

論文 三次元的な構造を有した地中 RC 構造物の終局挙動評価

中村 翔^{*1}・上田尚史^{*2}・河村精一^{*3}・中村 光^{*4}

要旨：三次元的な構造を有した地中 RC 構造物の地震時の終局時の挙動は未だ不明な点が多い。本研究では、応答変位法を用いて地中に埋設された RC 構造物が受ける荷重を想定し、三次元的な構造を有した地中 RC ボックス構造物の終局時挙動を三次元有限要素解析により解析的に評価した。その結果、三次元的な構造を有した地中 RC ボックス構造物の挙動に及ぼすせん断壁の影響は大きく、終局域に至るまでにせん断壁の効果により複雑な挙動となることが示された。

キーワード：地中 RC 構造物, 三次元解析, 応答変位法, 終局挙動

1. はじめに

横断方向および奥行方向に鉄筋コンクリート壁で仕切られた箱型の地中 RC ボックス構造物は数多く存在する。そのようなせん断壁を有する RC ボックス構造物を設計する際、実務では二次元ラーメン構造としてモデル化し耐震設計する場合が多い。すなわち、せん断壁が構造物の横断方向変形に対する剛性を高める効果を見逃し、せん断壁の剛性を側壁や頂版の剛性に分配することはしない。このことは、構造物横断面方向の断面変形よりもせん断壁の終局が先行することを仮定し、壁と側壁の接合部の健全性が保たれているということを暗黙の前提としている。この破壊性状に対する前提については、実験的に一部検討はされているが¹⁾、様々な条件下での終局時の挙動については未だ明確になっていないため、数値解析により、地中 RC 構造物の終局挙動の詳細な検討をすることが望まれる。

そこで本研究では、図-1に示すせん断壁が設置された RC ボックス構造物を三次元的にモデル化して有限要素解析を行うとともに、応答変位法により地中構造物に作用する荷重を想定して、その終局時に至るまでの挙動を検討した。

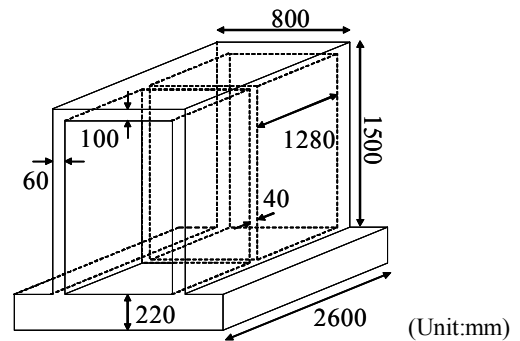


図-1 せん断壁を有する RC ボックス構造物

2. 解析手法

2.1 格子等価連続体モデル (LECOM)

本研究では構成則に格子等価連続体モデル (LECOM)²⁾を用いた三次元有限要素法により解析を行った。格子等価連続体モデルは、コンクリートと補強鉄筋の耐荷機構をモデル化する Main Lattice と、ひび割れ面におけるせん断伝達挙動をモデル化する Shear Lattice を想定することにより、RC 要素の連続体構成式を構築するものである。図-2に本解析で用いたコンクリートの一軸応力-ひずみ関係を示す。引張領域では、引張破壊エネルギーを考慮した 1/4 モデルを用いた。圧縮領域では、解の要素寸法依存性を軽減するために、ひずみ軟化領域に中村ら³⁾が提案する

*1 名古屋大学大学院	工学研究科社会基盤工学専攻	(正会員)
*2 名古屋大学大学院	工学研究科社会基盤工学専攻研究員	工(修) (正会員)
*3 中部電力(株)	土木建築部	工(修) (非会員)
*4 名古屋大学大学院	工学研究科社会基盤工学専攻教授	工(博) (正会員)

