

鉄筋コンクリート製地中構造物の 遠心力模型振動実験と解析

伊藤浩二¹・大野了²・松田隆³

¹ (株)大林組技術研究所土木基礎・耐震研究室 主任研究員 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)

E-mail:ito.koji.ro@obayashi.co.jp

² (株)大林組技術研究所土木構造・材料研究室 副主任研究員 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)

E-mail:ohno.satoru@obayashi.co.jp

³ (株)大林組技術研究所土木基礎・耐震研究室 室長 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)

E-mail:matsuda.takasi@obayashi.co.jp

地中構造物や基礎構造物の耐震設計では、構造物～地盤連成系での非線形応答特性を考慮した耐震性能評価手法の確立が重要であり、構造物、地盤の非線形域までを対象とした地震時挙動の把握、および地震応答解析手法の開発が必要である。本研究では、両者の非線形域までの地震時挙動の確認、耐震性能評価手法の検証を目的に、鉄筋コンクリート製地中構造物の1/20ミニチュア試験体による遠心力実験と地震応答解析を実施した。

ミニチュア試験体の製作では静的構造性能を確認するとともに、遠心力実験により強震時の試験体の降伏を確認した。鉄筋コンクリートおよび地盤の材料レベルの非線形性を考慮した地震応答解析手法を遠心力実験結果に適用した結果、地中構造物～地盤連成系における耐震性能評価へ適用できる可能性があることを確認した。

Key Words : centrifuge model test, underground structure, seismic response, numerical analysis

1. はじめに

地中構造物や基礎構造物の耐震設計では、1995 年兵庫県南部地震以降、構造物や地盤の非線形性を取り入れ、その性能を照査することが望まれるようになってきた¹⁾。

²⁾ 構造物～地盤連成系での非線形地震応答解析に関しては、地下鉄駅舎の被害分析、部材非線形性を考慮した地下構造物の解析等が行われ^{3), 4)}、今後指向される性能設計においては、構造物および地盤の非線形性を適切に考慮することにより更なる合理化の可能性も考えられる。

鉄筋コンクリート (以下、RC) 製地中構造物および地盤の塑性域までを対象とした振動台実験に関しては、1G 場において実施された例⁵⁾があるが、遠心力場における振動台実験の実施は報告されていない。

本研究では、遠心力実験による RC 製地中構造物の非線形域までの応答性状を示すとともに、構造物および地盤の材料レベルの非線形性を考慮した地震応答解析手法を適用し、その妥当性を検証する。

2. RC 製ミニチュア試験体

(1) 検討対象

図-1 に遠心力実験で想定した地中ボックスカルバートの寸法を示す。周辺地盤は、地下水位が G.L.-10m 以深の中密な乾燥地盤を想定している。試験体の縮尺率は、遠心力実験で用いる剛土槽 (長さ 1900mm、深さ 600mm、幅 800mm) の大きさを勘案して 1/20 とした。ここで、遠心力実験では剛土槽を用いたが、遠方地盤および剛土槽を想定した地震応答解析による事前検討より、試験体の応答へ及ぼす土槽境界の影響が小さいことを確認した。

対象とした地中ボックスカルバートは、覆土厚 3m の深度に埋設され、函体の内空 4m×4m、側壁厚 500mm である。縮尺率 1/20 では、覆土厚 150mm、函体の内空 200mm×200mm、側壁厚 25mm、試験体を構成する鉄筋、コンクリート材料は、それぞれ鉄筋径が D1, D2 相当、粗骨材径が 1mm 程度となる。ここで上下床版部は、遠心力実験で弾性挙動を示すように部材厚を 45mm とした。

(2) 試験体

図-2 の曲げ試験体は、対象構造物の側壁をモデル化したもので、極細異形鉄筋と骨材径を 1/20 に縮小したコンクリート (ここで、縮尺率 1/20 において、骨材を粗骨材と細骨材に分類し調合したコンクリートをマイクロコンクリート⁶⁾と呼ぶ。) を使用して製作した。曲げ試験は

