

論文 SRC 部材の修復および終局限界状態に対応した変形性能評価法と橋脚の耐震設計への適用

内藤 英樹^{*1}・姜 一圭^{*2}・秋山 充良^{*3}・鈴木 基行^{*4}

要旨： SRC 橋脚の耐震設計において、かぶりコンクリートの剥落を修復限界、H 形鋼の局部座屈を終局限界とする部材損傷レベルを設定した。ファイバー解析による SRC 橋脚の動的解析を行った結果、単柱式橋脚では、橋脚基部の塑性変形が直接的に橋脚全体系の応答変位に影響するが、2 層式ラーメン橋脚では、中層はりに修復限界以上の大きな塑性変形を許容した場合にも、橋脚に過大な応答変位は生じなかった。また、バイリニアモデルを用いた 1 質点系の動的解析とファイバー解析とを比較した結果、静的非線形解析と 1 質点系モデルを用いた簡易手法でも、地震時の SRC 橋脚の最大応答変位や損傷状況を妥当に評価できた。

キーワード： SRC 構造、単柱式橋脚、2 層式ラーメン橋脚、時刻歴応答解析、損傷レベル

1. はじめに

鉄骨鉄筋コンクリート（以下、SRC）構造は、施工の合理化と高い耐震性能を同時に可能とすることから、近年、橋梁上部工・下部工への適用例が増加している。鉄道構造物等設計標準¹⁾（以下、鉄道標準）では、SRC 橋脚の耐震設計において、重要度に応じた構造物の耐震性能と、柱やはりなどの部位（以下、構成部位）に許容される損傷レベルの設定を示している。しかし、鉄道標準では、降伏荷重を維持する最大変位点を終局と定義するなど、損傷レベルの限界変形量の評価に力学的根拠は乏しい。

著者ら²⁾は、正負交番載荷を受ける SRC 柱に対し、i) かぶりコンクリートの剥落（以下、かぶり剥落）を修復限界、ii) H 形鋼の局部座屈を終局限界とする 2 つの限界状態を新たに定義し、これらの変形性能評価法を提示した。しかし、提示した上記 ii) の変形性能評価法は、鉄道標準の終局変位よりも大きな塑性変形を算定する場合があり、このような大きな塑性変形を許容したときの橋脚の最大応答変位を試算するなど、SRC 橋脚の耐震設計における限界状態 i), ii) の妥

当性や解析手法を検討する必要がある。

そこで、本研究では、はじめに、静的非線形解析と 1 質点系の動的解析による手法（以下、1 質点系モデル）を簡易手法と位置づけ、単柱式橋脚と 2 層式ラーメン橋脚の試設計を行う。そして、材料非線形をファイバーモデルによって逐次計算する多質点系の動的解析（以下、ファイバー解析）を行い、単柱式橋脚と 2 層式ラーメン橋脚の構成部位に許容される損傷レベルの設定と、橋脚の最大応答変位との関係を明らかにする。また、1 質点系モデルとファイバー解析の比較を行うことによって、簡易手法としての 1 質点系モデルの妥当性を検討する。

2. 解析モデルの概要

2.1 損傷レベルの設定と変形性能評価法

著者ら²⁾は、橋脚を模した充腹形の SRC 柱の正負交番載荷実験を行い、かぶり剥落と H 形鋼の座屈をそれぞれ修復限界と終局限界と定義した。そして、本研究では、鉄道標準¹⁾を参考にして、SRC 部材の損傷点に対する部材損傷レベルを表-1 のように設定した。なお、参考文献²⁾

*1 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻助教 博(工) (正会員)

*2 (株) オリエンタルコンサルタンツ 東北支店 修(工)

*3 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻准教授 博(工) (正会員)

*4 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

表-1 SRC 部材の損傷レベルの設定

	限界損傷点	損傷状況	補修のイメージ
損傷レベル 1	軸方向鉄筋の降伏	曲げひび割れ	無補修 (場合により耐久性上のひび割れ注入)
損傷レベル 2	かぶり剥落, 軸方向鉄筋の座屈 (修復限界)	曲げひび割れ, ひび割れ幅の拡大	必要によりひび割れ注入・断面修復
損傷レベル 3	H 形鋼の局部座屈 (終局限界)	コンクリートの剥落, 軸方向鋼材の座屈や破断など	ひび割れ注入, 断面修復, 帯鉄筋等の整正, 軸方向鉄筋の整形あるいは取替え

