

道路橋 RC 橋脚の設計変数と構造最適化のための影響度解析

Parametric Study on Optimum Design for RC Pier of Road Bridge

廣瀬 彰則*・近田 康夫**

Akinori HIROSE and Yasuo CHIKATA

*正会員 金沢大学大学院自然科学研究科システム創成科学専攻(中央復建コンサルタンツ株式会社)

**正会員 工博, 金沢大学助教授, 自然科学研究科システム創成科学専攻(〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

The design of the road bridge has become more complicated in comparison with the former, with the wide variety of social demands in both diminishment of initial construction costs and affects in environment around in public works. Especially, road bridge substructure has become required in widely revised seismic design standards taking into consideration the experience of the Hanshin-Awaji Earthquake in 1995. Under this circumstances, we, bridge engineers, have produced effective and rational substructures which satisfy the several demanded factors. On the other hand, here are so many design variables applied to current seismic standards in road bridge design. Therefore, we are in a difficult circumstance to evaluate optimum size of substructure quantitatively. In this study, we, taking into account the situation above, attempt to verify the effects on bridge pier performance influenced by each design variables, by the way of analyzing the sensitivity of design variables against several required item as standards.

Key Words : optimum design, RC pier, seismic design, design variables, road bridge

キーワード: SOM, RC 橋脚, 耐震設計, 道路橋

1. はじめに

現在, 公共事業を取り巻く社会環境は非常に厳しく, 特に建設事業関連への総投資削減への取り組みはいまなお不足している良質な社会資本整備の必要性を認識しながらも, 個々の整備プログラムに対する厳格なコストパフォーマンスの評価を不可避なものとしている。

このような状況下にあつて, 道路橋整備の分野においても建設コストの縮減は至上命題のひとつであり, 各種コスト縮減策や設計・施工の合理化に関する研究・開発が活発化している^{1)~5)}。また平成7年に発生した兵庫県南部地震以後, より安全で信頼性の高い橋梁整備が従来にも増して強く求められている。橋梁の耐震設計法への信頼性理論の適用については, 地震動の不確定さや橋の変形性能の算定法の精度が不十分であることから今後十分な研究が必要とされているところであるが^{6)~8)}, 耐震設計の実務に着目して確率論的手法あるいは最適設計手法の考え方をを用いた, 設計作業の軽減もしくは意思決定の一部を肩代わりさせようとする研究も少なくない^{9)~18)}。

RC 橋脚の耐震設計手法の実際は, 平成8年度の道路橋示方書全面改訂¹⁹⁾²⁰⁾により, その躯体の非線形挙動である靱性の評価が重要となり, 必要な変形性能を確保するための具体的な構造詳細決定過程で用いる設計変数が大幅に増加した。これにより設計作業には非常に複雑なプロセスが要求されることとなり, 与えられた設計条件・設計空間内での最適部材断面の探索段階では多くの試行錯誤を繰り返すのが実状である。この場合, その入力値の設定においては設計者の経験と勘に依存する部分が多く, 設計作業の軽減のためには設計初期値の設定が重要な要素となるほか, 得られた

結果の最適性に関する検証手法も課題である¹²⁾。

一方で, 鉄道橋の耐震設計手法¹³⁾として確立されている応答スペクトル法を用いた, 遺伝的アルゴリズム(GA)によるRCラーメン高架橋の最適設計手法の研究¹⁴⁾¹⁵⁾や, 性能照査型設計²¹⁾²²⁾への移行をにらんで信頼性理論と構造最適化手法を統合させ, 任意に設定された安全度に対応できる設計手法¹⁶⁾など, RC構造物を対象とした包括的な耐震設計の最適化を目指した研究も進められている。

本研究は, 仕様規定設計ともいえる現状の道路橋示方書に基づく設計実務の最適化, または性能照査型設計の要求性能に対する解探索の合理化を目的に, 有効な設計代替案を効率的に提案するシステムづくりを目指して, 道路橋RC橋脚の柱断面を対象とした設計実務における設計初期値の設計結果に与える影響度を解析し, 最適化のために着目すべき設計パラメータについて検討したものである。

2. 道路橋 RC 橋脚の耐震設計

2.1 RC 橋脚の設計基準

道路橋RC橋脚の設計には, 道路橋示方書IV下部構造編¹⁹⁾(以下「道示IV」)ならびにV耐震設計編²⁰⁾(以下「道示V」)が適用される。平成8年版道示V(以下「新耐震基準」)への改訂前後の影響を確認するため, 同一の上部構造と地盤条件を用いてRC橋脚の比較設計を行った。その設計結果を図-1, 図-2に示す。これらの断面を対比すると, 耐震設計基準の改訂により橋脚形状ならびに配筋状況が大きく変化していることが理解できる。新耐震基準のもっとも大きな特徴は, 従

