

断層変位と地震の重畳現象に対する 地中カルバートの損傷評価手法

山口 和英¹・堤内 隆広²・原 朗²・永井 秀樹⁴・肥田 幸賢⁵

¹正会員 一般財団法人電力中央研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

E-mail: yamaguchi3876@criepi.denken.or.jp

²正会員 株式会社大林組 原子力本部設計第二部 (〒182-0007 東京都港区港南 2-15-2)

E-mail: tsutsumiuchi.takahiro@obayashi.co.jp

³正会員 株式会社大林組 原子力本部設計第二部 (〒182-0007 東京都港区港南 2-15-2)

E-mail: hara.akira.au@obayashi.co.jp

⁴正会員 株式会社大林組 原子力本部設計第二部 (〒182-0007 東京都港区港南 2-15-2)

E-mail: nagai.hideki@obayashi.co.jp

⁵東北電力ネットワーク株式会社 土木建築部(新潟地域) (〒951-8068 新潟市中央区上大川前通五番町84)

(旧 東北電力株式会社 発電・販売カンパニー 土木建築部 (〒980-0011 仙台市青葉区本町1-7-1))

E-mail: hida.yukimasa.ud@tohoku-epco.co.jp

著者らは、これまで断層変位による地中構造物の影響評価について検討してきた。断層が変位する場合には、一般的に地震を伴うことから地震の影響を考慮する必要がある。今回、断層変位と地震の重畳現象に対して追加検討を実施した。本論文では、断層変位と地震との重畳を受ける鉄筋コンクリート製地中ボックスカルバートの要求性能に応じた損傷や破壊に対する評価について解析的に様々な検討を行った。この結果、重畳現象に対する損傷評価では断層変位の作用による構造物の弱軸方向の変化に留意する必要があること、今回提案する耐力曲線により弱軸方向の安全率を定量的に評価できることが分かった。また、重畳現象に対する損傷評価においては、三次元材料非線形 FEM を用いた応答震度法による静的解析が適用できることを確認した。

Key Words: RC structure, fault displacement, Seismic response, damage assessment

1. はじめに

東日本大震災以降、原子力規制強化のため新規制基準¹⁾が制定され、地震や津波への対策が強化されたほか、火山や竜巻などの自然災害、火災など幅広いリスクに備えるため、構造物に対する設計基準が強化されている。

我が国は地震国であり、その地盤の成り立ちから多くの断層が存在する。このため、高い安全性が求められる原子力発電所の設置に際しては、詳細な地形・地質、地盤、地震等に関する調査・検討²⁾³⁾が行われている。新規制基準では、耐震重要施設が将来活動する可能性のある断層等の露頭がある地盤に設置された場合、その断層等の活動によって安全機能に重大な影響を与えるおそれがあるため、当該施設を将来活動する可能性のある断層等の露頭がないことを確認した地盤に設置することを求めている。このため、屋外重要土木構造物は断層変位が

生じるおそれがない地盤に設置されるが、断層変位が生じる残余のリスク⁴⁾に対して屋外重要土木構造物への影響を定量的に評価する手法を構築しておくことは重要である。

著者らは、これまで屋外重要土木構造物のうち鉄筋コンクリート製地中埋設ボックスカルバート（以下、地中カルバート）を対象に、断層変位に対する影響評価について検討を行い、耐変位評価手法を構築してきた⁵⁾。また、この耐変位評価手法では、断層変位に対する応答値算出時の留意点として、断層変位と地震との重畳についても適切に考慮する必要があるとしていることから、断層変位と地震との重畳現象についても検討を行ってきた⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾。

本論文では、断層変位と地震との重畳現象を受ける地中カルバートを対象に解析的に様々な検討を行い、重畳現象における構造物の損傷・破壊に対する評価手法を提

案するとともに、重畳現象により生じる地盤と構造物の複雑な相互作用について解明を試みた。なお、対象とする断層は、震源として考慮する断層（主断層等）ではなく、震源断層の活動に伴って副次的に永久変位が生じる断層（副断層）とし、岩盤上面で数十cm程度の断層変位量¹⁰が生じるものとする。

2. 検討条件

(1) 重畳のシナリオ

断層変位と地震との重畳による影響を検討する場合に、考えられるシナリオを表-1に示す。断層変位と地震の重畳のシナリオに応じて構造物に作用する荷重の順序を適切に考慮する必要がある。

Case1に示すように、一般的には震源断層による地震動の作用に遅れて、断層変位（副断層）が起こることが想定される。主断層による断層変位を想定する場合には、地震動の作用とほぼ同時に断層変位が発生することも考えられるが、ここでは、副断層による断層変位を想定しているため、今回のシナリオから省いている。

Case2では、断層変位を受けた後に、余震等による地

表-1 断層変位と地震の重畳現象の順序

ケース	作用する荷重順序		
	0	⇒ 1	⇒ 2
Case1	自重など	地震動(本震)	断層変位
Case2		断層変位	地震動(余震)

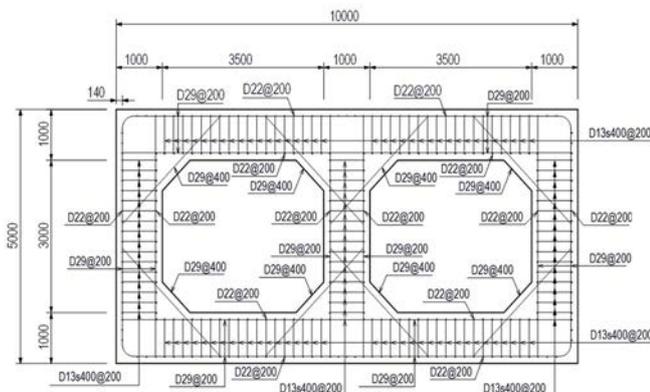


図-1 対象構造物の構造配筋図

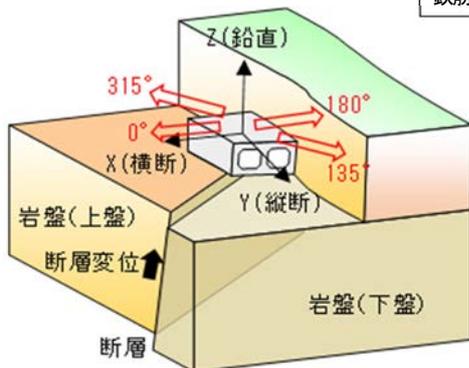


図-2 地震荷重の载荷方向

震動が発生するケースを想定する。

(2) 解析手法の選定

断層変位が作用する構造物は、断層との交差角度、交差位置などの幾何学的関係から三次元問題となることが多い。また、断層変位の作用により構造物が損傷し、弱軸方向が変化することも想定され、重畳させる地震動の作用方向は弱軸方向の変化も考慮する必要がある。

このような損傷評価では、三次元ソリッド要素による構造物—地盤連成の三次元動的材非線形解析により、地震動の作用方向をパラメータとした解析が有効である。一方、三次元動的材非線形解析は、現状の一般的な計算機レベルでは解析時間が実務的でない。

そこで本研究では、地震荷重を構造物—地盤連成の三次元材非線形 FEM モデルを用いた応答震度法により考慮する静的解析手法（以下、静的解析）を採用し、静的解析の適用性の検討を行った。