では、一定軸力において、これらの損傷点を軸方向鉄筋や H 形鋼の座屈モデルに基づき算定する手法を提示している。

以降では、1 質点系モデルおよびファイバー解析によって SRC 橋脚の応答値を算定し、表-1 に示す損傷レベルの限界変形量と比較することによって、橋脚の損傷状況を評価する。

2.2 1 質点系モデル

SRC 部材の復元力特性は、断面の鉄骨量の増加に伴ってエネルギー吸収能が増加する³⁾。これに対し、簡易手法として、バイリニアモデルによる 1 質点系の動的解析も検討する。

まず、1 方向漸増荷重による静的非線形解析を行い、復元力モデル (荷重-変位関係) のスケルトンカーブを定める。具体的には、橋脚を 2 次元はり要素でモデル化し、塑性ヒンジ部の平均曲率を図-1 のモーメント-曲率関係によって与える。なお、柱-はり接合部とハンチ部は剛体要素、その他は弾性要素とし、橋脚基部の下端は固定とした。図-1 の部材降伏点 (Y_b 点)、かぶり剥落点 (M 点)、H 形鋼の座屈発生点 (U 点) でのモーメントと曲率の値、および塑性ヒンジ部の要素長は参考文献²⁾から算定する。なお、本研究が解析対象としたラーメン橋脚では、地震時の上部工慣性力 (水平荷重) によって柱部材に生じる軸力変動が、死荷重による軸力に対して大きかった。このため、本解析では、柱部材に作用する最大軸力に対して図-1 のモーメントの値を算定したが、参考文献²⁾の変形性能評価法は一定軸力での使用を条件としている。軸力変動が変形性能に及ぼす影響は今後の課題とし、ここでは、死荷重に対して図-1 の曲率を

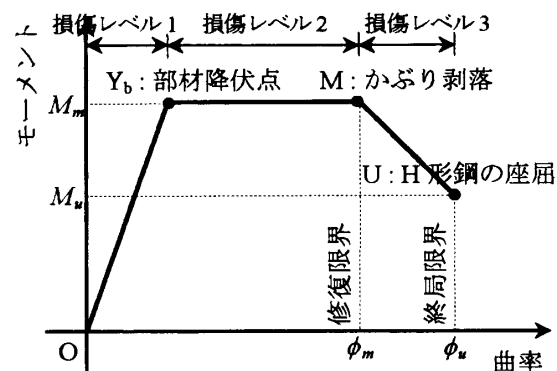


図-1 モーメント-曲率関係

定めた。

そして、この静的非線形解析から得られる橋脚全体系の荷重-変位関係に対して、原点と初降伏点 (軸方向鉄筋の降伏) を結ぶ割線が最大水平荷重に達する点を降伏とした完全弾塑性のスケルトンカーブ (荷重-変位関係) を設定する⁴⁾。さらに、SRC 部材の履歴特性を考慮して、エネルギー吸収能の大きいバイリニアモデルを履歴則とした復元力モデル (荷重-変位関係) を用いる。

動的解析は Newmark β 法を用いて、時間刻みは 1/200 秒、減衰係数は 5 % とした。

2.3 ファイバー解析

上記の 1 質点系モデルでは、橋脚全体系の挙動をバイリニアモデルによって評価した。一方、著者ら³⁾は、ファイバー解析によって SRC 柱の復元力特性を精度良く評価できることを報告しており、本研究では、橋脚を 2 次元はり要素でモデル化し、材料非線形を逐次計算するファイバー解析を詳細モデルとして位置づける。

軸方向鉄筋と H 形鋼の応力-ひずみ関係は、Menegotto-Pinto モデルを用いた³⁾。正負交番荷重

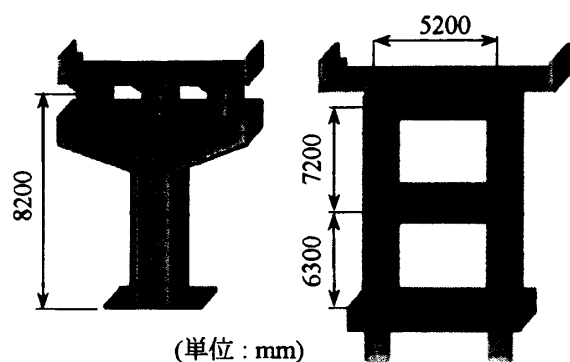


図-2 解析対象の橋脚

を受ける SRC 柱では、かぶり剥落後の載荷に伴って軸方向鉄筋や帯鉄筋が破断し、コアコンクリートも徐々に剥落するが、本解析では、ファイバー要素の断面曲率が図-1 のかぶり剥落時曲率 ϕ_m に達した後に、軸方向鉄筋と H 形鋼から外側のコンクリートの応力を 0 とした。