来の震度法中心の設計法からプレート境界型(タイプI)地震動, 兵庫県南部地震で実測された内陸直下型(タイプII)地震動を考慮した地震時保有水平耐力法(以下「保耐法」)中心の設計法に移行した点である。保耐法による耐震設計法についてはすでに昭和55年版の道示Vから導入されていたものであるが, 新耐震基準では以下の点について見直しが行われている²⁰⁾。

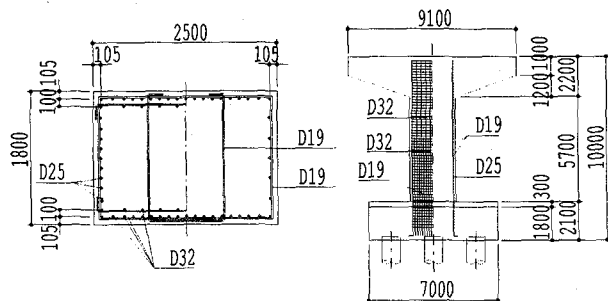


図-1 平成6年度道路橋示方書を適用した設計例

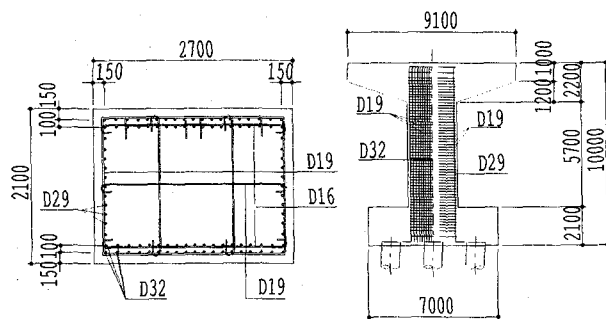


図-2 平成8年度道路橋示方書を適用した設計例

- ① 帯鉄筋による拘束効果を考慮したコンクリートの応力度-ひずみ曲線の導入
- ② 塑性ヒンジを考慮した鉄筋コンクリート橋脚の変形性能の解析法の導入
- ③ 地震動および繰返し特性に応じた許容塑性率の導入
- ④ 寸法効果, 荷重の正負交番作用の影響を考慮したコンクリートのせん断耐力の評価法の導入

