

断層変位を受けるRCボックスカルバートの 継手位置が挙動に与える影響の解析的検討

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RCボックスカルバートを対象とし、継手位置が挙動に与える影響の解析的検討を実施した。断層は傾斜角度 67.5° 変位量 0.2m の逆断層とした。構造物は 20m 間隔で継手を設け、継手位置を変動させたパラメータ解析を実施し、継手と断層面の相対位置関係が結果に与える影響について検討した。検討の結果、継手は構造物縦断方向の軸力の低減に効果を発揮すること、また継手が等間隔に設けられている場合でも、断層交差面との相対的な位置関係により、横断方向曲げモーメントや継手変位の値に差異が生じること等がわかった。

Key Words : *fault displacement, underground structure, 3D FEM, nonlinear, earthquake-resistant joint*

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RCボックスカルバートに対し、3次元非線形解析を用いたパラメータスタディにより、継手等の対策工がない場合に断層交差角度が構造物の挙動に与える影響の検討²⁾および直交断層の場合に継手間隔が構造物の挙動に与える影響の検討³⁾について実施してきた。

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、断層条件を構造物と斜めに交差する逆断層とし、断層面が構造物を横切る箇所と継手の相対的な位置関係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海水管ダクトとする。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

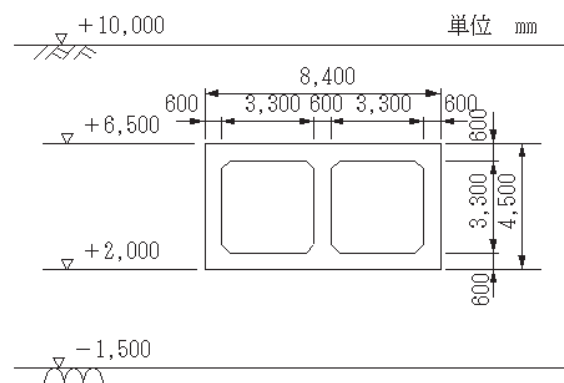


図-1 検討対象構造物

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、構造物縦断方向と 45°

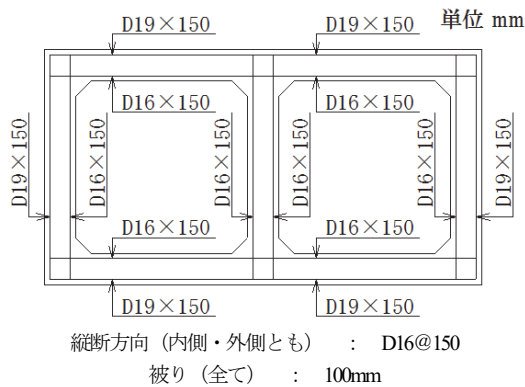


図-2 配筋図

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°
	構造物との交差角度		45°
	変位方向		逆断層
	ずれ量		0.2m
	断层面摩擦係数		0.0

で交差するものとする。断層変位は摩擦抵抗のない平面が断層傾斜方向に沿ってずれる事象として想定する。断層傾斜方向に沿ったずれ量は0.2mと設定する。実際には地表で1.0m以上の断層ずれが観測された事例もあるが、本検討の目的が構造物の破壊過程を追うものではなく、条件による結果の比較に主眼をおくことから、有限要素法ならびに今回の地盤・構造物の非線形要素が無理なく適用できると考えられる値として0.2mと設定した。

(2) 解析モデル

検討は、微小変形理論に基づく解析コード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継手なしのケースの解析モデルを示す。

