

論文 周辺地盤と躯体間の相互作用変化を考慮した中柱式地中RCカルバートの損傷機構に関する検討

米津 薫*1・千々和 伸浩*2・土屋 智史*3

要旨：中柱を有する1層2径間の地中ボックスカルバートを対象に、材料と構造応答を連成した3次元マルチスケール解析により、建設施工時からの長期変形挙動と、それが地震時挙動に及ぼす影響について評価することを試みた。打設から材齢30年までの長期挙動解析では、躯体内側の乾燥にともなうひび割れ損傷が表層で進展し、土圧分布にも明確な経時変化が現れたが、いずれも三次元的な応答となっており、構造形式の影響が認められた。材齢30年時に時刻歴地震応答解析を実施した結果、地震前の損傷により中柱の層間変形角が有意に変化しており、長期挙動を考慮することで地震時応答に差異が生じる可能性が示唆された。

キーワード：中柱式地中ボックスカルバート、材料-構造連成解析、平均化損傷指標、時空間的相互作用

1. はじめに

近年、数値解析技術の進展により、水和反応から長期におよぶ材料挙動と、ひび割れ発生から破壊へと至る構造挙動を連成して、相互の影響を実構造スケールで直接評価できるようになってきている¹⁾。土木構造物の設計においては、コンクリートの収縮やクリープは断面一律な値として考慮することが一般的であるが、材料挙動と構造挙動を連成する解析手法を用いれば、部位ごとの状況に応じて、より詳細に構造物の応答を評価することが可能となる。

数十年の時間スケールで構造物の応答を見た場合に予期せぬ変形が生じる場合があり、例えば、PC長大橋梁の過大なたわみ²⁾や地中カルバートの遅れせん断ひび割れ³⁾の事例が報告されている。これらは、構造物中の水分状態が断面内で大きく異なる場合に生じている点で共通している。特に地中構造物では、外面が地下水による水分供給により飽和に近い湿潤状態にありながら、内面は通気による強い乾燥に晒されることで、断面内で水分状態が著しく異なる状況が生じる場合があり、従来想定されていた挙動と差異が生じる可能性が指摘されている^{3),4),5),6)}。また、過去の震災では中柱がせん断破壊することで倒壊に至った事例⁷⁾もあり、既設地中構造物の安全性確保のためには、諸現象の相互作用に依存して決定される地下構造物の状態を踏まえながら、現有性能を評価する必要がある。上述の遅れせん断ひび割れの事例³⁾は、1層1径間の地中カルバート形式であり、上床版に生じたひび割れが地震時挙動に及ぼす影響は、それ程大きくないことが想定されるが、すべての構造形式や環境条件について同一の結論を導くことは早計であると考えられる。

本検討では、縦断方向に不連続な構造形式となる中柱を有する1層2径間の地中ボックスカルバートを対象とし、新設のみならず耐震補強を含めた維持管理にも資する現象の把握を目的に、建設施工時からの長期変形挙動と、それが地震時挙動に及ぼす影響について、数値解析的に検討する。解析ツールには、東京大学コンクリート研究室で開発中の3次元マルチスケール解析 *DuCOM-COM3*¹⁾を用いる。

2. 解析対象のモデル化

2.1 解析モデルの概要

検討対象は、「トンネルライブラリー開削トンネルの耐震設計」⁸⁾に例示されている、幅9.5m、高さ5.62m、4.0m毎に0.5m×2mの中柱を有する1層2径間地中ボックスカルバートとする(図-1)。躯体および地盤を3次元ソリッド要素でモデル化し、躯体と地盤の境界には剥離、すべりを考慮する接合要素を設ける。地盤のモデル化範囲は、地震時に躯体の影響が及ばない程度として、鉛直方向を地表面からGL.-20.7mまでとし、水平方向には10B程度(B:躯体幅)とする。縦断方向のモデル化は4.0mとする。配筋に応じて要素分割を行い、Tension Stiffening/Softeningを考慮する。