図-1, 図-2でも明らかなように, 設計基準の改定に伴う構造面での具体的な変更は, 以下の点にあるといえる。

- (a) 帯鉄筋の配置間隔と形状
- (b) 中間拘束鉄筋(横拘束筋)の導入
- (c) 主鉄筋の段落とし(断面変化)の廃止

2.2 耐震設計の流れ

図-3には, 新耐震基準に基づく橋梁の設計手順を示している。

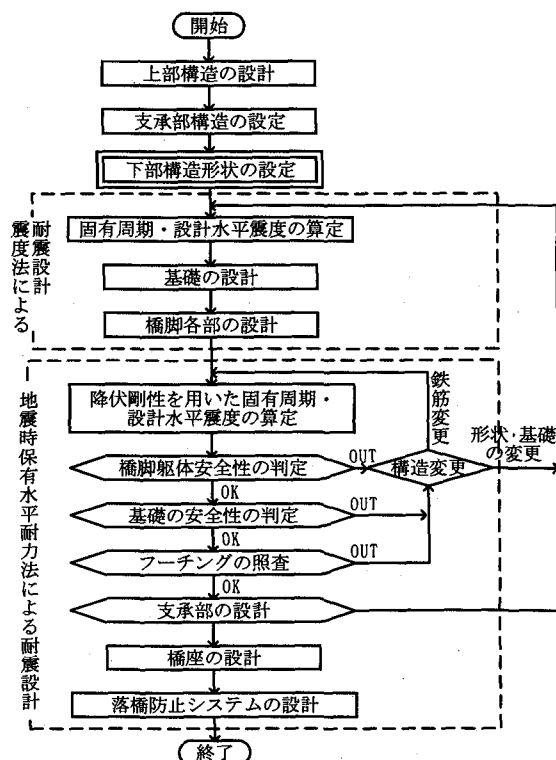


図-3 現行道路橋示方書によるRC橋脚の設計計算の流れ

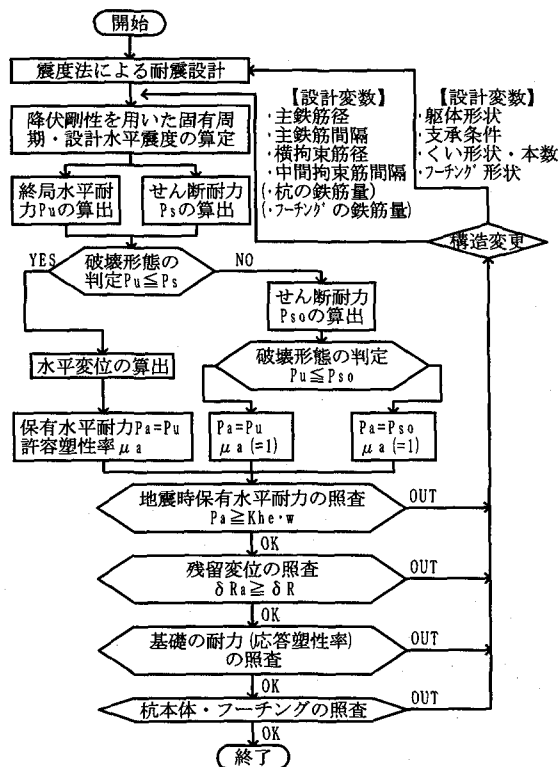


図-4 地震時保有水平耐力による耐震設計の手順

RC橋脚の設計実務はこのフローに示される各段階の照査項目を満足する設計変数を同定して行く作業にほかならないが, 各設計変数が照査項目ごとに独立でなく複雑に絡み合っているため, 要求される条件に最

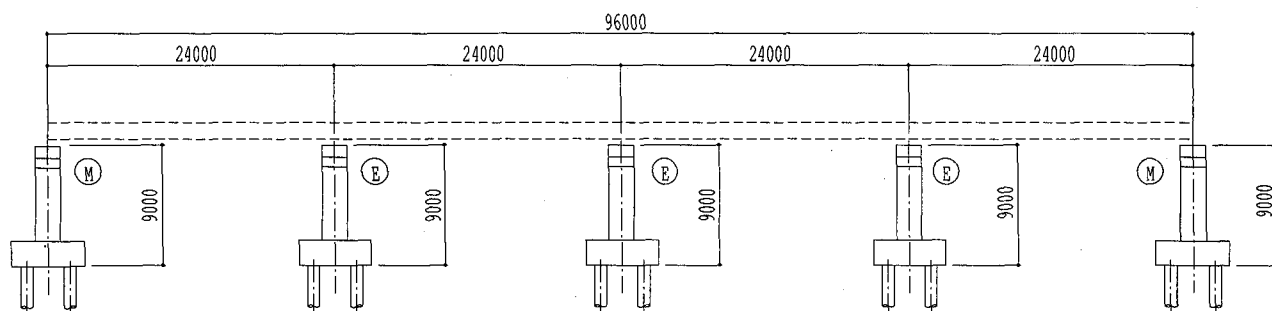


図-5 解析対象橋梁一般図

も適した構造諸元を追求するには、場合によっては設計の全過程を幾度となく繰り返すことにもなり、非常に多くの労力を費やすことになる²³⁾。

図-3 に示す設計手順のうち、地震時保有水平耐力法のみに着目し、技術者の判断を必要とする設計変数（入力項目）と評価項目ならびに繰返し手順を整理すると、図-4 のように表すことができる。これらの設計変数は、それぞれが相互に関連性を有していることから、変更操作が一変数にとどまることはまれであり、同時に複数の設計変数の変更を繰り返す試行錯誤となることが多い。このため、設計実務においては、橋脚初期断面の設定が非常に重要な要素となる。

3. RC 橋脚設計への要求性能

3.1 RC 橋脚の構造最適化

橋梁設計への要求は多様化しているが、具体的には以下の項目があげられる。

- ① 適切な耐震性能の確保
- ② 初期コストに維持管理費を加えたライフサイクルコストの低減
- ③ 周辺環境に調和した景観への配慮
- ④ 施工性を考慮した各構造部材の合理化

なお性能規定設計においては、本来耐震設計レベルの設定状況についてもライフサイクルコストの中で評価すべきものとなるが、現状ではこれらのうち、特に RC 橋脚に対しては適切な耐震性能を有することのほかに、初期コストの低減と施工性が重視されるのが一般的である。

RC 橋脚の構造詳細の決定においては、交差条件に制約を受ける都市内の橋梁や施工面で厳しい制約を受ける山間部などの橋梁で、その断面寸法に制約を受けることもあるが、一般的には多くの自由度を有している。

