

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 大野 了
松田 隆

Seismic Response of Underground Reinforced Concrete Structure

- Centrifuge Model Test and its Analyses -

Koji Ito Satoru Ohno
Takashi Matsuda

Abstract

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 was carried out to clarify the nonlinear response characteristics of the reinforced concrete members in the underground structure. Numerical analyses applied to the results of the centrifuge model test were carried out to clarify the applicability of the numerical procedure, considering the nonlinear stress-strain relationship in each concrete member, reinforcing bar and the surrounding ground. 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 earthquakes.

概 要

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模型振動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が可能であることを確認した。

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⁾。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、遠心力模型振動実験による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

2.1 検討対象

Fig. 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。試験体の縮尺率は、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、遠方地盤を想定した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ている。

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0.5m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、振動実験で弾性挙動を示すように部材厚を45mmとした。

2.2 試験体

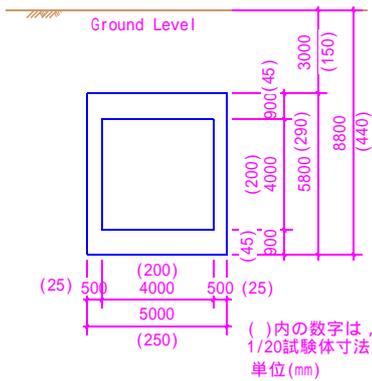


Fig. 1 地中ボックスカルバート
Dimension of Underground Structure

Fig. 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、骨材が粗骨材と細骨材に分類されて配合されたコンクリートをマイクロコンクリートと呼ぶ）を使用して製作した。曲げ試験は、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場で荷重試験を実施した。

Fig. 3のボックスカルバート型試験体は、遠心力振動実験で非線形域の応答性状を把握するためのもので、1体の主躯体（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。

2.3 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⁶⁾。

2.3.1 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。Table 1にフシ（鉄筋の軸線に直交あるいは斜交する突起部）およびリブ（鉄筋の軸線に沿った突起部）の形状・寸法を示す。

Table 2に極細異形鉄筋の引張試験結果、Fig. 4にD1の応力～ひずみ関係を示す。

2.3.2 マイクロコンクリート マイクロコンクリートとして使用した細骨材、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、ベトナム産珪砂の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Table 3に示す配合を決定した。

2.4 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

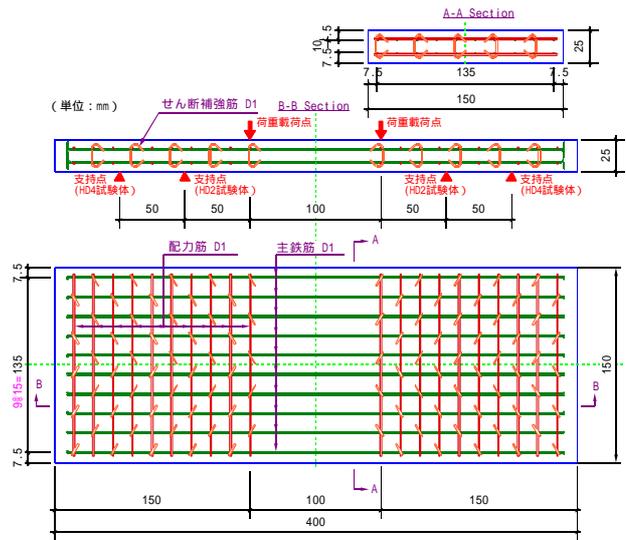


Fig. 2 曲げ試験体
Dimension of Wall Type Specimen

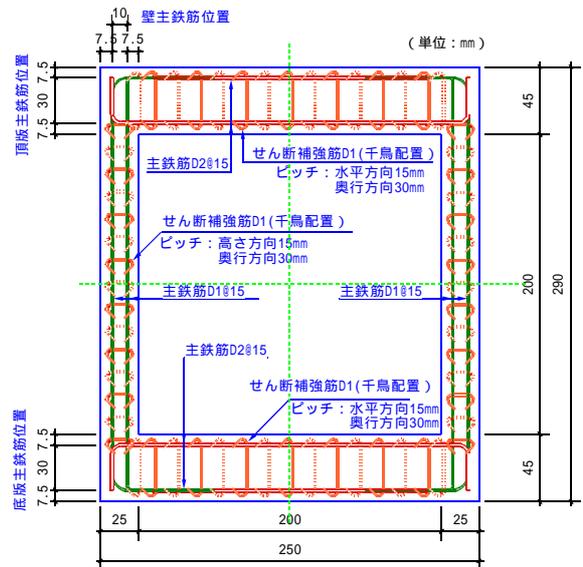


Fig. 3 ボックスカルバート型試験体
Dimension of Underground Structure Specimen

Table 1 フシの形状と寸法
Dimension of Reinforcing Bar Joint

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	D 1.2	0.05 h 0.1 Ln 0.8
	製作値	0.16	1.22	0.096 0.77
D2	目標	b 0.9	D 2.2	0.1 h 0.2 Ln 1.6
	製作値	0.41	2.10	0.11 1.54