2.2 材料物性

(1) コンクリート配合

基準圧縮強度24MPa相当を想定し、表-1の配合を設定する。適用する解析手法では、コンクリートの強度や剛性は、時々刻々部位ごとに算定される。

(2) 鉄筋

鉄筋の仕様はSD295とし、降伏強度は295MPa、ヤング係数は210GPaとする。

*1 (株)コムスエンジニアリング 第一事業部 修士(工学)(正会員)

*2 東京工業大学 環境・社会理工学院 准教授 博士(工学)(正会員)

*3 (株)コムスエンジニアリング 博士(工学)(正会員)

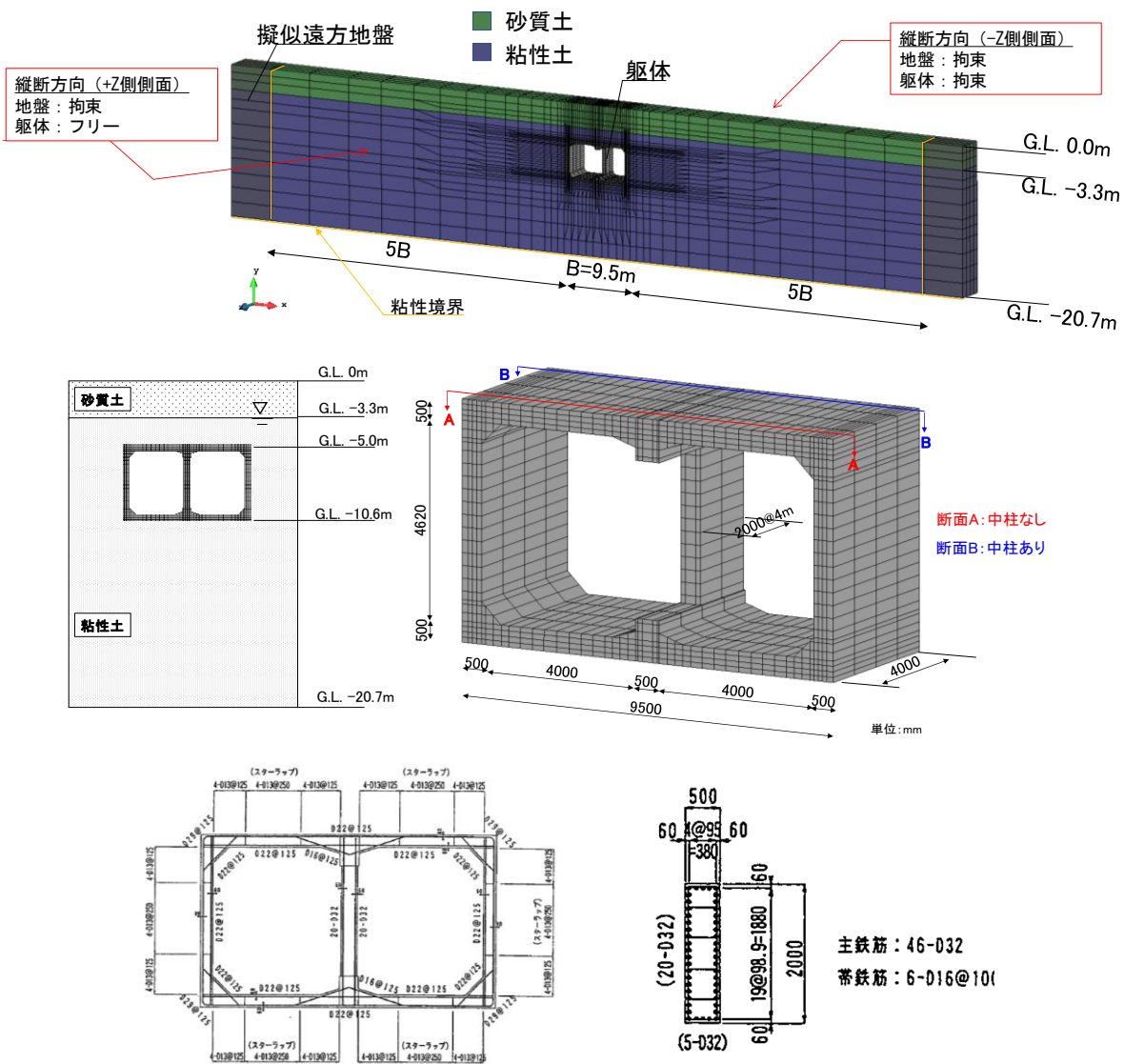


図-1 対象構造物概要⁸⁾と解析モデル

(3) 地盤

図-1 に示すように、躯体は粘性土中に位置している。ここでは、単純化のため砂質土、粘性土の2層の条件とし、表-2 に示す地盤物性値を用いる。地盤構成則はR-O型の非線形モデル⁹⁾とする。