ここでは、RC 橋脚の構造最適化の着眼点として以下の要求性能を想定した場合の合理的な設計手法に関する検討を行うものとする。

- ① 適切な耐震性能
- ② 初期コストの最小化

このような場合、特別な制約を受けない場合の設計実務では、設計技術者の蓄積した経験から初期断面を想定し、限られた変数のみを変化させて、その中で最

適解を探索しているのが実状である。このため、得られた解は限られた解空間に属する局所最適解となっている場合がほとんどであり、厳密な最適解かどうかの判定は極めて困難である。しかしながら、最適解を厳密に求めるには、多数の変数を変化させ非常に多くの組合せケースを対象とした試設計を重ねることが必要であり、多くの場合、実業務においては非現実的な作業となる。

要求性能を満足させる橋脚設計を、より合理的にかつ効率的に行うためには、その解を探索する空間をいかに最適値に近い位置に設定するかがポイントであり、そのためにも検討の初期値とする断面の設定と設計変数の更新方法が重要な要素となる。

このため、本研究ではまず、より効率的・合理的な設計初期断面の設定ができることを目的に、種々の設計変数が橋脚性能やコストに及ぼす影響の感度を分析した。

4. 影響度解析と最適設計に関する考察

4.1 対象モデルと設計条件

本研究で対象とした橋梁の概要図を図-5 に示す。また、その橋梁の設計条件を表-1 に示す。

表-1 対象橋脚の設計条件

下部構造	張出し式橋脚 ($H=10.0\text{m}$)
基礎構造	場所打ちくい ($\phi 1.0, L=19\text{m}$)
支承条件	地震時水平反力分散方式
地盤種別	II 種地盤
コンクリート材料	$\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$
鉄筋材料	SD345

なお、地震時水平反力分散方式による橋梁については、道示 V の追加修正²⁴⁾により、材料非線形性を考慮した動的解析による照査が義務付けられているが、解析に inputs する部材寸法などの基本的諸元は、保耐法にて決定されることが一般的であり、以下は保耐法による設計に着目して考察する。

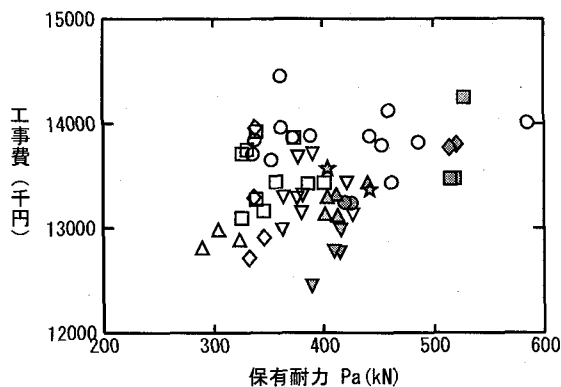
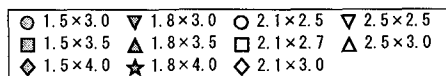
表-2 に示す設計変数を組合せて、各柱断面に対して適切な応力度ならびに地震時保有水平耐力（以下、保有耐力）となる軸方向鉄筋量および横拘束鉄筋量を算

