

中壁に開口を有する道路ボックスカルバートの 地震時耐荷特性の評価に関する基礎的検討

八ツ元仁¹・谷口哲憲²・星隈順一³

¹正会員 阪神高速道路㈱ 技術部技術開発課（前独立行政法人 土木研究所CAESAR）（〒541-0056 大阪府中央区久太郎町4-1-3）

²正会員 ジオスター㈱ 技術部技術開発チーム（前独立行政法人 土木研究所CAESAR）（〒112-0002 東京都文京区小石川1-28-1）

³正会員 国立研究開発法人 土木研究所CAESAR （〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

1. はじめに

ボックスカルバートは様々な用途で用いられてきており、道路用施設としても数多く用いられてきている。このような道路用施設としてのボックスカルバート（以降、道路ボックスカルバートと呼ぶ）の使用事例として代表的なものは、盛土内に設置される横断道路が挙げられる。

近年、この道路ボックスカルバートについては、構造寸法や構造形式が多様化してきており、例えば構造形式については、図-1に示すように従来の1連の構造形式のものから、2連、3連といった多連の構造形式のものまで現れ始めている。この多連の構造形式（以降、多連形式と呼ぶ）の道路ボックスカルバートでは、写真-1に示すように内空断面を車道として使用するだけでなく、歩道としても使用する事例も存在する。このような内空断面を歩道として使用する多連形式の道路ボックスカルバートでは、写真中に示すように中壁に開口を設ける事例が数多く存在する。この中壁の開口については、歩道部を利用する歩行者への圧迫感の軽減や事故などの突発時における避難口としての活用など様々な理由から設けられている。このことから、中壁に設ける開口は、内空断面を歩道として用いる道路ボックスカルバートの構造的な特徴の一つであるとも言える。

一方で、このような中壁に開口がある構造の耐震設計法については、開削トンネルといったその他のRC製地中構造物の耐震設計基準類（例えば1）、2）にも明記されておらず、現時点では確立された手法が存在していないと言える。そのため、このような開口を有

するRC製地中構造物の耐震設計では、開口による部材の剛性低下を簡便に考慮した2次元骨組み解析（以降、修正2次元骨組み解析と呼ぶ）や3次元FEM解析等の解析手法を、設計者の判断により選択して用いられているというのが現状である。2次元骨組み解析はトンネルのような奥行方向に断面変化が無い構造物に用いることができる手法であり、開口による部材の剛性低下を考慮した修正2次元骨組み解析では開口まわりで3次元的な応力変化が生じることが予想される構造物に適用できるかどうかについては不明である。仲山らの研究³⁾では、開削トンネルの側壁に開口を設けた場合の構造解析に関する解析的研究が行われており、改良を加えた2次元骨組み解析を用いると3次元FEM解析とほぼ同じ結果が得られることが報告されている。しかし、開口の位置が側壁であることや限定的な構造条件下での結果であることから、この知見をそのまま用いることが

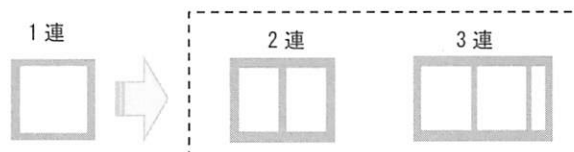


図-1 道路ボックスカルバートの構造形式



写真-1 中壁に開口が設けられている状況

できるかどうかについては、現時点では言及することが難しいと考える。部材に開口を有するRC製地中構造物の耐震性能に関する研究自体がそれ程多くないことを考えると、この種の研究については今後まだまだ必要であり、さらなる知見の蓄積が望まれるところである。

そこで、本検討では、中壁に開口を有する道路ボックスカルバートの耐震設計を行う際に把握しておかなければならない地震時耐荷特性について更なる知見を蓄積することを目的に、3次元FEM解析によるプッシュオーバー解析を実施した。本稿では、その検討結果について報告を行うものである。

2. 数値解析の概要

(1) 解析の概要

ボックスカルバートの中壁に設けられる開口は、過去の実績を調べるとその大きさや形状も様々である。開口を設けた場合の補強対策としては、図-2(a)に示すように開口により配置できなかった主鉄筋を開口の無い部分に配置する方法や、図-2(b)に示すように開口周りに補強鉄筋を配置し開口の補強を行う方法などが行われており、設計者の判断によ