2.3 荷重条件および境界条件

(1) 荷重条件と施工ステップ

初期応力として作用する自重と土水圧は、打設から14日後の脱型時に、鉛直方向の重力加速度を付与することで考慮する。地震応答解析に用いる入力波形は図-2 に示す兵庫県南部地震波¹⁰⁾ (レベル2) を用いる。時刻歴地震応答解析は材齢30年後に実施する。

(2) 力学的境界条件

地震応答解析用の境界条件として、横断方向のモデル側方に自由振動を模した擬似遠方地盤要素を接続して、振動エネルギーの逸散を考慮する。モデル底面は、

表-1 コンクリート配合

セメント種	W/C (%)	Air (%)	単位量 (kg/m ³)			
			W	C	S	G
普通C	62.0	4.0	179	288	853	951

表-2 地盤物性

土質名	初期せん断剛性 (MN/m ²)	単位体積重量 (kN/m ³)	内部摩擦角 (deg.)	粘着力 (kN/m ²)
砂質土	62.1	17.3	34.6	20.0
粘性土	74.2	19.2	35.7	62.5

粘性境界を設定する。地震発生までの常時状態においては、底面固定、側方を鉛直ローラーとし、地震時に境界条件を変更する。縦断方向(Z軸)の拘束条件は、-Z側端部側面では全節点で拘束、+Z側端部側面では地盤部のみ拘束し躯体部はフリーとする。

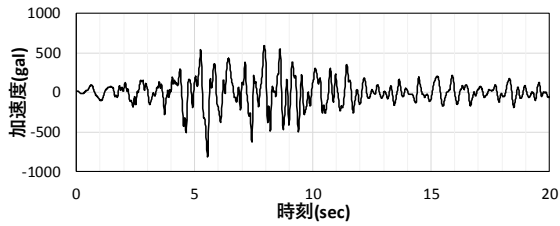


図-2 入力地震動¹⁰⁾

(3) 環境条件

打設から脱型までは封緘状態とし、脱枠以降は躯体内側の相対湿度は30%一定として極端に乾燥する条件とする。躯体外側は、躯体が地下水位以深にあることを勘案して湿潤条件として相対湿度 99%を設定する。打込み温度は20℃、躯体内外面の温度は20℃一定とし、温度応力を考慮する。

3. 長期挙動解析

水分移動に起因する長期挙動による損傷過程への影響を比較するため、2.で述べた条件を標準(Case1)とし、打設開始から計算終了まで、躯体内外表面からの水分移動を完全に許さない条件(封緘条件)としたケース(Case2)の計2ケースを実施する。また、以降は図-1に示した通り、中柱のない断面を断面A、中柱側の断面を断面Bとして考察を行う。

3.1 躯体の経時変化

材齢15日(自重考慮直後)、1年および30年後における躯体の変形図と重ねた平均化損傷指標コンター図を図-3、図-4に示す。平均化損傷指標として、コンクリート標準示方書¹¹⁾では、コンクリートのひび割れ

損傷を表す偏差ひずみ第二不変量と圧縮損傷を表す正規化累加ひずみエネルギーの2つが挙げられている。いずれも半径150mmで重み付き平均化処理を行っており、後者の正規化パラメータは、ここでは24MPaとしている。本稿では、主に偏差ひずみ第二不変量を取り上げる。

