

論文 高速度断層変位載荷実験による地中 RC カルバートの損傷評価

山野井 悠翔^{*1}・山口 和英^{*2}・上田 圭一^{*3}・松尾 豊史^{*4}

要旨：地中 RC 構造物の耐変位性能評価手法の高度化を目的として、FEM による感度解析及び 1G 場での高速度断層変位載荷実験により、断層変位の動的作用が地中 RC カルバートの損傷に及ぼす影響を確認した。その結果、断層変位速度が大きい場合、地盤中に形成されるせん断帯が分散し影響範囲が広がる傾向が認められ、カルバートの引張損傷も大きくなることなどが明らかとなった。また、基盤の最大加速度よりも最大速度の方がカルバートの損傷に大きな影響を及ぼす可能性が数値解析で示唆された。動的作用を考慮すべき条件等を検討する際に必要となる数値解析手法の妥当性検証用に有意義なデータが得られた。

キーワード：断層変位、耐変位性能、耐震性能、地盤—RC 構造物連成系、模型実験、FEM

1. はじめに

断層変位に対する RC 構造物の安全性評価のために、これまで多くの実験及び数値解析が実施されてきた。近年では、確率論的リスク評価手法¹⁾や、決定論による性能評価手法²⁾が提案されている。これら既往の検討のほとんどは、動的に作用する断層変位を静的に作用する強制変位として模擬している。その理由として、現象の単純化や地震動と比較して遅い現象であることが挙げられるが、その妥当性は十分に検討されていない。一方で、1999 年に発生した台湾の集集地震では地震時の加速度波形から断層変位速度が最大で 2 m/s あったと推定されており³⁾、この場合、材料強度の速度依存性や慣性力の影響が無視できないことも考える。地中構造物の損傷モードの誤った評価や、危険側の評価を防ぐために、動的な断層変位作用に対する地盤—RC 構造物連成系の応答を把握することが肝要である。

本研究では、地中 RC 構造物の耐変位性能評価手法の高度化を目的として、FEM による感度解析及び高速度試験機を用いた 1G 場での高速度断層変位載荷実験により、断層変位の動的作用が地中 RC カルバートの損傷に及ぼす影響を確認した。

2. FEM 解析による予備検討

2.1 解析概要

既往の実規模解析²⁾と同様に、図-1 に示すような地下 15 m の岩盤上に設置された高さ 4.5 m の単連 RC ボックスカルバート構造物を対象とした。カルバート横断面中央で傾斜 45 度の逆断層変位が作用する状況を想定して、6 面体要素により奥行き 10 mm の領域を一要素でモデル化した。奥行き方向の変位を拘束することにより、疑似的な平面歪条件とした。岩盤は弾性体でモデル化し、

モデル底面に強制変位を与えることで断層変位を模擬した。周辺地盤にはダイレタンシーを考慮可能な一相系の弾塑性モデル⁴⁾を適用し、密な乾燥砂を想定して表-1 に示す物性を設定した。RC カルバートには多方向ひび割れを考慮可能な分散ひび割れ型のコンクリート構成モデル⁴⁾を適用し、分散鉄筋モデルにより鉄筋を考慮した。ひび割れ前のコンクリートは連続体として弾塑性破壊モデルが適用され、ひび割れ後はひび割れ面でのせん断伝達特性、ひび割れ開口方向の引張軟化、ひび割れに沿う弾塑性破壊挙動が考慮され要素としての平均応力が算定される。一軸圧縮強度 24 MPa のコンクリートを想定した強度特性を入力した。断層面や、カルバートと岩盤又は周辺地盤との間の界面には剥離と滑りを考慮可能なジョイント要素を設けた。図-2 に示すように、一定の加速度で加速後、任意の速度で等速運動となるような単純な波形を模擬した。なお、解析上では想定する加速度や速度に応じた変位時刻歴が強制変位として入力される。静的な載荷ケースに加え、最大速度 1.0 m/s を一定として最大加速度を 3~100 m/s² と変化させたケース (Case A-3~A-100) と、加速度 10 m/s² 一定で最大速度を 0.1~2.0 m/s と変化させたケース (Case B-0.1~B-2.0) を検討した。