構造物は継手部以外の一般部を積層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

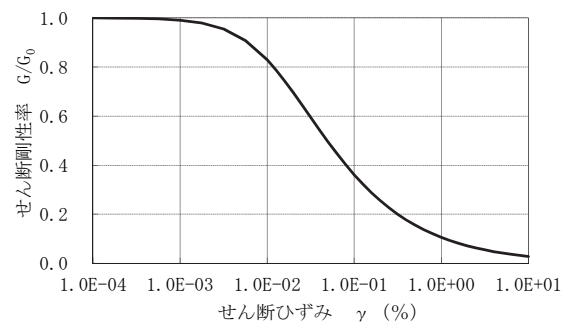


図-3 地盤の非線形特性

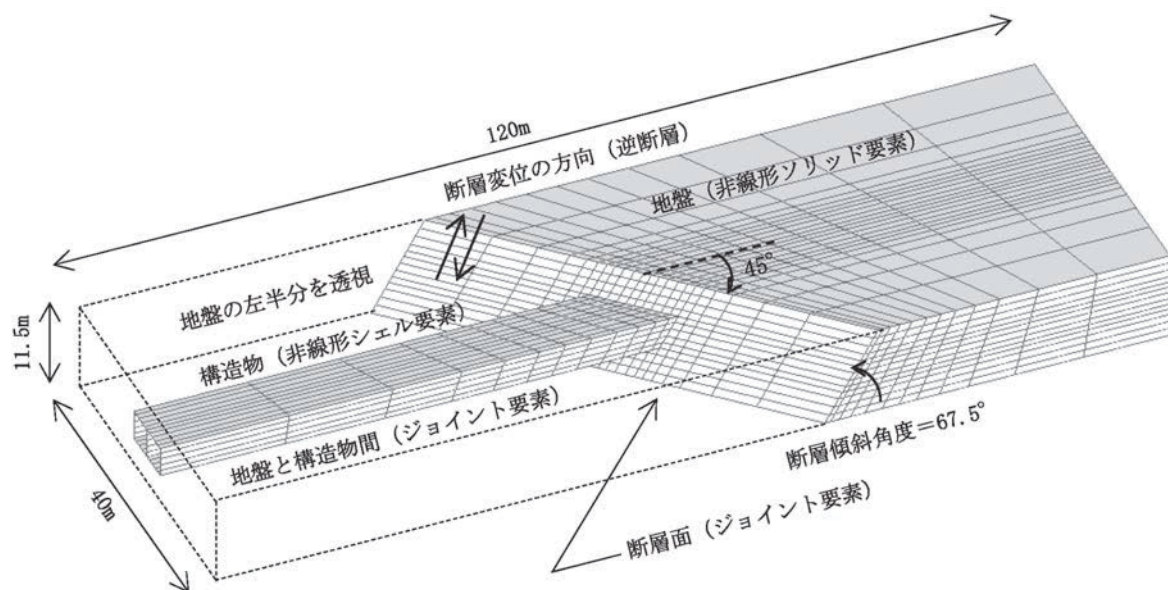


図-4 解析モデル（継手なしのケース）

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。

解析モデルの境界位置すなわち領域の大きさについては、今回使用した解析ツールおよび計算環境における自由度数や要素縦横比の制限を加味しつつ以下のように設定した。底面境界については、図-1に示す堅固な岩盤上面位置 (G.L.-1,500) とした。側方境界については、参考文献6)に例示された2次元解析モデル等を参考に、解析モデル幅を構造物幅の5倍程度として設定した。縦断方向境界については、端部拘束がたとえば構造物縦断方向軸力等の結果に影響を与えないことが理想であるが、端部軸力をゼロとするにはモデル領域を極めて大きくとる必要があるため、側方境界とのバランスや解析容量等を考慮して設定した。結果的には後述するように、端部付近の軸力分布自体はなめらかであり、また解析モデルの縦断方向の端部は構造物の節点も含めて強制変位をかけていることから、地盤・構造物の相互作用の観点からは安全側の評価になっているといえる。

(2) 継手の条件

継手は、構造物の特定の横断面位置で耐震ジョイントにより構造を分断して変位を吸収するものであり、横ずれ方向・引張方向に加え、圧縮方向についても特定のクリアランスを設けて変位を吸収する機構が研究されている^(例えば11)。今回の検討は、特定の案件を対象としたものではなく条件を一般化した汎用的・基礎的な検討と位置付けているので、継手についてもばね定数や軸方向のクリアランスは具体的な数値として設定せず、理想化した完全な縁切り構造として設定する。解析モデル上は継手幅はゼロ、すなわち継手を挟んだ対応節点は同座標とする。したがって両側の構造物が互いに近づく場合でもぶつかり合うことなく、空間を共有するように重なり合う解析結果となる。

継手間隔は20mとする。

(3) 検討ケース

検討ケースは図-5に示すように、「継手なし」のケースおよび断層面が構造物を横切る箇所と継手の相対的な位置関係を変動させた継手あり4ケースの計5ケースとする。「継手ケース1」は構造物と断層の交差面が継手で