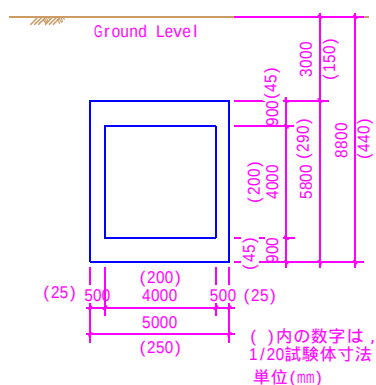


図-1 地中ボックスカルバート

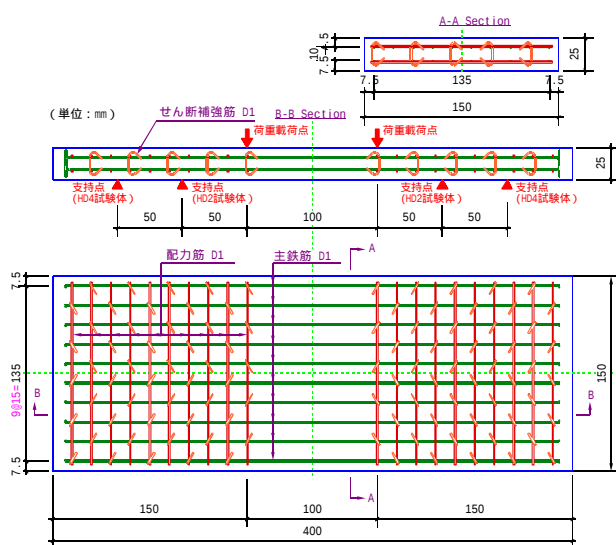


図-2 曲げ試験体

構造体が RC としての構造性能を満足するかを検証するためのもので、1G 場で载荷試験を実施した。

図-3 のボックスカルバート型試験体は、遠心力実験で非線形域の応答性状を把握するためのもので、1 体の主函体（奥行 400mm）と側方境界の影響を排除するための 2 体のダミー函体（奥行 190mm）からなる。

(3) 使用材料

RC 製ミニチュア試験体を製作するにあたり、極細異形鉄筋（D1、D2 相当）の製作とマイクロコンクリートの配合設計を実施した⁹⁾。

a) 極細異形鉄筋

製作した異形鉄筋は、「JIS G3112 鉄筋コンクリート用棒鋼」の適用範囲外であるが、製作にあたりなるべく JIS の定める範囲内になるよう化学成分や機械的性質、形状・寸法等を調整した。表-1 に化学成分、表-2 にリブ（鉄筋の軸線に沿った突起部）およびフシ（鉄筋の軸線に直交あるいは斜交する突起部）の形状・寸法を示す。

表-3 に極細異形鉄筋の引張試験結果、図-4 に D1 の応力～ひずみ関係を示す。

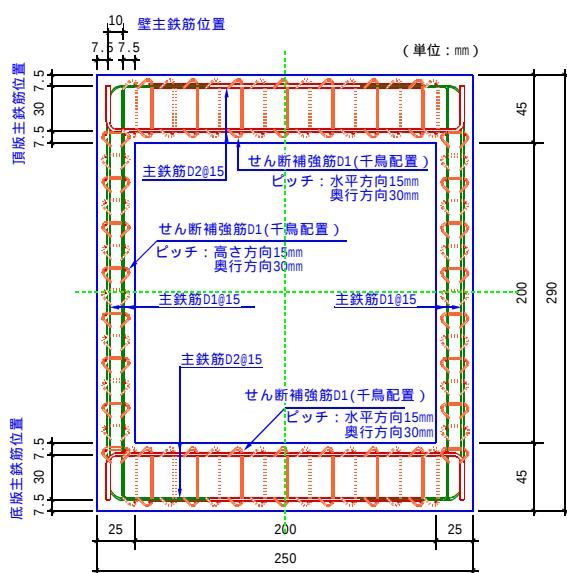


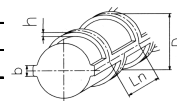
図-3 ボックスカルバート型試験体

表-1 極細異形鉄筋の化学成分

成分 (%)	C	Si	Mn	P	S
JIS規定 (SD345相当)	0.27	0.55	1.60	0.04	0.04
製作値 (鋼種S45C)	0.43	0.24	0.720	0.017	0.007