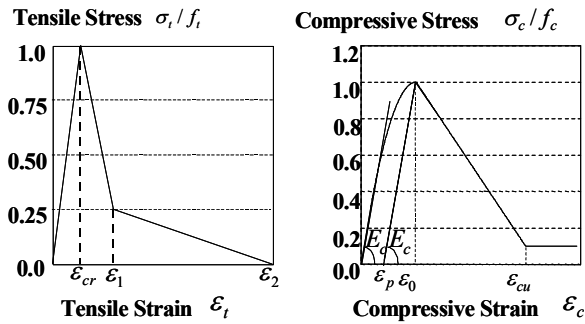


図-2 コンクリート一軸応力-ひずみ関係

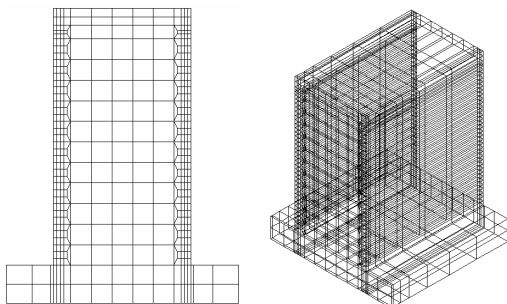


図-3 三次元モデル

表-1 各部材の断面諸元

部材			部材		
側壁	断面厚さ (mm)	60	せん断壁	断面厚さ (mm)	40
	鉄筋量 (mm)	D6@62.5		鉄筋量 (mm)	D4@62.5
	鉄筋比 (%)	0.51		鉄筋比 (%)	0.57
頂版	断面厚さ (mm)	100	底版	断面厚さ (mm)	200
	鉄筋量 (mm)	D6@62.5		鉄筋量 (mm)	D4@62.5
	鉄筋比 (%)	0.57		鉄筋比 (%)	0.65

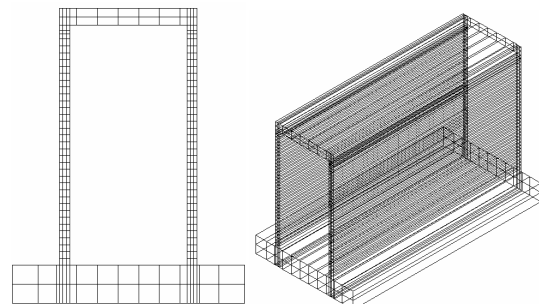


図-4 フレームモデル

圧縮破壊エネルギーを導入した。等価長さは、コンクリート要素の体積の三乗根とした。鉄筋は要素内に分散させてモデル化し、応力-ひずみ関係はバイリニア型とし、降伏後は剛性を弾性剛性の1/100とした。

2.2 解析対象

本研究では、せん断土槽内に底面完全固定条件で埋設された構造物に対して行われた振動台実験¹⁾で用いられた試験体を解析対象とした。試験体はRCボックス構造で、中央部にせん断壁を有した構造物である。試験体の寸法諸元を図-1に示す。材料諸元はコンクリートのヤング率が28.6kN/mm²、圧縮強度が35.7 N/mm²、引張強度が3.21 N/mm²、D6鉄筋においてはヤング率が217kN/mm²、降伏強度が401N/mm²、D4鉄筋においてはヤング率が198 kN/mm²、降伏強度が414 N/mm²である。断面諸元は表-1に示す通りである。

2.3 解析モデル

本解析では図-1に示す試験体の奥行き方向対称性を考慮し、図-3のように1/2モデルでモデ

ル化(以下、三次元モデル)した。また、せん断壁の効果を明らかにするために、図-4のようなせん断壁を有していない解析モデル(以下、フレームモデル)についても解析を行った。三次元モデル、フレームモデルともに断面は共通しており、曲げ変形が予想される側壁は厚さ方向に3分割した。

2.4 解析方法

地中RC構造物の解析は応答変位法により行った。応答変位法で用いる地盤変位および地盤ばね値は一次元地震応答解析により算定し、ばね値の設定は道路橋示方書・下部構造編⁴⁾に準拠した。また、本検討においては、設計において通常考慮するRC構造物に作用する慣性力を検討の簡便化の観点から無視し、構造物頂版上面に作用する周面せん断力と構造物側面に作用する変位のみを考慮した。周面せん断力には構造物頂部深度でのせん断応力を用いた。一次元地震応答解析は振動台実験に用いられた入力波波形(3Hz, sin波)の最大値を500Gal, 1000Gal, 1500Galと変化させた3パターンを行った。

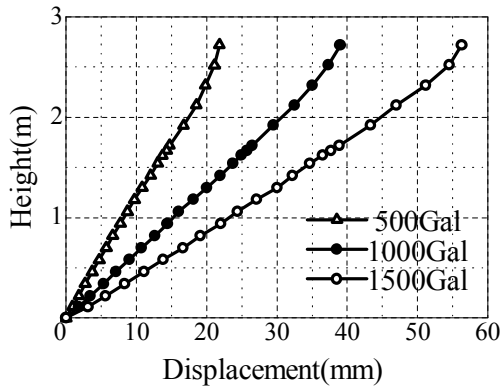


図-5 地盤変形分布

図-5にそれぞれの加速度時の地盤変形を示す。図-5に示すように、地盤変形は加速度の大きさによらず、ほぼ同一な形状でその絶対値が加速度に比例していたため、1500Gal時の変形分布を保ったまま、比例的に変位の大きさを随時増加させた。さらに、実際には生じる可能性のない大変位領域まで、解析を行うことで、終局時に至る挙動の評価を試みた。なお、地盤反力係数は変位の絶対値に関わらず、1500Gal時の値を用いた。また、試験体底面を全固定とした。