(3) 検討対象構造物

検討対象構造物は、2連の地中カルバート(図-1)とし、土被りは8mとした。断層変位の影響を考える場合のモデル化は、前述の通り対象構造物と断層との幾何学的関係から三次元問題となることが多いため、三次元ソリッド要素による三次元材非線形 FEM モデルとした。

解析は非線形 FEM 解析プログラム「FINAL-GEO」¹¹により行った。構造物はコンクリートを六面体要素、鉄筋は構造物横断面内の主筋とハンチ筋をトラス要素、縦断方向の配力筋とせん断補強筋を埋め込み鉄筋要素でモデル化し、コンクリートと鉄筋それぞれに非線形特性と材料試験による強度を考慮した。コンクリートと鉄筋の材料構成則を表-2に示す。

3. 静的解析による構造物の損傷評価

地震力（応答震度）の作用方向は、水平成分の载荷方向をパラメータとし、図-2に示す4方向を考慮した。135°方向および315°方向が構造物に45°で斜交する断層線に直交する方向、0°方向および180°方向が構造物

表-2 コンクリートと鉄筋の材料構成則

材料	材料構成則
コンクリート	テションスライフィング特性：出雲モデル(C=1.0) 圧縮強度まで：修正 Ahmad モデル 圧縮破壊条件：Ottosen の 4 パラメータモデル(畑中らの係数) 圧縮軟化域：中村・松貝モデル ひび割れ後のせん断伝達：長沼モデル ひび割れ後軟化域：RC 示方書の式
鉄筋	バイリニア(2次剛性：0)

の横断方向(=地震荷重に対する一般的な弱軸方向)である。なお、角度はX軸正方向から反時計回りで示す。

応答震度は、図-3 に示す地震動(水平 $A_{max}=234\text{Gal}$, 鉛直 $A_{max}=195\text{Gal}$)を入力した一次元重複反射理論に基

づく地震応答解析により得られる応答加速度のうち地表面および構造物頂版位置で最大と時刻 3.63 秒における応答加速度(図-4)を重力加速度で除して算出した。

解析は、応答震度による慣性力を載荷後、この荷重状

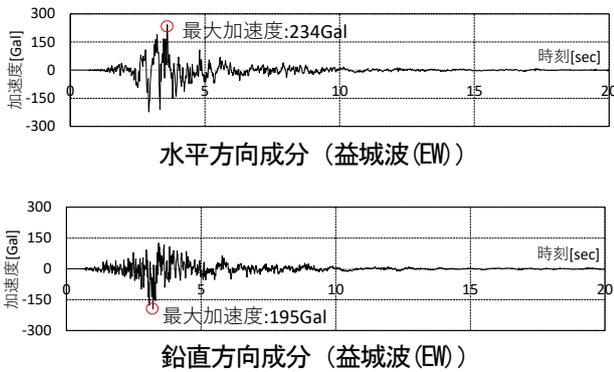


図-3 入力地震波(2016年熊本地震・益城観測波)

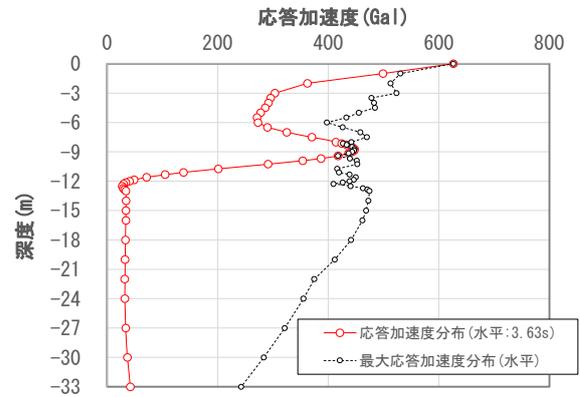
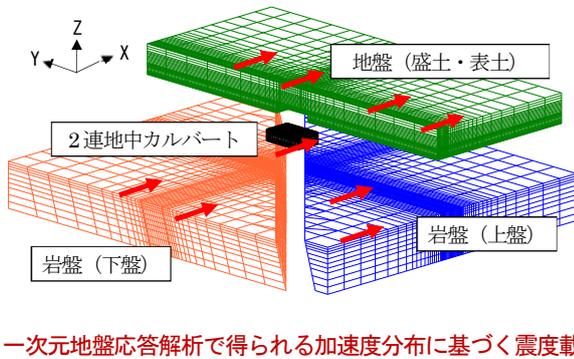
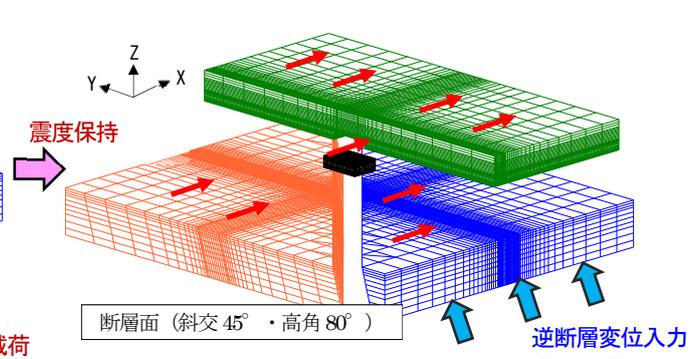


図-4 1次元地震応答解析による加速度分布



一次元地盤応答解析で得られる加速度分布に基づく震度荷重

ステップ1: 地震荷重(応答震度法)