表-2 極細異形鉄筋の形状と寸法

呼称	リブ幅 b (mm)	外径 D (mm)	フシ高さ h (mm)	フシ間隔 Ln (mm)
D1	目標 b 0.5 製作値 0.16	目標 D 1.2 製作値 1.22	目標 h 0.1 製作値 0.096	目標 Ln 0.8 製作値 0.77
D2	目標 b 0.9 製作値 0.41	目標 D 2.2 製作値 2.10	目標 h 0.2 製作値 0.11	目標 Ln 1.6 製作値 1.54



b) マイクロコンクリート

使用した細骨材、粗骨材は、縮尺率 1/20 を目標に骨材の粒度調整を行なった。細骨材は、ベトナム産珪砂 7 号を用いた。粗骨材は最大寸法を 1.2mm とし、セメント協会のセメント強さ試験用標準砂を粒度調整して用いた。これらの骨材と普通ポルトランドセメントおよび高性能 AE 減水剤を用い、所定の圧縮強度（目標 28 日強度 24N/mm²）、静弾性係数およびワーカビリティが得られるように表-4 に示す配合を決定した。

(4) 異形鉄筋の加工とマイクロコンクリートの打設

鉄筋のフックおよび曲げ内半径は、コンクリート標準示方書に準拠し、曲げ加工用に製作したベンダーにより加工し、鉄筋同士の結束には結束線を使用した。写真-1 にボックスカルバート型試験体の配筋状況を示す。

マイクロコンクリートの打設には、木槌と小型パイプレータによる型枠への振動と、超小型パイプレータによる内部振動により十分に締固めを行った。

表-3 極細異形鉄筋の材料試験結果

呼称	公称直径 ¹⁾ (mm)	公称断面積 ¹⁾ (mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	破断強度 (N/mm ²)	降伏点 ²⁾ (N/mm ²)	弾性係数 ($\times 10^5$ N/mm ²)	伸び率 (%)
D1	1.13	1.00	401	313	284	1.03	15.4
D2	2.07	3.36	499	383	360	1.90	15.1

1) 公称直径および公称断面積は単位重量と比重より求めた。

2) 降伏点は0.2%オフセット法により求めた。

数値は各3本の平均値を示す。

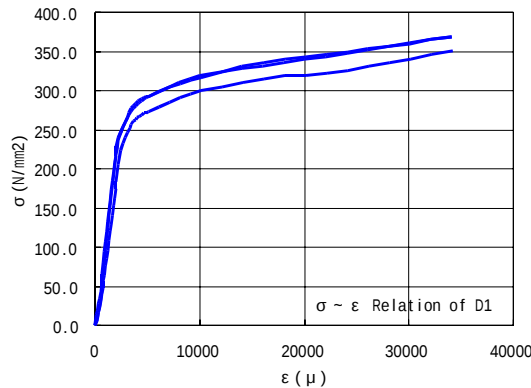


図-4 応力～ひずみ関係 (D1)



写真-1 配筋状況 (ボックスカルバート型試験体)

(5) 曲げ試験

試験体は、図-2 に示した通り断面幅 150mm、断面高さ 25mm、長さ 400mm とし、主鉄筋および配筋筋、せん断補強筋に D1 の鉄筋を使用した。引張主鉄筋およびせん断補強筋比は、それぞれ $P_t = 0.38\%$ 、 $P_w = 0.22\%$ である。試験体数は 2 体で、せん断スパン比 H/D (H : せん断スパン、 D : 断面高さ) を 4 (HD4 試験体) と 2 (HD2 試験体) として曲げ試験を実施した。