Case1では、乾燥開始から材齢1年程度までは、躯体内側の乾燥にともなうひび割れ損傷が表層で進展し、長期材齢になるとハンチ周辺での損傷が際立っている。これらひび割れ損傷は断面A、Bで分布が異なっており、中柱による影響が大きいものと考えられる。Case2では、封緘状態としているため、内外の収縮差による影響は見られず、自重考慮直後からひび割れ損傷はほとんど変化していない。

3.2 土圧の推移

既往の検討³⁾では、内部乾燥による躯体の長期的な変形により躯体に作用する土圧分布が変化することを示唆している。本検討においても、上下床版にひび割れ損傷が生じており、一例として上床版に作用するCase1の土圧分布の長期的な推移を分析した(図-5)。

断面Aでは、常時荷重直後は、端部を除き概ね一様の分布を示すが、材齢1年以降は中柱周辺で土圧が変動する傾向を示している。一方、断面Bでは、材齢1年以降はモデル中央部分で土圧が作用しておらず、地盤と躯体が剥離状態にある。構造物全体で見ると、建設直後には設計時の想定に近い2次元的な土圧分布となっているが、時間の経過とともに、中柱の影響により3次元的な分布となって設計時の想定から乖離し

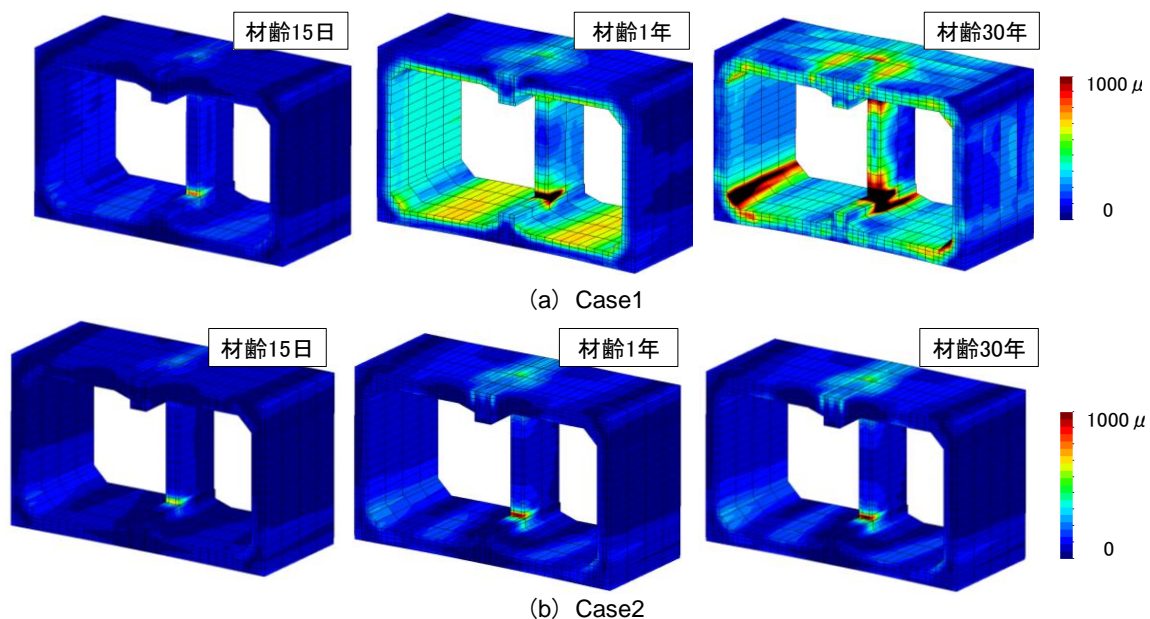


図-3 偏差ひずみ第二不変量コンターの比較：断面A(変形倍率×20)