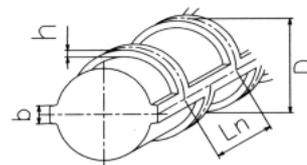


Table 2 極細異形鉄筋の材料試験結果
Mechanical Properties of Reinforcing Bar

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。

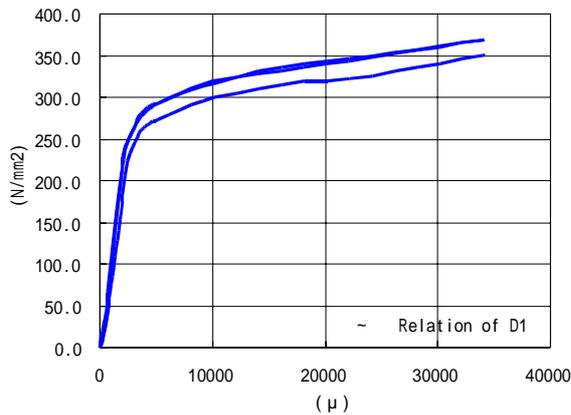


Fig. 4 応力～ひずみ関係 (D1)
Stress - Strain Relationship of D1 Reinforcing Bar



Photo 1 配筋状況 (ボックスカルバート型試験体)
Arrangement of Reinforcing Bar

加工し、鉄筋同士の結束には結束線を使用した。Photo 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、木槌と小型バイブレータによる型枠への振動と、超小型バイブレータによる内部振動により十分に締固めを行った。

3. 曲げ試験

3.1 試験体

試験体は、Fig. 2に示した通り断面幅150mm、断面高さ25mm、長さ400mmとし、主鉄筋および配力筋、せん断補強筋にD1の鉄筋を使用した。引張主鉄筋比およびせ

Table 3 マイクロコンクリートの配合
Arrangement of Micro Concrete

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

Table 4 マイクロコンクリートの材料試験結果
Mechanical Properties of Micro Concrete

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

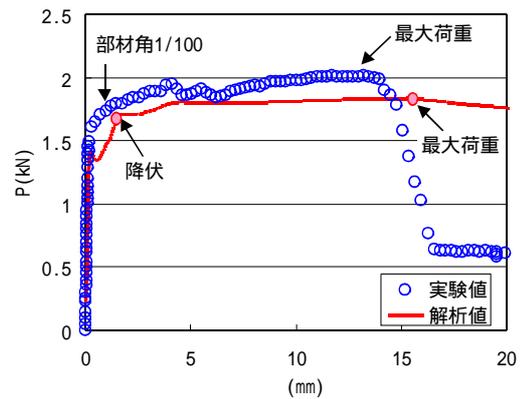


Fig. 5 荷重～たわみ関係 (HD4試験体)
Load - Deflection Relationship of HD4 Specimen

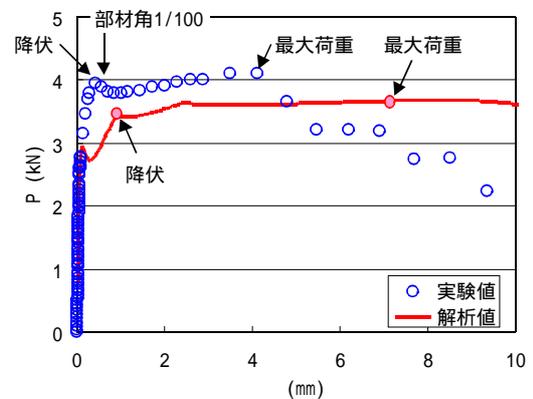


Fig. 6 荷重～たわみ関係 (HD2試験体)
Load - Deflection Relationship of HD2 Specimen

ん断補強筋比は、それぞれ $P_t = 0.38\%$ 、 $P_w = 0.22\%$ である。試験体はせん断スパン比 H/D (H : せん断スパン、 D : 断面高さ)が4 (HD4試験体)、2 (HD2試験体)の2体とし、Fig. 2の試験条件による曲げ試験を実施した。