表-3 橋脚設計計算結果の概要

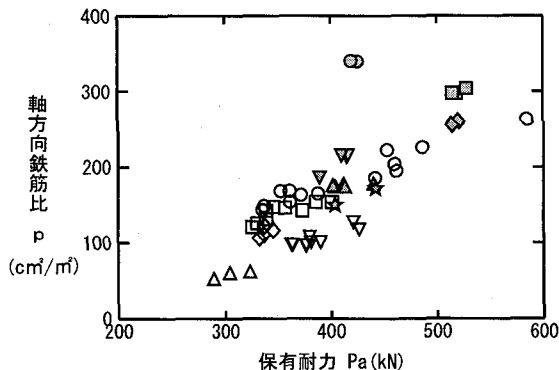
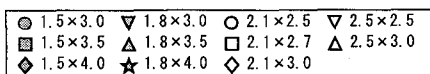
柱断面寸法		橋軸方向主鉄筋		直角方向主鉄筋		帯鉄筋 /横拘束鉄筋	横拘束筋体積 比 $\rho_s (\times 10^{-3})$		保有耐力の照査 (kN)				震度法 (計算値/許容値)				保耐法 (計算値/許容値)				許容塑性率 μ_a				工事費 (千円)
橋軸 (m)	直角 (m)	使用 鉄筋	鉄筋量 (cm^2)	使用 鉄筋	鉄筋量 (cm^2)		橋軸	直角	橋軸方向		直角方向		橋軸方向		直角方向		橋軸方向		直角方向		(タイプⅠ)		(タイプⅡ)		
									Pa	khe-W	Pa	khe-W	σ_c	σ_s	σ_c	σ_s	耐力	変位	耐力	変位	橋軸	直角	橋軸	直角	
1.5	3.0	D 51	709.45	D 25	55.74	D 19	1.132	2.547	425.4	393.5	671.9	423.3	0.72	0.48	0.72	0.48	0.93	0.88	0.63	0.17	1.75	1.42	4.01	2.93	13,238
1.5	3.0	D 51	709.45	D 35	57.40	D 19	1.132	2.547	419.4	369.7	654.4	429.3	0.72	0.48	0.72	0.48	0.88	0.89	0.66	0.18	1.83	1.42	4.55	2.92	13,244
1.5	3.5	D 51	749.99	D 19	31.52	D 19	0.955	2.547	519.0	361.3	955.6	391.4	0.66	0.45	0.66	0.45	0.70	0.56	0.41	0.02	1.85	1.37	4.82	2.72	13,478
1.5	3.5	D 51	749.99	D 19	48.71	D 19	1.433	3.820	528.1	301.1	986.5	373.4	0.66	0.45	0.66	0.45	0.57	0.55	0.38	0.01	2.19	1.43	6.53	3.06	14,249
1.5	3.5	D 51	749.99	D 25	30.40	D 19	0.955	2.547	515.0	355.3	943.0	391.4	0.66	0.45	0.66	0.45	0.69	0.56	0.42	0.02	1.89	1.37	4.93	2.71	13,475
1.5	4.0	D 51	749.99	D 19	31.52	D 19	1.032	3.183	520.4	377.1	1141.4	389.3	0.63	0.45	0.63	0.45	0.72	0.55	0.34	0.00	1.83	1.40	4.53	2.83	13,802
1.5	4.0	D 51	749.99	D 19	17.19	D 19	1.032	3.183	514.1	371.0	1120.4	389.3	0.63	0.45	0.63	0.45	0.72	0.56	0.35	0.00	1.87	1.39	4.63	2.82	13,769
1.8	3.0	D 38	524.40	D 22	50.32	D 16	0.981	1.765	414.8	368.3	564.1	458.9	0.64	0.50	0.64	0.50	0.89	0.71	0.81	0.26	1.95	1.43	4.60	2.68	12,764
1.8	3.0	D 38	524.40	D 25	55.74	D 19	1.132	2.037	415.7	326.0	561.0	416.6	0.64	0.50	0.64	0.50	0.78	0.71	0.74	0.27	2.20	1.52	5.77	3.22	12,977
1.8	3.0	D 38	524.40	D 32	55.59	D 16	0.981	1.765	409.7	350.2	552.2	464.9	0.64	0.50	0.64	0.50	0.85	0.72	0.84	0.27	2.03	1.43	4.99	2.68	12,776
1.8	3.0	D 51	445.94	D 32	55.59	D 16	0.981	1.765	389.6	362.3	514.3	440.8	0.65	0.52	0.65	0.52	0.93	0.78	0.86	0.31	2.09	1.50	4.80	2.91	12,442
1.8	3.5	D 38	524.40	D 19	31.52	D 16	0.828	0.706	402.0	336.9	663.2	404.2	0.62	0.51	0.62	0.51	0.84	0.77	0.61	0.14	2.16	1.49	5.56	2.87	13,138
1.8	3.5	D 38	524.40	D 19	37.25	D 16	0.993	2.118	411.9	329.9	677.9	391.0	0.60	0.49	0.60	0.49	0.80	0.71	0.58	0.13	2.19	1.49	5.68	2.87	13,326
1.8	3.5	D 38	524.40	D 19	37.25	D 16	0.993	2.118	411.9	329.9	677.9	391.0	0.60	0.49	0.60	0.49	0.80	0.71	0.58	0.13	2.19	1.49	5.68	2.87	13,326
1.8	3.5	D 38	524.40	D 22	27.10	D 16	0.993	2.118	404.0	323.8	659.9	397.1	0.60	0.49	0.60	0.49	0.80	0.73	0.60	0.14	2.27	1.49	5.94	2.87	13,302
1.8	3.5	D 38	524.40	D 22	27.10	D 19	0.955	2.037	413.2	287.1	673.1	354.3	0.60	0.49	0.60	0.49	0.69	0.71	0.53	0.13	2.50	1.59	7.52	3.47	13,124
1.8	3.5	D 51	527.02	D 19	37.25	D 16	0.993	2.118	440.2	323.8	686.4	391.0	0.56	0.44	0.56	0.44	0.74	0.60	0.57	0.12	2.38	1.48	5.89	2.86	13,443
1.8	4.0	D 38	524.40	D 19	20.06	D 16	1.239	3.056	404.0	333.7	766.9	364.6	0.57	0.49	0.57	0.49	0.83	0.71	0.48	0.07	2.32	1.53	5.80	3.01	13,578
1.8	4.0	D 38	592.80	D 19	31.52	D 19	1.239	1.019	442.1	254.1	838.0	526.9	0.55	0.45	0.55	0.45	0.57	0.64	0.63	0.05	2.92	1.00	9.71	3.45	13,375