コンクリートの応力-ひずみ関係は、道路橋示方書⁴⁾のモデルを用いて、最大応力後は最大応力の 20% を収束応力とした。また、引張応力は無視した。なお、SRC 断面でのコンクリートと H 形鋼は完全付着とした⁵⁾。

動的解析は、多質点系の Newmark β 法とし、時間刻みを 1/200 秒、減衰定数は 5% とした。

3. 橋脚の構成部位に許容される損傷レベルの設定と地震応答性状

3.1 概説

表-1 の損傷レベル 3 を許容することによって、部材には大きな塑性変形が生じる。以降では、図-2 の単柱式橋脚と 2 層式ラーメン橋脚を対象として、これらの橋脚の構成部位に許容される損傷レベルの設定と、橋脚全体系に生じる最大応答変位との関係を明らかにする。

また、不静定次数の高いラーメン構造などでは、試設計の初期段階において、計算時間や解の安定性の問題からファイバー解析よりも簡便な手法が望まれる。そこで、1 質点系モデルとファイバー解析の結果を比較し、簡易設計法としての 1 質点系モデルの妥当性を検討する。

なお、本研究では、橋軸直角方向のみを対象

表-2 損傷レベルの設定

a) 単柱式橋脚

	構造物の耐震性能 ¹⁾	部位	部材の損傷レベル
SP1	II	橋脚基部	2
SP2	III	橋脚基部	3

b) 2 層式ラーメン橋脚

	構造物の耐震性能 ¹⁾	部位	部材の損傷レベル
FP1	II	柱	2
		中層はり	2
FP2	III	柱	2
		中層はり	3
FP3	III	柱	2
		中層はり	3

耐震性能 II: 地震後に補修を必要とするが、構造物の機能を早期に回復できる。

耐震性能 III: 地震によって構造物全体系が崩壊しない。

とする。また、SRC 部材のせん断耐力は鉄道標準¹⁾に準じて算定しており、いずれの部材も曲げ破壊が先行するように諸元を決定した。

3.2 単柱式 SRC 橋脚の地震時応答性状

参考文献⁶⁾の橋脚諸元を参考にして、1 質点系モデルによる単柱式 SRC 橋脚の試設計を行った。具体的には、道路橋示方書⁴⁾のレベル 2 地震動 (II 種地盤) の標準波形 3 波から橋脚の最大応答変位の平均値を求め、この平均値と前記の静的非線形解析の結果との対応から橋脚の損傷状況を確認する。その結果、表-2 の損傷状況となるような表-3 の橋脚諸元を得た。復旧性に配慮した耐震性能 II の SP1 橋脚では橋脚基部にかぶり剥落を生じさせないが、復旧性を期待しない耐震性能 III の SP2 橋脚では、橋脚基部にかぶり剥落後の塑性変形を許容した。その結果、表-3 の試設計では、SP2 橋脚の橋脚基部の曲げ耐力を SP1 橋脚の 7 割程度に低下させた。

表-3 の橋脚に対し、ファイバー解析による動的解析を行った。TypeII-II-1 地震波を入力した橋脚天端の応答変位図と橋脚基部のモーメント-曲率関係をそれぞれ図-3 と図-4 に示す。これらの損傷状況や最大応答値は試設計と同様であ

表-3 単柱式 SRC 橋脚の諸元

	部位	断面幅×高さ (mm)	鋼材比 (%)	帯鉄筋	軸力 (MPa)	固有周期 (sec)
SP1 橋脚	柱基部	1600×1600	4.27	D16@150	1.7	0.41
SP2 橋脚	柱基部	1400×1400	4.87	D16@300	2.3	0.55

表-4 単柱式 SRC 橋脚の動的解析の結果 (3 波の平均値)

