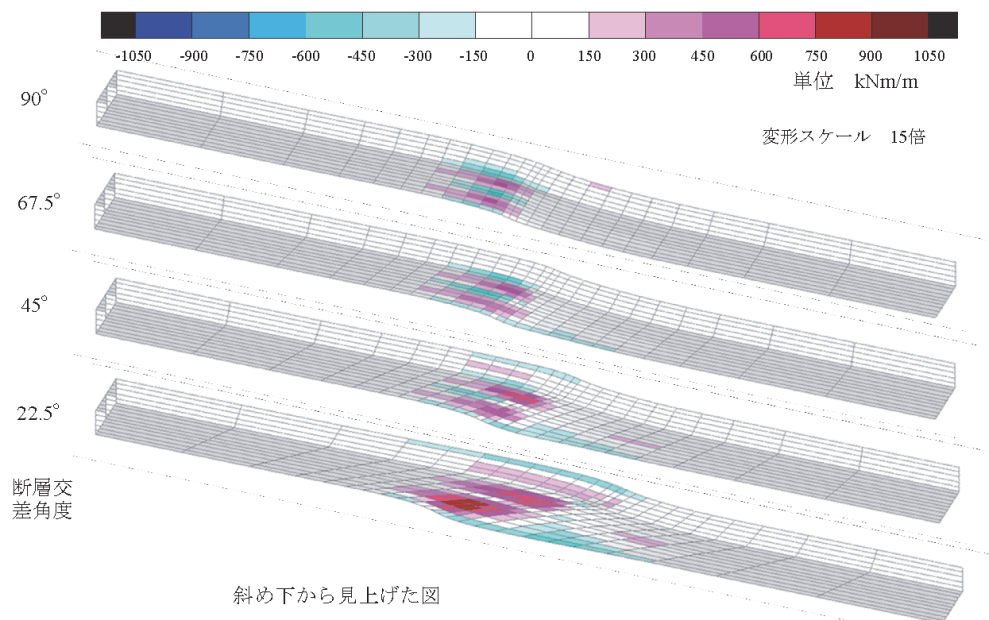
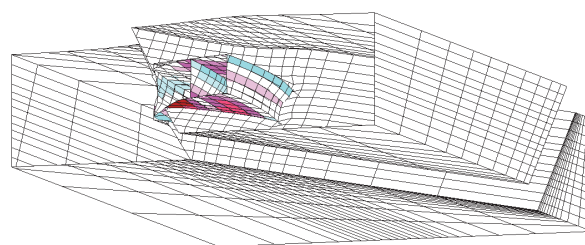


