

屈曲部を有する RC カルバートの損傷における荷重載荷方向の影響に関する一考察

佐々木 義志¹・永井 秀樹²・堤内 隆広³・三橋 祐太⁴

¹正会員 株式会社構造計画研究所 防災・環境部 (〒164-0011 東京都中野区中央 4-5-3)
E-mail: yoshiyuki-sasaki@kke.co.jp

²正会員 株式会社大林組 原子力本部設計第二部 (〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2)
E-mail: nagai.hideki@obayashi.co.jp (Corresponding Author)

³正会員 株式会社大林組 原子力本部設計第二部 (〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2)
E-mail: tsutsumiuchi.takahiro@obayashi.co.jp (Corresponding Author)

⁴正会員 株式会社構造計画研究所 防災・環境部 (〒164-0011 東京都中野区中央 4-5-3)
E-mail: yuta-mitsuhashi@kke.co.jp (Corresponding Author)

本研究では地中に埋設された屈曲部を有する RC 製ボックスカルバートを対象に大規模モデルを作成し、片方の耐震ジョイントが屈曲部に近接するように非対称に設置された場合及び荷重の載荷方向を変えた場合における挙動の評価を試みた。検討の結果、耐震ジョイントが非対称である場合には、屈曲部に近接させた耐震ジョイントに変形が集中することで RC カルバート本体に生じる損傷が抑制されることを確認した。また、荷重の載荷方向に依らず屈曲部付近には大きな損傷は生じない一方、載荷方向に直交する一般部の壁面において最も厳しい評価となることを確認した。

Key Words: box culvert, soil structure interaction, nonlinear analysis, high performance computing

1. はじめに

原子力発電所の屋外重要土木構造物を対象とした耐震性能照査では、手法の簡便さや保守的な検討を理由として二次元 FEM 解析が適用されることが多い。一方で近年の計算環境の向上により、地盤-構造物系の連成問題に対して三次元 FEM 解析を適用することも可能となってきた。例えば、原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針¹⁾(以降、指針と称する)では、地中に設置された屈曲部を有する RC 製ボックスカルバートに対する応答解析を実施し、その応力やひずみを評価している。ボックスカルバートでは施工上の観点から一定のブロックで区切られていることが一般的であり、先述の指針では屈曲部を境に耐震ジョイントが対称に配置された RC カルバートを検討対象としている。

一方、耐震ジョイントが非対称である場合における検討事例はなく、また、耐震ジョイントの位置と荷重載荷方向の関係が RC 製ボックスカルバートの損傷に与える影響についても未解明な部分が多い。本検討では耐震ジ

ョイントが非対称に配置された場合、並びに荷重の載荷方向を変化させた場合における RC 製ボックスカルバートの損傷評価を試みる。

2. 解析モデル及び解析ケース

(1) モデル形状

解析モデルは指針を参考に、耐震ジョイントの位置並

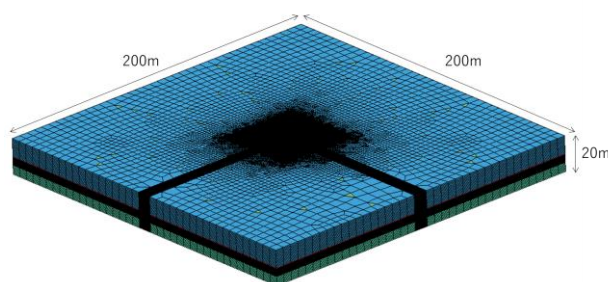


図-1 解析モデル外形

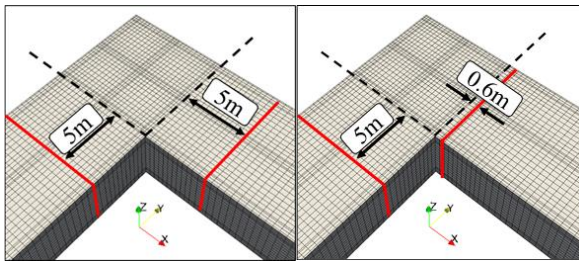


図-2 ボックスカルバートのモデル化
(左：耐震ジョイント対称，右：耐震ジョイント非対称)

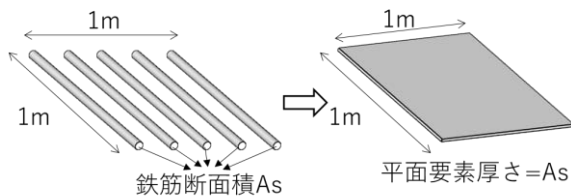


図-4 平面応力要素による鉄筋のモデル化

表-1 解析モデル毎の特徴

モデル名	特徴
解析モデル A	耐震ジョイント：対称 構造物-地盤間ジョイント：なし
解析モデル B	耐震ジョイント：非対称 構造物-地盤間ジョイント：なし
解析モデル C	耐震ジョイント：非対称 構造物-地盤間ジョイント：あり

表-2 地盤のパラメータ

	R-0モデルパラメータ					
	単位体積重量	ポアソン比	せん断弾性係数の初期値	γ_y	α	β
砂盤①	18	0.40	1.65E+05	2.80E-04	0.79	0.82
砂盤②	20	0.48	1.84E+05	6.20E-04	5.16	1.28
岩盤	20	0.33	1.00E+06	線形		

びに構造物-地盤間のジョイントの有無による違いを考慮した計3通り（解析モデルA~C）を作成する。地盤は200m×200m×20mの範囲をモデル化対象とし、ソリッド要素によるモデル化を行う。解析モデルの外形を図-1に示す。

ボックスカルバートのモデル図を図-2に示す。ボックスカルバートは二連の横断面を有する形状とし、水平方向に直角の屈曲部を有する構造である。このうちコンクリート部をソリッド要素でモデル化し、鉄筋部は異方性の平面応力要素でモデル化する。ボックスカルバートの部材断面は図-3に示す通りであり、鉄筋の平面応力要素でのモデル化は図-4に示す方法により鉄筋量が等価となるように設定している。