2.5 三次元解析の検証

応答変位法による解析に先立ち、振動台実験後に取り出された同一試験体に対して気中で行われた静的載荷試験を解析することで、本解析の妥当性を検証した。静的載荷試験は試験体頂部の水平方向変位を奥行方向に一定に制御して載荷が行われたものである¹⁾。実験ならびに解析による荷重-変位関係を図-6に示す。実験値は初期から逆S字型の挙動を示しているが、これは振動台実験により、既に損傷を受けているためである。静的載荷解析では振動台実験で与えられた損傷を考慮するために、同程度の損傷まで一方向に載荷した後、繰り返し解析を行った。図-6より、解析より得られた履歴挙動は、損傷を受けた構造物の逆S字型の履歴を含む挙動とよく一致しており、三次元モデルに対する本解析の妥当性が示されている。

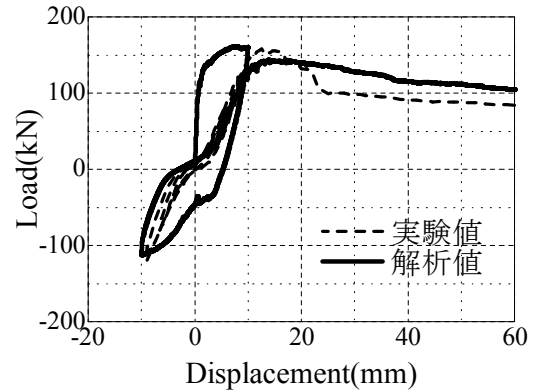


図-6 荷重-変位関係 (気中-三次元モデル)

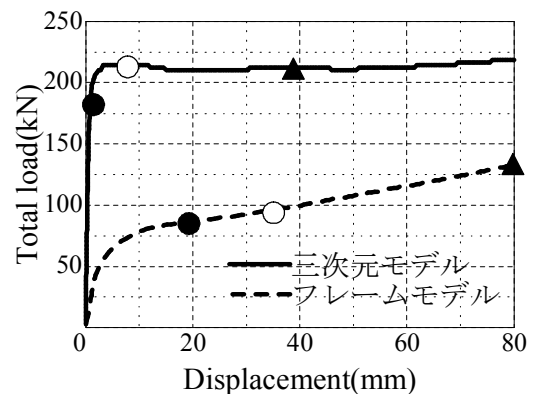


図-7 荷重-変位関係 (応答変位法)

3. 三次元モデルの変形性状ならびに荷重分担性状

3.1 三次元モデルの変形性状

図-7に三次元モデルとフレームモデルのせん断壁位置の頂部の変位と試験体に作用する水平方向荷重の総和で表した荷重変位関係を示す。

図-7中、●印は応答変位法により得られた1000Gal相当の地盤変位を与えた場合に対応する時点(以下、1000Gal時)を、○印は1500Gal相当の地盤変位に対応する時点(以下、1500Gal時)を示している。さらに▲印は1500Gal時の2倍の地盤変位を与えたものに対応する。このような大きな地盤変位では、地盤応答や地盤ばね値は当然1500Galの場合と大きく変わると考えられ、またその大きさも現実的ではないが、便宜的に終局挙動を検討するための3000Gal相当の地盤変位に対応する時点(以下、3000Gal時)とした。荷重-変位関係については、三次元モデルはフレームモデルの倍程度の荷重保持能力

を持っており、せん断壁の効果がうかがえる。

図-8にせん断壁を有している構造物の1000Gal, 1500Gal, 3000Gal時での三次元モデルの変形図を示す。変形図は、変形モードの相違を理解しやすいように、せん断壁位置の頂部の変形が等しくなるように示した。表-2に地盤およびフレームモデルと三次元モデルの地盤に押される側の構造物頂部位置の変形量を示す。