2.2 断層変位の動的作用がカルバート損傷に及ぼす影響

代表的な解析ケースで得られた変形図並びにひずみ分布を図-3 に示す。断層変位の最大速度を一定で最大加速度を変化させた場合、加速度の増加とともに砂層のせん断帯は不明瞭になり、カルバートに発生する引張ひずみが大きくなる傾向が認められた。同様の傾向は最大速度を一定で最大速度を変化させた場合にも確認された。

図-4 では、各解析ケースで得られるカルバートに発生する最大の引張主ひずみを静的ケースで得られた値で

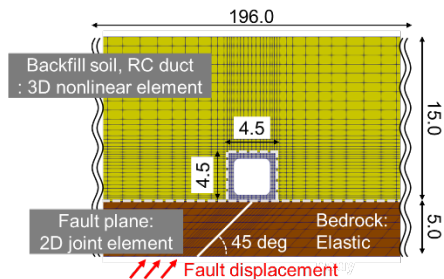
*1 (一財) 電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部構造・耐震工学研究部門研究員 工博 (正会員)

*2 (一財) 電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部構造・耐震工学研究部門上席研究員 工博

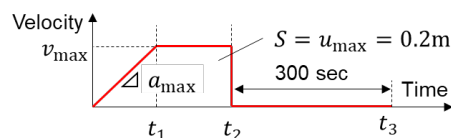
*3 (一財) 電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部首席研究員 理博

*4 (一財) 電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部構造・耐震工学研究部門上席研究員 工博 (正会員)

正規化した指標を損傷増加率と定義し、最大加速度及び最大速度との関係を整理した。加速度の増加に対しては損傷増加率の値は頭打ちになり、近年の巨大地震時に記録されている最大加速度（1G 程度）を考慮すれば、その 10 倍以上の加速度を与えた場合でも結果はほとんど変わらないことが伺える。一方で、速度の増加に対しては指数関数的に損傷が増加している。解析ケースとして設定した最大速度は 2 m/s であるが（Case B-2.0）、先述の



図－1 FEM 解析モデル概要（単位：m）

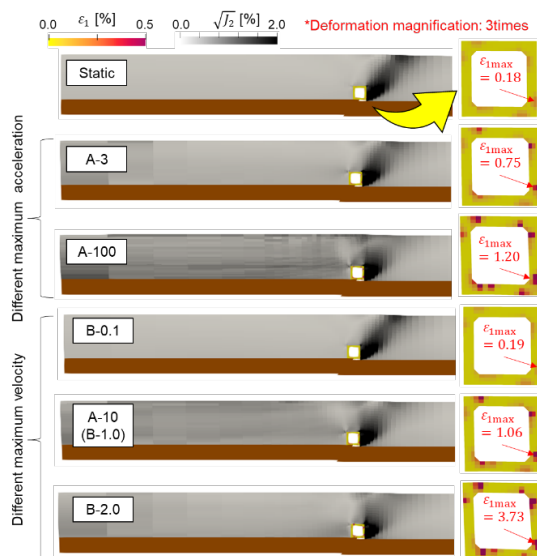


図－2 感度解析の入力波形

表－1 地盤材料の入力物性

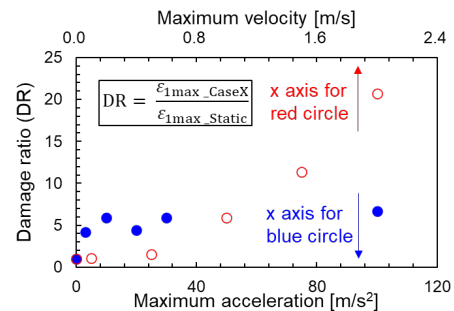
γ [ton/m ³]	RD* [%]	c [MPa]	ϕ_{pre} [deg]	ϕ_{post} [deg]	SB* [m]	ν [-]
1.53	89.2	0.0	42.0	32.0	0.05	0.4