図-5, 6 に各試験体の荷重～たわみ関係の実験値と解析値をそれぞれ示す。解析では積層はり要素を使用し、コンクリートで修正 Ahmad モデル (圧縮側) と出雲モデル (引張側)、鉄筋で修正 Menegotto-Pinto モデルを用いたファイバーモデルにより平面保持を仮定した⁷⁾。表-5 に曲げ試験時のマイクロコンクリートの物性値を示す。

HD4, HD2 試験体の荷重は、試験体中央部のひび割れが大きく開いたたわみ 15mm, 5mm 程度まで実験値が解析

表-4 マイクロコンクリートの配合

W / C (%)	s / a (%)	単位量 (kg/m ³)				
		W	C	S	G	SP
57	42	250	439	613	838	8.78

表-5 マイクロコンクリートの材料試験結果

一軸圧縮強度	静弾性係数	割裂強度
30.2N/mm ²	23600N/mm ²	2.87N/mm ²

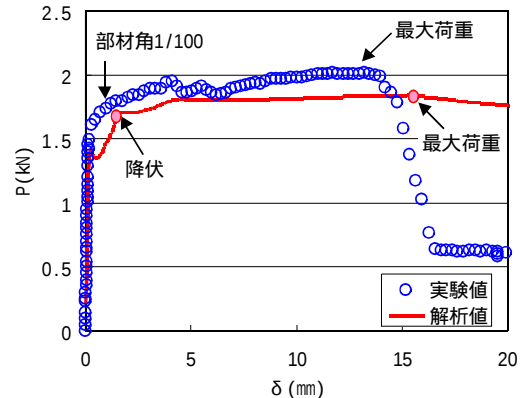


図-5 荷重～たわみ関係 (HD4 試験体)

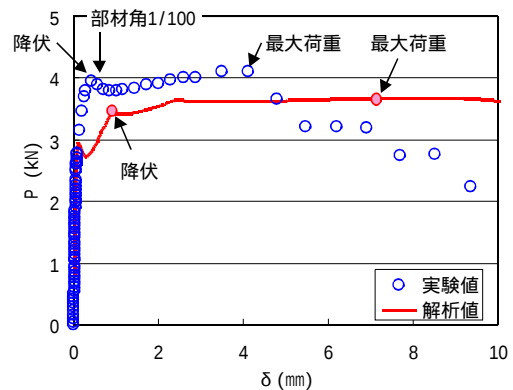


図-6 荷重～たわみ関係 (HD2 試験体)

値と比較して大きい。荷重～たわみ曲線の形状および最大荷重より、製作した RC 製ミニチュア試験体は通常の RC としての構造性能を概ね有することを確認した。

3. 遠心力実験

(1) 実験方法

図-7 に模型地盤と計器配置を示す。支持地盤では、珪砂 6 号を所定の層厚毎にパイプレータで締固め相対密度 $D_r = 100\%$ とした。周辺地盤では、珪砂 6 号を空中落下法で撒き出し $D_r = 84\%$ 、 $\rho_d = 1.46\text{t/m}^3$ となった。

遠心力実験前に実施した遠心加速度 20G におけるベンダー計測⁸⁾では、周辺地盤中央深度 (G.L. - 295mm) で S 波速度 $V_s = 200\text{m/s}$ が得られた。実物のカルバートと周辺地盤の見掛けの初期せん断剛性比は $G/G_0 = 1.0$ 、試験体の見掛けの単位体積質量は $\rho = 1.09\text{t/m}^3$ である。

写真-2 に試験体の設置状況を示す．遠心力実験では，正弦波 60Hz，波数 20 波，振動台入力加速度 2G，5G，10G，20G，25G の 5 ケースを行った．事前検討において，試験体が塑性域に達するために 20G 以上の入力加速度が必要となることから，25G までのケースを設定した．