りその対応が決められている。このように、構造的に様々な様式を持つ開口を有する中壁の耐荷性能を評価するには、奥行方向に同じ構造である場合に適用することができる2次元骨組み解析をそのまま用いることは難しいと考えられる。そこで、本検討では奥行方向に構造的な変化がある場合でもその影響について評価することができる3次元FEM解析を実施することとした。RC構造物を対象とした3次元FEM解析を行う場合は、鉄筋の効果をコンクリート要素内に取り込む分散鉄筋の考え方に基づく解析手法も存在するが、上述のように開口周りに複雑に配置された補強鉄筋の効果も精度良く評価するため、埋め込み鉄筋要素を用いた。

(2) 解析モデル

図-3に本解析における対象構造の断面概要図を示す。本検討では、開口を有する中壁の地震時耐荷特性を評価することが目的であることから、2連ボックスカルバートの中壁を中心としたある一定の範囲を解析対象とした。解析対象の構造は、全幅が約15m、土被りが約1.5mの2連ボックスカルバートとし、解析対象範囲は常時状態におけるモーメント分布を基に、頂版において中壁近傍にて曲げが卓越していた範囲を対象として設定した。

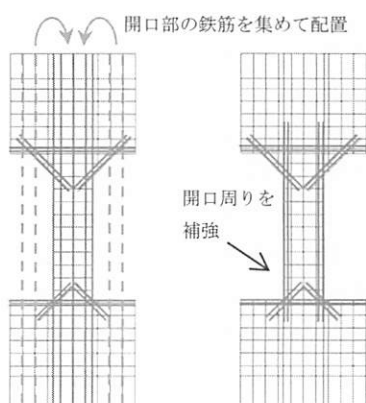


図-2 開口周りの補強事例（側面配筋図）

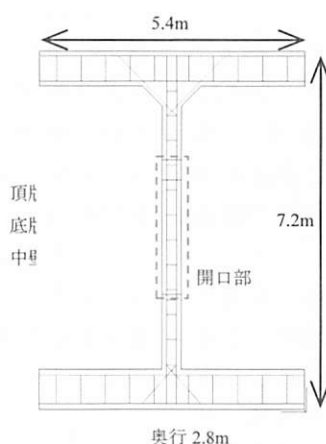


図-3 断面概要図

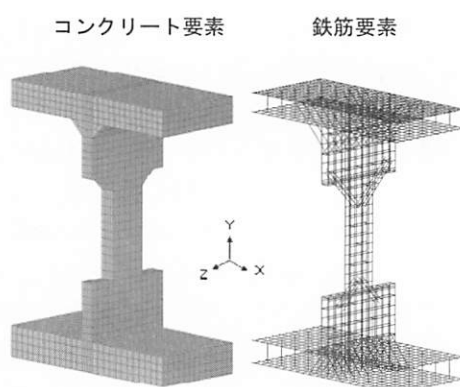


図-4 解析要素モデル

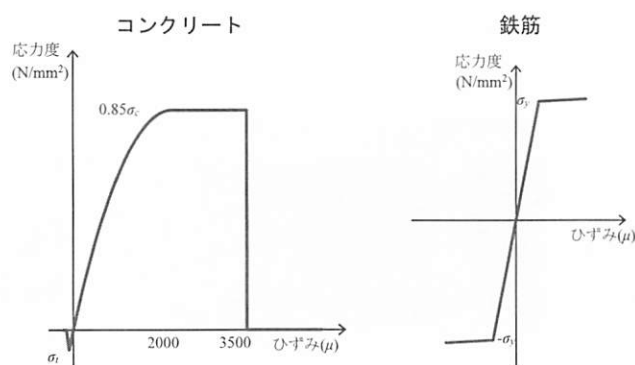


図-5 解析に用いた材料構成則

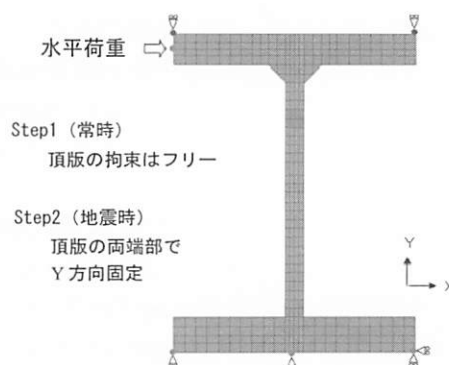


図-6 解析における境界条件

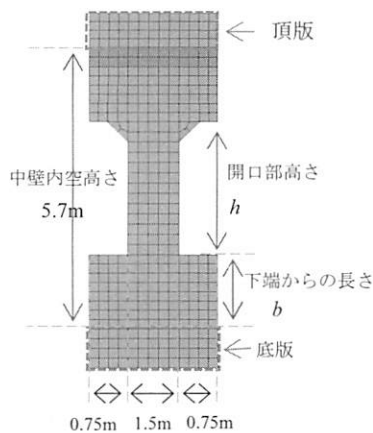


図-7 中壁開口部の概要図

図-4に解析での要素モデル、図-5に材料構成則を示す。コンクリート要素は6面体の弾塑性性ソリッド要素とし、鉄筋はパイリニア型の埋め込み鉄筋要素とした。本検討ではコンクリートと鉄筋間の付着すべりは考慮せず、完全剛結とした。コンクリートの応力-ひずみ関係は道路橋示方書Ⅲ編に示す2次曲線モデル⁴⁾を使用し、3500 μ に達した後、応力が0となるように設定した。

(3) 荷重条件および境界条件