ステップ2: 断層変位

図-5 地震と断層変位の重畳による解析ステップ

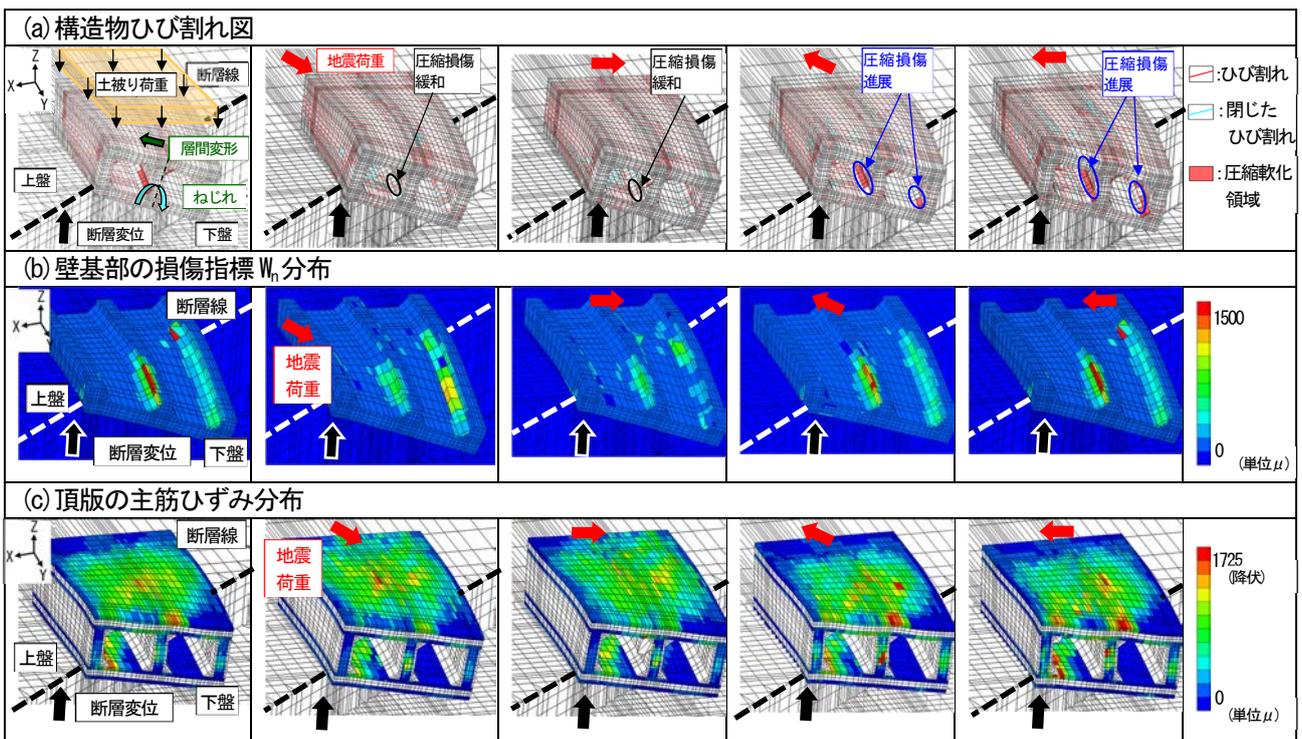


図-6 構造物の代表的な変形・損傷状況の比較

表-3 「壁基部：損傷指標 $W_n=1500\mu$ 到達時」と「頂版：主筋降伏時」の断層変位量 (mm)

損傷指標	地震荷重の作用方向				
	地震荷重なし	135°	180°	315°	0°
$\epsilon_s=1725\mu$ (頂版、主筋降伏)	149	142	142	131	103
$W_n=1500\mu$ (中壁基部、圧縮損傷)	310	486	468	290	274

態を保持し、さらに逆断層変位によるプッシュオーバー解析を行った。載荷順序としては、重畳シナリオの Case1 の地震動⇒断層変位の順序となる。断層変位は、岩盤（上盤）のモデル下端より静的に与えた。地震荷重の載荷後に断層変位が作用する順序となるが、荷重状態としては、同時に作用（重畳）する条件となっている。地盤—構造物連成の三次元材料非線形 FEM モデルおよび載荷ステップを図-5 に示す。

図-2 に示す水平地震力の載荷方向 4 ケースと地震荷重を考慮しないケースの合計 5 ケースの比較により、断層変位と地震荷重との重畳による変形・損傷モードの変化や、断層変位の作用による構造物の地震荷重に対する弱軸方向の変化の把握し、静的解析の適用性を検証した。

構造物の代表的な変形・損傷状況の比較を図-6(a) に示す。特徴的な変形・損傷として、上からの土被り荷重による断層線を支点とした曲げ変形が生じると同時に、片持ち状態となる下盤側では、構造物横断面のねじれとそれに伴う壁部材の層間変形が生じている。同図の赤く塗られた要素は圧縮軟化を生じたコンクリート要素を示し、同図に示す層間変形の向きに対し、壁の基部で圧縮側となる面に圧縮軟化が認められる。地震荷重と重畳した場合、135° 方向、180° 方向に作用する地震荷重に対してはこの領域の損傷は緩和され、315° 方向、0° 方向に作用する地震荷重に対しては損傷が進展しており、地震荷重の作用方向により重畳の影響が異なっている。これは断層変位の作用により生じる層間変形の方法に対し、135°・180° 方向に作用する地震荷重はこの層間変形を打ち消す向き、315°・0° 方向に作用する地震荷重は層間変形を増大させる向きであるためと考えられる。同図(b)には壁基部の圧縮領域に着目した損傷指標 W_n の分布の比較を示す。同図(a)に示した、地震荷重との重畳による壁基部での圧縮損傷の変化の状況と良く対応している。また、土被り荷重による構造物全体の曲げ変形に対し、引張側となる頂版の損傷に着目した指標として、頂版の主筋ひずみ (ϵ_s) 分布の比較を同図(c)に示す。315° 方向および0° 方向に作用する地震荷重と重畳した場合に、構造物が下盤で張り出す側の妻面近傍で主筋ひずみの増大が見られるが、範囲は限定的となっている。

表-3 には壁基部で損傷指標 $W_n=1500\mu$ に到達する時、および頂版で主筋が降伏する時の限界断層変位量の比較を示す。両方の指標において限界断層変位量は、315° 方向・0° 方向に作用する地震荷重と重畳した場合に減

少し、減少量は 0° 方向の方が大きい。すなわち構造物の横断方向（一般的な弱軸方向、0° 方向）の地震荷重による影響が最も大きいことから、本検討では断層変位の作用による弱軸の変化は生じていないことになる。

以上より、重畳現象に対する静的解析の適用性を確認した。

4. 耐力曲線による損傷評価の提案

前述の静的解析による損傷評価では、地震力の作用方向を図-2 に示す 4 方向と仮定して損傷評価を行った結果、弱軸方向の変化は認められず、構造物の横断方向に地震荷重を載荷した場合が最も厳しい評価となった。

しかし、地震荷重を横断方向に載荷する場合は必ずしも厳しい条件となるとは限らず、更に細分化した地震荷重の載荷で最も厳しい照査結果を示すことが必要と考える。よって、構造物の断層変位と地震動との重畳時における構造物の弱軸方向変化および弱軸方向の安全性を評価する手法として、耐力曲線による評価手法を提案する。

地中カルバートは強軸方向、弱軸方向が明確な構造物であり、耐力曲線は横断方向に短軸、縦断方向に長軸を持つ楕円で近似されるが、断層変位が作用する場合には構造物の損傷により弱軸方向が変化し、耐力曲線の長軸・短軸が回転角 ϕ で傾くことになる。更に楕円の形状（ふくらみ）に変化を持たせる従来の関数 $(P_x/P_{ux})^\alpha + (P_x/P_{uy})^\alpha = 1$ （超楕円）での α も含めて解析結果からの定義が必要となる。従って耐力曲線は、長軸、短軸、回転角 ϕ および形状変数 α の 4 変数を用いて表すこととなり、4 方向の耐力値が必要となる。

算定方法として、断層変位により損傷を受けた構造物の耐力曲線上の点 $P_0(x_0, y_0)$ に回転角 $-\phi$ の回転行列を作用させた点を点 $P_1(x_1, y_1)$ とする。4 次の項を考慮して R' 、 θ' を用いて設定すると下式となる。

$$R' = a_0 + a_2 \cos 2\theta + a_4 \cos 4\theta \quad (1)$$

$$\theta' = a_2 \sin 2\theta + a_4 \sin 4\theta \quad (2)$$

拡張した楕円上の点 $P_2(x_2, y_2)$ の座標は媒介変数 θ を用いて下式で表せる ($a_4=0$ のとき楕円)。

$$x_2 = R' \cos \theta + \theta' \sin \theta \quad (3a)$$

$$= (a_0 + a_2 - 3a_4) \cos \theta + 4a_4 \cos^3 \theta \quad (3b)$$

$$y_2 = R' \sin \theta + \Theta' \cos \theta \quad (4a)$$

$$= (a_0 - a_2 - 3a_4) \sin \theta + 4a_4 \sin^3 \theta \quad (4b)$$

点 $P_2 (x_2, y_2)$ をみたく曲線を回帰線とすれば、距離 P_1P_2 を誤差とした最小二乗法により、4 方向の耐力値からパラメータ a_0, a_2, a_4 および回転角 ϕ が求まり、耐力曲線が得られる。