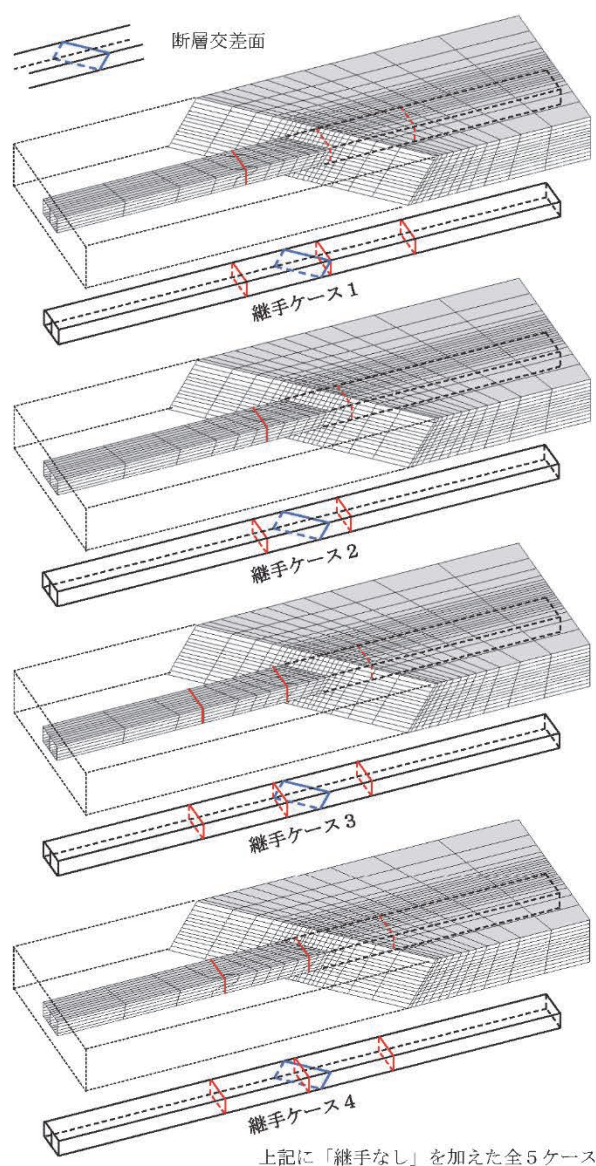


図-5 検討ケース

区分された構造物ブロックの断層下盤寄りにあるケース、「継手ケース2」は断層交差面がブロック中央にあるケース、「継手ケース3」は断層交差面がブロックの上盤寄りにあるケース、「継手ケース4」は断層交差面が継手面と交差するケースである。継手は20m間隔で設けられている設定であるが、断層交差面が含まれるブロックよりも外側は、後述の結果からわかるように継手の有無は構造物の挙動にはほとんど影響がないと考えられるため、解析上は設けないこととする。

(4) 解析支援ツールの整備

解析モデル作成に当たっては、TDAP IIIを対象とした3次元解析モデルを自動作成するツールを整備した。

図-6に示すように、横断面を対象とした平面ひずみ要素（地盤）・梁要素（構造物）・2次元ジョイント要素（地盤と構造物間）よりなる2次元解析モデルと、「断

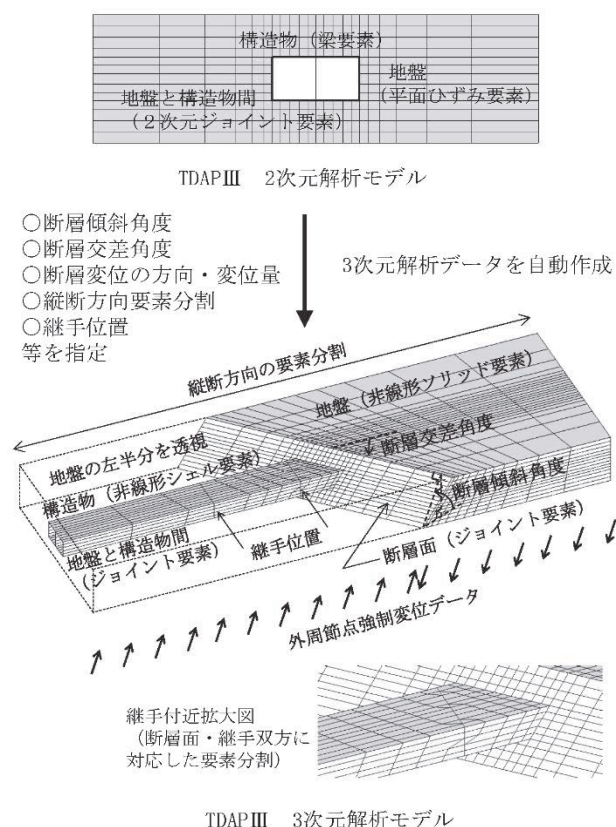


図-6 解析支援ツールの整備

層傾斜角度」「断層交差角度」「断層変位の方向・変位量」「縦断方向要素分割」「継手位置」等を指定することにより、自重解析時の境界条件や断層変位解析時の外周節点強制変位データを含む3次元解析モデルを自動作成するものであり、今回の検討のようなパラメータスタディを実施する際に有効となる。

3. 検討結果

(1) 変形および構造物縦断方向軸力

図-7に継手なし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、奥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隙間が生じている様子がわかる。

以降に示す断面力は、自重解析による常時分と断層変位解析による増分とを足し合わせたものである。

地盤要素を取り除き、構造物の変形および縦断方向軸力分布図を図-8に示す。継手なしの場合、この断面力の発生機構は、逆断層であるが故の構造物の全体的な圧縮と、断層面近傍で構造物がS字状に変形することによる曲げの重ね合わせとなる。継手なしのケースでは、断層面付近の上盤側の底版と下盤側の頂版では圧縮と曲げの

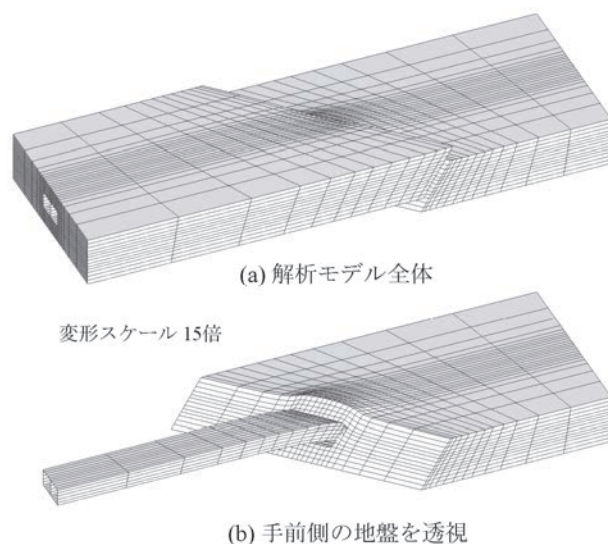


図-7 変形図 (継手なし, 断層変位0.2m)