図-6に本解析における荷重条件および境界条件を示す。本解析では、地震時に道路ボックスカルバートが受ける荷重状態を再現できるような荷重条件および境界条件を設定した。本解析では、中壁が地震時に大きなせん断変形を受けることを想定し、頂版に対して一方向載荷解析（プッシュオーバー解析）を行った。荷重については、頂版の左端部に強制変位を与えた。また、境界条件にあたる支持条件としては、X方向（水平方向）は底版の右端部の1点で固定し、Y方向（鉛直方向）は、底版の両端部および中壁の直下部の3点で固定した。地中内での道路ボックスカルバートの支持状態は、地盤ばねによる支持が現実状態に近く望ましいが、本検討での目的はあくまで中壁部の地震時耐荷特性である水平抵抗力の評価であることから、底版両端部および中壁の直下にあたる底版中央部の3点でのピン支持としても水平抵抗力に大きな影響を与えないと判断して、この支持条件とした。頂版でのY方向の支持は、常時状態での自重による頂版の沈下を考慮するため、1ステップ目で常時状態の再現として頂版の境界条件をフリーとし計算し、2ステップ目で地震時水平力の載荷状態として、頂版の両端部でY方向を固定して頂版を水平方向にスライドさせるように支持した。

表-1 解析検討ケース

ケース名	開口面積率 (%)	開口高さ (m)	下端からの長さ (m)	備考
N	0	—	—	開口なし
タイプA	A1	28.4	2.7	1.5 開口位置中央
	A2	17.9	1.7	2.0 開口位置中央
	A3	28.4	2.7	2.0 開口位置頂版側に偏心
タイプB	B1	28.4	2.7	1.5 開口位置中央
	B2	17.9	1.7	2.0 開口位置中央
	B3	28.4	2.7	2.0 開口位置頂版側に偏心

(4) 解析検討ケース

図-7に中壁開口部の概要を、表-1に本解析での検討ケースを示す。2. (1)の中でも述べたように、中壁における開口の形状や寸法だけでなく、開口に対する補強方法も様々である。中壁に開口を設けた実在する道路ボックスカルバートの構造図を収集および整理した結果、本検討では、開口面積率（開口面積が中壁の面積に占める割合）、開口の位置、開口部に対する補強方法に着目し、これら項目をパラメータとした解析を行った。表中に示すように、図-2で示した2種類の補強タイプそれぞれにおいて開口面積率と開口の位置を変えた3ケース、そしてそれらの比較対象として中壁に開口が無い場合の全7ケースについて解析を行った。