フレームモデルでは、1500Gal時以降は地盤変位とほぼ等しい変位となっており、構造物が降伏し剛性が失われたことが予測される。三次元モデルでは、1000Gal時においては、せん断壁位置と開口部変位の差は小さく、またその値はフレームモデルよりもかなり小さいことから、せん断壁が構造物全体の剛性を高める効果が十分に発揮されていることが分かる。ただし側壁の変形モードは、地盤に押される側では、開口部に近づくほどせん断壁位置とは異なり内側にたわむ挙動を示す。1500Gal時では、せん断壁位置と開口部の変位差が大きくなるが、変位量はフレームモデルよりもかなり小さいことから、せん断壁の効果は十分に存在する。一方、3000Gal時では開口部の変位は急激に増加し地盤変位に近づく挙動を示すため、開口部ではせん断壁の効果がほとんど失われていると思われる。しかしながら、その変位は依然としてフレームモデルより小さく、大変形時においてもせん断壁に

表-2 構造物頂部位置の変位量 (mm)

Gal	地盤	フレーム	3次元	
			開口部	せん断壁
1000	26.5	19	0.8	0.7
1500	39	35	8.2	5.9
3000	80	80	68	4.4

よる構造物全体の剛性を高める効果はある程度維持されていると推測できる。

3.2 三次元モデルの荷重分担性状

三次元モデルに対する頂版位置での側壁奥行き方向の荷重分担分布を図-9に示す。縦軸の荷重は解析モデルに作用する水平方向荷重をその節点の支配面積で除したものであり、単位面積当りの水平方向荷重となっている。横軸は、開口部からの側壁奥行き方向の距離を示している。図-9中の破線は1000Gal時、一点鎖線は1500Gal時、実線は3000Gal時に対応する荷重分担分布性状を示している。

頂版の奥行き方向の荷重分担分布は1000Gal時ではせん断壁位置も含め一様な分布となった。しかし、1500Gal時ではせん断壁が負担する荷重が増加した。さらに3000Gal時では、せん断壁位置の荷重が顕著に大きくなるとともに、側壁に作用する荷重がせん断壁から離れるに従い徐々に小さくなる挙動を示した。このような挙