重ね合わせにより大きな縦断方向圧縮力が発生しており、局所的には壁として全断面圧縮強度到達軸力まで達している部分もある。継手ありの4ケースでは、まず変形に関しては2章(2)節で述べたように、継手部は両側の構造物が互いに近づく挙動に対してぶつかり合って止まるという事象を解析では考慮しないため、空間を共有するようにわずかに重なり合う形で描画されている。縦断方向軸力に関しては、圧縮力は継手変位により解放されるため、継手ありの4ケースとも大幅に低減される。しかし圧縮力が解放された一方で、曲げに伴う引張力については発生範囲が広がっている。そこで同図を引張側に注目したコンタースケールで描いたものを図-9に示す。継手ありの4ケースは継手なしのケースと比較して発生する引張力は大きく、局所的には壁として全断面引張降伏軸力まで達している部分もある。継手ありの4ケース間の比較では、断面力の発生分布形状は違いがあるが値については大きな差はないといえる。

もちろん継手が縦断方向の引張に対して不利になると結論付けるものではなく、たとえば正断層の場合には、断層変位により構造物に発生する大きな縦断方向引張力を継手が解放して低減することは想像に難くない。

(2) 構造物横断方向曲げモーメント

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-10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。横断方向曲げモーメントについては、継手の存在により低減されるということは確認されず、むしろ継手付近で大きくなっている部分が見られる。特に断層面と継手面が交差する継手ケース4で顕著であり、逆に断層面と継手面が離れている継手ケース2では、分布・値と