地震力のみ（断層変位なし）ケースでは、構造物の対称性から横断方向、縦断方向、 45° 方向の3方向の耐力が求めれば耐力曲線が得られる（回転角 $\phi=0$ ）。一方で重畳（地震力+断層変位）のケースでは、構造物の対称性が損なわれるため、上記3方向に加えて 135° 方向にも載荷し、さらに正対する2方向（ $0^\circ, 180^\circ$ など）の耐力の違いを考慮し、計8方向に載荷した（図-8）。ただし、実際の地震動は動的に正負交番で作用することから、正対する2方向については耐力が小さくなる載荷方向の結果を採用した。

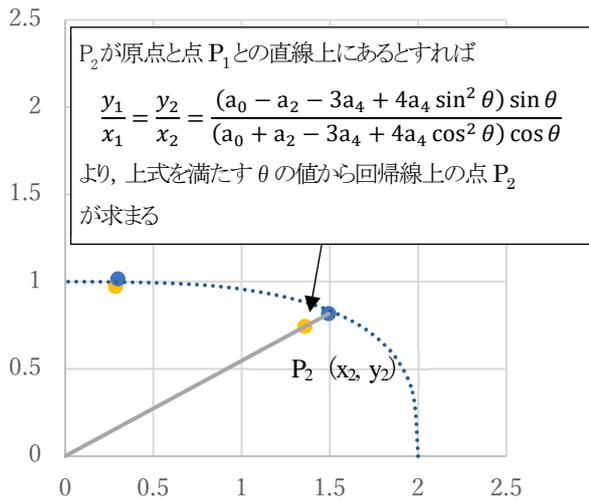


図-7 回帰線と ϕ 回転させた耐力曲線上の点

本検討では、損傷指標（鉄筋降伏ひずみ、底版下面および中壁基部の圧縮損傷 W_n ）に対して、重畳荷重作用時の最大応答値を抽出し、その閾値との比より安全率を算定し、耐力曲線（安全率による曲線）として設定した。

前述の耐力曲線算定方法によって作成した地中カルバート頂版の主筋降伏に対する耐力曲線を図-9に示す。青破線は地震力のみが作用した場合の鉄筋降伏歪（ 1725μ ）に対する発生歪の比率（安全率）で、構造物の弱軸（X方向）で安全率が小さくなる。赤一点鎖線は断層変位（50mm）のみが作用したケースの閾値との比率（安全率）であり、地震力の影響度を確認する観点から円形に仮定して記載している。黒線が重畳ケースでの閾値との比率（安全率）であり、断層線方向の安全率が僅かに小さくなる一方で、構造物の弱軸方向の安全率は僅かに大きくなっている。これは頂版の主筋に対しては、断層変位による影響が大きく、断層変位による損傷モードと地震力による損傷モードが異なることから、地震力により生じる損傷が、断層変位で生じた損傷の進展に殆ど影響を与えないためと考えられる。