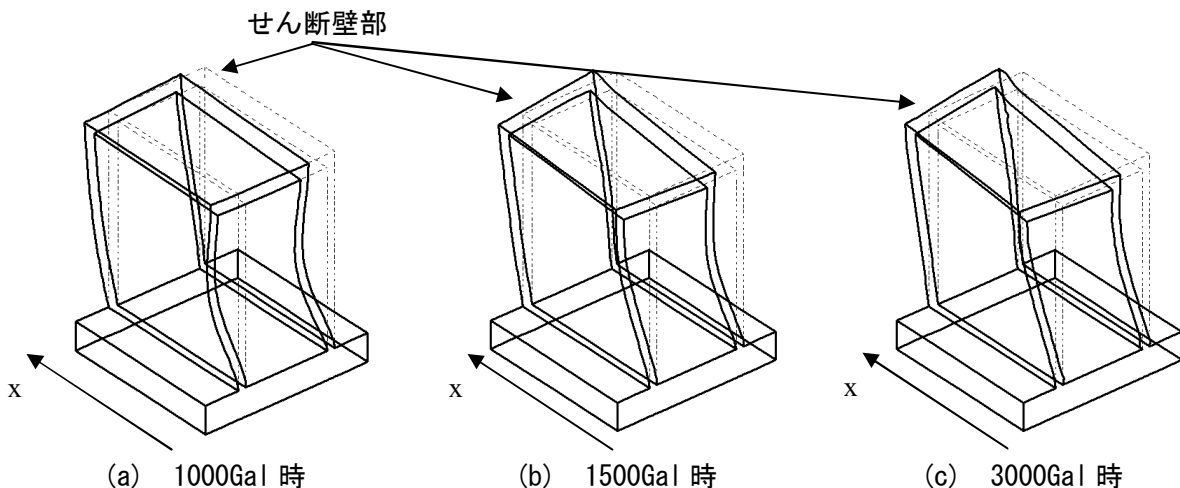


図-8 三次元モデルの変形図

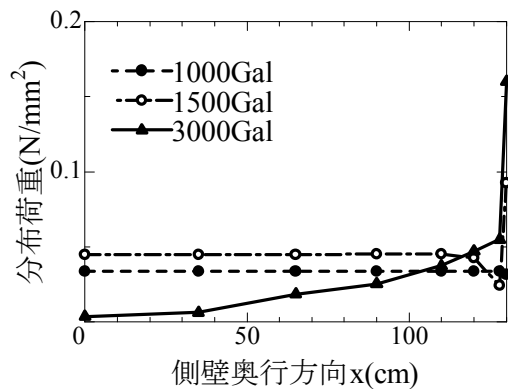


図-9 荷重分担分布図

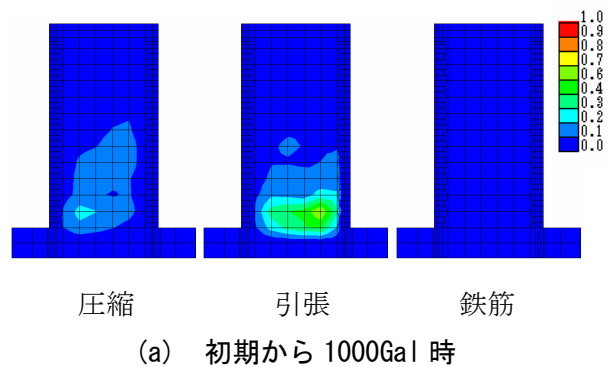
動は、前節で示した変形量や変形モードが開口部に近づくほどせん断壁近傍の挙動と異なっていることと対応しているとともに、終局域ではせん断壁と側壁との間で応力の再配分が行われ、耐荷機構がかなり変化することを示唆するものと考えられる。

4. 三次元モデルの損傷進展状況

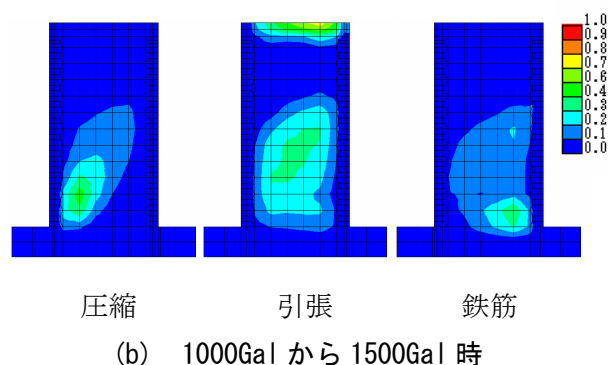
4.1 せん断壁の損傷進展状況

図-10 に初期から 1000Gal 時まで、1000Gal 時から 1500Gal 時まで、1500Gal 時から 3000Gal 時までのせん断壁のコンクリートの引張、圧縮、鉄筋の増分ひずみエネルギー吸収図を示す。なお、せん断の増分ひずみエネルギーは微小だったため今回は省いた。それぞれの増分ひずみエネルギー吸収図を用いることで、対象とした増分過程で、どの成分がどの領域で全体のエネルギー増分に寄与しているかを調べることが可能になる⁹⁾。なお、各増分吸収エネルギーは、対象とする増分過程で要素の全増分吸収エネルギー（コンクリート+鉄筋）が最大となる要素の値で正規化した。なお、構造物は右側から地盤に押される方向である。

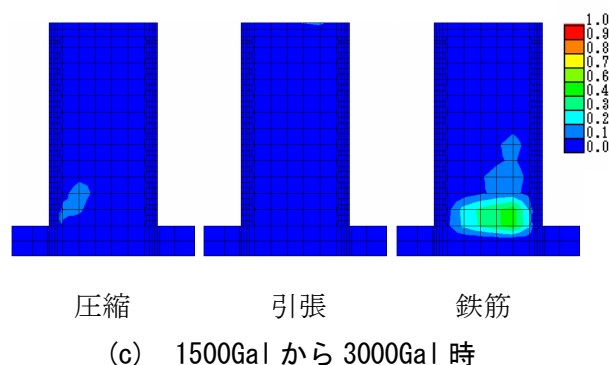
1000Gal 時まで、エネルギーは引張応力下のコンクリートが主に吸収している。1000Gal から 1500Gal 時までは、圧縮応力下のコンクリートと鉄筋もエネルギーを分担するようになり、特に圧縮応力下のコンクリートはストラットを形成してエネルギーを吸収していることが分かる。



(a) 初期から 1000Gal 時



(b) 1000Gal から 1500Gal 時



(c) 1500Gal から 3000Gal 時

図-10 せん断壁のひずみエネルギー吸収

1500Gal から 3000Gal 時までは鉄筋が主にエネルギーを吸収している。したがって、終局域では鉄筋が降伏し、その部分の変形が増大しながら耐荷力を保持し続けていると推測される。

4.2 側壁の損傷進展状況

図-11 に初期から 1000Gal 時まで、1000Gal 時から 1500Gal 時まで、1500Gal 時から 3000Gal 時までのせん断壁、側壁の各部位の全増分吸収エネルギーの分布を示す。1000Gal 時までは、各部位とも下端で主にエネルギー吸収をしていることが分かる。また地盤に押される側の側壁は