耐震ジョイント及び構造物-地盤間のジョイントはいずれも Goodman ジョイント要素でモデル化する。耐震ジョイントは直交するカルバートそれぞれに設けるものと

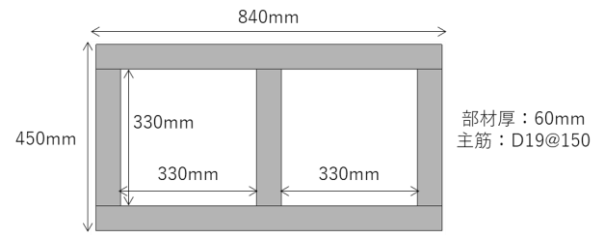


図-3 ボックスカルバートの断面諸元

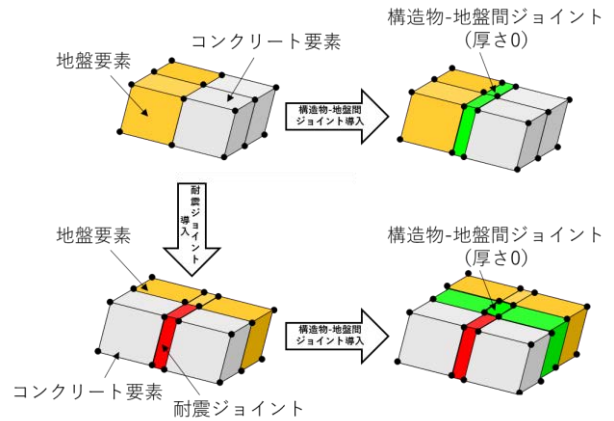


図-5 ジョイントのモデル化方法

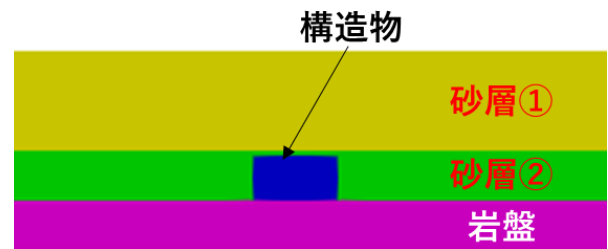


図-6 カルバートと地層の位置関係

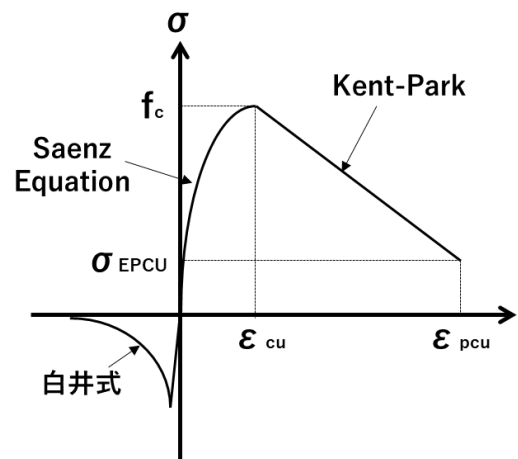


図-7 コンクリートの応力-ひずみ関係

し、対称に配置する場合は屈曲部からそれぞれ 5m の位置に、非対称とする場合は片側のジョイントを屈曲部から 0.6m の位置に設置することとした。耐震ジョイントの厚さは 10cm、構造物-地盤間のジョイントは厚さ 0 として図-5に示すようにモデル化する。解析モデルA-Cの特徴を表-1にまとめる。

本解析モデルの節点数は 1,078,174、要素数は 1,141,971

表-3 コンクリートの材料モデル

評価項目		適用モデル
等価1軸 応力-ひずみ関係	圧縮	硬化域:Saenz式 ²⁾ , 軟化域:Kent-Park式 ³⁾
	引張	硬化域:直線, 軟化域:白井式 ⁴⁾
せん断伝達特性		Al-Mahaidi Model ⁵⁾
破壊条件		Willam and Wanke Model ⁶⁾
ひび割れモデル		直交固定ひび割れモデル
ひび割れ後の 圧縮強度低減		野口・飯塚モデル ⁷⁾

表-4 コンクリート及び鉄筋の材料諸元

材料	仕様	適用モデル	
コンクリート	-	圧縮強度	24 N/mm ²
		ヤング係数	25 kN/mm ²
鉄筋	SD345	引張強度	345 N/mm ²
		ヤング係数	200 kN/mm ²

である。

(2) 材料モデル

ボックスカルバートと地層の位置関係を図-6に示す。地盤は2種類の砂層と岩盤から構成されており、ボックスカルバートは底面が岩盤に接するほかは全て砂層②の中に存在している。解析では砂層をR-Oモデルで、岩盤を線形弾性体としてモデル化する。地盤のパラメータを表-2に示す。

ボックスカルバートを構成するコンクリートは図-7、表-3に示す応力-ひずみ関係を有するものとしてモデル化する。また、鉄筋にはバイリニア型の応力-ひずみ関係を適用する。コンクリート及び鉄筋の材料諸元を表-4に示す。

耐震ジョイントの圧縮方向及びせん断方向の剛性はコンクリートの物性値と等価な値を設定し、せん断破壊は考慮しないものとする。構造物-地盤間のジョイントの圧縮方向及びせん断方向の剛性は、解析が安定する範囲で大きな値を設定し、せん断破壊基準は Mohr-Coulomb の破壊基準($\tan \phi = 0.6$)を適用する。また、引張側における各ジョイントの剛性は圧縮側の剛性値の 1/1000 となるように設定した。圧縮-引張方向の荷重-変位関係とせん断における破壊基準の模式図を図-8に示す。

(3) 荷重条件

本検討における解析はすべて自重解析と静的増分解析の2段階で実施する。自重解析においては重力加速度を鉛直下方へ、静的増分解析においては 960gal を最大荷重レベルとする増分荷重を単一方向へ載荷する。荷重の載荷方向を図-9に示す。解析モデル A,B については図-9の①の方向のみ、解析モデル C では図-9の8方向を載荷方向とし、載荷ステップ数は各載荷方向とも等間隔に 50 ステップとする。

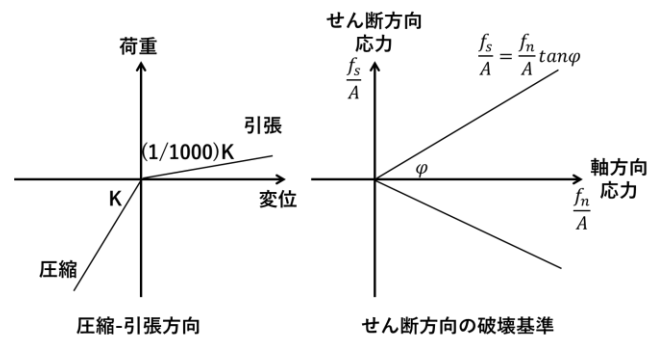


図-8 ジョイント要素の構成則模式図

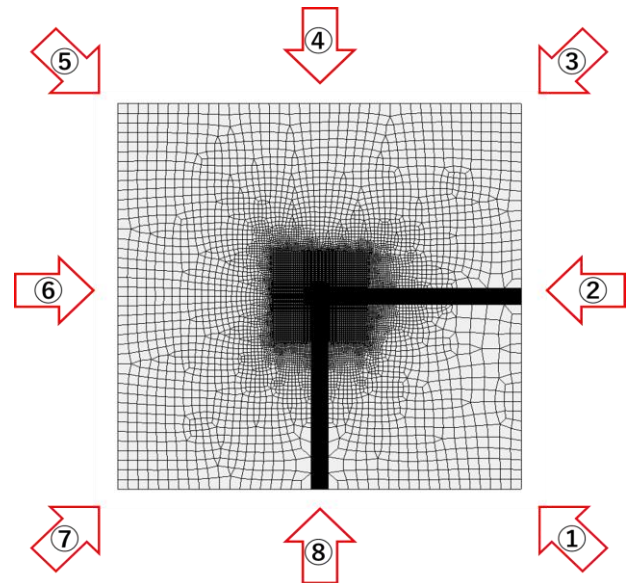


図-9 荷重の載荷方向

解析モデル A と B の比較では耐震ジョイントの位置の違いによる影響、解析モデル B と C (載荷方向①) の比較では構造物-地盤間のジョイントの有無による影響が確認できる。また、解析モデル C (載荷方向①～⑧) では載荷方向と躯体の損傷状態の関係を把握する。