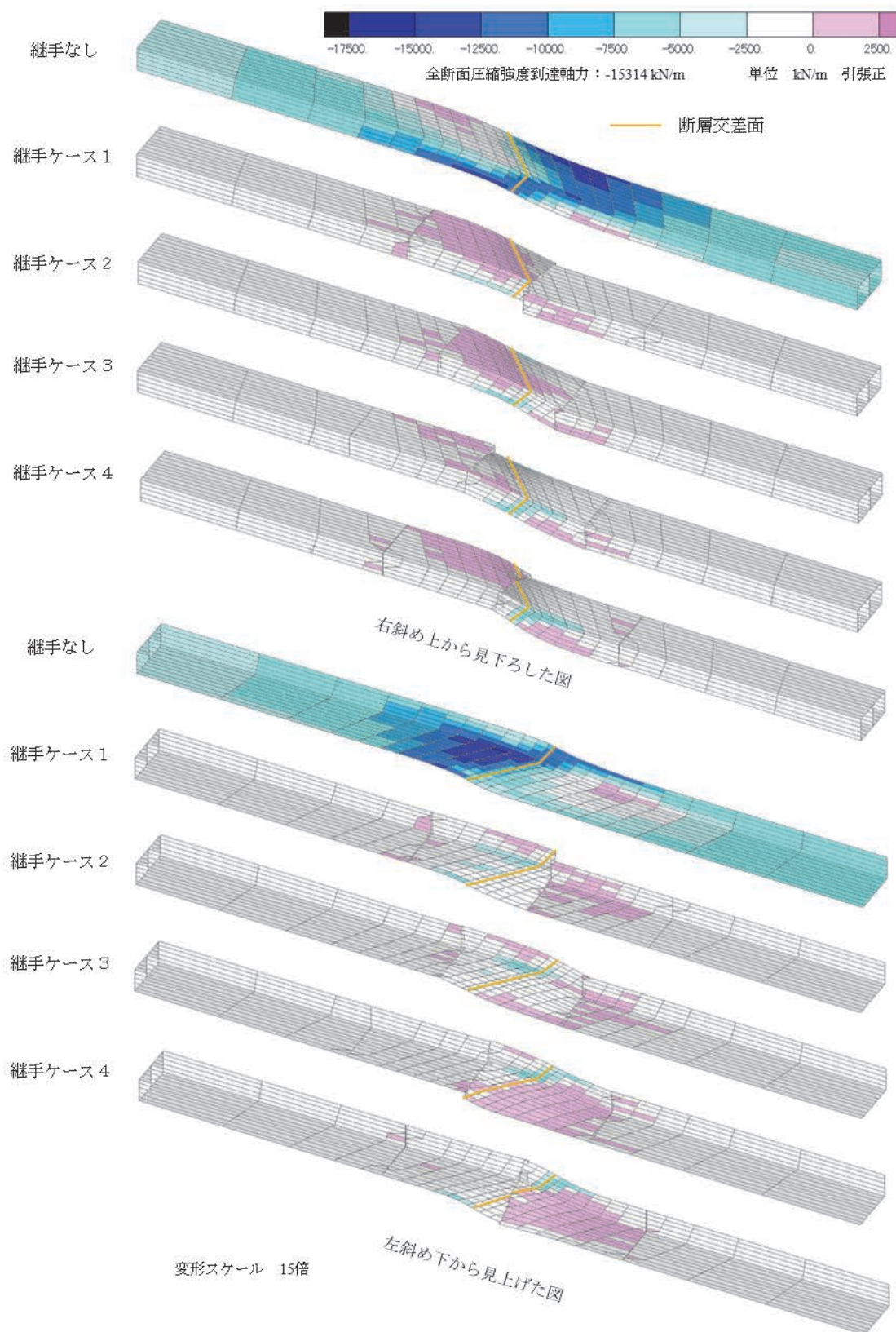


図-8 変形図および構造物縦断方向軸力分布 (断層変位0.2m)

も継手なしのケースと大きく変わらない結果となっている。断層面と継手面が近づくとも横断方向曲げモーメントが大きくなる理由としては、図-11に継手ケース4の例を示すように、継手部では構造物が分断されているので縦

断方向に拘束効果のある一般部よりも集中力に対しては弱くなる。したがって横断面を斜めに横切るような地盤からの力が作用する場合、一般部よりも大きな変形が生じやすくなるものと考えられる。

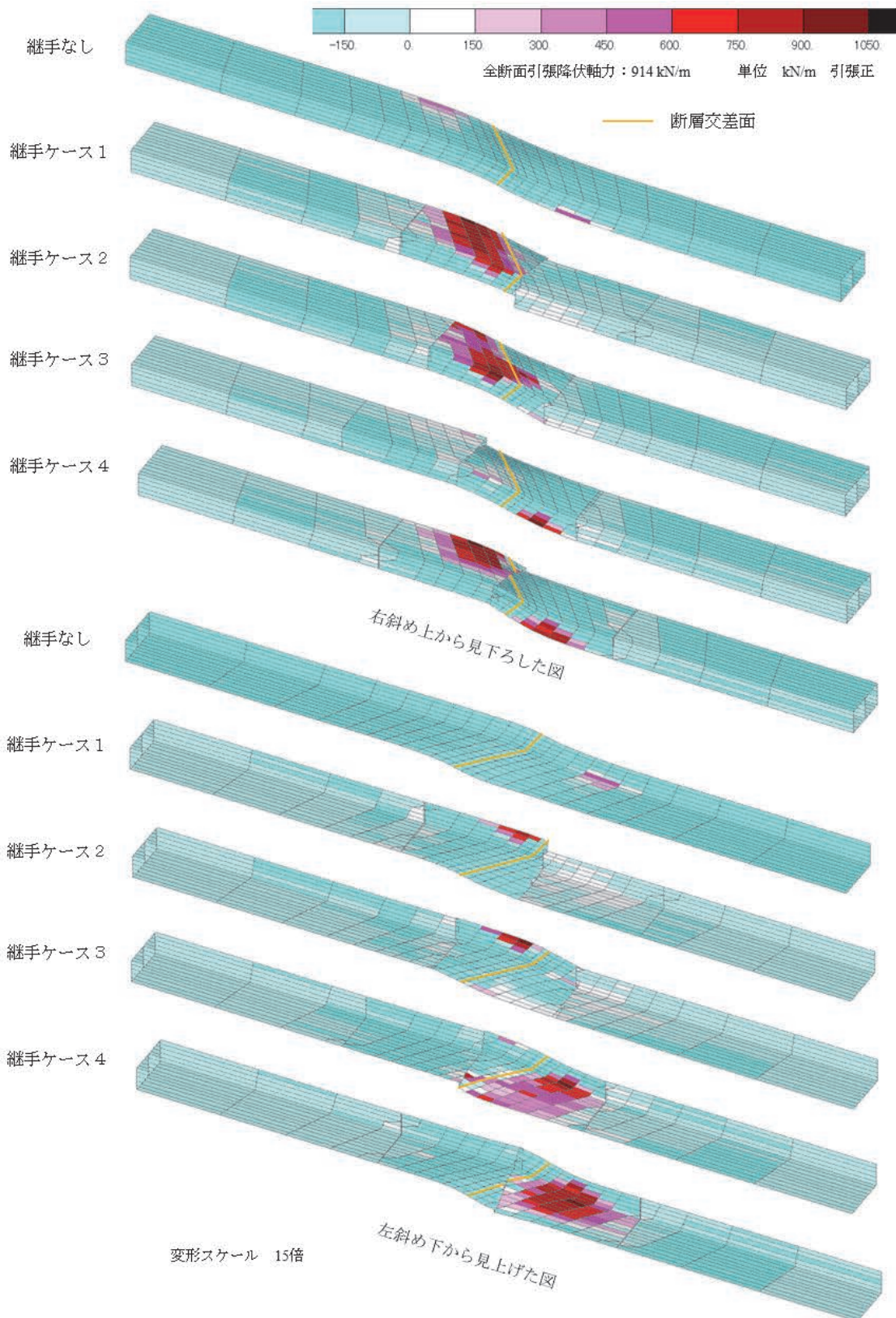


図-9 変形図および構造物縦断方向軸力分布（断層変位0.2m）（引張着目用コンタースケール）

図-11中に示した出力位置における横断方向の鉄筋およびコンクリートの応力ひずみ関係を図-12に示す。コンクリートについては、2つの直交する主応力方向のうち横断方向に近い方の主応力方向について示しており、