		橋脚の変形性能		ファイバー解析			1 質点系モデル		
		かぶり剥落 時曲率 ϕ_m ($\times 10^{-5}/\text{mm}$)	H 形鋼の座 屈時曲率 ϕ_u ($\times 10^{-5}/\text{mm}$)	最大応 答変位 (mm)	最大応 答曲率 ($\times 10^{-5}/\text{mm}$)	損傷 レベル	最大応 答変位 (mm)	最大応 答曲率 ($\times 10^{-5}/\text{mm}$)	損傷 レベル
SP1	柱基部	1.55	2.30	128	0.85	2	135	0.86	2
SP2	柱基部	1.64	2.89	307	2.58	3	306	2.79	3

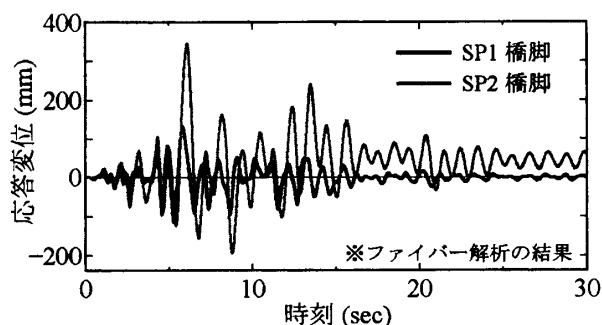


図-3 単柱式橋脚の応答変位図

った。図-4 より、SP1 橋脚の橋脚基部の損傷は、修復限界 (かぶり剥落) を超えない損傷レベル 2 の範囲内であり、橋脚天端の応答変位も小さい。この最大応答変位に対して道路橋示方書⁴⁾に規定されている RC 橋脚の残留変位の照査をそのまま適用した結果、SP1 橋脚の残留変位は道路橋示方書の許容値を満足した。なお、SP2 橋脚は、終局限界には達していないが、道路橋示方書の残留変位の許容値を大きく上回った。

標準波形 3 波による動的解析の平均値を表-4 に示す。3 波の平均値でも、図-3 および図-4 の解析結果と同様に、SP2 橋脚は橋脚基部のかぶりコンクリートが剥落し、橋脚天端の最大応答変位は 300mm 程度となった。単柱式 SRC 橋脚の耐震設計において、H 形鋼の局部座屈が生じるまでは橋脚の倒壊を回避できるため、構造物の重要度と設計地震動のレベルによっては、橋脚基部にかぶり剥落後の塑性変形を許容した設計も可能と考えられる。しかし、その場合には、

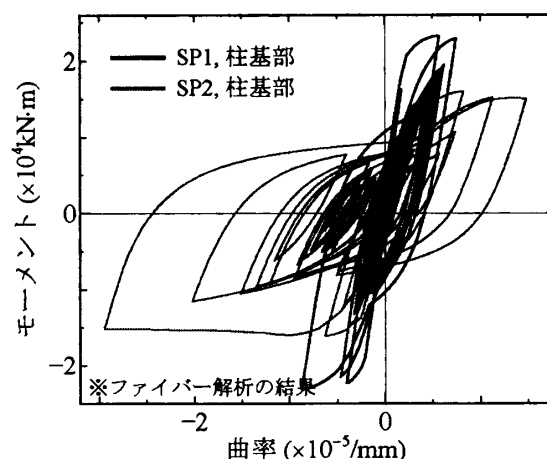


図-4 単柱式橋脚のモーメント-曲率関係

橋脚に過大な応答変位や残留変位が生じることに留意する必要がある。

また、表-4 には、ファイバー解析と併せて 1 質点系モデルの解析結果も示した。表-4 より、3 波平均の最大応答変位のみの評価に限れば、1 質点系モデルでもファイバー解析の結果をよく評価できていた。

3.2 2 層式 SRC ラーメン橋脚の地震応答性状

参考文献⁷⁾の橋脚諸元を参考にして、1 質点系モデルによる 2 層式 SRC ラーメン橋脚の試設計を行った。なお、1 質点系モデルにおける質量は、鉄道標準¹⁾に準じて定めた。橋脚の構成部位に許容される表-2 の損傷レベルの設定に対し、試設計によって得られた橋脚諸元を表-5 に示す。なお、設計地震動は、前記の単柱式橋脚と同様に、道路橋示方書⁴⁾のレベル 2 地震動 (II 種地盤)