(4) 境界条件

荷重条件の項で述べた通り、本検討では自重解析と静的増分解析をリスタート機能により接続する。そのため、自重解析と静的増分解析の各ステップにおいて表-5に示すように境界条件を変更する。

(5) 解析コード

本研究では解析コードとして、オープンソースの構造解析ソルバーである FrontISTR⁹⁾をカスタマイズしたものを適用している。

3. ジョイントの配置と損傷状態の関係に関する考察

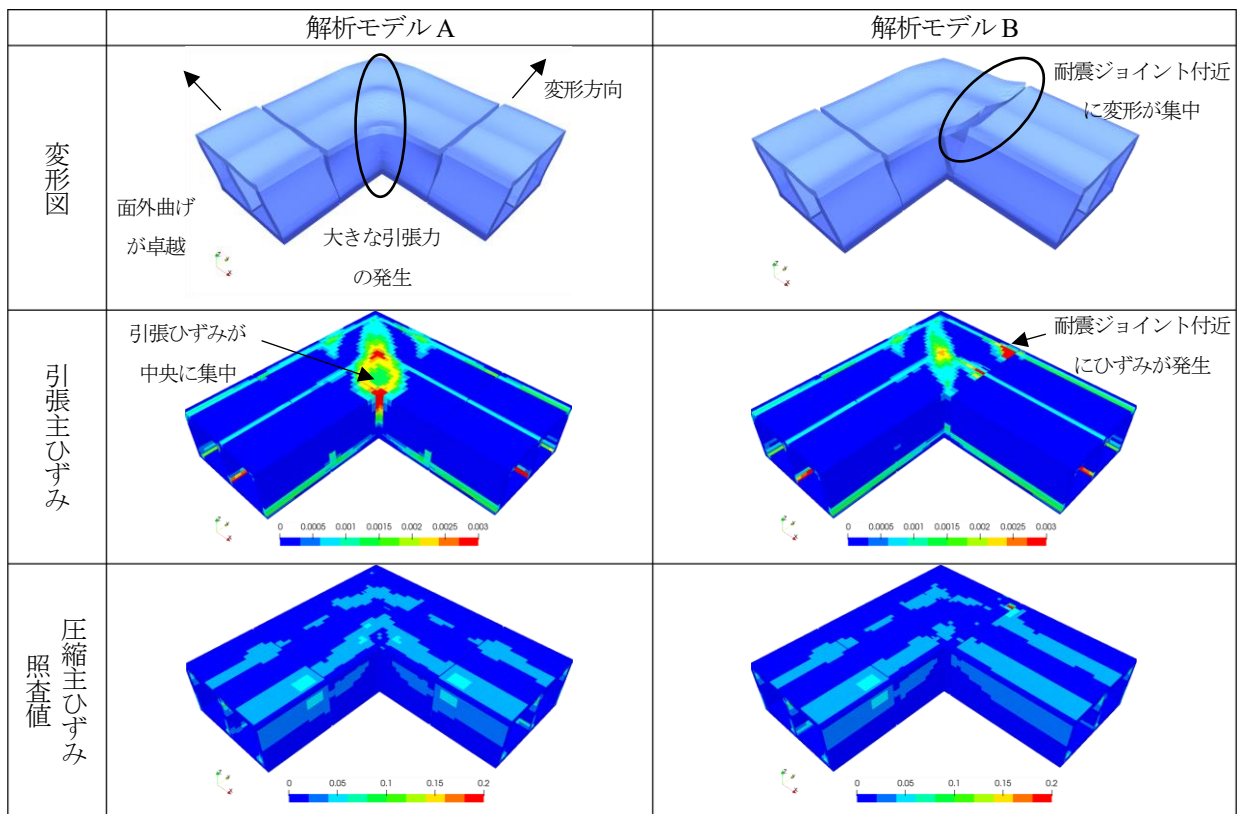


図-10 カルバートの変形、引張主ひずみ、圧縮主ひずみ照査値コンター図

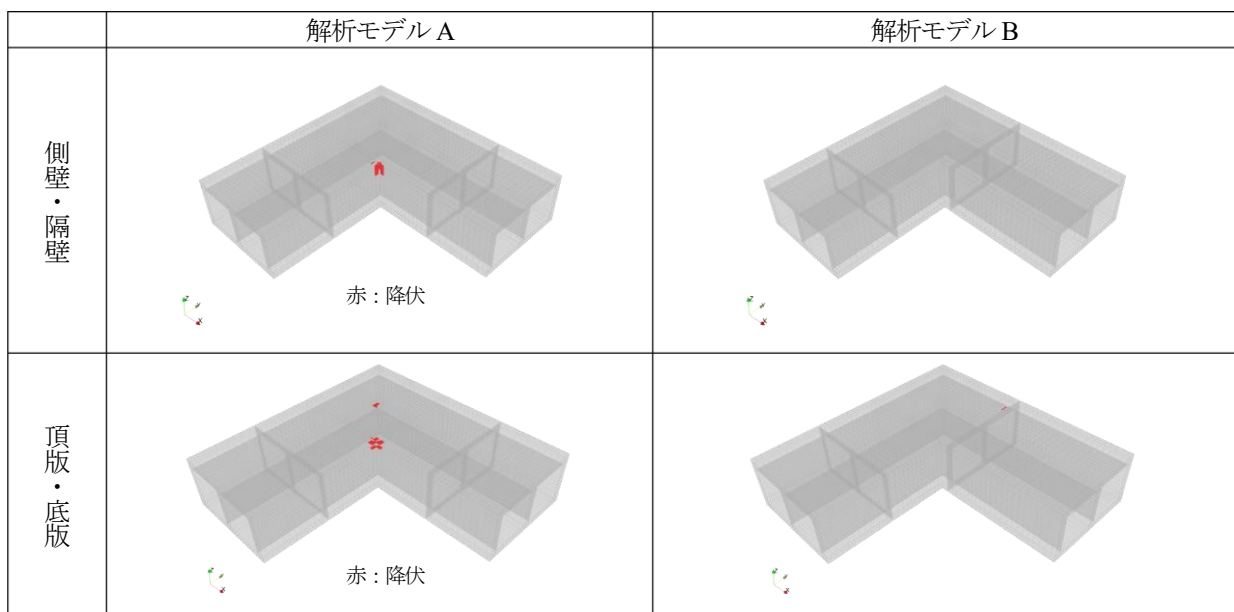


図-11 側壁・隔壁・頂版・底版におけるカルバート軸方向鉄筋の降伏状況

(1) コンクリートのひずみの分布

図-10 に解析モデル A と B から得られた屈曲部付近におけるカルバートの変形とコンクリートの引張主ひずみ、圧縮主ひずみの照査値を示す。なお、これ以降の評価では特筆しない限り載荷レベル 960gal 時点での結果を用いるものとする。圧縮主ひずみの限界値については以下の式に基づいて算出し、解析により得られた主圧縮ひずみ