*RD: Relative density, SB: Shear band width



図－3 感度解析より得られたひずみ分布

通りこれは実構造物が実際に経験しうる速度である。故に本解析結果からは、断層変位に対する地中 RC 構造物の損傷に対しては、断層変位の加速度よりも速度の影響が大きいと判断できる。一方で、動的断層変位を受ける RC カルバートの損傷モードの知見は少なく、動的且つせん断局所化を伴う地盤や RC 構造物の数値解析の妥当性の検証は不十分であることから、検証用のデータを取得するために高速度断層変位载荷実験を実施した。



図－4 RC カルバートの引張損傷の比較

3. 実験概要

3.1 試験装置

本実験で使用した試験装置を図－5 に示す。高さ 500 mm、幅 500 mm、長さ 2000 mm の土層に対し、底版の片側半分を可動床とし、他方を固定する。可動床を高速度载荷が可能な万能試験機のジャッキに 4 本の PC 鋼棒(直径 19 mm) を介して連結させることで、傾斜 90 度の逆断層変位を任意の変位波形で与えることが出来る装置となっている。砂の流出を防ぐために、可動床と側壁及び固定床との間には 2.5 mm 程度のクリアランスを設け、可動床周りに厚さ 8 mm のスポンジ材を貼付けた。加えて、可動床周りの摩擦を低減するために、スポンジ材表面にテフロンシートを貼り付けた。この結果、実験中に砂の流出は確認されず、可動床は傾くことなく動作した。

3.2 試験体

砂層には栃木県産珪砂 5 号を使用した。後述する画像解析を実施する上で輝度分布が明確になるように、黒色に着色した砂と着色前の砂を質量比 1:4 で混合した。相対密度が 80 %程度となるように、高さ 50 mm 毎に所定の量の混合砂を投入し、都度締め固めを行った。最終層のみ土層の高さが 500 mm となるように砂の量を調節した。その結果、最終的に算出された相対密度は 79~85 % のバラつきがあった。せん断帯を明確にするために、ガラス面付近では、赤色に着色した同砂の層(層厚約 1 mm) を深さ方向に 50 mm 間隔で設けた。

実験で用いる RC 試験体(カルバート模型)を図－6 に示す。地盤厚とカルバートの高さの比が 2 章で示した実

規模解析モデルと一致するように寸法を定めた。小寸法であるためモルタルで作成し、D4 鉄筋(引張試験より得られた降伏強度：368 MPa、ヤング係数：190 GPa)を主筋と配力筋に用いた。動的模型実験の場合、実物の挙動を直接評価するためには、運動方程式が等価となるような相似則を満たすことが求められる。1G 場の場合、応力-ひずみ関係が同じで密度が異なる材料を使用する必要があり、この相似則を満たすことは難しい。本実験の主眼は動的作用の影響の有無を確認することと、数値解析モデルの妥当性検証用のデータを得ることに置かれていることから、相似則の不成立を許容した。一方で、強い拘束圧依存性を有する砂層の強度とセメント硬化体の固着力に起因する強度が支配的である RC カルバートの強度差を実際と近づけるために、モルタルの強度を可能な限り小さくした。モルタルの配合及び各種試験より得られたフレッシュ性状を表-2 にまとめる。円柱試験体を用いた材料試験の結果、一軸圧縮強度は 1.44 MPa、ヤング係数は 2.48 GPa、割裂引張強度は 0.29 MPa であった。

3.3 実験ケースと計測項目

実験は Case 1~Case 6 の 6 ケース実施した。全ケースにおいて、層厚 500 mm の砂層に対して 50 mm の断層変位を与えた。砂層のみの Case 1~3 に対し、Case 4~6 では RC

試験体を断層線直上に埋設した。Case 1, 4 では、1000 s かけて 50 mm の変位を与えたのに対し、その他のケースでは最大速度が 0.30 m/s (Case 2, 5) 又は 0.60 m/s (Case 3, 6) となるように変位を与えた。断層変位に対しては様々な速度関数が提案されているが⁵⁾、制御性の観点から、試験機の制御システムに元々組み込まれている 1/2 ハーバーサイン波を動的载荷ケースでは採用した。可動床で計測した変位と加速度に加え、変位時刻歴の中央差分により算出した速度の時刻歴を図-7 に示す。算出された速度時刻歴はノイズを多く含んでいたため、入力波形の周波数の約 100 倍のカットオフ周波数 (Case 2: 400 Hz, Case 3: 800 Hz) で 4 次の Butterworth filter を施した。