2.1	2.5	D 29	244.11	D 32	198.55	D 22	1.408	1.720	361.1	319.6	387.4	349.8	0.78	0.80	0.78	0.80	0.89	0.87	0.90	0.71	2.10	1.92	5.91	5.04	13,958
2.1	2.5	D 29	244.11	D 32	198.55	D 22	1.408	1.147	352.4	326.4	379.0	356.6	0.80	0.83	0.80	0.83	0.93	0.95	0.94	0.76	2.07	1.90	5.78	4.94	13,652
2.1	2.5	D 32	230.32	D 29	160.60	D 22	1.408	1.720	337.1	301.5	356.0	337.7	0.79	0.82	0.79	0.82	0.89	0.97	0.95	0.83	2.26	1.99	6.67	5.36	13,841
2.1	2.5	D 32	301.80	D 29	102.78	D 25	1.843	2.252	361.5	247.3	364.8	331.7	0.71	0.66	0.71	0.66	0.68	0.84	0.91	0.84	2.81	1.98	9.54	5.64	14,448
2.1	2.5	D 32	301.80	D 32	127.07	D 22	1.408	1.720	371.9	289.5	378.8	367.9	0.71	0.66	0.71	0.66	0.78	0.79	0.97	0.76	2.36	1.81	7.05	4.55	13,864
2.1	2.5	D 38	216.60	D 29	160.60	D 22	1.408	1.720	335.4	289.5	348.0	331.7	0.78	0.83	0.78	0.83	0.86	0.96	0.95	0.86	2.36	2.05	7.03	5.57	13,708
2.1	2.5	D 38	330.60	D 29	102.78	D 22	1.408	1.720	388.1	277.4	383.3	379.9	0.67	0.59	0.67	0.59	0.71	0.70	0.99	0.75	2.58	1.78	7.87	4.40	13,882
2.1	2.5	D 38	330.60	D 32	254.14	D 19	1.042	1.273	452.8	386.0	473.0	428.2	0.67	0.59	0.67	0.59	0.85	0.53	0.91	0.46	1.77	1.62	4.18	3.52	13,794
2.1	2.5	D 38	433.20	D 29	102.78	D 22	1.408	1.720	459.8	283.4	440.5	416.1	0.60	0.47	0.60	0.47	0.62	0.47	0.94	0.59	2.42	1.61	7.31	3.71	14,121
2.1	2.5	D 38	433.20	D 29	160.60	D 19	1.042	1.273	486.0	343.7	473.5	464.4	0.60	0.47	0.60	0.47	0.71	0.41	0.98	0.48	1.94	1.50	4.89	3.06	13,819
2.1	2.5	D 51	385.13	D 29	102.78	D 22	1.408	1.720	441.7	271.4	418.0	392.0	0.60	0.48	0.60	0.48	0.61	0.50	0.94	0.64	2.57	1.69	7.79	4.08	13,880
2.1	2.5	D 51	385.13	D 32	127.07	D 19	1.042	1.273	461.7	331.7	445.7	440.2	0.60	0.48	0.60	0.48	0.72	0.45	0.99	0.54	2.07	1.57	5.38	3.33	13,435
2.1	2.5	D 51	587.83	D 29	102.78	D 19	1.042	1.273	584.7	512.6	536.7	494.5	0.50	0.34	0.50	0.34	0.88	0.20	0.92	0.36	1.00	1.42	5.80	2.74	14,009
2.1	2.7	D 29	205.57	D 32	198.55	D 22	1.290	1.720	338.7	297.1	401.4	309.2	0.80	0.91	0.80	0.91	0.88	0.96	0.77	0.56	2.29	2.24	6.78	6.41	13,922
2.1	2.7	D 29	269.81	D 29	102.78	D 19	0.955	1.273	339.0	297.1	377.4	376.0	0.72	0.73	0.72	0.73	0.88	0.90	1.00	0.67	2.47	1.85	6.89	4.45	13,274
2.1	2.7	D 29	269.81	D 32	71.48	D 22	1.290	1.720	325.8	242.5	358.6	333.5	0.72	0.73	0.72	0.73	0.74	0.97	0.93	0.75	3.13	2.04	10.41	5.57	13,712
2.1	2.7	D 32	254.14	D 29	102.78	D 22	1.290	1.720	330.4	266.8	370.2	327.4	0.73	0.75	0.73	0.75	0.81	0.97	0.88	0.70	2.71	2.11	8.53	5.83	13,750
2.1	2.7	D 32	254.14	D 29	160.60	D 19	0.955	1.273	356.9	333.5	408.1	369.9	0.73	0.75	0.73	0.75	0.93	0.84	0.91	0.55	2.11	1.89	5.58	4.58	13,440
2.1	2.7	D 32	333.56	D 29	102.78	D 19	0.955	1.273	386.1	309.2	420.2	406.3	0.65	0.59	0.65	0.59	0.80	0.70	0.97	0.55	2.33	1.72	6.42	3.92	13,425
2.1	2.7	D 32	333.56	D 32	71.48	D 22	1.290	1.720	373.2	254.7	401.8	357.8	0.65	0.59	0.65	0.59	0.68	0.75	0.89	0.62	2.91	1.87	9.19	4.85	13,862
2.1	2.7	D 32	270.03	D 32	148.21	D 19	0.955	0.849	345.8	322.1	392.4	382.9	0.74	0.75	0.74	0.75	0.93	0.92	0.98	0.64	2.20	1.83	5.92	4.34	13,162
2.1	2.7	D 38	239.40	D 29	102.78	D 19	0.955	1.273	325.8	297.1	359.1	357.8	0.72	0.75	0.72	0.75	0.91	0.96	1.00	0.72	2.43	1.97	6.80	4.89	13,096
2.1	2.7	D 38	364.80	D 32	71.48	D 19	0.955	1.273	401.2	291.1	426.8	412.3	0.61	0.53	0.6										