を各要素の主圧縮ひずみの限界値で除すことにより照査値を算定している。

$$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{c0} + \frac{2G_{fc}}{l_r f'_{ck}} - \frac{f'_{ck}}{E_{c0}} \quad (1)$$

$$G_{fc} = 8.8\sqrt{f'_{ck}} \quad (2)$$

ここで、 ε_{cu} は参照領域の主圧縮ひずみの限界値、 ε_{c0}

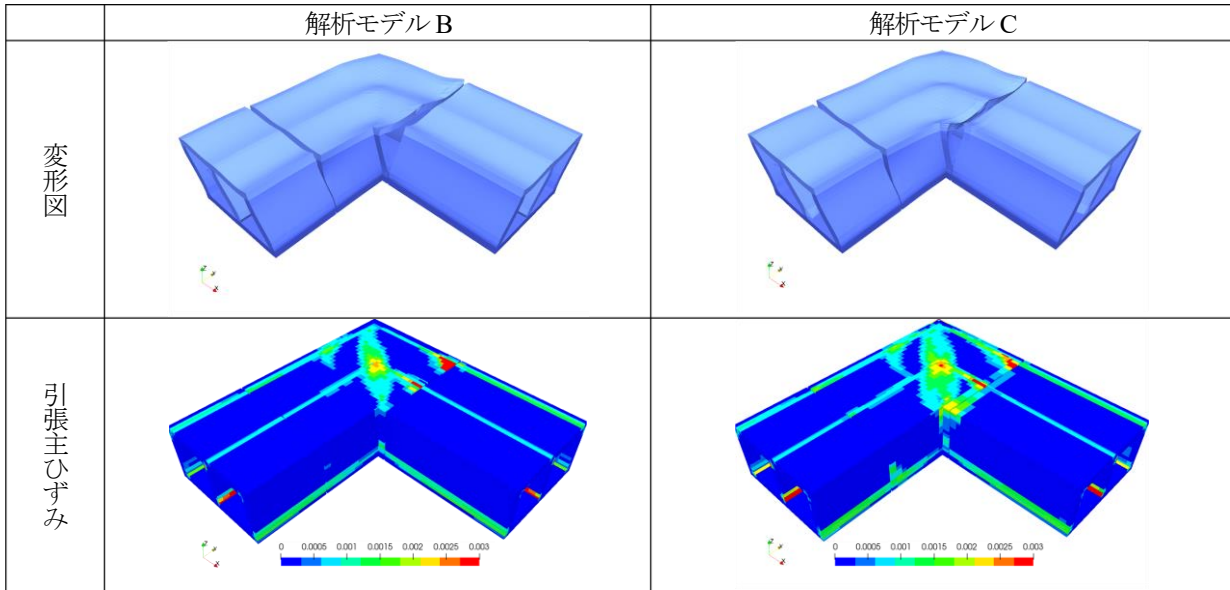


図-12 カルバートの変形, 引張主ひずみコンター図

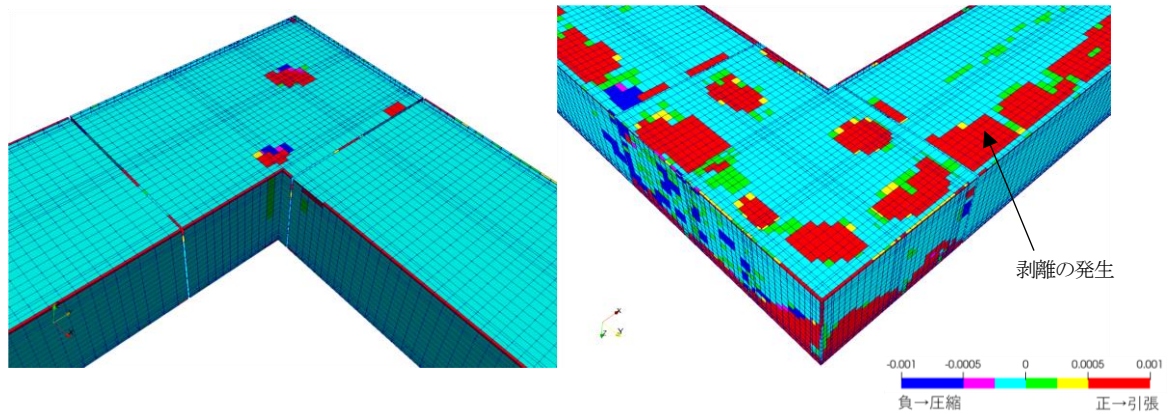


図-13 解析モデルCにおけるジョイントの剥離状況 (左: 頂版側, 右: 底板側)

は一軸圧縮下におけるコンクリートの圧縮強度時のひずみ, l_r は参照長さ[mm], f'_{ck} はコンクリートの圧縮強度の特性値[N/mm²], E_{co} はコンクリートのヤング係数[N/mm²], G_{fc} はコンクリートの圧縮破壊エネルギー[N/mm]である。

今回対象としたボックスカルバートでは、屈曲部付近とそれ以外の部位での損傷パターンが異なる。今回の荷重条件は屈曲部を開く挙動であることから、屈曲部の近傍のカルバート上面付近にはこの引張力による損傷が卓越する。一方、屈曲部以外の部位ではカルバート直交方向の荷重が支配的であり、ここでは壁面の面外曲げが卓越する。したがって、壁面と頂底版の接続部付近に曲げによる損傷が発生する。なお、屈曲部の損傷パターンは耐震ジョイントの位置によって異なり、耐震ジョイントが対称に設置されている解析モデルAでは変形図も左右対称であるが、非対称に設置されている解析モデルBでは屈曲部に近い側の耐震ジョイントが大きく開く変形

状態となることが確認できる。この影響が頂版の引張主ひずみコンターにも表れており、解析モデルAは屈曲部中央付近にひずみが集中しているのに対し、解析モデルBではジョイントの開きによりコンクリートの引張が緩和されるため、頂版の引張主ひずみが低減されている。