主な計測項目を図-5 と図-6 に示す。静的载荷ケースでは 1 Hz、動的载荷ケースでは 5 kHz 以上でデータをサンプリングした。砂層のひずみ分布を計測するために、画像相関法 (DIC) による 2D の画像計測も実施した。静的载荷の場合には解像度が 6000 px×4000 px の一眼レフカメラを用いて 0.25 Hz で画像を取得し、動的载荷の場合には解像度が 2560 px×1680 px である高速度カメラを用いて 1kHz で画像を取得した。また、3D レーザースキャナを用いて、断層変位载荷前後の地表面形状も計測した。

表-2 モルタルの配合及びフレッシュ性状

W/C [%]	W/P [%]	S/P [%]	AE [C*%]	W [kg/m ³]	Flow [mm]	Air [%]	Bleeding [cm ³ /cm ²]
300	70	3.0	1.0	316	222	0.5	0.44

W: Water, C: Cement, P: Powder (= C+LS), LS: Limestone, S: Sand
AE: Air entraining and water reducing agent

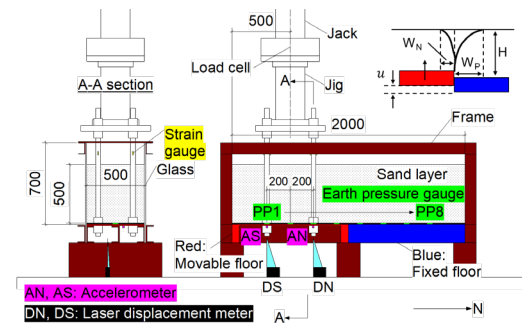


図-5 高速度断層変位载荷装置 (単位: mm)

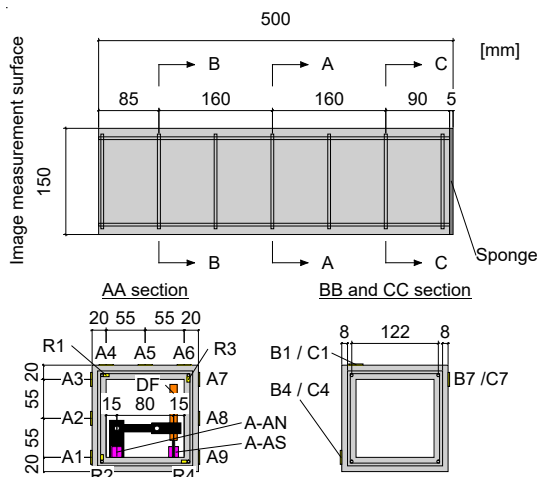
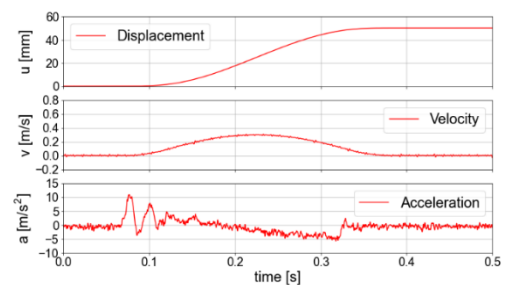
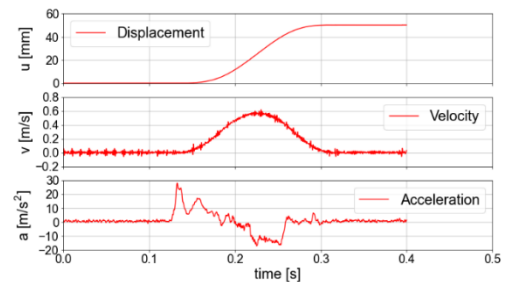


図-6 RC 試験体 (カルバート模型)



(a) Case 2 ($v_{\max} = 0.30$ [m/s])



(b) Case 3 ($v_{\max} = 0.60$ [m/s])