図に偏角（上から見たときの反時計回りを正）を併記している。コンクリート・鉄筋とも、上側が引張・下側が圧縮の曲げとなっている。上側鉄筋は断層変位0.1m時に既に引張降伏しており、下側鉄筋も0.2m時には圧縮降伏

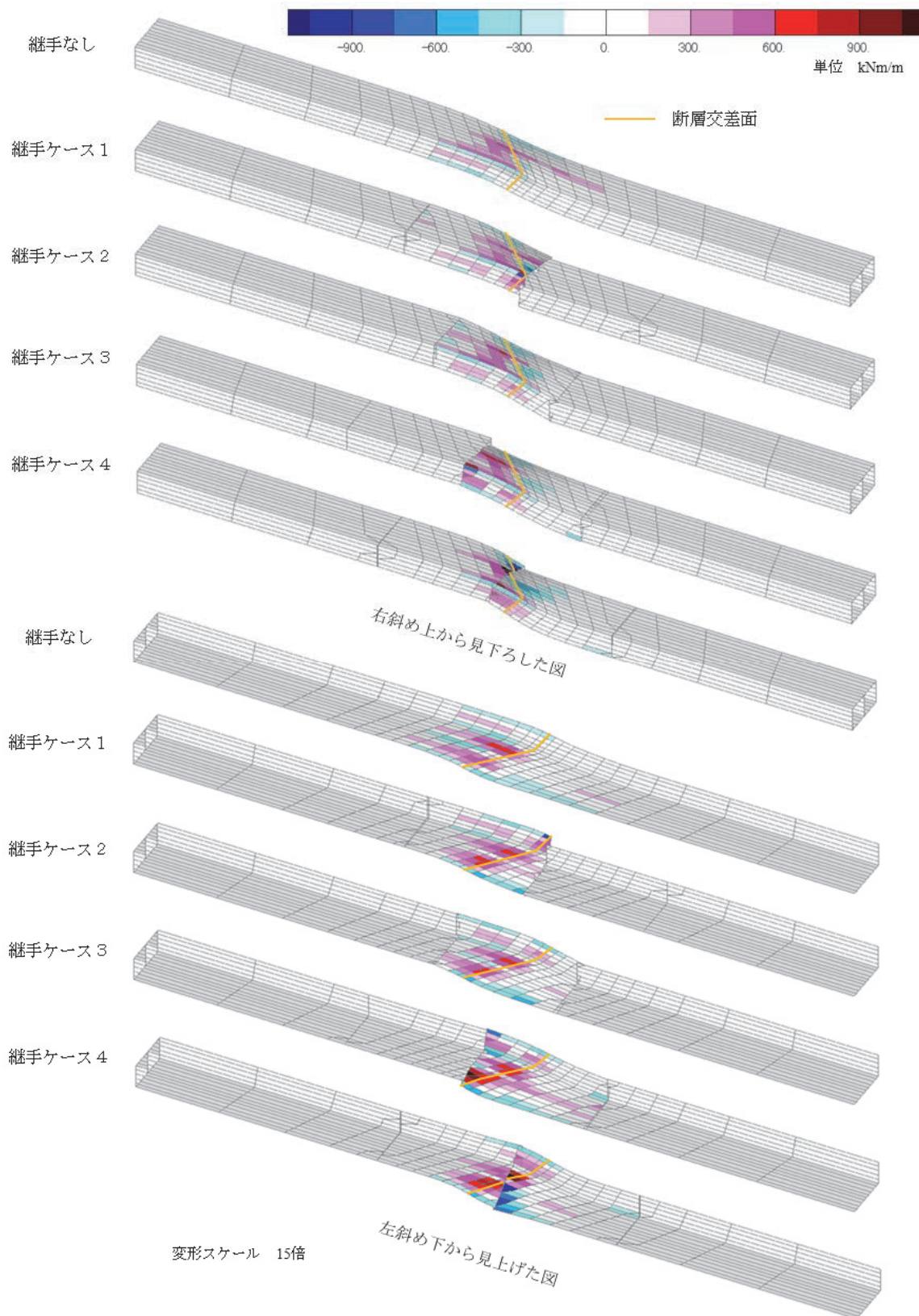


図-10 変形図および構造物横断方向曲げモーメント分布（断層変位0.2m）

する。コンクリートについては、下縁で断層変位0.1m時に圧縮強度近くになり0.2m時には圧縮強度に達している。上縁では早い段階から引張によるひび割れが発生する。

以上より、一般的には断層面付近に継手を設ければ構

造物にとって有効というイメージがあるが、特に断層面が構造物と斜めに交差する場合、継手付近での局所的破壊に対する裕度が低くなる可能性があることに留意する必要がある。