一方、圧縮に関しては解析モデルAとBで大きな差は見られない。これは今回の荷重方向が屈曲部を開く方向への荷重であることから、全体的な変形性状は同じであり、圧縮力に違いが見られるのが屈曲部に近い耐震ジョイント付近に限定されることが要因と考えられる。

(2) 鉄筋の引張降伏状況

ボックスカルバート壁面及び頂底版の部材軸に沿った方向の鉄筋における降伏状況を図-11に示す。図中に赤色で示した箇所が降伏の発生している鉄筋となる。解析モデルAでは屈曲部に大きな引張力が集中するため、鉄筋の降伏が発生する。一方、解析モデルBでは耐震ジ

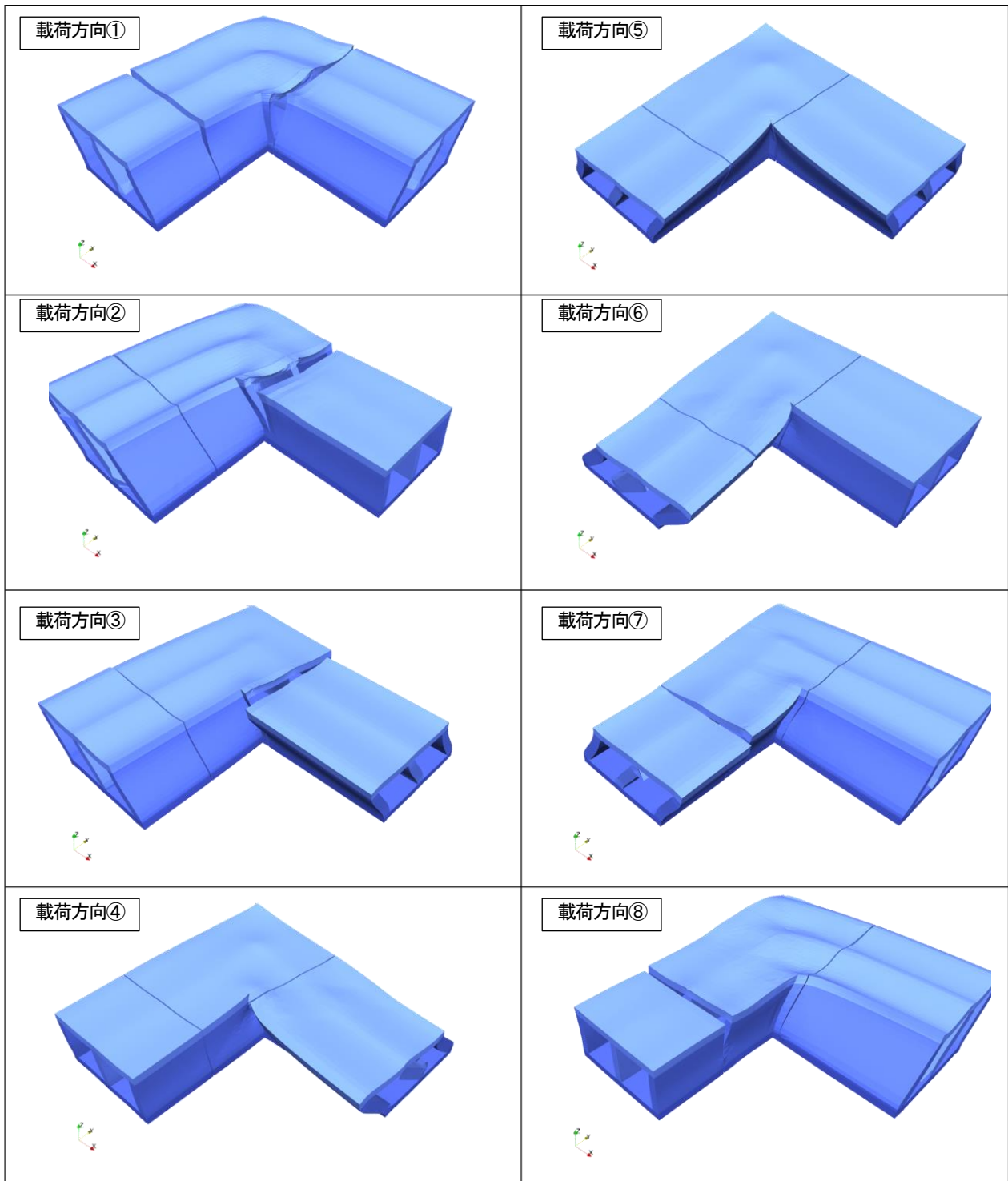


図-14 960gal 時点における載荷方向ごとの変形状態

ジョイントでの変形の吸収が発生することから、屈曲部付近においては鉄筋が降伏に至るほどの引張力が発生しない。

(3) 構造物-地盤間のジョイントの有無による差

図-12 に載荷方向①に対する解析モデル B と C の変形図と引張主ひずみコンターを示す。構造物-地盤間のジョイント導入の目的は地盤の剥離によりカルバートに生

じる引張荷重の低減にあったが、引張主ひずみのコンターには大きな違いは現れなかった。図-13 は構造物-地盤間ジョイントの剥離状況であるが、頂版側における剥離はほとんど発生していない。すなわち、今回の荷重条件においては地盤がカルバートを引っ張る効果は小さく、カルバートに生じる引張力はカルバート自体が開くことにより発生した、変形に起因するものであると言える。