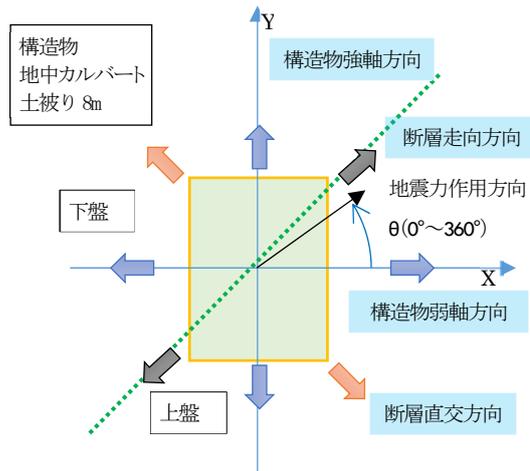


図-8 地震慣性力の載荷方向

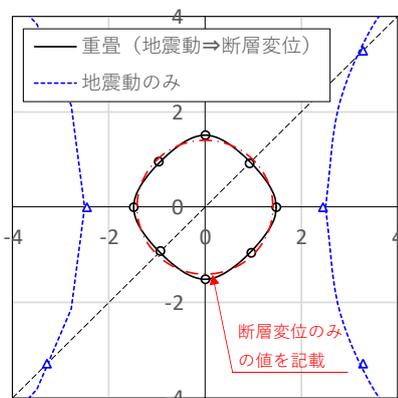


図-9 耐力曲線
（頂版の主筋降伏）

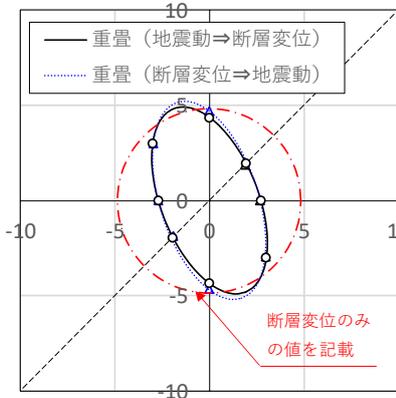


図-10(1) 耐力曲線
（底版下面の W_n ）

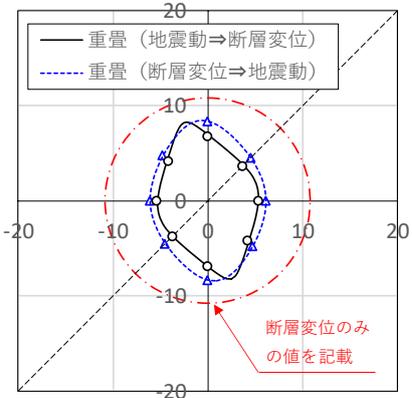


図-10(2) 耐力曲線
（中壁下端の W_n ）

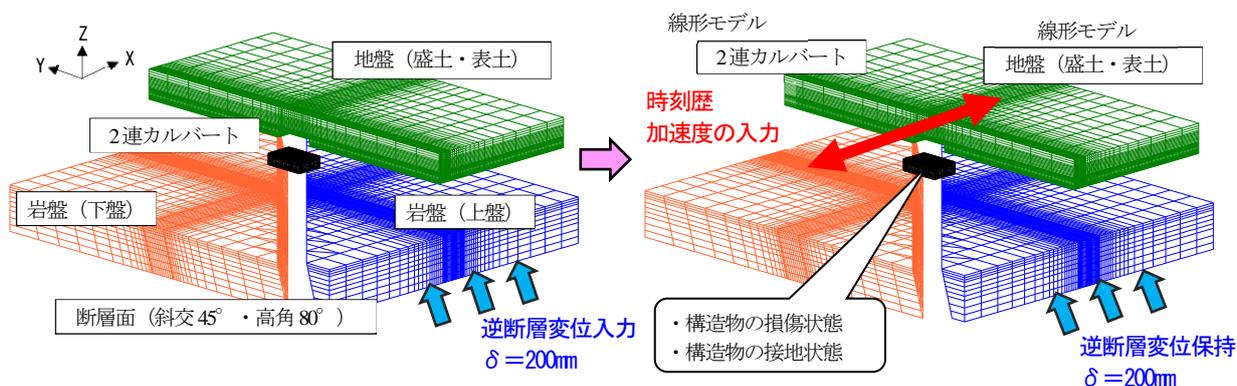


図-11 重畳による床応答への影響に対する解析ステップ

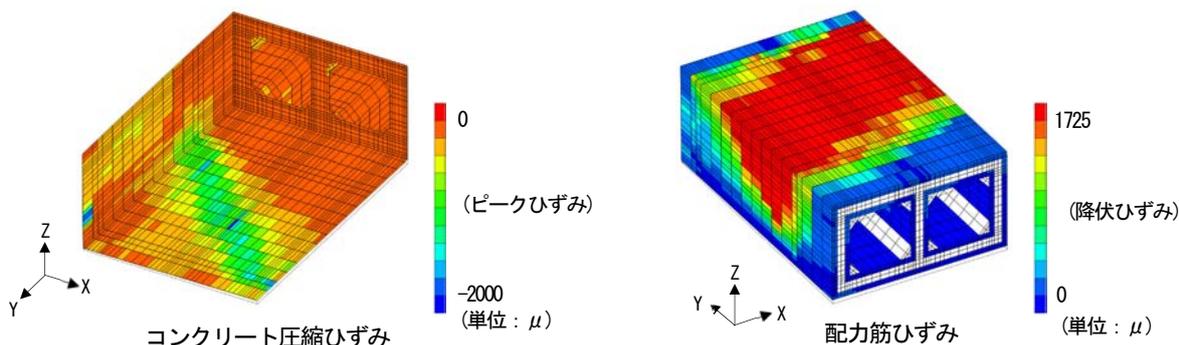


図-12 断層変位による損傷状況

第2章の重畳解析で示した主な圧縮損傷モードである底版下面の圧縮損傷に対する耐力曲線を図-10(1)に、中壁下端の圧縮損傷に対する耐力曲線を図-10(2)に示す。耐力曲線は図-9と同様に閾値との比率(安全率)を示す。図-10(1)では、赤一点鎖線で断層変位のみケースを示し、黒線および青破線で重畳ケースを示す。重畳ケースでは約 $8^\circ \sim 12^\circ$ 傾いた楕円を示しており、断層変位の方向と構造物の弱軸の間で最も安全率が小さくなる方向があることになる。重畳ケースとして、荷重順序を地震動を作用させた状態に断層変位を荷重したケース(重畳シナリオ Case1)および断層変位を荷重した状態に地震動を作用させたケース(重畳シナリオ Case2)の耐力曲線を重ねて記載しているが、殆ど両者に差がなく、荷重順序による影響は小さいことが分かる。

図-10(2)では、図-10(1)に示す底版下面の圧縮損傷より安全率は大きく、中壁下端の圧縮損傷が構造物の主な破壊モードではないことが分かる。楕円の形状は概ね図-10(1)と同様であるが、楕円の回転は僅かであり、第2章で考察したように概ね構造物の弱軸で最小値を示す。また、赤一点鎖線で示す断層変位のみ安全率より重畳ケースの安全率が大きく減少していることから、中壁下端に対する地震動の影響が大きいことが分かる。

上記の通り、耐力曲線を用いれば、断層変位を受けた構造物の弱軸方向、弱軸方向における構造物の安全率が評価できる。

5. 重畳時の床応答の評価

断層変位と地震との重畳による床応答の評価では、重畳シナリオの Case2 として、構造物に断層変位が作用した状態で、さらに余震等による地震動が作用するという想定での検討とした。これは、断層変位により構造物に損傷が生じた状態および構造物周辺地盤の支持性能が変化した状態における床応答への影響を評価することを目的とするためである。

対象構造物の構造配筋およびコンクリートおよび鉄筋の仕様は、図-1と同様とした。解析は図-11に示すように、ステップ1で地盤および構造物の材料非線形モデルに対して所定の断層変位を静的に与え、その状態を保持した状態にステップ2で地震荷重(時刻歴加速度)を入力して動的解析を行った。本検討では解析の安定性を考慮し、動的解析については線形モデルで行うこととした。

断層変位が重畳することによる床応答への影響として、構造物の損傷による剛性の低下および構造物の支持条件の変化(構造物と周辺岩盤・地盤との剥離等)が考えられるため、これらの影響を反映するため、ステップ2では、構造物の剛性低下を考慮した線形モデルとし、構造物と周辺岩盤・地盤間の接触要素は、そのまま非線形性(接触、剥離考慮)を適用した。周辺地盤は、一次元地震応答解析を事前に実施し、その収束剛性を用いて線形としてモデル化した。解析モデルの岩盤底面から入力し

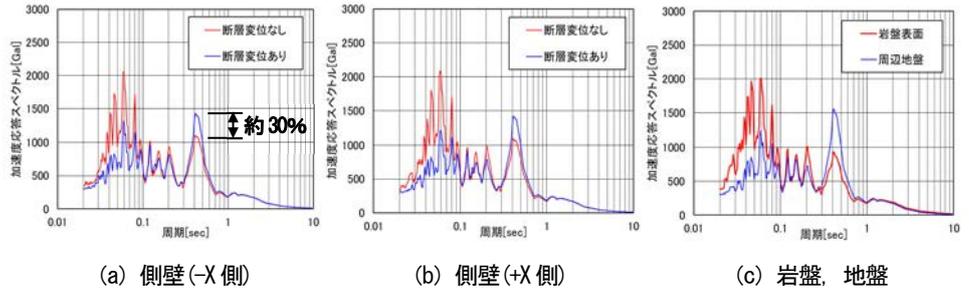
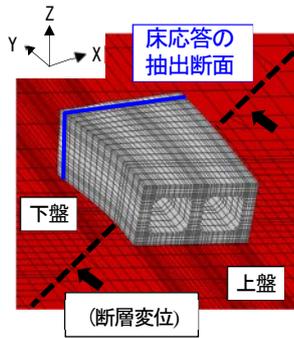


図-13 床応答（加速度応答スペクトル(減衰 1%)）水平方向の結果

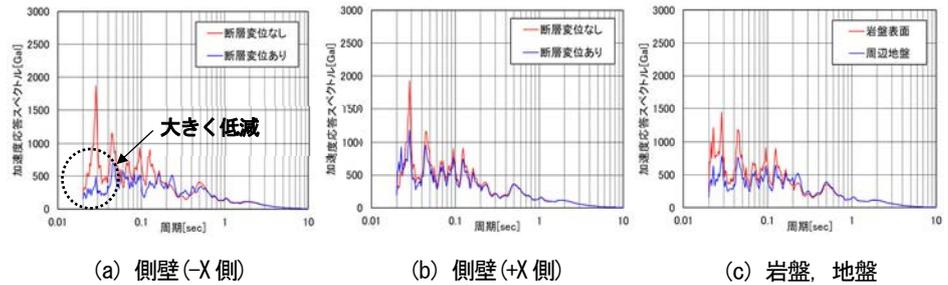
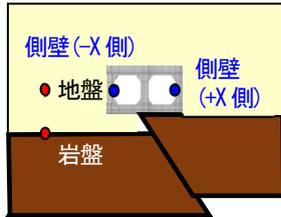