図-7 動的ケースの変位・速度・加速度の波形

4. 動的断層変位に対する地盤応答

画像計測により得られた断層変位載荷後の最大主ひずみ分布を図-8 に示す。ここで、各カメラで得られた画像は予めガラス背面に設置していた基準点に従って射影変換され、GOM 社製の GOM Correlate⁶⁾を用いてひずみ分布を取得した。サブセットはカメラの解像度に応じて 6 mm~10 mm の範囲となるような画素数に調整し、計測間隔はサブセットの約半分とした。レンズの歪曲補正は実施していないため、画像端部では精度が低くなっていることに注意が必要である。今後更なる高精度化を進めていきたい。一方で、ガラス面越しの砂を撮影していることから、ガラスの小傷や表面での反射、砂粒子の面外への移動等によるノイズの方が支配的となっている。計測されたひずみの精度に懸念は残るが、断層線より伸びる明確なせん断帯が複数認められる。これらは地表面での断層崖の出現箇所や目視でのせん断帯経路と一致していたため、実際に生じたせん断帯と判断できる。

図-8 (a) ~ (f) の各図にはせん断帯の出現順番がそれぞれ示されている。RC 試験体の有無に依らず、断層変位速度が大きくなるほどせん断帯が分散し影響領域が広がる傾向が伺える。RC 試験体が無いケースで載荷後の地表面を比較すると、静的載荷では明瞭な断層崖が 3 本確認できたのに対し、動的載荷ではその本数が 1~2 本と少なくなっていた。同様の傾向は、動的断層変位を模擬した数少ない既往実験においても報告されている⁷⁾。3D スキャンで得られた地表面形状よりせん断帯の出現範囲を調べてみると、表-3 のようになった。RC 試験体

が無い場合、断層線を挟んで固定側に出現するせん断帯が最初に地表面に達するが、静的のケース (Case 1) での出現位置 (W_P) は、乾燥砂を対象とした既往の静的断層変位載荷実験結果と整合していた⁸⁾。それに対し、動的ケースでは 2 割程度出現位置が離れており、地表地震断層の出現箇所を推定する際にも断層変位速度の影響に留意する必要があることが示された。地盤全体の緩やかな変形となるため、地上構造物にとっては断層変位速度の大きい方が有利な条件となる可能性も考えられる。

RC 試験体がある場合、固定側の RC 試験体側面に沿ってせん断帯が地表に進展するため、せん断帯の出現位置は遠くなった。断層変位速度が大きくなると、可動側の RC 試験体側面から伸びるせん断帯も明確になってくるが、これは RC 試験体から固定側の砂層に伝達される変位量が減少していることを示唆している。即ち、断層線付近での RC 試験体の損傷が大きくなった影響と考えられる。土層底版に加わる土圧を比較すると (図-9)、動的に断層変位が作用する場合、可動側で土圧が増加することが確認できる。可動床が砂層全体を持ち上げたとした仮定した場合、最大加速度が 30 m/s^2 、砂層重量が 747 kg であった Case 3 では、砂層の慣性力として最大で約 45 kPa の負荷が可動床に加わることとなる。しかし、Case 3 では最大で 80 kPa の土圧が計測されており、慣性力による増分を超過している。この原因は、実験データのみならず、数値解析による検討も踏まえ今後分析していく必要がある。