3. 解析結果

(1) 水平変位-水平荷重の関係

図-8にタイプA、タイプBそれぞれの水平変位-水平荷重の履歴曲線図を、表-2に各イベント時におけるケース毎の水平変位、水平荷重の値を示す。なお、図中の○は初降伏時を、●は最大荷重時を、×はコンクリートの圧縮ひずみが3500 μ に達した時を示す。ここに示す初降伏時とは、本解析でモデル化したすべての主鉄筋の中で、最初に降伏が生じた時点のことを表す。また、今回着目したコンクリートの圧縮ひずみが3500 μ に到達した時については、本解析で設定した応力-ひずみ関係モデルにお急変点となるひずみであることから、そのような解析モデル上の急変点が中壁の耐荷力の評価への影響を確認するために着目したものである。したがって、コンクリートの圧縮ひずみが3500 μ に到達した時に中壁

がある特定の状態になるということが明らかになっているわけではないが、この解析ではコンクリートの圧縮ひずみが3500 μ に到達した時を便宜的に終局時と呼ぶこととする。

図-8(a)に示すように、タイプAでの水平変位－水平荷重の履歴曲線では、水平荷重の大きさがケースA2、ケースA1、ケースA3の順となった。初降伏時では、いずれのケースも開口の無いケースであるケースNとほとんど差が生じなかったが、最大荷重時においてはケースA2ではケースNに比べて10%程度の増加、ケースA1では5%程度の増加、ケースA3では5%程度の減少というように、開口による影響が現れた。終局時においては、いずれのケースもケースNの水平荷重より大きく、ケースA2ではケースNに比べて水平荷重が約20%も増加する結果となった。一方で、各イベント発生時における水平変位について見てみると、初降伏時ではケースA1で約40%、ケースA3で約60%増加したのに対して、終局時にはケースA1が10%程度、ケースA3が30%程度減少する結果となった。開口面積が広いケースA1とケースA3では、初降伏時に水平荷重が開口の無いケースNとほとんど同じで水平変位だけ大きくなっている

ということから、中壁の剛性の低下が顕著に表れたと言える。終局時においても、開口面積が広いケースであるケースA1とケースA3で水平荷重が減少しており、特に開口位置が偏心しているケースA3でのその低下の割合は大きかった。このため、ケースA1とケースA3では、いわゆるポストピーク時の変形性能の低下が確認された。

次に、図-8(b)に示すように、タイプBでの水平変位－水平荷重の履歴曲線では、水平荷重の大きさがケースB2、ケースB1、ケースB3の順となるとともに、水平荷重はどの段階においても開口が無いケースNより小さくなった。主鉄筋の初降伏時では、水平荷重はいずれのケースもケースNに比べて5%程度減少し、最大荷重時ではケースB2では5%程度、ケースB1では10%程度、ケースB3では15%程度の減少と、各ケースでの水平荷重の低下が顕著に表れた。終局時には、ケースB2はケースNとほぼ同じ、ケースB1およびケースB3はケースNに比べて10%程度減少する結果となった。各イベント発生時における水平変位は、ケースB1およびケースB3の初降伏時、ケースB3の終局時を除けばケースNでの水平変位とほぼ同じ値となった。開口面積が広いケースB1とケ