奥行き方向にほぼ一様にエネルギーを吸収している。

1000Gal 時から 1500Gal 時点では、せん断壁はストラットにより主にエネルギーを吸収し、側壁は下端部で主にエネルギーを吸収する。ただし、側壁のエネルギー吸収は、地盤に押される側の開口部下端において大きくなっており、せん断壁の効果が失われフレーム的な挙動に開口部が移行していると推測される。1500Gal 時から 3000Gal 時では側壁の大きなエネルギー吸収域がせん断壁方向に移動していることが分かる。このような側壁部の挙動は、せん断壁の効果が徐々に開口部から失われてフレームの挙動に近づいていくことを示していると推測される。

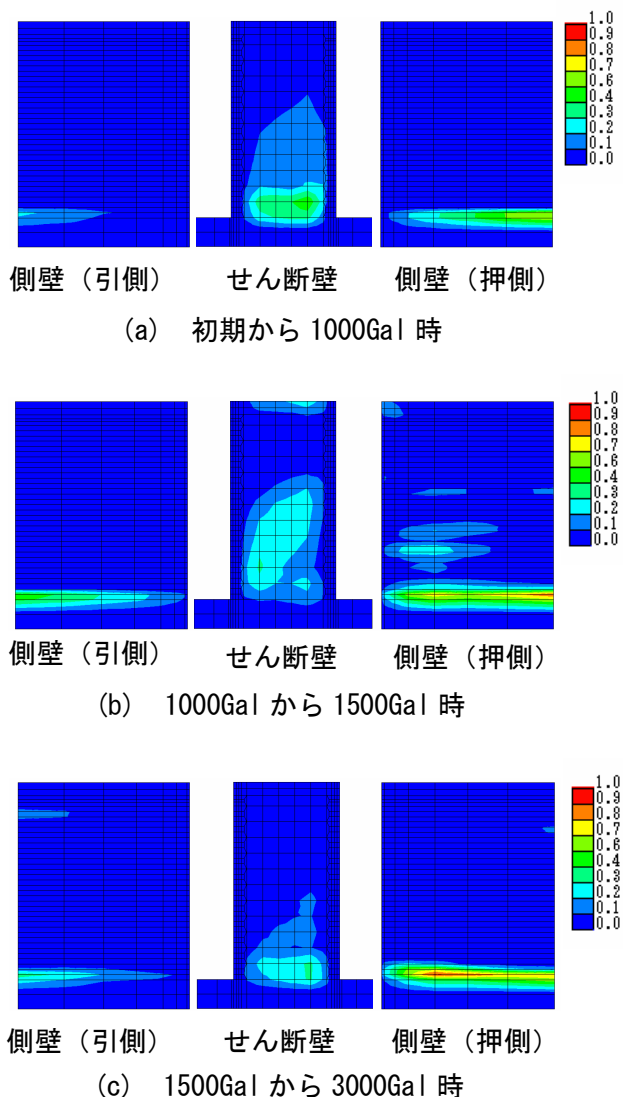


図-11 側壁およびせん断壁の
ひずみエネルギー吸収

5. まとめ

応答変位法を用いて、地中での荷重状態を簡易に仮定し、三次元的な構造を有した地中 RC 構造物の終局挙動の評価を試みた。そして、地中 RC 構造物の変形ならびに荷重分布性状やひずみエネルギー吸収分布を検討した結果、以下の知見を得た。

- (1) 本研究により得られた構造物の変形図から、せん断壁による構造物全体の剛性を高める効果は終局域においてもある程度存在すると推測される。
- (2) 本研究により得られた荷重分担分布により、終局時にはせん断壁の荷重分担が大きくなり、耐荷機構が 1000Gal 程度の荷重を受ける場合から変化することが推測された。

参考文献

- 1) 土木学会原子力土木委員会：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〉，土木学会，pp.1-22，2005
- 2) 田辺忠顕：初期応力を考慮した RC 構造物の非線形解析方法とプログラム，技報堂出版，2004
- 3) NAKAMURA,H and HIGAI,T : Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads , ASCE , pp.471-487,2001
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・下部構造物編，日本道路協会，2002.6
- 5) 上田尚史，伊藤睦，中村光，田辺忠顕：せん断破壊を生じる RC はりおよび柱のエネルギー吸収と破壊プロセス，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.26，No.2，pp.1003-1008，2004.2