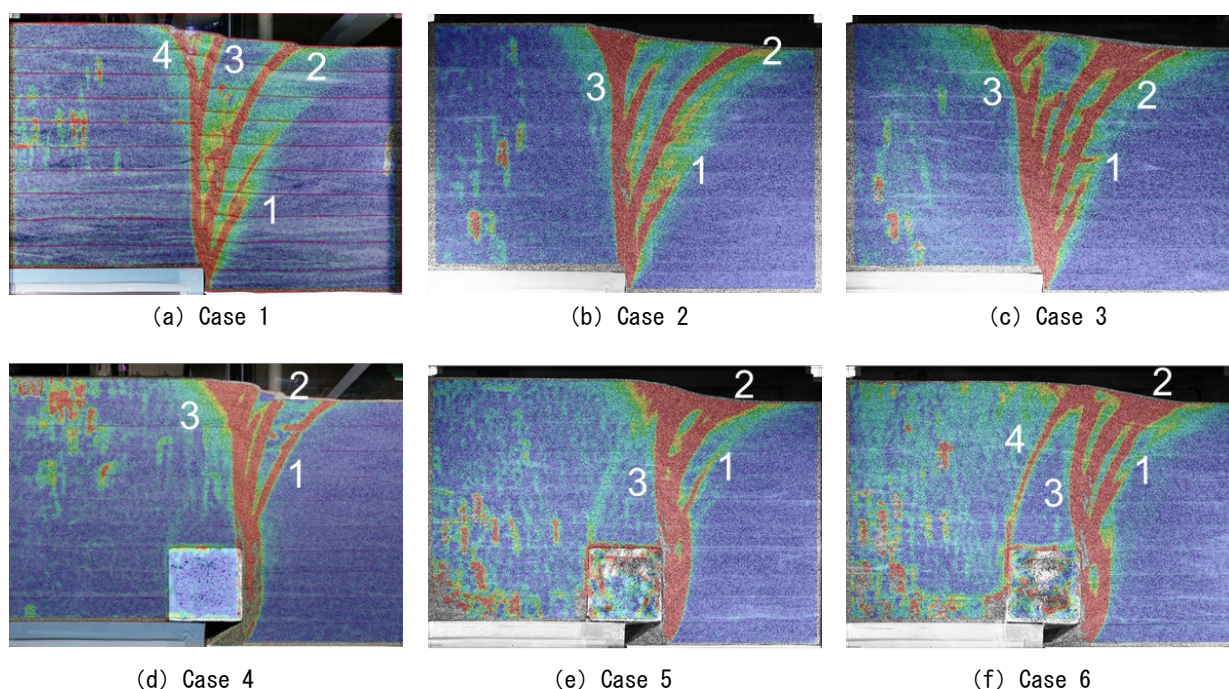


図-8 画像計測 (DIC) より得られた実験終了時の最大主ひずみ分布 (赤 : 10%以上, 青 : 0%以下)

表－3 地表面でのせん断帯出現範囲

Case	W_N^* [mm]	W_P^* [mm]	W_N/H^*	W_P/H^*
1	-71.1	276.0	-0.14	0.55
2	-61.6	326.5	-0.12	0.65
3	-118.5	327.4	-0.24	0.65
4	23.6	303.9	0.05	0.61
5	-11.4	353.1	-0.02	0.71
6	-23.5	341.5	-0.05	0.68

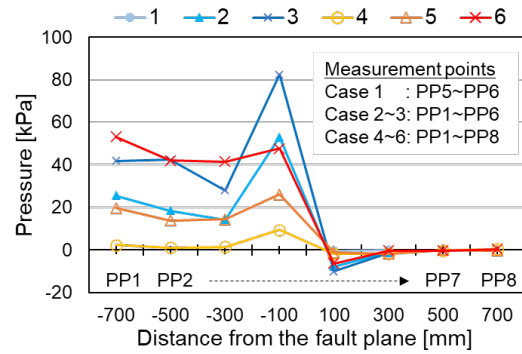
* W_P , W_N , H are defined in Fig. 5.

5. RC 試験体の損傷評価

まず初めに動的ケースでの RC 試験体床面の応答加速度を比較すると（図－10），断層線を挟んで可動側，固定側ともに可動床の加速度応答（黒線）と概ね同じ応答をしていることが分かる。これより，カルバートに直接断層変位が作用する場合，基盤の加速度履歴が支配的になると考えられる。一方で，断層変位速度が最も大きい Case 6 では，可動床側の RC 試験体床面の加速度が若干大きくなる傾向も確認された（図－10（b）中の赤線）。