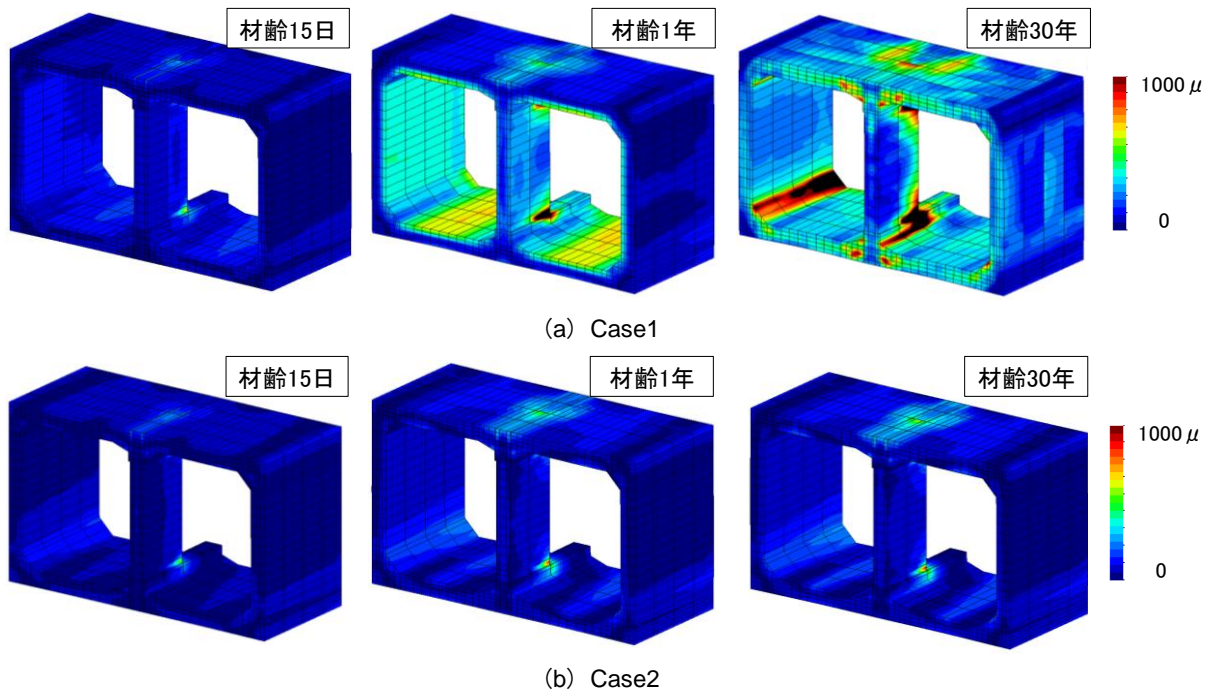


図-4 偏差ひずみ第二不変量コンターの比較：断面 B(変形倍率×20)

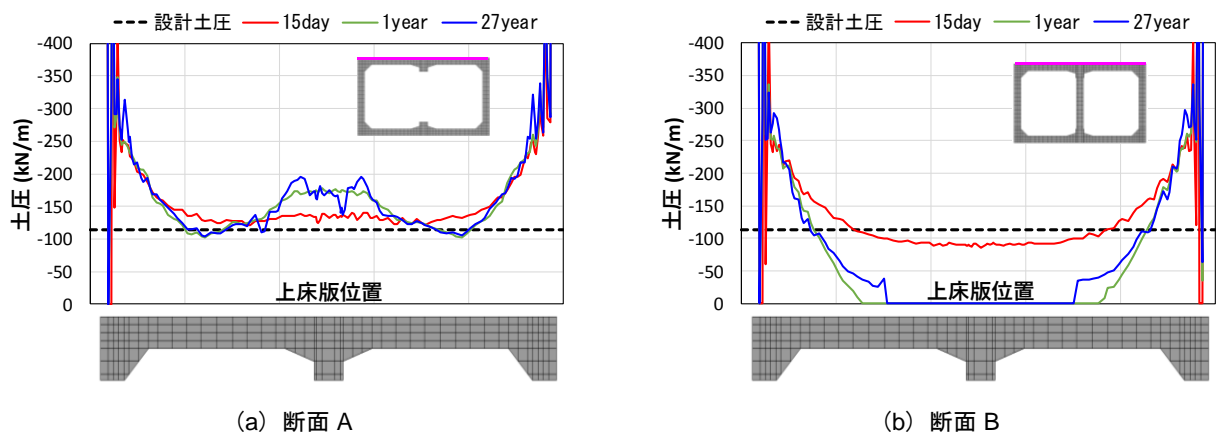


図-5 上床版土圧分布の推移 (Case1)