図-14 床応答（加速度応答スペクトル(減衰 1%)）鉛直方向の結果

た時刻歴加速度は2章(図-3)と同じである。

検討における断層変位量は、土被り厚 8m の断層変位解析の結果より、構造物の損傷が進展し剛性低下していると見なせる断層変位量 200mm を設定した。断層変位 200mm 時の構造物の損傷状況を図-12 に示す。断層変位 200mm では、頂版の配力筋が全面で降伏し、また底版の一部のコンクリートがピークひずみに到達していることから、構造物が断層変位の影響を受け、剛性低下した条件と言える。

地震応答解析として、側壁(-X側, +X側)の水平方向の床応答(加速度応答スペクトル(減衰 1%))の結果を図-13 に示す。断層変位の影響により、短周期側で応答が低減し、長周期側で応答が増加する傾向がある。長周期側の応答の増加は最大 30%程度であり、応答が過度に増加することはなかった。断層変位の影響により、-X側が岩盤より浮き上って接地していないが、その応答は+X側の側壁と有意な差はなかった。側壁(-X側, +X側)の鉛直方向の床応答の結果を図-14 に示す。断層変位の影響により短周期側での応答が低減する点は水平成分と同じ傾向であるが、長周期側の応答の増加は水平成分に比較して僅かであり、応答が過度に増加することはなかった。断層変位の影響により、接地していない+X側で短周期側の応答が大きく低減する傾向がある。

構造物周辺の岩盤および地盤の加速度応答スペクトルとの比較により、断層変位の影響がない場合には、岩盤の応答スペクトルに近似し、断層変位の影響で構造物の損傷が大きくなり、構造物周辺地盤の支持性能が変化し

た場合には、表層地盤の応答スペクトルに近くなる事が分かる。

6. 動的解析の適用性検証

重畳現象に対する動的解析の適用性を地盤-構造物連成の三次元動的材非線形解析(以下、動的解析)から得られる構造物の層間変位と作用土圧、静的解析結果との比較により検証した。

動的解析では、断層変位と地震動に起因する荷重作用の二種類の荷重作用を考慮することから、これらの条件下の地盤挙動を適切に評価するため、地盤の構成則には以下の性能が要求される。

- (1) 三次元応力/ひずみ場で、地盤の非線形特性を適切に表現する構成則であること。

断層変位を対象とした解析では評価する地盤の状態として、地盤破壊までを対象とする必要がある。ここで求められる具体的な性能は、地盤の降伏応力(破壊状態)に拘束圧依存性が表現できること、地盤の破壊状態に至る過程において適切な剛性低下が生じかつダイラタンシーと呼ばれる体積変形挙動が再現できること、破壊時のひずみが実地盤の挙動と適合することである。さらに、断層変位の方向性や構造物周囲の応力状態の複雑さを考慮すると、応力主軸の回転を前提とした三次元応力場での構成則である必要がある。

(2) 動的応答特性と静的特性を統一的に扱うことが可能なこと。

重畳解析では断層変位解析で地盤や構造物に生じた状態（例えば地盤の変形や構造物への荷重条件、損傷程度）を保持しつつ、地震時の状態が再現可能な構成則が必要である。これは、地盤の非線形特性が静的解析と動的解析の重ね合わせでは適切に評価できないからである。一方、上述した静的問題への適合性に加え、地震時の動的応答特性、すなわち地震による繰返し応力の作用による繰返し塑性変形特性とエネルギー消散特性（減衰特性）の再現性が求められる。

本研究では、上記要求性能を満足する地盤の構成則として、下負荷面モデルの弾塑性構成則を導入して動的解析を行った。

動的解析では、①下負荷面モデルの要素シミュレーションを実施し、②大規模三次元解析（図-1）により断層変位を作用させた後に、③地中カルバートの周辺地盤

で大きな歪が発生している状態で地震動を入力し、地中カルバートへの影響について考察した。

①では、地中カルバートの周辺地盤を砂質土とし、地中カルバートの断層遠心実験⁹⁾に適用した地盤材料を対象とした圧密排水三軸試験（7号珪砂：Dr=90%・拘束圧100kN/m²）の結果を参考に、下負荷面モデルの要素シミュレーションを実施した。解析ソフトは、FINAL-GEOとした。要素シミュレーションの三軸圧縮試験は、1個のソリッド要素に初期応力100kN/m²を与えた後、鉛直変位を変位制御で歪0.15まで載荷した。繰返し三軸試験は、初期応力100kN/m²を与えた後、鉛直変位を変位制御で歪10⁻⁶~10⁻²まで繰返し載荷した。室内試験と要素シミュレーションの結果比較を図-15に示す。両方のグラフが概ね一致する下負荷面モデルのパラメータを求めることができたと考える。要素シミュレーションで決定したパラメータ値を表-3に示す。

②で地中カルバートに対して走向45°で逆断層変位

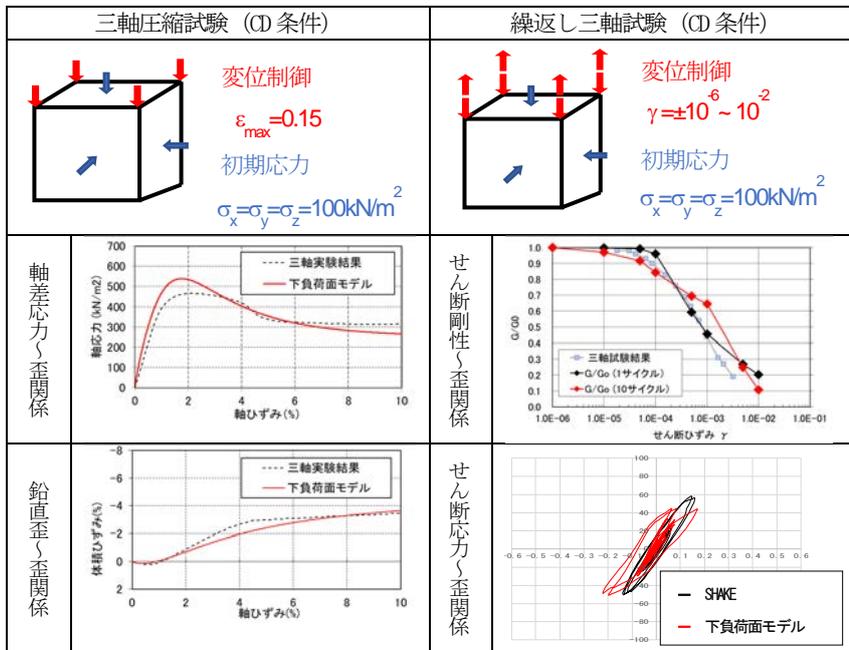


図-15 下負荷面モデルの要素シミュレーション結果

表-3 下負荷面のパラメータ

項目	入力値
ヤング係数 E (N/mm ²)	198.9
ポアソン比 ν	0.33
内部摩擦角 φ (度)	32
初期間隙比 e ₀	0.73
膨潤指数 κ	0.00089
圧縮指数 λ	0.02276
過圧密比 OCR	100
膨潤指数の基準拘束圧	1.0
U(R)の定数	2.00
相似中心発展則の定数	1.0
回転硬化限界面の定数 φ _b (度)	6.0
回転硬化発展則の定数 Br	10.0
せん断硬化軟化程度の定数 μ	0.01