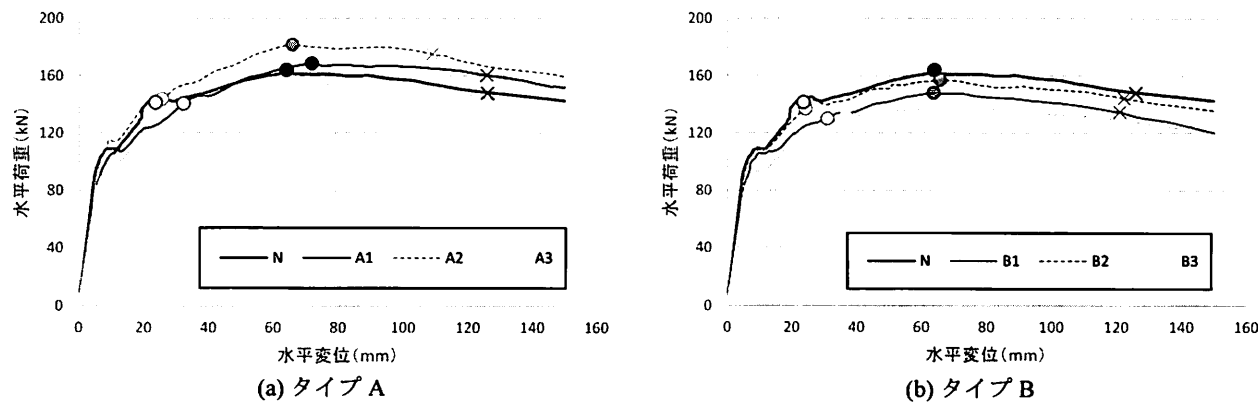


図-8 水平荷重－水平変位の関係

表-2 各ケースにおけるイベント時の水平変位・水平荷重

解析ケース		ひび割れ		鉄筋降伏		最大荷重		終局	
		δ (mm)	P(kN)	δ (mm)	P(kN)	δ (mm)	P(kN)	δ (mm)	P(kN)
N		4.0	76.6	23.6	141.5	64.0	164.1	126.0	148.0
タイプ A	A1	4.8 (1.20)	74.3 (0.97)	32.2 (1.36)	140.8 (1.00)	71.8 (1.12)	168.7 (1.03)	125.8 (1.00)	160.5 (1.08)
	A2	4.2 (1.05)	75.1 (0.98)	25.0 (1.06)	141.7 (1.00)	65.8 (1.03)	181.8 (1.11)	109.0 (0.87)	175.1 (1.18)
	A3	4.6 (1.15)	69.2 (0.90)	38.6 (1.64)	141.0 (1.00)	67.4 (1.05)	155.7 (0.95)	90.0 (0.71)	154.0 (1.04)
タイプ B	B1	4.8 (1.20)	74.3 (0.97)	31.0 (1.31)	130.2 (0.92)	63.8 (1.00)	148.2 (0.90)	121.2 (0.96)	134.9 (0.91)
	B2	4.4 (1.10)	78.0 (1.02)	24.2 (1.03)	137.9 (0.97)	65.8 (1.03)	157.0 (0.96)	122.5 (0.97)	144.3 (0.98)
	B3	4.8 (1.20)	71.6 (0.93)	36.6 (1.55)	131.5 (0.93)	67.8 (1.06)	136.6 (0.83)	95.2 (0.76)	134.3 (0.91)

* () 内の数字はケースNとの比較値を示す

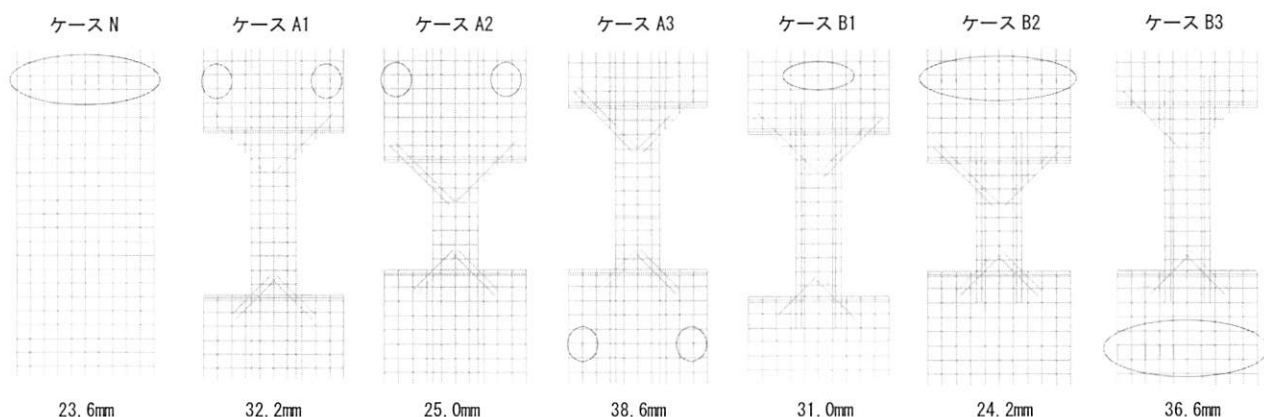
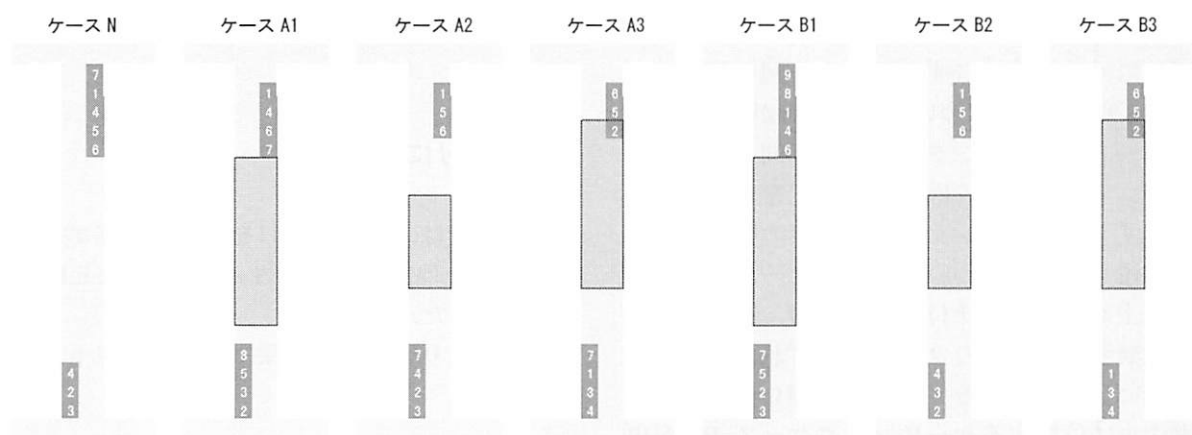