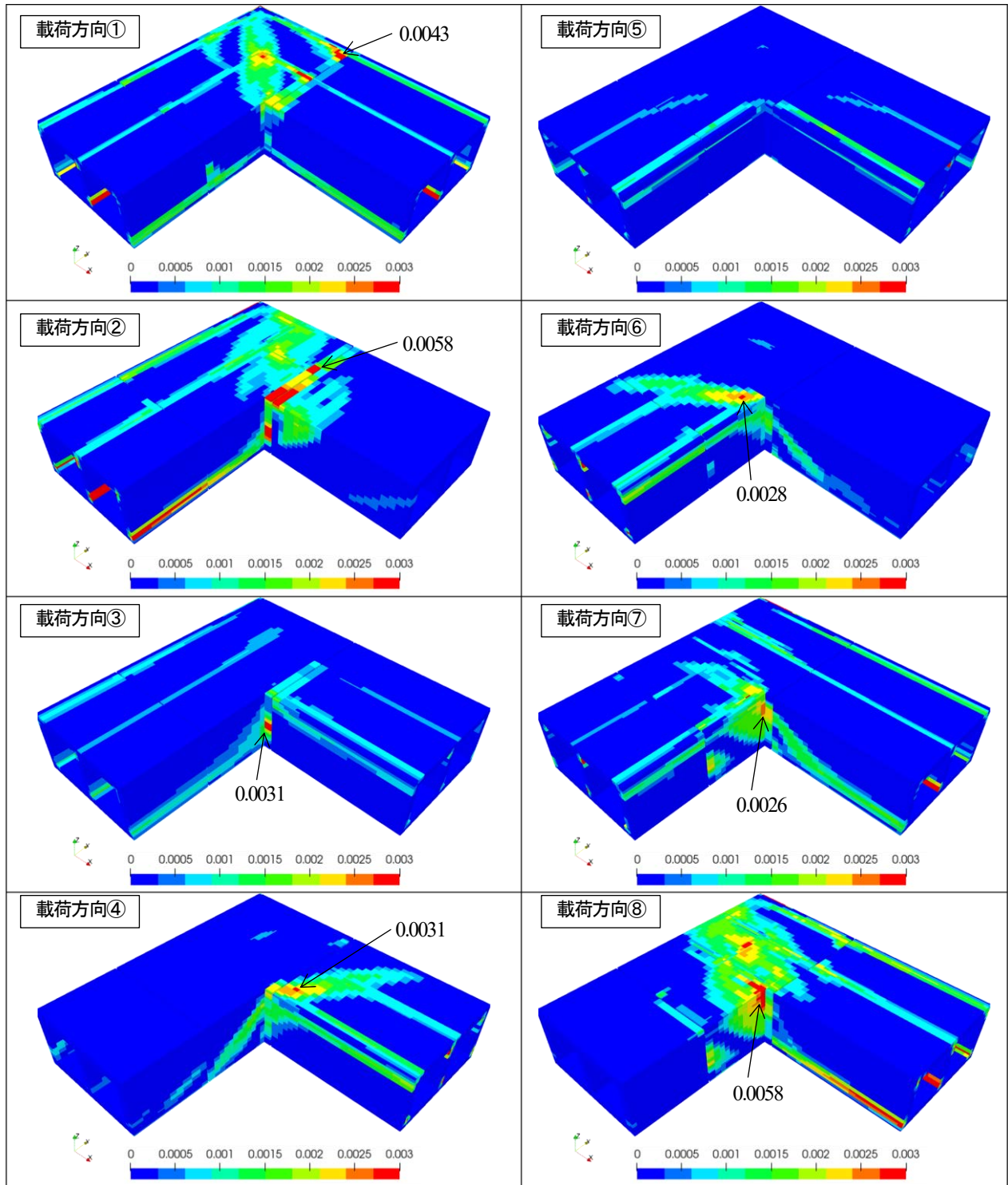


図-15 960gal時点における載荷方向ごとの引張主ひずみ

4. 載荷方向と損傷状態の関係に関する考察

(1) コンクリートのひずみに着目した比較

載荷方向毎の変形図及び引張ひずみ、圧縮ひずみ照査値のコンター図を図-14～図-16に示す。引張主ひずみ、圧縮主ひずみ照査値についてはコンターレンジを統一して描画しているが、屈曲部付近に発生するひずみのうち

コンターレンジ上限近くの応答について、その大きさを直接比較するために、当該要素の応答値を図中に追記している。

本ケースではカルバートの構造と載荷方向の関係から、載荷方向②と⑧、③と⑦、④と⑥がそれぞれ対応する関係にあると見なせる。それぞれの載荷方向の組合せにおけるひずみについて、以下の事項が確認できる。

a) 載荷方向②と⑧について

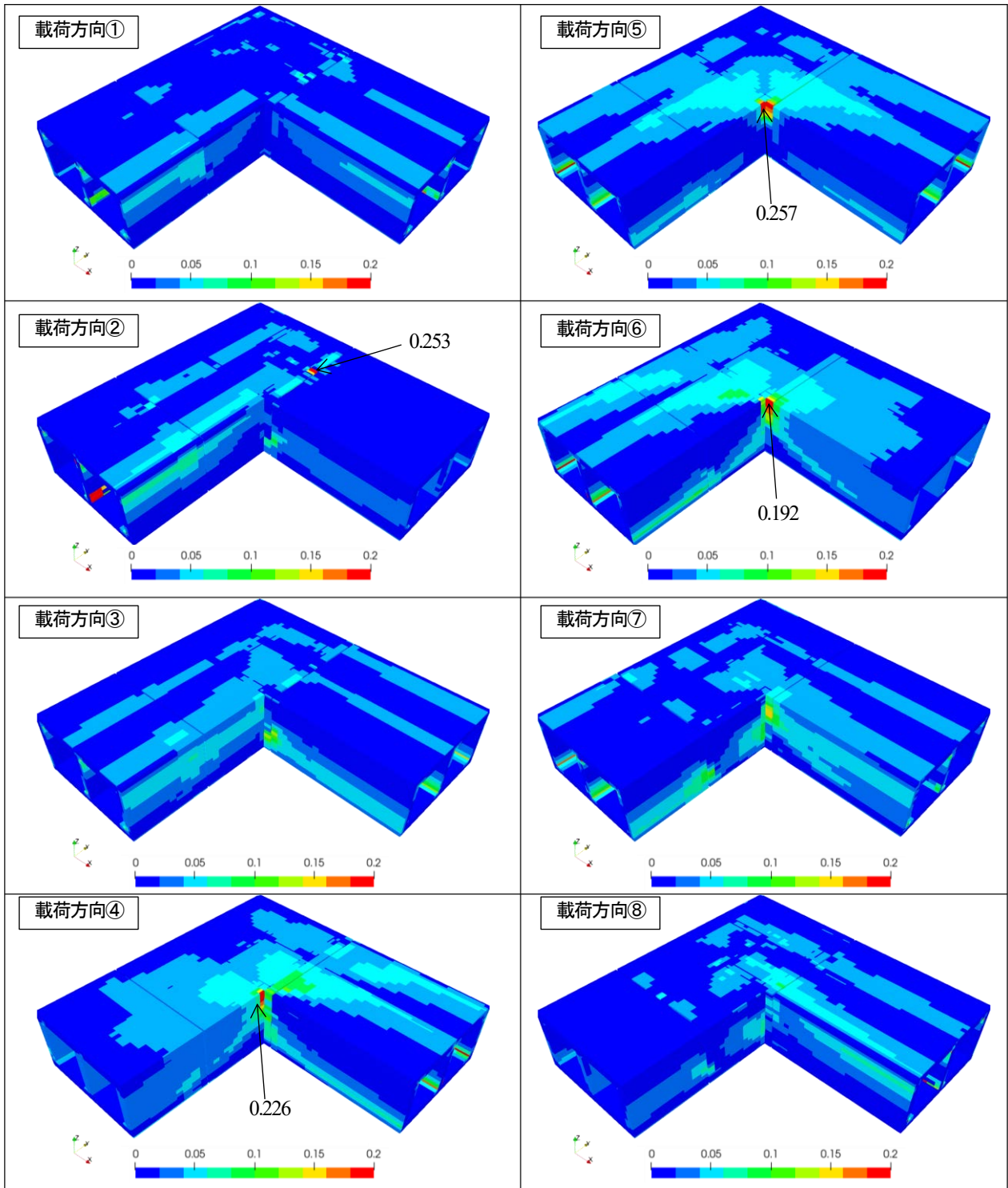


図-16 960gal 時点における荷重方向ごとの圧縮主ひずみ照査値

この2つはともに屈曲部を開く方向に荷重を行うケースとなる。ただし、荷重方向②については直交するジョイントが屈曲部に近接していることから、このジョイントが開くことでひずみを吸収するため、荷重方向⑧に比べカルバート頂版の引張ひずみが低減している。一方、圧縮ひずみに関しては両結果が類似している。これは荷重方向に直交するカルバートの挙動においてはジョイントの位置による影響は小さく、同様な形状の変形を示すためであると考えられる。また、このケースにおける屈