次に，図－11 に载荷終了時の RC 試験体周囲のひずみ分布を示す。静的载荷の場合，全ての個所で引張りひずみが一般的なコンクリートのひび割れ発生ひずみである 0.02 % を下回っている。加えて，側壁では高さ方向に，頂版では水平方向に比例的なひずみ分布となっていることから，RC 試験体の損傷が線形範囲に収まっていたことが伺える。それに対し，動的载荷の場合では，隅角部で 0.2 % を超える引張りひずみが確認され，目視でも明確なひび割れが確認された。ここで，Case 5 と Case 6 を比較すると，左側壁のひずみ分布が異なる。ひずみゲージを貼付けた位置以外も含めると，両試験体とも A1 と A3 の高さのひび割れを目視で確認したため，支配的になるひび割れが異なっていたとみなすことが出来る。断層変位の増加に伴い，カルバートには左側壁が上昇する方向のせん断変形と土圧による内側へのはらみ出しが生じる。前者は A1 位置の引張りひずみを増加させ，後者は A1 と A3 位置両方の引張りひずみを増加させる。従って，Case 5 では可動床側からの土圧により RC 試験体の損傷が増加したのに対し，Case 6 では土圧が作用する前に RC 試験体がせん断変形の限界に到達したと考えられる。これは，図－8 で Case 6 のみ両側壁の上端からせん断帯が生じたこととも整合する。

表－4 に RC 試験体のひずみと RC 試験体床面に取り付けた変位計（図－6 中の DF）で得られた床面相対変位（ Δh ）を，最大値と実験終了時の値で整理した。引張りひずみ（ $\varepsilon_{\max}$ ）程では無いが，RC 試験体の圧縮ひずみ（ $\varepsilon_{\min}$ ）



図－9 最大土圧記録時の土圧分布の比較

も動的ケースで大きくなっている。Case 6 では最も大きなひび割れが断層線直上の底版上面に生じたが，その影響が RC 試験体底版の相対変位として表れている。

CT スキャンにより得られた载荷前後の RC 試験体の内部損傷を図－12 に示す。ここで，同図は特にひび割れが明瞭であった断面（図－6 中の CC 断面より 45 mm 右側の断面）を示しており，明るさとコントラストを適度に調整している。断層線直上の底版のひび割れが最も大きく，概ね全長で観察された。鉄筋位置と被っているため，はっきりと視認できる断面は少なかったが，隅角部でのひび割れも CT 画像で確認された。生じているひび割れは全て部材軸と直交しており，曲げひび割れであったと判断できる。隅角部の曲げひび割れは全ケースで確認された。カルバートの限界状態なども含めて実験結果の分析を今後深めたい。

6. まとめ

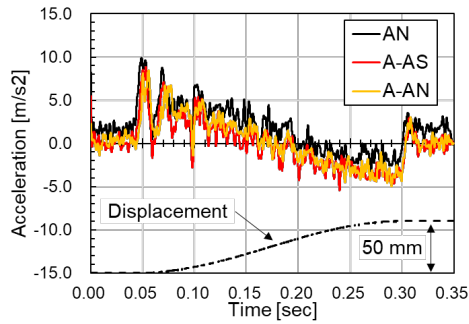
本研究で得られた主な成果は以下のようである。

- (1) 断層変位速度が大きい場合，表層地盤のせん断帯が分散するとともに，カルバートの引張損傷が増大することが実験・数値解析の双方で確認された。
- (2) 地中 RC カルバートの損傷に対しては，断層変位の加速度よりも速度の影響の方が大きいことが解析的に示唆された。
- (3) 断層変位の動的作用に対する数値解析手法の妥当性を検証するための実験データが得られた。

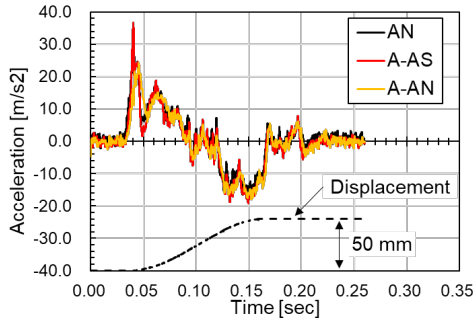
今後，プッシュオーバー実験による RC 試験体の残存耐力評価など実験的検討をさらに進めるとともに，実験の再現解析に基づく解析的検討も実施する。

謝辞

载荷や計測の実施に当たり鹿倉企画の大塚氏，試験装置の製作には共和技研の瀬戸井氏，原田氏，及川氏らご協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。