3.2 実験結果

Fig. 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、ファイバーモデルにより平面保持を仮定した⁷⁾。Table 4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程度まで解析値が実験

値に比べ小さいが、荷重～たわみ曲線の形状、最大荷重は概ね一致している。以上より、RC製ミニチュア試験体は、通常のRCとしての構造性能を有することを確認した。

4. 遠心力振動実験

4.1 実験方法

Fig. 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プレートで締め固め相対密度 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 $D_r = 84\%$ 、 $\rho_d = 1.46t/m^3$ となった。振動実験前に実施した遠心加速度20Gにおけるベンダー計測

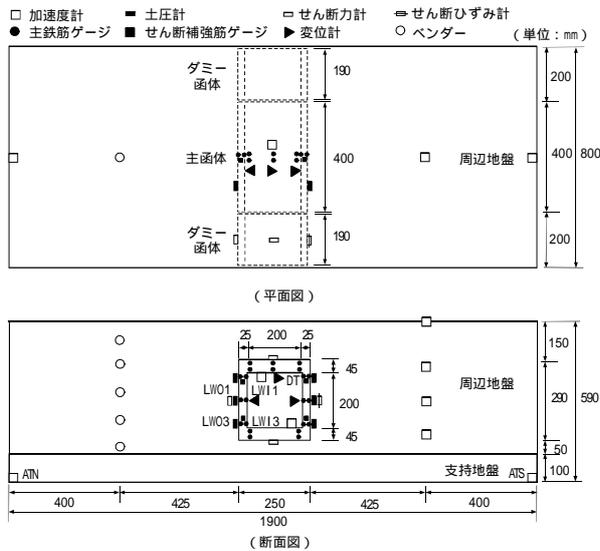


Fig. 7 模型地盤と計器配置
Model Configuration and Transducers

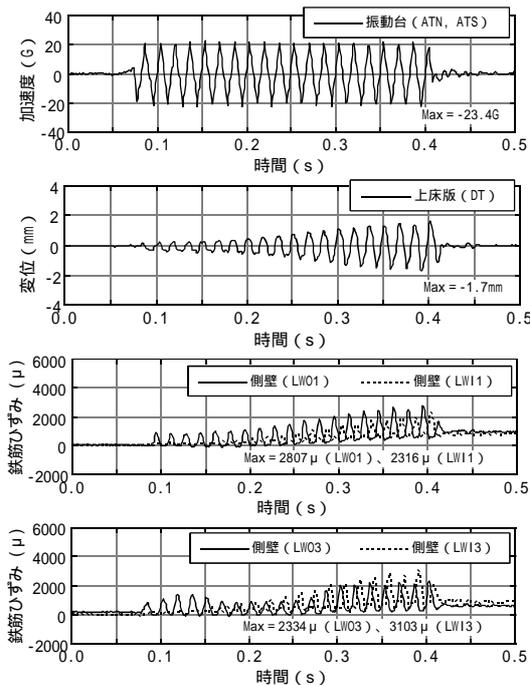


Fig. 8 時刻歴 (20G入力)
Time Histories (20G Input)

(圧電素子を用いてP波およびS波を計測し、地盤の初期せん断剛性 G_0 とポアソン比を算出する計測法)では、ボックスカルバート中央深度 (G.L. - 295mm) でS波速度 $V_s = 200m/s$ が得られた。実物のボックス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 $= 1.09t/m^3$ である。

Photo 2に試験体の設置状況を示す。振動実験では、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。