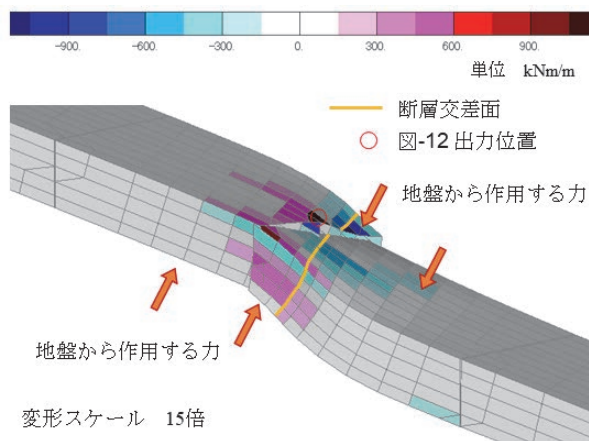
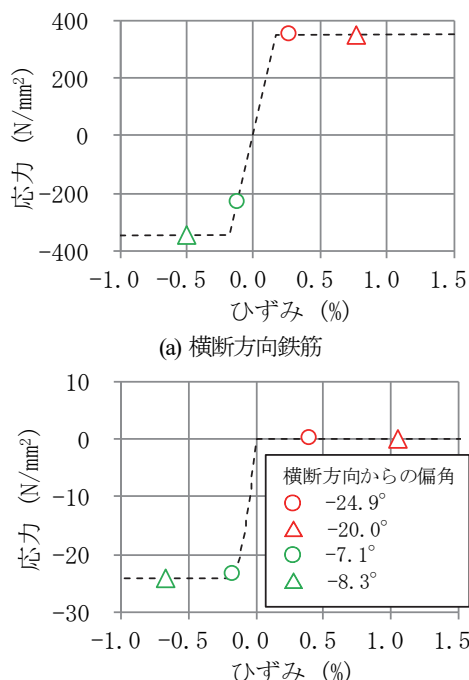


図-11 変形図および構造物横断方向曲げモーメント分布
(継手ケース4 断層変位0.2m) 継手付近拡大図



(b) コンクリートの横断方向に近い主応力方向

○ : 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-12 横断方向の応力-ひずみ関係
(図-11に示す出力位置)

(3) 継手の変位

継手ありの4ケースについて、図-13に示す継手各位置の変位を表-2に示す。

横断方向の変位については、今回の断層条件が逆断層であるため、各ケースとも大きな値は発生していない。

縦断方向の変位については、逆断層であるため全てのケース・全ての箇所で縮む方向に変位している。最も大きな値が発生するのは断層面と継手面が交差している継

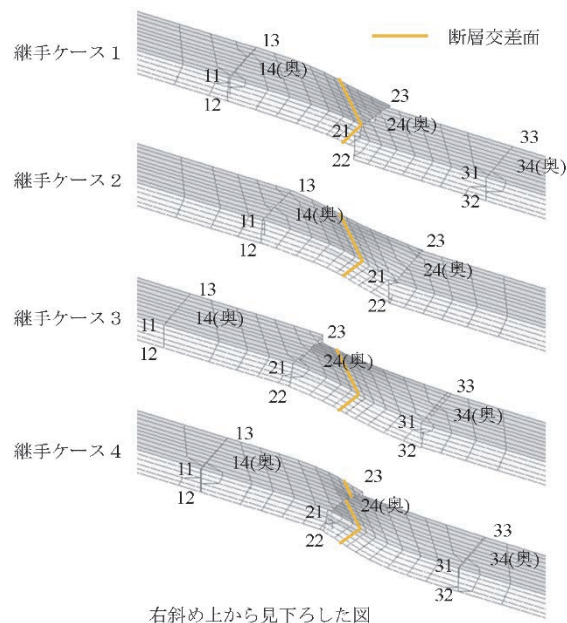


図-13 継手節点番号

手ケース4 (9.3cm) である。継手ケース4で最も大きな理由としては、断層面と継手面が一致しているため、その位置の継手に変位が集中しやすくなるためと考えられる。ただし最大値は4ケース間でそれほど顕著な差異はない。

鉛直方向の変位については、最も大きな値が発生するのは断層交差面が継手で区分された構造物ブロックの断層下盤寄りにある継手ケース1 (13.2cm)，続いて断層交差面がブロックの上盤寄りにある継手ケース3 (8.2cm) である。これらのケースで鉛直方向の変位が大きくなる理由は、たとえば継手ケース1の変形図を見てわかるように、断層上盤に大部分が載る左側のブロックは持ち上げられ、上盤のかからない右側のブロックではほとんど変形・変位のない状態となり、その差分が表れているものと考えられる。また変形図や表-2を見てわかるように、左側のブロックの右端に注目した場合、断層面が構造物に斜めに交差しているため、手前側(節点21, 22)では持ち上げられ奥側(節点23, 24)では下向きに押さえつけられ、横断面としてねじれるように変位するのも特徴である。