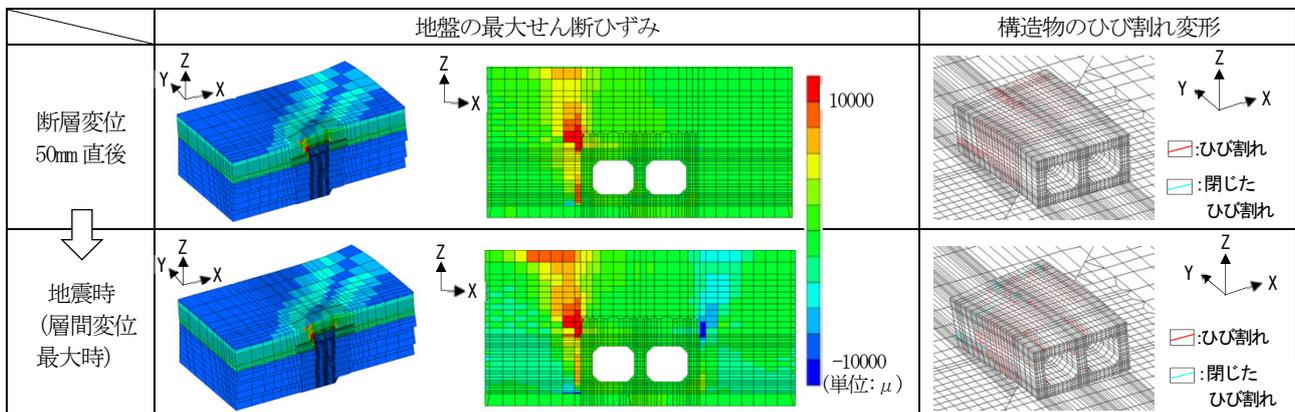


図-16 地盤の最大せん断ひずみと構造物のひび割れ変形図

50mm を静的に載荷した後、③で時刻歴加速度による動的解析を実施した。地震動は、図-3 に示す入力加速度を使用し、水平・鉛直方向の同時入力として、水平方向は、構造物の横断断面方向（弱軸方向）に入力した。

図-16 より断層変位の影響により構造物の左側上方に地盤のせん断ひずみが発生し、滑り線が発生していることが分かる。地震動により構造物の右側上方にも地盤のせん断ひずみが集中し、更に構造物周囲にも一定のせん断ひずみが発生していることが分かる。また地中カルバートにおいては、頂版のひび割れに閉じる部分が発生する一方で、中壁の上下端部にはひび割れが新たに発生している。これは断層変位の影響による「構造物全体の曲げモード」と地震の影響による「壁の面外方向の曲げモード」との重ね合わせが起こり、後者が卓越する現象が発生しているためと考えられる。

層間変位は、図-17 に示すように断層変位の影響により変形した後、地震動の影響により更に変位が進行し、地震後に残留変位が生じている。地震動の影響で壁の損傷が進行し、断層変位の影響による変位と同じ方向に変位が増大する、つまり損傷の重ね合わせが起こっている

ことが分かる。構造物に作用している水平土圧は、断層変位の影響により左側壁土圧が増加し、右側壁土圧が減少する。一方でその後の地震時では両側壁の土圧が減少する。これは地震の影響により構造物周辺の地盤ひずみが増加し、地盤の剛性が低下したためと考えられる。

以上のことから、層間変位と作用土圧の関係を整理することで、構造物と地盤の相互作用のメカニズムの解明および構造物のひび割れ損傷状況の把握ができていていると考える。

3章で実施した静的解析と動的解析との解析を比較した結果を図-18 に示す。構造物の損傷については、応答震度法と動的解析とで有意な差がなく構造物の損傷が再現されていることから、静的解析の妥当性、動的解析の適用性が確認できた。

また、動的解析は、断層変位解析から地震応答解析の連続解析を実施することで、各現象の相互影響を詳細に把握し、重畳現象の複合的な作用を把握することが可能であり、今後、動的解析でも検証を進めていく必要があると考える。