4.2 実験結果

Fig. 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)、側壁隅角部の鉄筋ひ



Photo 2 試験体設置状況
Condition of Underground Structure Specimen

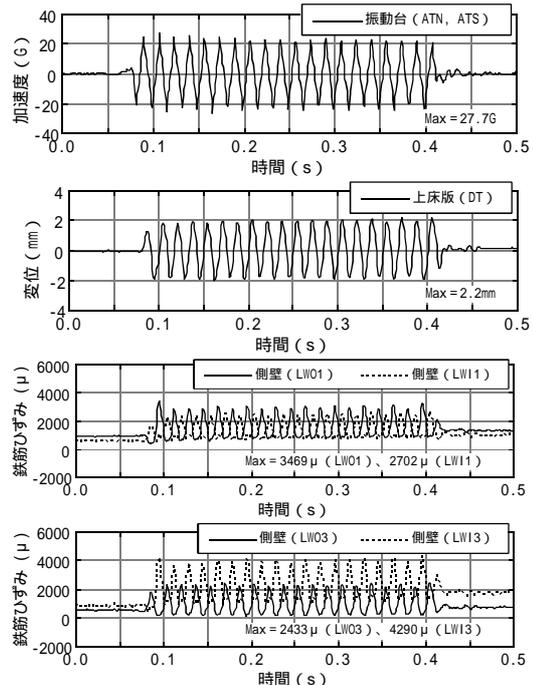


Fig. 9 時刻歴 (25G入力)
Time Histories (25G Input)

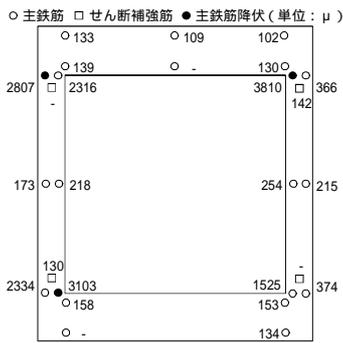


Fig. 10 鉄筋の最大ひずみ (20G入力)
Distribution of Max. Strain in Bar (20G Input)

ひずみの時刻歴を示す。20G入力時の鉄筋ひずみは、周辺地盤の非線形性の影響により加振と伴に徐々に増大し加振後半で定常応答となり、上床版変位の時刻歴とも対応している。10Gまでの入力では、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、Table 2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入力と異なり加振当初から定常応答となり、上床版変位の時刻歴とも対応している。加振後の主鉄筋の残留ひずみは20G入力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。

上床版変位より算定される側壁の部材角 θ は、20G、25G入力で、それぞれ $\theta = 1.7\text{mm} / 200\text{mm} = 0.0085$ 、 $\theta = 2.2\text{mm} / 200\text{mm} = 0.011$ となった。

Fig. 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、Photo 3に振動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、側壁の外表面、内面とも隅角部位置で生じている。

5. 地震応答解析

5.1 解析方法

Fig. 7の遠心力実験の実物寸法を対象に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、1軸の応力-ひずみ履歴モデル⁷⁾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、周辺地盤を弾塑性モデル⁸⁾、RC試験体と周辺地盤との境界を剥離・滑動を考慮したジョイント要素(壁面摩擦角 $\theta = \theta_f$)、20G、25G入力で得られた振動台平均加速度を継続入力波とした。Table 5にRC製試験体と周辺地盤の主な定数を示す。

5.2 解析結果

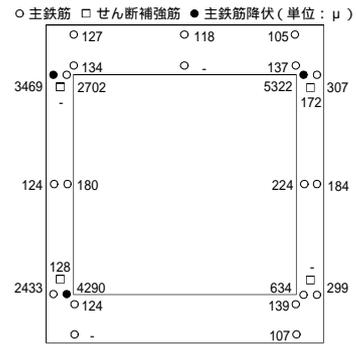


Fig. 11 鉄筋の最大ひずみ (25G入力)
Distribution of Max. Strain in Bar (25G Input)

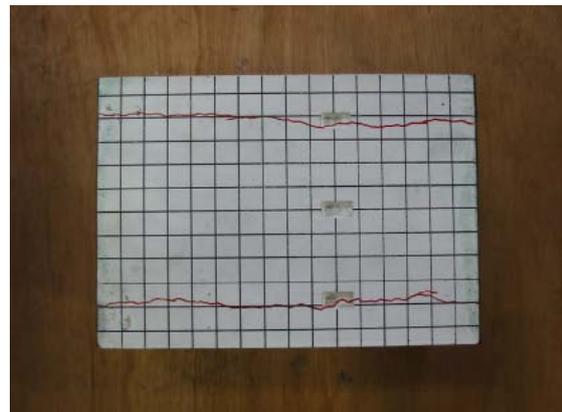


Photo 3 ひび割れ状況 (主函体左側壁外面)
Condition of Cracking on Outer Surface

Table 5 入力定数
Mechanical Properties in Calculation

		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		0.33
	硬化パラメータ	k_s	0.015%
	内部摩擦角	θ_f	44°
	ダイレイタンスパラメータ	μ	1.2
			0.21

Fig. 12, 13に20G、25G入力時の上床版変位(下床版との相対変位)と側壁隅角部の鉄筋ひずみの時刻歴、Fig. 14, 15に隅角部主鉄筋の最大ひずみと降伏位置を示す。解析では、遠心力実験で得られた20G入力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、2