(2) 実験結果

図-8，9 に 20G，25G 入力時の振動台平均加速度，上床版変位（下床版との相対変位），周辺地盤変位（上下床版深度の加速度を積分し差し引いた相対変位），側壁隅角部の鉄筋ひずみの時刻歴を示す．上床版変位から得られる側壁の最大部材角 θ は 20G，25G 入力時で $\theta = 1.7\text{mm} / 200\text{mm} = 0.0085$ ， $2.2\text{mm} / 200\text{mm} = 0.011$ であり，周辺地盤変位から得られるせん断ひずみと同様である．

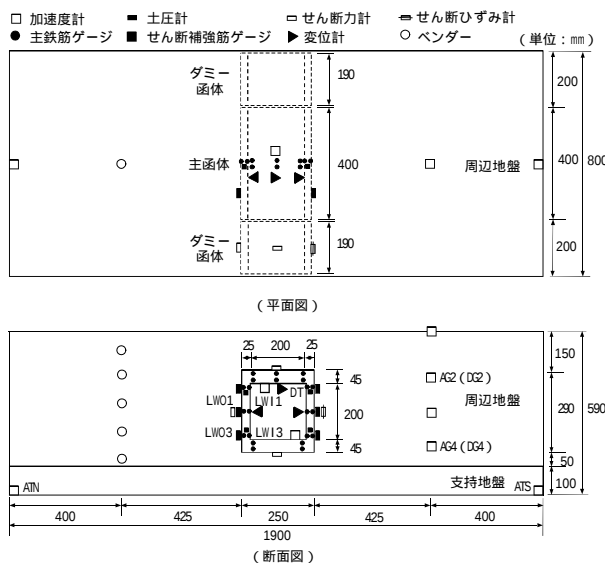


図-7 模型地盤と計器配置

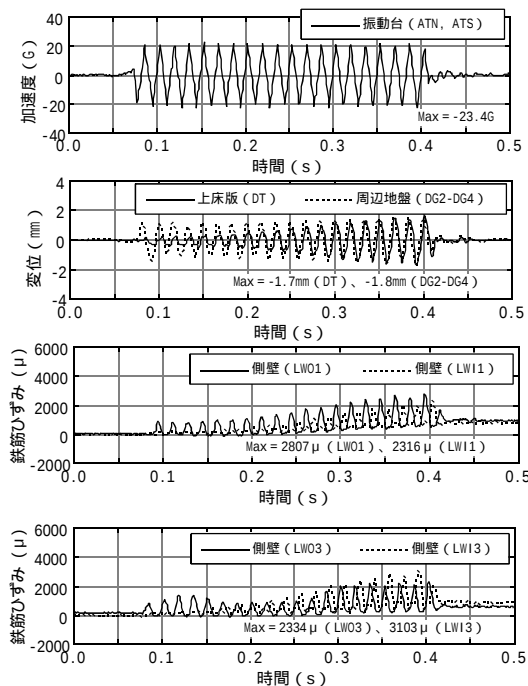


図-8 時刻歴（実験：20G入力時）

20G 入力時の主鉄筋のひずみは加振と伴に徐々に増大し，上床版変位と周辺地盤変位との差は加振前半で顕著であるが，加振後半で徐々に小さくなる．10G 入力時までは，加振後に主鉄筋の残留ひずみは生じないが，20G 入力時の主鉄筋のひずみは，表-3 に示した鉄筋の材料試験から得られた降伏ひずみ 2800 μ 相当まで生じ，残留ひずみも生じたことから側壁隅角部で主鉄筋が降伏したと推察される．25G 入力時の主鉄筋のひずみは，20G 入力時と異なり加振当初から定常応答となり，上床版変位と周辺地盤変位は同様の時刻歴である．加振後の主鉄筋の残留ひずみは 20G 入力時より増加していることから，側壁隅角部の主鉄筋の降伏がさらに進展したと考えられる．

図-10，11 に 20G，25G 入力時の主鉄筋の最大ひずみと主鉄筋の降伏位置，写真3 に遠心力実験後の試験体のひび割れ状況を示す．主函体では，上下床版で弾性内，側壁隅角部で主鉄筋の降伏が生じており，鉄筋の降伏ひずみ 2800 μ から評価される応答塑性率（＝鉄筋応答ひずみ