ていくことが分かる。長期的に周辺地盤と躯体が一体となって耐荷機構を形成することにより、土圧分布が変化しているものと推察される。

4. 地震応答解析

地震応答解析では、3.で実施した2ケースに加え、経時変化の影響を考慮しない通常の構造解析単体によるケース(Case3)を合わせて実施する。なお、Case3では、材料挙動は考慮しておらず、コンクリートの物性はすべて一定値($f_c=24\text{MPa}$)である。

4.1 層間変形角の時刻歴

解析結果の一例として、中柱の層間変形角の時刻歴応答波形を図-6に示す。また、中柱の層間変形角に関する3ケースの総括を表-3に示す。なお、各ケースで振幅に差は生じているものの、周期特性は概ね同

様であり、地震後の水平方向の残留変形は小さいと言える。また、いずれも曲げ型の変形モードを示した。

層間変形角の最大値は、Case1、Case2、Case3の順で大きくなり、長期変形を考慮したことによる影響が確認できる。このことは、建設後、どのタイミングで地震が発生するかによって応答が大きく変わる可能性があることを示唆している。本例では、正側最大変形時には、Case1とCase3で最大変形角の比が1.7~1.9倍程度であった。乾燥やクリープ、圧密といった時間依存変形により、躯体内部に損傷が蓄積したことやカルバートの動きを拘束する周囲の地盤条件が断面ごとに変ったことが、この違いの原因と考えられる。カルバート内部を封緘状態としたCase2においても、層間変形角がCase3の1.4倍程度に大きくなった。30年までの時間依存変形を考慮していることにより、(Case1

よりは小さいもののひずみ損傷が生じていることに起因していると考えられる。一方、出力図の掲載は割愛しているが、Case3 ではほとんどひずみ損傷が生じていないことを別途確認している。

4.2 損傷指標分布

層間変形角が最大となる時刻および地震終了時における平均化損傷指標のコンター図を図-7、図-8に示す。各ケースを比較すると、平均化損傷指標の分布、大きさの相違は明らかである。地盤やコンクリートの時間依存変形、カルバート軸方向の断面諸元の違いを含めた3次元的な応力場の分布を考慮することで、損傷と耐荷機構に差異が生じている。なお、ここでは偏差ひずみ第二不変量について示しているが、正規化累加ひずみエネルギーについても傾向は同様であった。

5. 結論

本検討では、中柱を有する1層2径間の地中ボックスカルバートを対象に、単純かつ幾分極端な条件の下で、建設施工時からの長期変形挙動と、それが地震時挙動に及ぼす影響について、解析的に評価した。本研究で得られた結論は、以下の通りである。

- (1) 長期挙動解析では、躯体内側の乾燥にともなうひび割れ損傷が表層で進展し、土圧分布にも明確な変化が現れた。いずれも三次元的な応答となっており、中柱を有する構造形式の影響が認められた。
- (2) 長期挙動を考慮した上で地震動を入力した結果、地震前に生じた損傷が応答に影響を及ぼし、層間変形角や躯体の損傷状態に有意な差異が生じる可能性が示唆された。

表-3 地震時層間変形角

断面	部位		最大変形角比 Case1/Case3
断面 A	側壁-X 側	正側	1.83
		負側	1.74
	側壁+X 側	正側	1.81
		負側	1.86
断面 B	側壁-X 側	正側	1.85
		負側	1.79
	中柱	正側	1.77
		負側	1.77
	側壁+X 側	正側	1.82
		負側	1.90