今回の検討条件では、継手の仕様において縦断圧縮方向に約10cm、鉛直方向に約14cmのクリアランスならびに目開き対応が必要である。

4. まとめ

断層変位を受けるRCボックスカルバートを対象とし、継手位置が挙動に与える影響の解析的検討を実施した。断層は傾斜角度67.5°，変位量0.2mの逆断層とした。構

表-2 継手変位

継手 ケース	継手節 点番号	継手変位 (cm)		
		縦断方向	横断方向	鉛直方向
1	11	-1.6	0.1	0.3
	12	-1.8	-0.1	0.2
	13	-0.2	0.2	0.2
	14	-1.1	-0.1	0.2
	21	-6.3	-1.5	-12.6
	22	-3.6	-1.1	-13.2
	23	-8.3	-1.5	-1.6
	24	-5.2	-1.0	-0.3
	31	0.0	0.0	0.0
	32	0.0	0.0	0.0
	33	-0.1	0.0	0.0
	34	-0.1	0.0	0.0
2	11	-2.2	0.1	1.1
	12	-3.7	-0.6	0.9
	13	0.4	0.3	0.0
	14	-3.2	-0.7	0.0
	21	-7.7	-1.0	-0.9
	22	-1.6	0.3	-0.8
	23	-6.9	-1.2	0.3
	24	-4.3	0.2	0.3
3	11	-0.2	0.0	0.0
	12	-0.2	0.0	0.0
	13	-0.1	0.0	0.0
	14	0.0	0.0	0.0
	21	-2.8	-0.8	1.1
	22	-6.2	-1.6	0.8
	23	-1.6	-0.5	-8.2
	24	-5.6	-1.6	-7.7
	31	-3.5	-0.3	0.5
	32	-0.6	0.5	0.5
	33	-4.0	-0.4	0.1
	34	-2.8	0.2	0.2
4	11	-0.7	0.0	0.0
	12	-0.6	0.0	0.0
	13	-0.2	0.1	0.0
	14	-0.4	0.0	0.0
	21	-4.3	0.0	-0.3
	22	-9.3	0.0	-0.8
	23	-8.0	0.0	-3.6
	24	-4.9	0.0	-2.3
	31	-0.9	0.0	0.0
	32	-0.3	0.1	0.1
	33	-1.4	-0.1	0.0
	34	-1.0	0.0	0.0

縦断方向は縮む方向が負
色枠は、各継手ケース・各方向での最大値

造物は20m間隔で継手を設け、継手位置を変動させたパラメータ解析を実施し、継手と断層面の相対位置関係が結果に与える影響について検討した。検討の結果、以下のことがわかった。

・断層変位により構造物に発生する縦断方向圧縮力は、

継手を設けることにより大幅に低減される。

- ・縦断方向軸圧縮力が低減される分、構造物の曲げにより発生する縦断方向引張力は増大する。
- ・構造物横断方向曲げモーメントは、継手がある場合の方が無い場合よりも大きくなる傾向があり、特に断層面と継手面が交差する場合に顕著となる。
- ・継手の縦断方向変位は、断層面と継手面が交差する場合に最も大きくなる。
- ・継手の鉛直方向変位は、断層交差面が継手で区分されたブロックの断層下盤寄りにある場合に最も大きくなる。
- ・今回の検討条件では、継手の仕様において縦断圧縮方向に約10cm、鉛直方向に約14cmのクリアランスならびに目開き対応が必要である。

今回は限られた断層条件・継手条件での結果であり、今後は断層交差角度や断層変位の方向をパラメータとした検討、および継手を実際の特性に則したばね要素等でモデル化した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 RC ボックスカルバートの挙動に関する解析的検討，土木学会論文集 A1, Vol. 75, No. 4, 2019.
- 3) 坂下克之，畑明仁：断層変位を受ける RC ボックスカルバートの継手効果に関する解析的検討，土木学会第 74 回年次学術講演会講演概要集，CS12-27, 2019.
- 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/>> (2019 年 8 月 27 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.
- 11) 大塚久哲，相部岳暁，副島すみれ子：断層変位を受ける地中構造物の耐震継手対策の有効性に関する研究，土木学会論文集 A1, Vol. 68, No. 4, pp. I_253-I_259, 2012.

PARAMETRIC STUDY ABOUT JOINT LOCATION OF RC BOX CULVERT SUBJECTED TO FAULT DISPLACEMENT

Katsuyuki SAKASHITA and Akihito HATA

In this paper, parametric studies about earthquake-resistant joints location 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 displacement is 0.2m. Joints interval is 20m, and parametric studies about positional relationship between joints and fault are presented. As a result, it is verified that earthquake-resistant joints is effective to decrease longitudinal axial forces, and even where joints interval is fixed value, bending moment and joint displacement depend on positional relationship between joints and fault.