写真-2 試験体設置状況

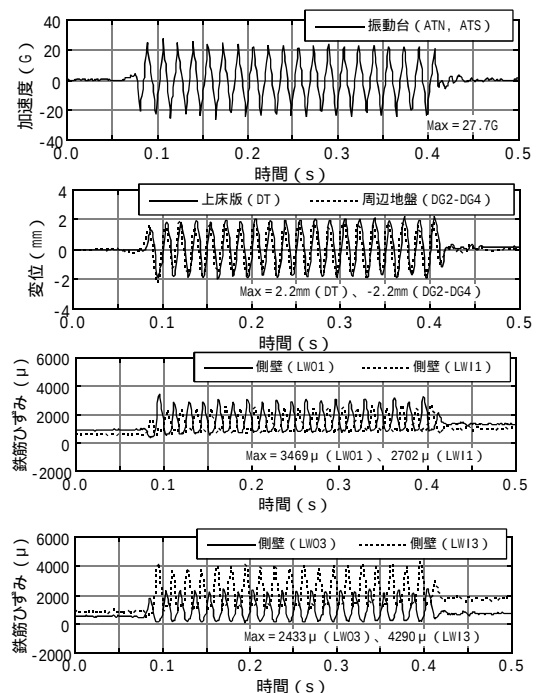


図-9 時刻歴（実験：25G入力時）

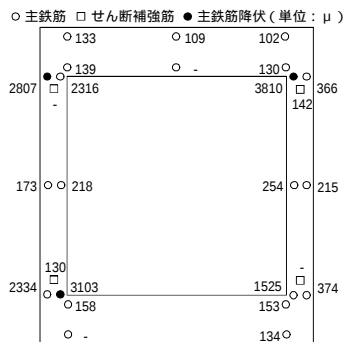


図-10 鉄筋の最大ひずみ（実験：20G入力時）

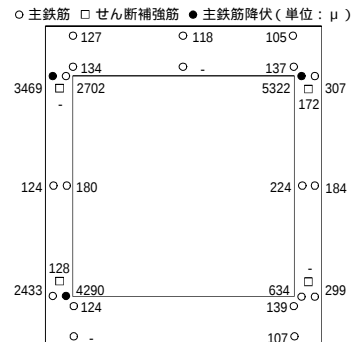


図-11 鉄筋の最大ひずみ（実験：25G入力時）

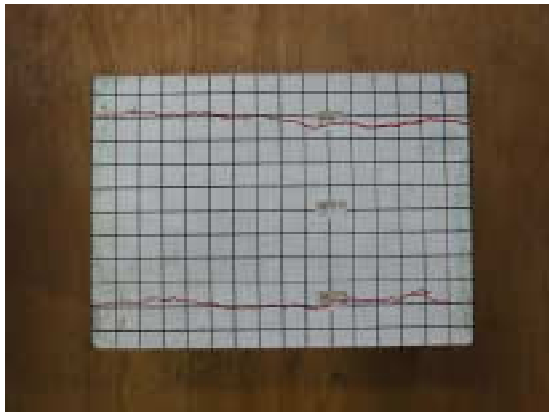


写真-3 ひび割れ状況（主躯体左側壁外面）

／鉄筋降伏ひずみ）は1.5～2.0程度である．ひび割れは，主鉄筋降伏位置と対応して，側壁の外面，内面とも隅角部位置で生じている．

4．地震応答解析

(1) 解析方法

図-7 の遠心力実験の実物寸法を対象に，20G，25G 入力時で得られた振動台平均加速度を継続入力波とした 2 次元 FEM 解析を行った．RC 製試験体を構成するコンクリート，鉄筋では曲げ試験の解析と同様に 1 軸の応力～ひずみ履歴モデル⁹⁾，周辺地盤で弾塑性モデルを用いた．