図-9 主鉄筋の降伏箇所



■：主鉄筋の降伏箇所（囲いの中の番号は当該箇所での降伏が生じた順番を示す）

□：開口部がある中壁の位置

図-10 主鉄筋の降伏箇所とその発生順序

ケースB3では、初降伏時に水平変位がケースA1で30%程度、ケースA3で60%程度増加した。水平荷重が開口の無いケースNとほとんど同じであることから、タイプAでの結果と同様、中壁の剛性の低下が現れたと考えられる。また、終局時においては、開口面積が広く開口の位置が偏心しているケースB3での変形性能の低下が現れており、タイプAでのケースA3と同じような傾向を示す結果となった。

(2) 塑性化の箇所とその発生順序の分析

図-9 に各ケースの主鉄筋の初降伏箇所を、図-10 に各ケースの主鉄筋の降伏箇所とその発生順序を、図-11 に終局時における各ケースのひずみコンターを示す。図-9 における主鉄筋の初降伏箇所は、図中で赤色の○囲いを行っている。また、図-11 におけるひずみ値は、正側が引張を、負側が圧縮を表すものとする。

主鉄筋の初降伏は、開口の無いケース N で中壁の上端部（頂版側）で生じており、ケース A1、ケース A2、ケース B1、ケース B2 でも同様に中壁の上端部で生じた。また、開口が頂版に偏心しているケ

ース A3、ケース B3 では初降伏が中壁の下端部（底版側）で生じた。ケース A1、ケース A2、ケース B1、ケース B2 の開口が壁の中央に位置するケースであることを考えると、主鉄筋の初降伏の位置は開口の位置に大きな影響を受けることがわかった。また、タイプ A にあたるケース A1 からケース A3 までのケースでは、主鉄筋の初降伏は開口の直上もしくは直下にあたる主鉄筋の配筋密度が比較的低い箇所で生じた。一方で、タイプ B にあたるケース B1 からケース B3 までのケースでは、主鉄筋の配筋密度が比較的高い中壁の中央部を中心に主鉄筋の降伏が生じる結果となった。

図-10 には中壁における主鉄筋の降伏箇所とその発生順序を示す。なお、本解析の結果では、頂版および底版での主鉄筋において、いずれのケースも降伏が生じなかった。図中に示すように、各ケースにおける主鉄筋の降伏は中壁の両端部で生じており、いずれのケースも概ね同じ範囲で降伏が生じていた。初降伏の後の 2 番目の降伏箇所は、上端部が降伏すると下端部、下端部が降伏すると上端部というように、いずれのケースもある一方の端部だけで降伏が