表-2 比較ケースの設計変数

設計変数	抽出ケース	種類
柱断面寸法	1.5×3.0, 1.5×3.5, 1.5×4.0, 1.8×3.0, 1.8×3.5, 1.8×4.0, 2.1×2.5, 2.1×2.7, 2.1×3.0, 2.5×2.5, 2.5×3.0	11
主鉄筋	D25, D29, D32, D38, D51	5
帯鉄筋・ 中間拘束筋	D16, D19, D22, D25	4



(a) 保有耐力と工事費 (橋軸方向)



(b) 保有耐力と軸方向鉄筋比 (橋軸方向)

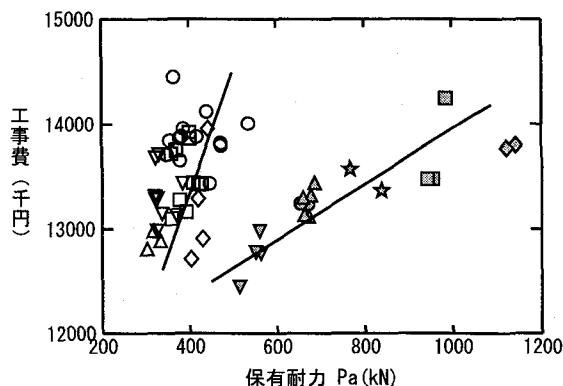
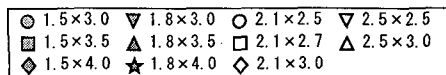
図-6 橋軸方向保有耐力と工事費、軸方向鉄筋比の関係

いずれかの照査において30%程度以下とする。

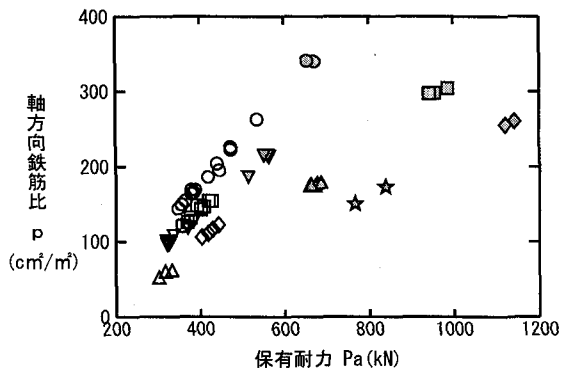
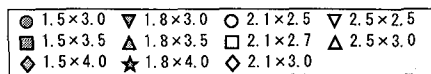
- ⑤ 場所打ちくいの設計径および鉄筋本数は変更しない。