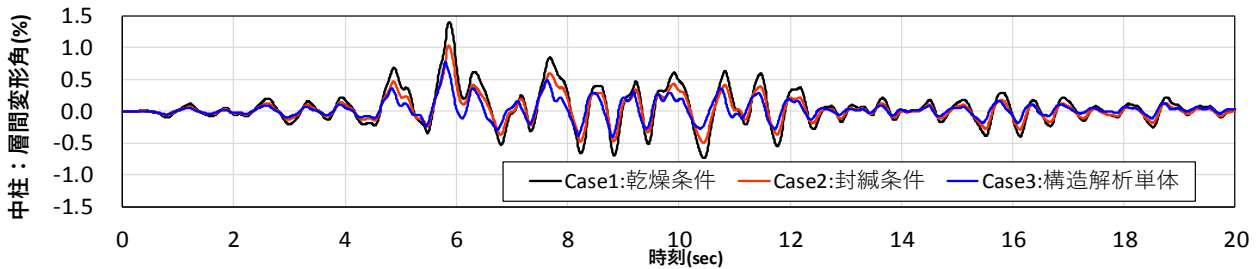


図-6 地震時層間変形角の時刻歴

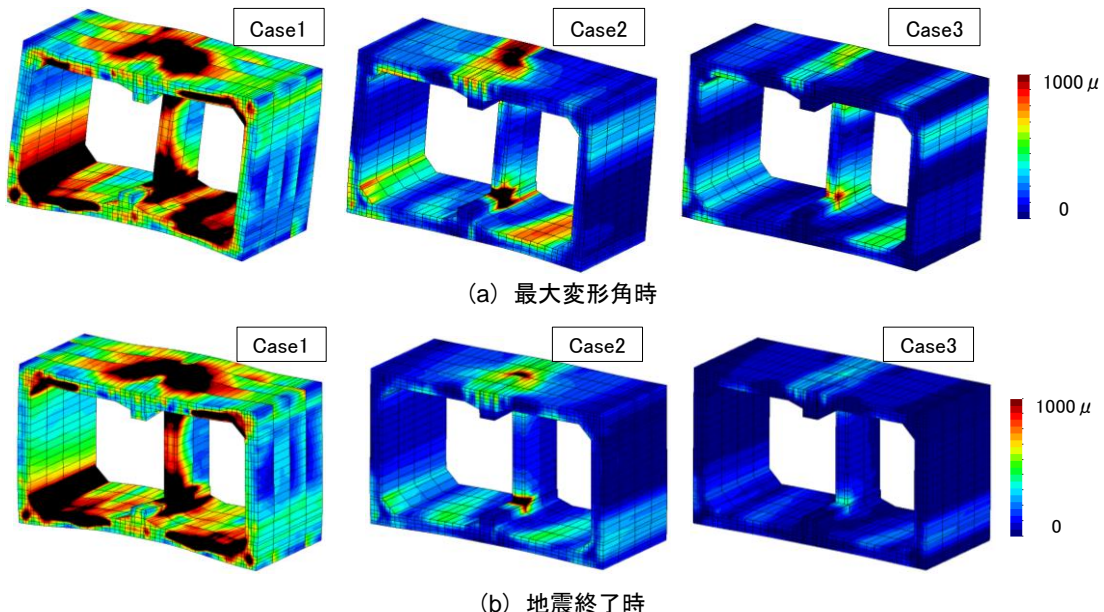


図-7 地震時 偏差ひずみ第二不変量コンターの比較：断面 A(変形倍率×20)