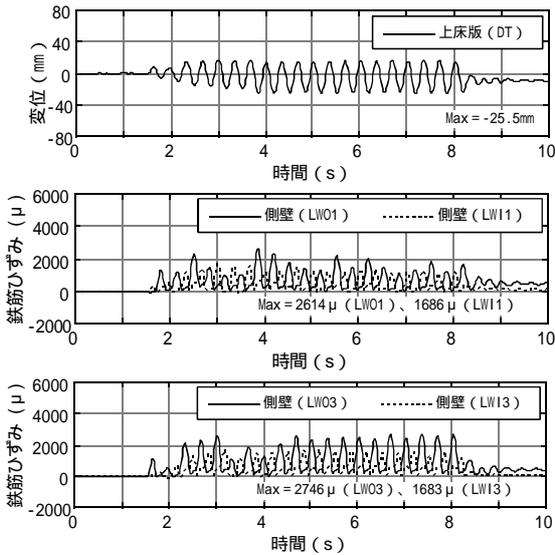


Fig. 12 時刻歴 (20G入力)
Time Histories (20G Input)

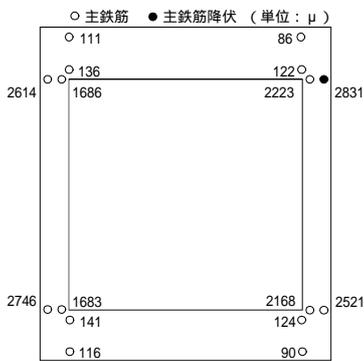


Fig. 14 鉄筋の最大ひずみ (20G入力)
Distribution of Max. Strain in Bar (20G Input)

5G入力における側壁隅角部内筋 (LWI3) の降伏の進展を除く他部位の鉄筋ひずみの応答性状と概ね整合する。

Fig. 14, 15より, 側壁隅角部の主鉄筋の降伏ひずみ2800 μ から評価される応答塑性率は1.2程度で実験と比較して小さいものの, 本手法により, RC製地中構造物の材料レベルでの耐震性能を評価できると考えられる。

6. 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振動実験により, RC構造物の降伏および地盤の非線形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ことを確認した。

参考文献

1) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 下部構造編, (2002)

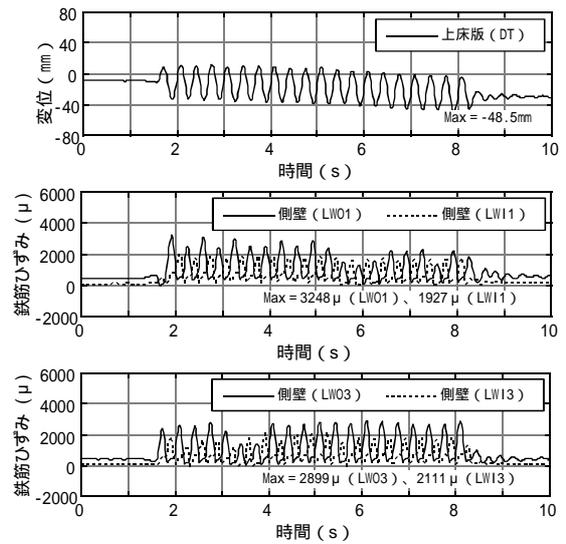


Fig. 13 時刻歴 (25G入力)
Time Histories (25G Input)

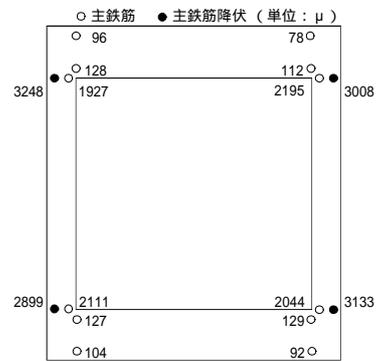


Fig. 15 鉄筋の最大ひずみ (25G入力)
Distribution of Max. Strain in Bar (25G Input)

2) (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)

3) 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)

4) 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)

5) 土木学会: 原子力発電所屋外重要構造物の耐震性能照査指針, (2002)

6) 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)

7) 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)

8) 伊藤浩二: 動的有効応力解析プログラム「EFFECT」(その1) 基礎理論と地盤構成モデル, 大林組技術研究所報, No.51, pp.7-14, (1995)