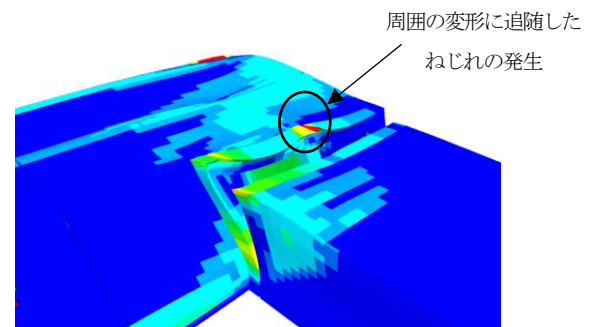


図-17 荷重方向②における圧縮ひずみ照査値と変形状態

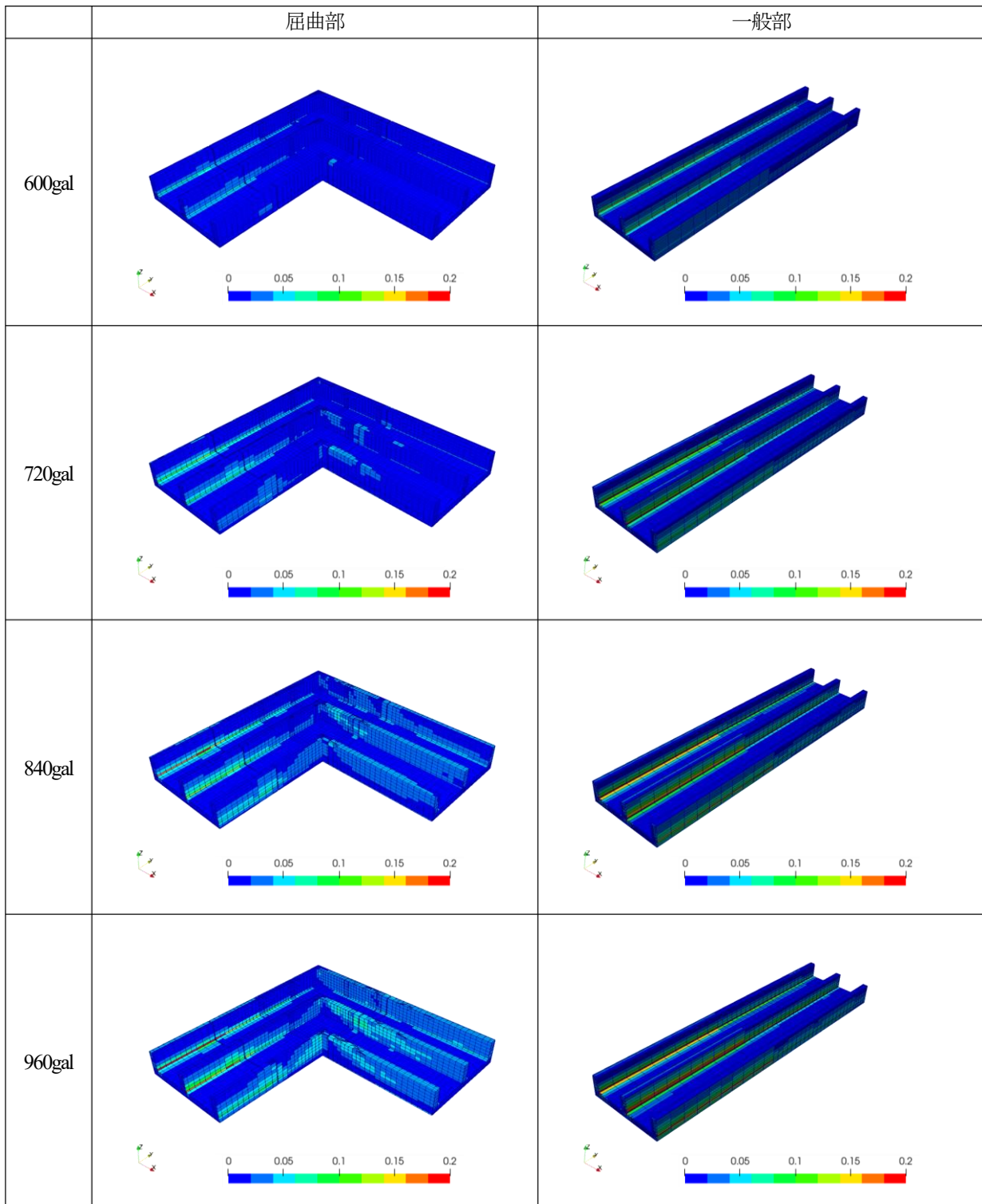


図-18 荷重方向⑥における震度ごとの圧縮ひずみ照査値コンター

曲部の引張主ひずみは約 0.006 と他の荷重方向に比べ大きく、この方向の荷重は屈曲部の引張に対して厳しい荷重方向であると言える。

b) 荷重方向③と⑦について

この2つは屈曲部に対し斜め方向に加力するケースである。このときの荷重方向はいずれのカルバートとも直交しておらず、カルバートをねじるような挙動が卓越する。ジョイントが屈曲部に近い場合、直交するカルバ

ートは当該ジョイント位置で分断され屈曲部への力の集中は小さい。一方、ジョイントが屈曲部から離れている場合は屈曲部からジョイントの間までの頂版、壁面における荷重の負担が発生する。そのため、引張及び圧縮において両ケースの間に差異が発生している。

c) 荷重方向④と⑥について

荷重方向④と⑥はともに屈曲部を閉じる方向に荷重を行うケースとなる。このとき、ジョイントは閉じる方

	屈曲部	一般部
600gal		
720gal		
840gal		
960gal		

図-19 荷重方向⑥における震度ごとの鉄筋損傷コンター（赤：降伏発生）

向への変形が卓越するため、いずれの荷重方向においても屈曲部に力が集中する傾向となる。ゆえに、両ケースにおける引張・圧縮ひずみの発生状況はジョイントの位置によらず類似したものとなる。