表-5 2層式ラーメン橋脚の諸元

	部位	断面幅×高さ (mm)	鋼材比 (%)	帯鉄筋	軸力 (MPa)	固有周期 (sec)
FP1 橋脚	上柱, 下柱	800×800	6.68	D16@150	2.5	0.58
	中層はり	700×1000	4.64	D16@300	0	
FP2 橋脚	上柱, 下柱	800×800	6.68	D16@150	2.5	0.62
	中層はり	700×1000	3.01	D16@300	0	
FP3 橋脚	上柱, 下柱	800×800	4.02	D16@150	2.5	0.66
	中層はり	700×1000	3.01	D16@300	0	

表-6 2層式 SRC ラーメン橋脚の動的解析の結果 (3波の平均値)

		橋脚の変形性能		ファイバー解析			1 質点系モデル		
		かぶり剥落 時曲率 ϕ_m ($\times 10^{-5}/\text{mm}$)	H 形鋼の座 屈時曲率 ϕ_u ($\times 10^{-5}/\text{mm}$)	最大応 答変位 (mm)	最大応 答曲率 ($\times 10^{-5}/\text{mm}$)	損傷 レベル	最大応 答変位 (mm)	最大応 答曲率 ($\times 10^{-5}/\text{mm}$)	損傷 レベル
FP1	下柱	3.24	5.38	213	2.04	2	208	1.85	2
	上柱				1.47	2		0.88	2
	中層はり				2.65	2		2.26	2
FP2	下柱	3.24	5.38	259	2.55	2	241	1.85	2
	上柱				1.82	2		1.20	2
	中層はり				3.90	3		3.26	3
FP3	下柱	3.68	5.70	317	3.25	2	305	2.76	2
	上柱				2.39	2		2.64	2
	中層はり				4.14	3		3.73	3

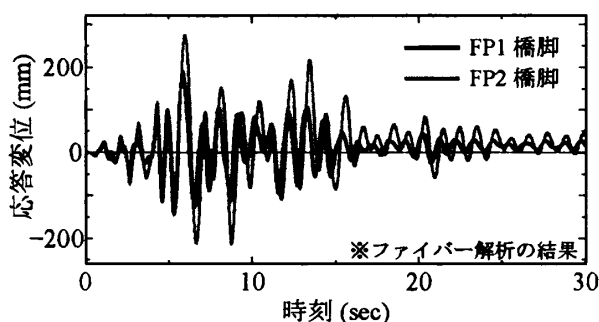


図-5 ラーメン橋脚の応答変位図

の標準波形 3 波とした。復旧性に配慮した耐震性能 II の FP1 橋脚では、柱と中層はりのいずれにもかぶり剥落を許容しない。これに対して、復旧性を期待しない FP2 橋脚では、FP1 橋脚と同じ柱の断面を用いたが、中層はりの曲げ耐力は FP1 橋脚の 4 割程度に低下させ、かぶり剥落後の塑性変形を許容した。また、FP3 橋脚では、FP2 橋脚と同じ中層はりの断面を用い、柱の曲げ耐力は FP1 橋脚の 7 割程度に低下させた。

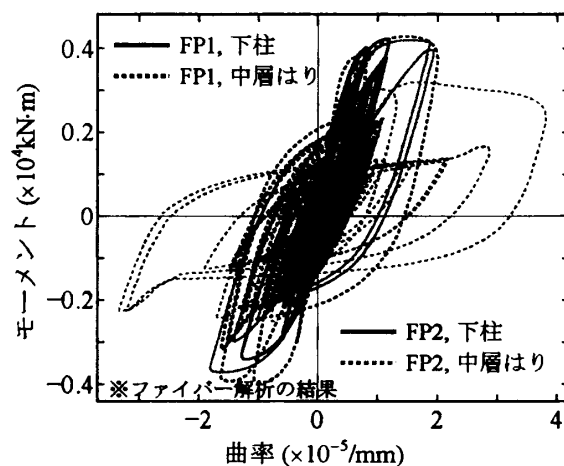


図-6 ラーメン橋脚のモーメント-曲率関係

表-5 の橋脚に対して、ファイバー解析による動的解析を行った。TypeII-II-1 地震波を入力した FP1 橋脚と FP2 橋脚の橋脚天端の応答変位図と構成部位のモーメント-曲率関係をそれぞれ図-5 と図-6 に示す。なお、これらの損傷状況と最大応答値は試設計と同様であり、図-6 の応答