図-8 変形図および構造物横断方向曲げモーメント分布 断層変位0.2m

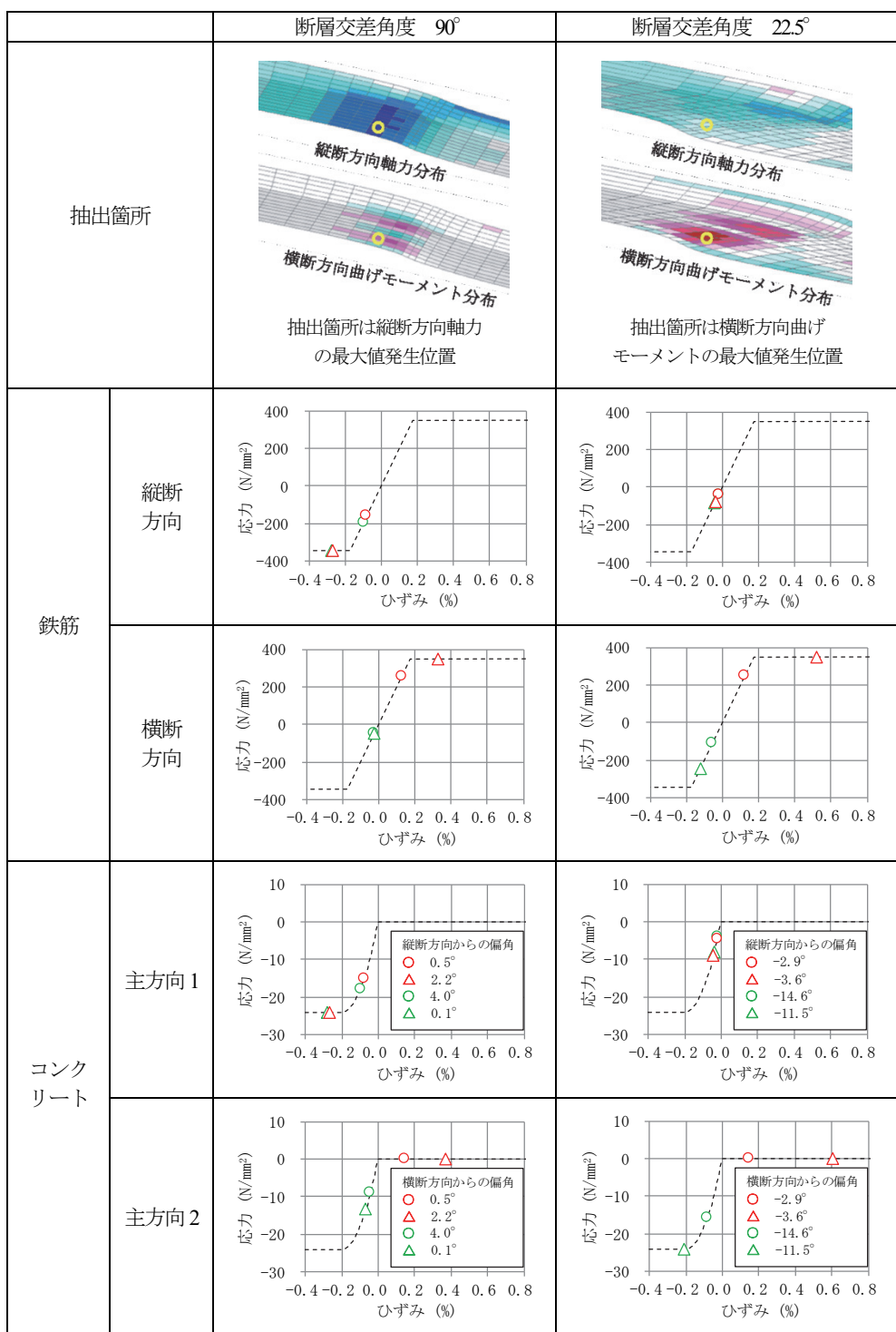
ケースでは、上側鉄筋は引張・下側鉄筋は圧縮の曲げとなっている。上側鉄筋は断層変位0.2m時には引張降伏しているが、下側鉄筋はあまり大きな圧縮応力は発生していない。断層交差角度22.5°のケースでは、同様に上側引張の曲げ状態であるが、断層交差角度90°のケースと比べて、下側鉄筋の圧縮応力や断層変位0.2m時の上側鉄筋の引張ひずみが大きく、構造物横断方向曲げモーメントが大きい状態を反映している。

次にコンクリート主方向について見る。図で主方向1とは縦断方向とのなす角度が45°以下の主方向、主方向2とは横断方向とのなす角度が45°以下の主方向である。すなわち主方向1は縦断方向と、主方向2は横断方向と概ね対比することができ、各図に偏角（上から見たときの



構造物横断方向曲げモーメント最大値発生位置付近で解析モデルを横断方向に切断
地盤要素は中空表示 変形スケール 15倍

図-9 変形図および構造物横断方向曲げモーメント分布
断層交差角度22.5° 断層変位0.2m



○：断層変位0.1m 上側（上縁） △：断層変位0.2m 上側（上縁）
 ○：断層変位0.1m 下側（下縁） △：断層変位0.2m 下側（下縁） 点線：構成則 引張正