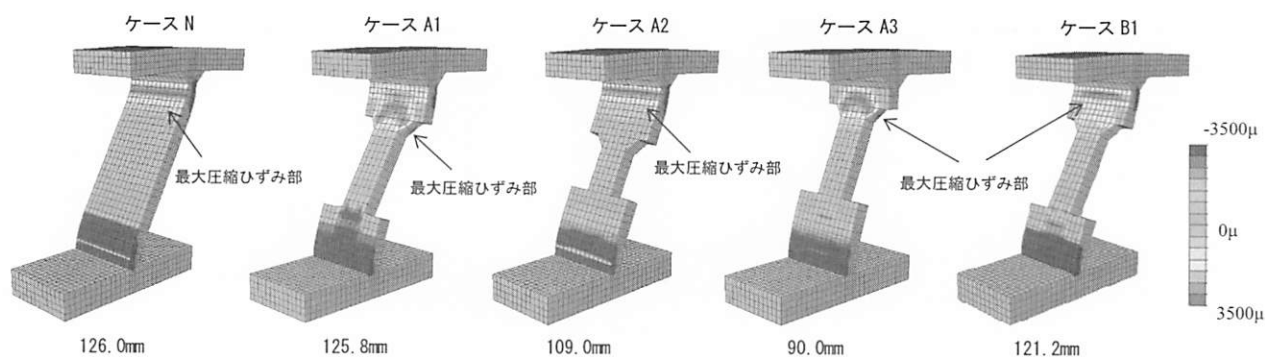


図-11 終局時におけるひずみコンター図

生じるのではなく、逆側の端部を含めた両端部において降伏が生じた。

図-11 には終局時のひずみコンター図を示す。ケース B2、ケース B3 については、前者がケース A2、後者がケース A3 のコンター図とほぼ同じ結果となったため、当該ケースの図中での表記を省略した。図中に示すとおり、コンクリート要素の圧縮ひずみ 3500μ に達した箇所については、各ケースの結果が①中壁の上端側のハンチ付け根部近傍、②開口部直上の変化断面の位置、の 2 箇所のいずれかとなった。開口の無いケースであるケース N や開口面積が小さく中壁中央に位置するケース A2 やケース B2 が中壁上端側のハンチ付け根部で終局状態に達したが、開口面積が大きいケース A1、ケース A3、ケース B1、ケース B3 では開口部直上の変化断面部で終局状態となった。

(3) 解析結果に対する考察

開口を有する中壁の耐力は、開口面積だけでなく開口の位置によっても影響を受けることが本解析からわかった。同じ開口面積でも開口の位置が頂版側に偏心すると耐力や変形性能が低下することから、開口を設ける場合は適切な手法により耐力等に与える影響を十分に考慮することが必要と考えられる。また、開口に対する補強方法の違いが耐力に影響を及ぼすことから、補強を行う場合にも上記と同様に十分な検討を実施してから、対策を講じる必要があると考えられる。

本解析では、解析対象として中壁とその周辺部位という限定した部材での解析を行っているため、道路ボックスカルバート全体系での耐力特性については言及できていない。中壁における耐力特性の変化が、構造全体系での耐力特性に及ぼす影響について

は不明であるため、今後は全体系解析による検討を行い、知見を蓄積していくことが必要かと考える。

4. おわりに

本検討では、中壁に開口を有する道路ボックスカルバートの地震時耐力特性の評価を 3次元 FEM 解析により行った。

本検討より得られた結果について、以下にまとめる。

- ・開口を有する中壁の耐力は、開口部の面積だけでなく開口の位置によっても影響を受ける。
- ・開口が頂版側に偏心したケースでは、ポストピーク時における変形性能が低下する。
- ・開口に対する補強方法により耐力は大きく変わり、主鉄筋の降伏する範囲にも影響が現れる場合がある。

参考文献

- 1) 阪神高速道路株式会社：開削トンネル設計指針，平成 20 年 10 月
- 2) 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・マニュアル，2005 年 6 月
- 3) 仲山貴司，津野究，牛田貴士，焼田真司，室谷耕輔：既設開削トンネル側壁の開口に関する構造解析手法の検討，土木学会論文集 F1（トンネル工学），Vol.71，No.1，pp.29-40，2015。
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編，2012。