解析では，RC 製試験体を隅角部で剛域を有するファイバーモデルの積層はり要素，RC 製試験体と周辺地盤との境界では，遠心力実験で得られた RC 製試験体と周辺地盤との境界におけるせん断力特性および土圧特性より評価した壁面摩擦角 $\delta = \varphi_f$ の剥離・滑動を考慮したジョイント要素とした．表-6 に RC 製試験体と周辺地盤の主な定数を示す．コンクリート，鉄筋の定数は材料試験結果，周辺地盤の定数は，遠心力実験の相対密度に相当する豊浦標準砂の室内試験結果を参考に設定した．

(2) 解析結果

図-12，13 に 20G，25G 入力時の上床版変位（下床版との相対変位），側壁隅角部の鉄筋ひずみの時刻歴，図-14，

表-6 入力定数

		側壁		上下床版
コンクリート	ヤング係数	E_c	23800MPa	
	ポアソン比	ν_c	0.2	
	一軸圧縮強度	σ_{cu}	31MPa	
	一軸引張強度	σ_{tu}	2.61MPa	
	一軸圧縮強度時のひずみ	ϵ_{cu}	0.212%	
鉄筋	ヤング係数	E_s	102700MPa	189700MPa
	ポアソン比	ν_s	0.3	
	降伏点	σ_y	292MPa	343MPa
周辺地盤	ヤング係数	E	160MPa	
	ポアソン比	ν	0.33	
	硬化パラメータ	k_s	0.015%	
	内部摩擦角	φ_f	44°	
	ダイレイタンスパラメータ	λ	1.2	
		μ	0.21	

15 に隅角部の主鉄筋の最大ひずみと主鉄筋の降伏位置を示す．解析では，遠心力実験で得られた 20G 入力時における上床版変位，鉄筋ひずみの降伏に至る非定常な応答性状，25G 入力時における側壁隅角部内筋（LWB3）の降伏の進展を除く他部位の鉄筋ひずみの応答性状の傾向と概ね整合する．一方で，上床版変位の時刻歴，降伏ひずみ 2800 μ から評価される応答塑性率は 1.2 程度で遠心力実験と比較して小さいことから，解析で用いた RC 製試験体と周辺地盤の定数を再評価し，本手法の遠心力実験結果との整合性，適用性の把握が必要と考える．

5．おわりに

極細異形鉄筋とマイクロコンクリートから構成される RC 製ミニチュア試験体は，曲げ試験より通常の RC の構造性能を概ね発揮することがわかった．また，RC 製地中構造物の縮小模型を用いた遠心力実験により，RC 構造物の降伏挙動を再現できること，構造物と地盤の非線形性を考慮した地震応答解析手法を地中構造物の耐震性能評価へ適用できる可能性があることを確認した．