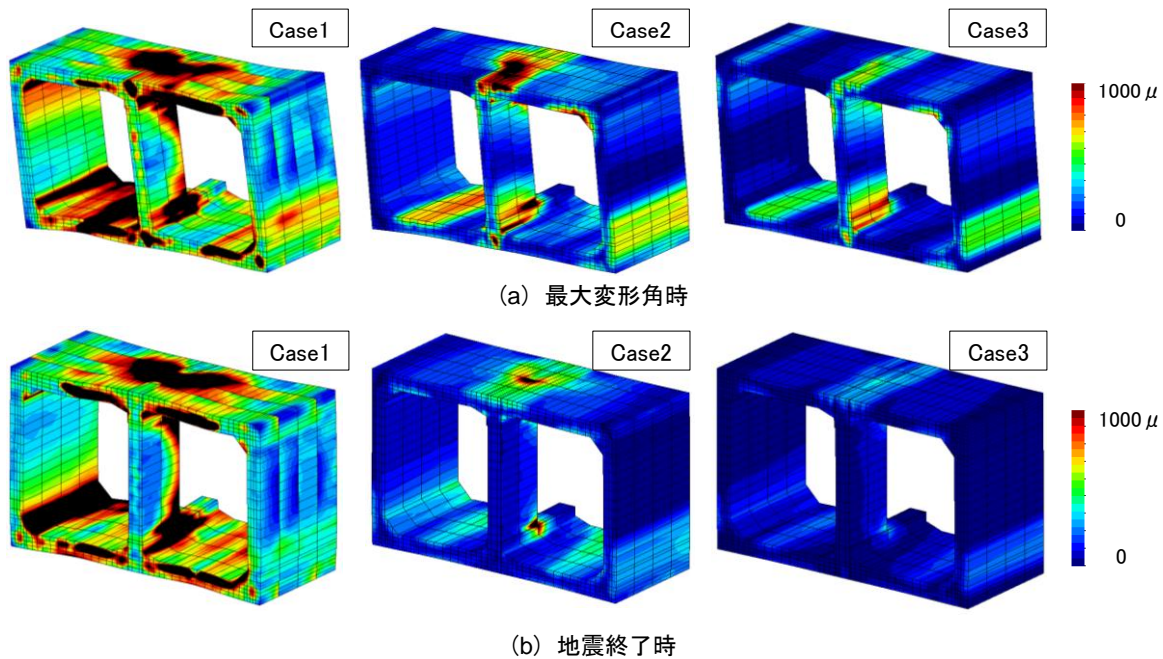


図-8 地震時 偏差ひずみ第二不変量コンターの比較：断面 B(変形倍率×20)

本検討より、実構造物の新設および補修補強設計にあたっては、構造物の実態に即した状況を再現し、詳細な検討を行うことが望ましいと言える。

謝辞

本検討に際して、土木学会コンクリート委員会「コンクリート構造物の設計と連成型性能評価法に関する研究小委員会(351委員会)」(委員長：牧剛史・埼玉大学准教授)において貴重なご助言を頂きました。また、本研究で使用した解析ツールは前川宏一教授(東京大学大学院)の御厚意により使用させて頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T.: Multi-scale modeling of concrete performance-integrated material and structural mechanics, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.1, pp.91-126, 2003.
- 2) Ohno, M., Chijiwa, N., Suryanto, B. and Maekawa, K.: An investigation into the long-term excessive deflection of PC viaducts by using 3D multi-scale integrated analysis, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.10, pp.47-58, 2012.
- 3) Maekawa, K., Zhu, X., Chijiwa, N. and Tanabe, S.: Mechanism of Long-Term Excessive Deformation and Delayed Shear Failure of Underground RC Box Culverts, *Journal of Advanced Concrete Technology*,

Vol.14, pp.183-204, 2016.

- 4) Chijiwa, N., Zhu, X., Ohno, H., Tanabe, S., Nakarai, K. and Maekawa, K.: Delayed Shear Crack Formation of Shallow RC Box Culverts in Service, *CONCREEP 10, Mechanics and Physics of Creep, Shrinkage and Durability of Concrete and Concrete Structures*, pp.1579-1586, 2015.
- 5) 木原亮太, 千々和伸浩, 洪 汶宜: 地中 RC ボックスカルバートの遅れせん断ひび割れ発生機構に関する検討, 土木学会第 72 回年次学術講演会講演概要集, pp.625-626, 2017.9
- 6) 土木学会: コンクリート構造物の設計と連成型性能評価法—時空間性能評価技術の未来予想図—, *コンクリート技術シリーズ 113*, 2017.
- 7) 土木学会: 阪神・淡路大震災調査報告 / 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会編, *土木・地盤*, 1998.6
- 8) 土木学会: トンネルライブラリー第 9 号, 開削トンネルの耐震設計, pp.188-234, 1998.10
- 9) Mohammad Reza Okhovat, M. R., Shang, F. and Maekawa, K.: Nonlinear seismic response and damage of reinforced concrete ducts in liquefiable soils, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.7. pp.439-454, 2009.
- 10) 日本道路協会: 道路橋示方書 V 耐震設計編, 2012.3
- 11) 土木学会: 2012 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], 2013.