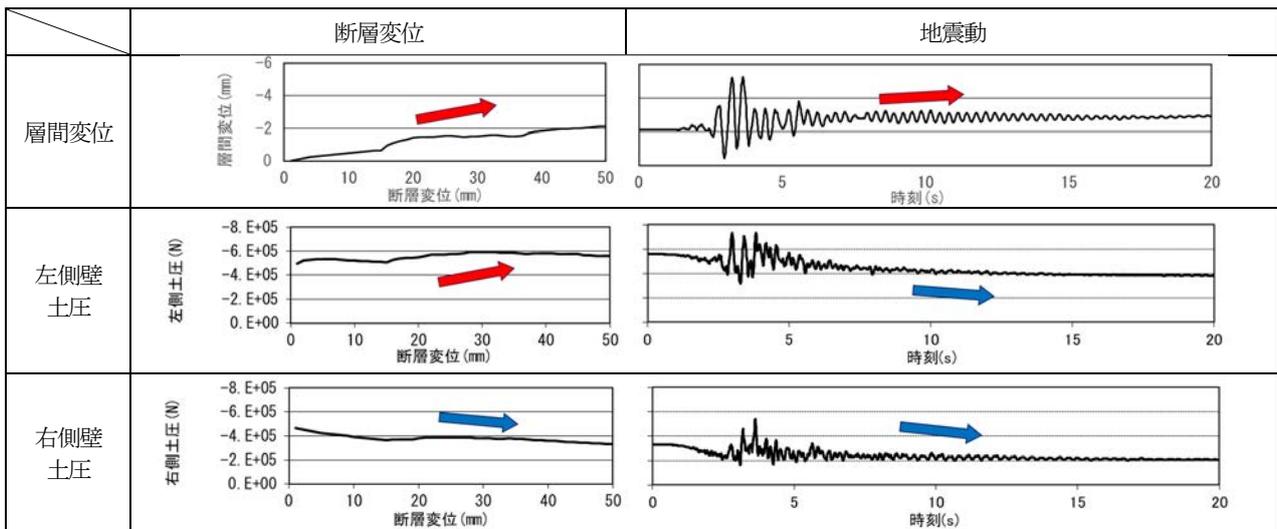


図-17 層間変位と側壁土圧の比較

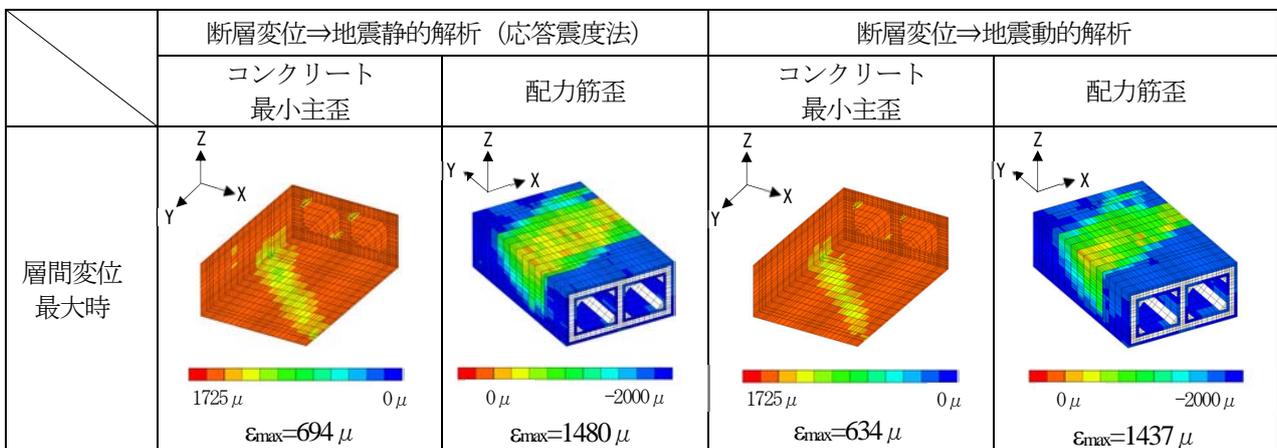


図-18 重畳解析における応答震度法と動的解析の比較

7. まとめ

本研究では、断層変位と地震との重畳を受ける鉄筋コンクリート製地中ボックスカルバートを対象に要求性能に応じた損傷や破壊に対する評価手法について解析的に様々な検討を行い、耐力曲線による評価手法を提案した。

本研究で得られた知見は、以下の通りである。

(1) 断層変位による弱軸方向の変化

断層変位と地震との重畳現象を検討する場合、地震荷重を構造物の弱軸方向（横断方向）に作用させることが最も厳しい条件とは限らず、断層変位による構造物の損傷も考慮する必要があることから、3章では地震荷重の水平成分の載荷方向をパラメータとした検討を行った。

この結果、構造物の横断方向（一般的な弱軸方向）の地震荷重による影響が最も大きく、断層変位の作用による弱軸の変化は認められなかった。一方で、今回提案した耐力曲線による検討では、底版下面の圧縮損傷の耐力曲線で約 8° ~ 12° 傾いた楕円となり、断層変位の作用により構造物の損傷部位によっては弱軸方向が変化していることが分かった。

よって、断層変位と地震との重畳現象に対する損傷評価では、断層変位による弱軸方向の変化に留意する必要がある。

(2) 耐力曲線による損傷評価

断層変位と地震との重畳現象に対する損傷評価において、今回提案する耐力曲線を用いることより、断層変位により変化した弱軸方向の安全率の定量的な評価が可能であり、構造物の健全性が評価できることが分かった。

また、構造物の損傷箇所などの詳細な評価は、耐力曲線による弱軸方向に地震力を作用させることにより評価できる。

(3) 断層変位の作用を受けた構造物の地震応答

断層変位の作用により損傷を受けた地中カルバートの地震応答は、短周期側で応答が低減し、長周期側で応答が増加する傾向がある。断層変位の作用がない場合には、岩盤の応答スペクトルに近似していたが、断層変位の影響で周辺地盤の支持性能が変化した場合（構造物が岩盤より浮き上がる場合）には、表層地盤の応答スペクトルに近くなることが分かった。

(4) 動的解析の有用性

3章に示す静的解析による解析的検討、6章に示す静的解析結果と動的解析結果の比較により、構造物の損傷

については、静的解析と動的解析とで有意な差がなく、構造物の損傷が再現されていることから、動的解析の適用性が確認できた。

また、動的解析は、断層変位解析から地震応答解析の連続解析を実施することで、各現象の相互影響を詳細に把握し、重畳現象の複合的な作用を把握でき、有用な損傷評価手法であると考えられる。今後、重畳現象について動的解析でも詳細な検証を進めていく必要がある。

謝辞：本研究は、電力9社と日本原子力発電（株）、電源開発（株）、日本原燃（株）による原子力リスク研究センター共通研究として実施した。関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 原子力規制委員会：実用発電用原子炉に係る新規規制基準について—概要，2016.2.
- 2) 一般社団法人 原子力安全推進協会 敷地内断層評価手法検討委員会：原子力発電所敷地内断層の変位に対する評価方法に関する調査・検討報告書，2014.9.
- 3) 土木学会原子力土木委員会：原子力発電所の基礎地盤および周辺斜面の安定性評価 技術資料，2009.2.
- 4) 一般社団法人 原子力学会「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「断層の活動性と工学的なリスク評価」調査専門委員会 報告書，2017.3.
- 5) 伊藤悟郎，山口和英，肥田幸賢，永井秀樹，堤内隆広，米澤健次：岩盤上に設置された地中カルバートの断層変位に対する耐変位評価手法，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol.76, No.1, 180-196, 2020.
- 6) 山口和英，肥田幸賢，永井秀樹，米澤健次：断層変位と地震の重畳現象に対する地中カルバートの損傷評価，2020年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会
- 7) 山口和英，佐藤達也，原朗，堤内隆広，渡辺伸和：断層変位による損傷を受けた地中カルバートの地震作用に対する評価手法に関する一考察，2019年度土木学会全国大会第74回年次学術講演会
- 8) 堤内隆広，鳥巢セダ，伊藤浩二，山口和英：重畳現象に対する地中カルバートの下負荷面モデルを用いた三次元動的解析，2020年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会
- 9) 山口和英，肥田幸賢，堤内隆広，永井秀樹：断層変位を受けた地中カルバートに対する地震時応答，2021年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会
- 10) 一般社団法人 原子力安全推進協会 敷地内断層評価手法検討委員会：原子力発電所敷地内断層の変位に対する評価方法に関する調査・検討報告書，JANSI-FDE-01，2013.9.
- 11) 米澤健次，穴吹拓也，樋口俊一：3次元大規模モデルによる地盤と構造物の非線形連成FEM解析，コンクリート工学年次論文集，Vol. 34, No. 2, pp. 55-60, 2012.

DAMAGE ASSESMENT METHOD OF UNDERGROUND CULVERTS SUBJECT TO FAULT DISPLACEMENT AND EARTHQUAKE SUPERIMPOSITION

Kazuhide YAMAGUCHI, Takahiro TSUTSUMIUCHI, Akira HARA,
Hideki NAGAI, Yukimasa HIDA

Althoght we had studied the evaluation of the impact of underground structures due to fault displacement, in this report, it is introduced that the results of various analytical studies on the evaluation of damage and destruction according to the required performance of underground culverts under superimposition phenomena fault displacement and earthquake.

As a result, it was found that it is necessary to pay attention to the change in the weak axis direction of the structure due to fault displacement in the damage evaluation for the phenomena fault displacement and earthquake. It was found that the safety factor in the weak axis direction can be quantitatively evaluated by the yield strength curve proposed this time. It was also confirmed that the response seismic intensity method analysis by the three-dimensional nonlinear FEM can be applied to the damage evaluation for the phenomena fault displacement and earthquake.