図-10 コンクリートおよび鉄筋の応力ひずみ関係

時計回りを正）を併記した。

まず断層交差角度90° のケースについて見る。偏角の絶対値は最大でも4.0° であり、主方向1・主方向2はそれぞれほぼ縦断方向・横断方向である。したがって結果は前述した鉄筋の発生ひずみと整合の取れたものとなっている。主方向1では、断層変位0.1m時には圧縮強度に達していないが、断層変位0.2m時では上縁・下縁とも圧

縮強度に達している。主方向2では圧縮強度には達しないが、上縁では早い段階から引張によるひび割れが発生する。

次に断層交差角度22.5° のケースについて見る。偏角の絶対値は最大でも14.6° であるので、断層交差角度90° のケースほどではないが、概ね主方向1・主方向2はそれぞれ縦断方向・横断方向と対比することができ、結

果を見てもある程度鉄筋の発生ひずみと整合は取れている。主方向2では、下縁で断層変位0.2m時に圧縮強度に達し、上縁では早い段階から引張によるひび割れが発生する。

4. まとめ

断層変位を受ける地中構造物としてRCボックスカルバートを対象として、構造物の非線形特性を考慮した解析的検討を実施した。断層は傾斜角度 67.5° の逆断層とし、平面上で構造物が断層を横切る角度を変動させたパラメータ解析を実施し、構造物の挙動に与える影響を検討した。

検討の結果、縦断方向軸力は断層交差角度が直交に近いほど大きく、横断方向曲げモーメントは断層交差角度が小さくなるほど大きくなることがわかった。

応力およびひずみを調べた結果、今回の検討条件においては、断層変位0.1m時にはコンクリートは圧縮強度以下で鉄筋は降伏しないが、断層変位0.2m時にはコンクリートは圧縮強度に達し鉄筋降伏するケースがあることが確認された。

今回得られた知見は、断層交差角度に応じた構造物の設計時の注目箇所や対策工選定の際の参考に資することができる。

今後は、構造物に断層変位対策工を施したケースも対象とし、継手位置等をパラメータとした同様の検討を続けていきたい。

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) 坂下克之，畑明仁：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，土木学会論文集 A1, Vol. 72, No. 4, pp.I_297-I_309, 2016.
- 3) 坂下克之，畑明仁：断層変位を受ける地中線状構造物の対策工に関する解析的検討，土木学会論文集 A1, Vol. 73, No. 4, pp.I_83-I_96, 2017.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 土木学会：「原子力発電所地質・地盤の調査・試験法および地盤の耐震安定性の評価手法」報告書 第6編 例示設計編，1985.
- 7) 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.
- 8) 土木学会：2007 年度制定 コンクリート標準示方書設計編，2007.
- 9) 耐震・構造解析シリーズ | アーク情報システム：
<<http://www.ark-info-sys.co.jp/jp/product/tdap/>> (2018年6月29日アクセス)
- 10) Shawky, A. A.: Nonlinear static and dynamic analysis for underground reinforced concrete, 東京大学博士論文，1994.

ANALYTICAL STUDY ON BEHAVIOR OF RC BOX CULVERT SUBJECTED TO FAULT DISPLACEMENT

Katsuyuki SAKASHITA and Akihito HATA

In this paper, analytical studies on behavior of RC box culvert subjected to fault displacement are conducted. The fault is set as reverse fault which dip angle is 67.5 degree, and parametric studies about horizontal intersection angle of structure and fault are presented. As a result, it is verified that longitudinal axial force is large when intersection angle is right angle, and cross-section bending moment is large when intersection angle is not right angle. In this papers condition, concrete and rebar stress does not reach yeald strength when fault displacement is 0.1m, and some concrete and rebar stress reach yeald strength when fault displacement is 0.2m.