(a) Case 5 ($v_{\max} = 0.30$ [m/s])



(b) Case 6 ($v_{\max} = 0.60$ [m/s])

図-10 RC 試験体床面の加速度応答

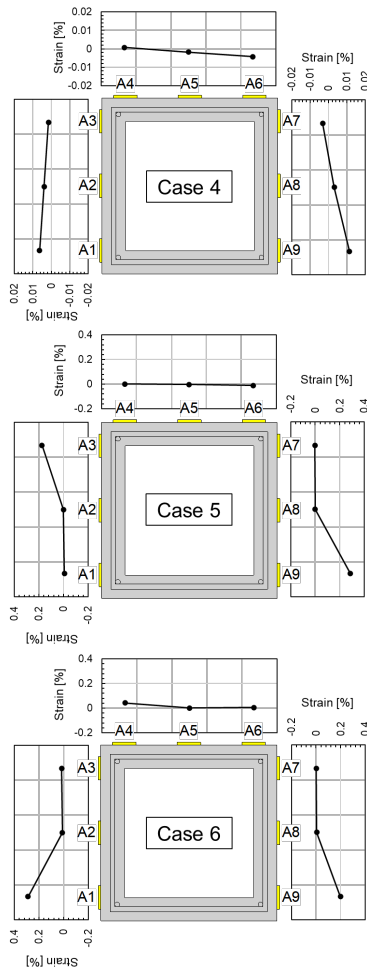
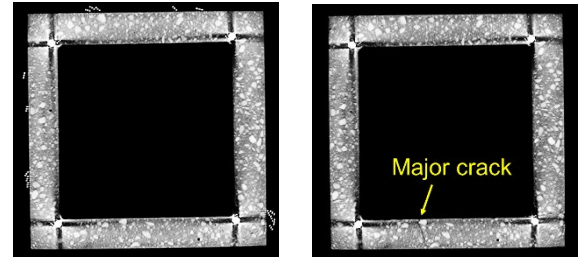


図-11 載荷終了時の RC 試験体周囲のひずみ分布（中央断面）



(a) 実験前

(b) 実験後

図-12 CT で得られた RC 試験体の損傷

表-4 RC 試験体の損傷比較

Case	$\epsilon_{\min}$ [%]	$\epsilon_{\max}$ [%]	$\epsilon_{\max_final}$ [%]	$\Delta h_{\max}$ [mm]	Δh_{final} [mm]
4	-0.0113	0.0167	0.0114	0.07	0.07
5	-0.0352	0.3931	0.2867	0.01	0.00
6	-0.0410	0.4782	0.2903	3.10	1.05

参考文献

- 「断層の活動性と工学的なリスク評価」調査専門委員会：断層変位に対するリスク評価と工学的な対応策，一般社団法人 日本原子力学会，2017.3
- 地中構造物の耐震性能照査高度化小委員会：原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針<別冊>断層変位に対する影響評価技術 2021，2021.10
- Lee, W.H.K., T.C. Shin, K.W. Kuo, and K.C. Chen.: CWB free-field strong motion data from the 921 Chi-Chi Earthquake, Volume 1, digital acceleration files on CD-ROM, prepublication version (December 6, 1999), Central Weather Bureau, Taipei, Taiwan, 1999.
- Mackawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H.: Nonlinear mechanics of reinforced concrete, CRC Press Taylor and Francis Group, 2003
- Tinti, E., Fukuyama, E., Piatanesi, A. and Cocco, M.: A kinematic source-time function compatible with earthquake dynamics, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.95, No.4, pp.1211-1223, 2005
- GOM Correlate Pro:
<https://www.gom.com/en/products/zeiss-quality-suite/gom-correlate-pro> (Access: Jan. 10th, 2023)
- 太田良巳，アイダン・オメル：地震断層近傍における地震動および永久変形に関する実験的研究，東海大学紀要海洋学部，Vol.2, No.3, pp.1-12, 2004
- 上田圭一，谷和夫：基盤の断層変位に伴う第四紀層及び地表の変形状況の検討（その 2）—正断層，逆断層模型実験—，電力中央研究所報告，U98048, 1999