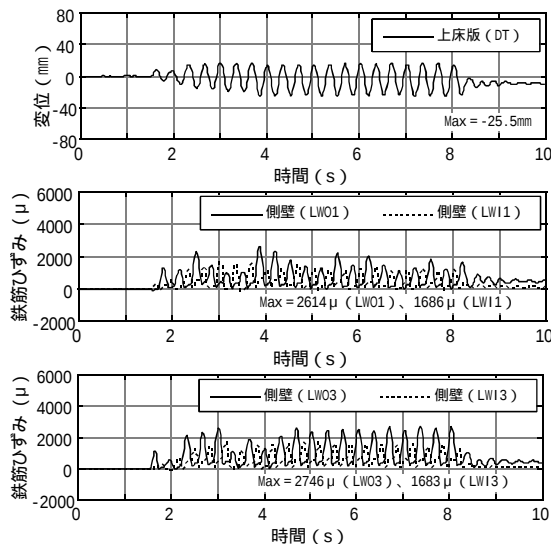


図-12 時刻歴（解析：20G入力時）

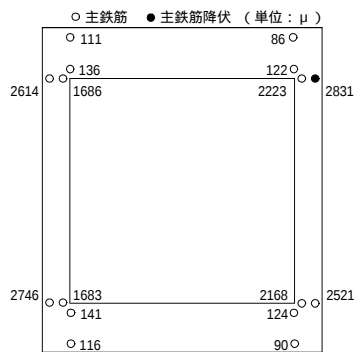


図-14 鉄筋の最大ひずみ（解析：20G入力時）

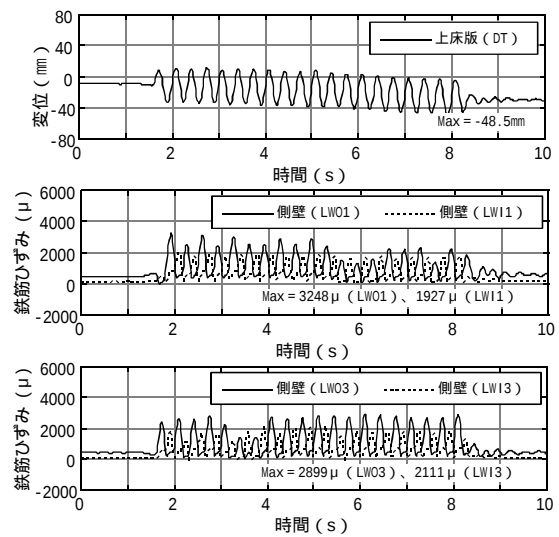


図-13 時刻歴（解析：25G入力時）

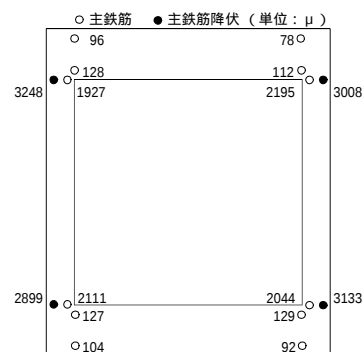


図-15 鉄筋の最大ひずみ（解析：25G入力時）

参考文献

- (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 下部構造編，2002．
- (財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物，2000．
- 松田隆，大内一，田中紀和，佐藤清：中柱を有する埋設函体構造物の地震時損傷メカニズムに関する解析的研究，土木学会論文集，No.563/ -39，pp.125-136，1997．
- 溜幸生，津田守：部材非線形性を考慮した有効応力法に基づく地下構造物の挙動解析，第46回地盤工学シンポジウム，pp.37-42，2001．
- 大友敬三，末広俊夫，河井正，金谷賢生：強震時における鉄筋コンクリート製地中構造物横断面の塑性変形に関する実証研究，土木学会論文集，No.724/ -62，pp.157-175，2003．
- 隈澤文俊：超小型立体模型による鉄筋コンクリート造建物の振動破壊性状に関する研究，東京大学博士課程学位論文，1995．
- 長沼一洋：三軸圧縮下のコンクリートの応力～ひずみ関係，日本建築学会構造系論文集，第474号，pp.163-170，1995．
- Shirley, D. J. and Hampton, L. D.：Shear-Wave Measurements in Laboratory Sediments, Journal of Acoustical Society of America, Vol.63, No.2, pp.607-613, 1978．
- 長沼一洋，大久保雅章：繰返し応力下における鉄筋コンクリート板の解析モデル，日本建築学会構造系論文集，第536号，pp.135-142，2000．

(2003.6.30 受付)

Seismic Response of Underground Reinforced Concrete Structure

- Centrifuge Model Test and its Analyses -

Koji Ito, Satoru Ohno and Takashi Matsuda

This paper describes results of centrifuge model tests on an underground structure and its numerical analyses considering the non-linearity of both the reinforced concrete structure and the surrounding ground. A centrifuge model test with a similitude of 1/20 and numerical analyses applied to the test results were carried out. It is concluded that the reinforced concrete member in miniature was similar to the real member in mechanical properties. Yielding of the reinforced concrete member was observed in the centrifuge model test and the numerical procedure presented was capable of predicting the nonlinear response of the soil-structure interaction during strong earthquake.