屈曲部の圧縮ひずみ照査値については、屈曲部が閉じる方向に変形する荷重方向⑤において最も厳しい値と

なっている。なお、荷重方向②においても大きな照査値が発生しているが、これは図-17に示すように、当該要素の両側の要素の変位に追随したねじれ変形が発生し、これにより要素の圧縮ひずみが大きくなったと考えられる。

(2) 荷重レベル毎に比較した一般部と屈曲部の損傷

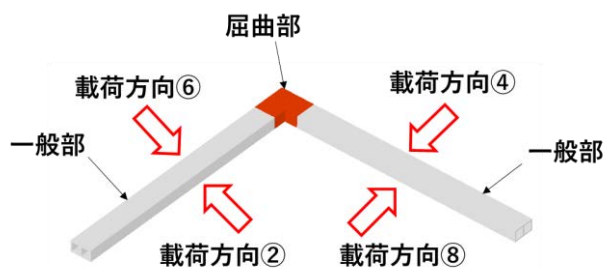


図-20 カルバートにおける一般部と屈曲部の区分

一般部の損傷評価 (図-19 参照) においては、カルバートに直交する方向の荷重を考慮することで最も厳しい評価となることから、荷重方向②④⑥⑧のいずれのケースにおいても同じ評価が可能である。本項では代表して荷重方向⑥の結果を用いた比較検討を実施する。

荷重レベル毎の圧縮ひずみ照査値コンターを図-17 に、鉄筋の損傷コンターを図-19 に示す。一般部と屈曲部の区分は図-20 に示す通りである。図-18 において照査値が 0.2 に達する要素に着目すると、一般部においては荷重レベルが概ね 720gal の時点で多く発生している。一方、屈曲部において照査値が 0.2 に達する要素は、荷重レベルが 840gal を超過した段階で目立ち始める。

図-19 より、一般部では荷重レベルが 840gal の時点において壁面下部の鉄筋が全体的に降伏している。一方、屈曲部においては荷重レベル 840gal 時点では鉄筋の降伏は見られず、荷重レベル 960gal の時点で降伏が確認される。ただし、カルバート交差部の鉄筋については、降伏が見られない。

以上の事項から、カルバートに直交する方向への荷重を実施した場合、一般部の壁面は屈曲部の壁面に比べ小さい地震荷重で損傷することが確認された。

5. まとめ

本研究では地中に設置された屈曲部を有する RC 製のボックスカルバートに対し、耐震ジョイントが非対称に配置された場合及び荷重の荷重方向を変化させた場合における損傷評価を実施した。以下に本研究で確認した事項をまとめる。

- 荷重方向①のケースにおいて耐震ジョイントが対称に設置されている場合、屈曲部に大きな引張ひずみが発生する。一方、耐震ジョイントが非対称である場合は変形が非対称となり、ジョイントにおける引張変位が大きくなることからカルバートに発生する引張ひずみが低減する。
- 構造物-地盤間のジョイントの有無がカルバートの応答に与える影響は小さいことを確認した。これは本研究では静的荷重かつ一方向への荷重に限定していることから主な変形は地盤がカルバートを押しこ

とによるものであるためと考えられる。ただし、動的解析の実施時には構造物-地盤間のジョイントの有無により結果は変わるため、今後の課題である。

- 荷重方向を変化させた解析を実施し、幾何学的な関係から各荷重ケースの対応関係を整理した。耐震ジョイントが非対称であることに起因し、耐震ジョイントを開く方向に荷重するケースでは、対応する荷重ケース間におけるひずみの傾向が異なる。一方、耐震ジョイントを閉じる方向に荷重するケースではジョイントを通じて圧縮力が伝達されるため、ひずみの傾向が類似する。
- ボックスカルバートの一般部と屈曲部について、荷重レベル毎の損傷状態の比較を実施した。その結果、カルバートに直交する方向への荷重を実施した場合、コンクリート・鉄筋とも一般部の壁面は屈曲部の壁面に比べ小さい荷重で損傷することを確認した。これは屈曲部では評価対象の壁面に直交するカルバートが壁面を支える効果を発揮するためであると考えられる。

REFERENCES

- 1) 土木学会原子力委員会：原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針<技術資料>2018年版, pp. 102-187, 土木学会, 2018. [The Nuclear Civil Engineering Committee, JSCE : *Guideline for seismic performance verification of critical civil structures outside nuclear power plants.<Technical documentation>*, pp. 102-187, JSCE, 2018.]
- 2) Saenz, L. P.: Discussion of 'Equation for the stress-strain curve of concrete', by Desayi and Krishnan, *ACI*, Vol. 61, No. 9, pp. 1229-1235, 1964.
- 3) Park, R., Priestley, M. J. N, and Gill, W. D. : Ductility of square-confined concrete columns, *Journal of the Structural Division, ASCE*, No. ST4, pp. 930-950, 1982.
- 4) 佐藤稔雄, 白井伸明他：鉄筋コンクリート造耐震壁の弾塑性性状に関する研究 (その6) (その7), 建築学会大会, pp. 1615-1618, 1978. [Sato, T., and Shirai, N.: Elasto-plastic behavior of RC shear walls, *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, C-2, AIJ*, pp. 1615-1618, 1978.]
- 5) Al-Mahaidi, R.S.H.: Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Members, Report 79-1, Dep. of Structural Engineering, Cornell Univ., 1979.
- 6) Willam, K. J., and Warnke, E. P. : Constitutive model for the triaxial behaviour of concrete, *Proceedings of IABSE Seminar on Concrete Structures subjected to Triaxial Stress*, Bergamo, Italy, Vol. 19, pp. 1-31, 1974.
- 7) Noguchi, H., Kashiwazaki, T., and Miura, K. : Finite element analysis of reinforced concrete joints subjected to multi-axial loading, *Proceedings of the Thomas T. C. Hsu Symposium on Shear and Torsion in Concrete Structures, AP-265, ACI*, pp. 223-244, 2009.
- 8) FrontISTR 研究会 : FrontISTR ,

A STUDY ON THE EFFECT OF LOADING DIRECTION ON DAMAGE OF RC CULVERTS WITH BENDS

Yoshiyuki SASAKI, Hideki NAGAI, Takahiro TSUTSUMIUCHI and
Yuta MITSUHASHI

In this study, we attempted to evaluate the behavior of RC culverts with bends buried underground when one of the seismic joints is installed asymmetrically so that it is close to the bend and when the loading direction is changed. As a result, it was confirmed that when the seismic joints are asymmetrical, the damage to the RC culvert body is suppressed by concentrating the deformation on the seismic joint located close to the bend. In addition, it was confirmed that no significant damage occurred near the bend regardless of the loading direction, while the most severe damage was observed on the wall surface of the general section perpendicular to the loading direction.