曲率は、塑性変形の大きい中層はりとは下柱のみを示した。復旧性に配慮した FP1 橋脚では、柱と中層はりとは損傷レベル 2 に抑えられており、橋脚天端の最大応答変位も小さい。なお、この最大応答変位に対して、道路橋示方書⁴⁾の残留変位の照査を適用した結果、FP1 橋脚の残留変位は許容値を満足した。また、中層はりの曲げ耐力を低下させた FP2 橋脚でも、中層はりの両端には大きな塑性変形が生じてかぶりコンクリートが剥落したが、道路橋示方書の残留変位の許容値を満足した。

標準波形 3 波による動的解析の平均値を表-6 に示す。FP2 橋脚に対して、柱の曲げ耐力を低下させた FP3 橋脚では、中層はりの応答曲率は FP2 橋脚と同程度であったが、上柱と下柱には FP2 橋脚よりも大きな応答曲率が生じた。この結果、FP3 橋脚の最大応答変位は FP2 橋脚よりも大きくなった。なお、耐震性能 II と耐震性能 III の橋脚の比較においては、2 層式ラーメン橋脚 (F1, FP2 橋脚) では単柱式橋脚 (SP1, SP2 橋脚) のような大きな応答変位の差は見られなかった。

以上より、前記の単柱式橋脚の場合とは異なり、2 層式ラーメン橋脚の耐震設計では、橋脚全体系に過大な応答変位や残留変位を生じさせずに、中層はりなどの特定部位にかぶり剥落後の大きな塑性変形を許容した設計も可能であることが示された。特に、SRC 部材は鉄骨と鉄筋の様々な組み合わせにより耐力と変形性能を大きく変化させることが可能であり、ラーメン橋脚など、不静定構造の構成部位に耐力格差を設けることによって、地震時の損傷部位を限定した合理的な耐震設計が可能になると考えられる。

また、表-6 には、ファイバー解析と併せて 1 質点系モデルの解析結果も示した。表-6 より、3 波平均の最大応答変位のみの評価に限れば、表-4 の単柱式橋脚の検討と同様に、1 質点系モデルでもファイバー解析の結果をよく評価できていた。しかし、表-4 や表-6 の結果は、限られた諸元と地震波による検討であるため、今後、繰り返し回数が多地震動など、多様な地震波

に対する検討も必要である。

4. まとめ

本研究では、単柱式橋脚と 2 層式ラーメン橋脚の試設計を通じて、SRC 部材の新たな修復限界 (かぶり剥落) と終局限界 (H 形鋼の局部座屈) の定義に対しても、参考文献²⁾の手法を用いて SRC 橋脚の耐震設計が可能になることを示した。特に、上記の解析手法は、設計地震動に対する SRC 橋脚の損傷状況と最大応答変位を予測できるなど、地震後の復旧性を考慮した耐震設計が可能になることを示した。

また、本研究の解析条件の範囲においては、静的非線形解析と 1 質点系の動的解析を用いた簡易手法でも、ファイバー解析と同程度の精度によって、SRC 橋脚の最大応答変位や損傷状況を評価できることが示された。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 1999.
- 2) 内藤英樹, 白濱永才, 秋山充良, 高田真人, 鈴木基行: H 形鋼の局部座屈に着目した SRC 柱の靱性能評価に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.4, pp.698-712, 2006.11
- 3) 秋山充良, 林寛之, 内藤英樹, 鈴木基行: 繰返し荷重を受ける SRC 柱の荷重-変位関係に関する解析的研究, 構造工学論文集, Vol.47, pp.1453-1463, 2001.3
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2002.
- 5) 堺純一, 松井千秋, 南宏一: 芯鉄骨合成柱材の耐震性能に関する解析的研究, 日本建築学会構造系論文集, No.544, pp.163-169, 2001.6
- 6) 村田二郎, 泉満明, 山寺徳明: 鉄骨鉄筋コンクリート土木構造物の設計, オーム社, 1976.
- 7) 鈴木基行, 秋山充良, 田中慎介, 丸中孝通, 浮本忍: 部材の降伏過程が RC2 層ラーメン高架橋の応答変位に及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.1359-1367, 1999.3