4.2 計算結果の概要

各ケースに対する設計計算結果の概要を表-3に示す。この計算結果によれば、工事費は最大14%程度の差で分布している。ここでの工事費は躯体(コンクリート、型枠、鉄筋)、基礎工、支保工および足場工の数量を基



(a) 保有耐力と工事費 (直角方向)



(b) 保有耐力と軸方向鉄筋比 (直角方向)

図-7 橋軸直角方向保有耐力と工事費、軸方向鉄筋比の関係

に算出している。工事費差が極端に大きく現れなかった原因は、対象橋梁規模では柱断面の変更が固有周期の変動に大きく寄与することがなかったことから、全計算ケースの基礎工ならびに底版の形状が同一となり、震度法レベルの設計水平震度が変化しなかったことによるものと考えられるが、この点についてはさらに検討を加える必要がある。しかしながら例題のような連続高架橋など橋脚数が多いものでは、個々の差がそれほど大きくはなくても全体では大きな工事費差をもたらすことになる。

また横拘束鉄筋の体積比については、道示Vの規定により設計上の評価値は 1.8×10^{-2} を上限値としているが、ここではこれをひとつのパラメータとして取り扱う関係上、計算値をそのまま表示している。

4.3 最適化パラメータの選定と分析

ここでは、検討の結果、橋脚の設計パラメータとして、橋脚柱断面の、軸方向鉄筋比 p 、軸方向鉄筋率 λ 、横拘束鉄筋体積比 ρ_s および辺長比 γ を選定した。それぞれのパラメータは次式で表わされる。

$$p = \frac{A_{sc}}{B \cdot w} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{\omega_{sc}}{\omega_{sc+h}} \quad (2)$$

$$\rho_s = \frac{4A_h}{s \cdot d} \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{w}{b} \quad (4)$$

ここに

- A_{sc} : 柱の全軸方向鉄筋量 (c m²)
 b : 柱の橋軸方向幅 (m)
 w : 柱の橋軸直角方向幅 (m)
 ω_{sc} : 柱の単位あたり軸方向鉄筋量 (kg/m²)
 ω_{sc+h} : 柱の単位あたり総鉄筋量 (kg/m²)
 A_h : 横拘束筋の断面積 (c m²)
 s : 横拘束筋の間隔 (cm)
 d : 横拘束筋の有効長 (cm)

(1) 橋脚柱の軸方向鉄筋比

軸方向鉄筋比の算定に用いる軸方向鉄筋量 A_{sc} は、震度法の場合と異なり、耐震設計上の方向に関係なく全ての軸方向主鉄筋量の合計としている。これは、保耐法では、着目している方向の軸方向鉄筋のみならず、その側面鉄筋も評価する必要があることによっている。図-6は橋脚柱の軸方向鉄筋比 p と橋軸方向地震時保有水平耐力 P_a 、工事費との対比を示している(図中の凡例中 $\bigcirc 2.1 \times 2.5$ ほかは、橋脚柱の橋軸方向幅 (m) $\times$ 橋軸直角方向幅 (m) を示しており、以下の図においても同様である)。また図-7には橋軸直角方向における同様の対比を示す。

全般に工事費は地震時保有水平耐力の増加に比例しているが、橋軸方向幅 $b = 1.5, 1.8$ m の比較的壁式橋脚に近い断面(辺長比の大きな断面)グループと、 $b = 2.1, 2.5$ m の比較的柱式橋脚に近い断面(辺長比の小さな断面)グループで、それぞれ異なる直線状に乗っている(図-7(a): 図中の直線は近似的に加えたものである)。

また、橋軸直角方向に関する保有耐力 P_a と軸方向鉄筋比 p についても、辺長比によって二つのグループに分かれている(図-7(b))。

(2) 柱の総鉄筋量に占める軸方向鉄筋量

図-8は橋脚柱の単位総鉄筋重量 ω_{sc+h} と軸方向鉄筋の占める割合 λ ・工事費との対比を示している。なお、図中の破線は同一断面寸法の橋脚柱の分布傾向を補助的に示したものである。

同一タイプの橋脚柱では単位総鉄筋重量 ω_{sc+h} が増加するに連れて工事費が増加する(図-8(a))ことは容易に理解できるが、総鉄筋量に占める主鉄筋量の増加が工事費を下げる方向にあることは特徴的である(図-8(b))。また、同一断面寸法では、軸方向鉄筋率 λ の高いほど工事費は小さくなる(図-8(c))。

このことから、以下のことがわかる。

- ① コストの縮減を計りながら、目的の耐震性能を発揮させるためには、配置可能な軸方向鉄筋を十分に配置した上で帯鉄筋横拘束鉄筋の配置を検討することが有効である。

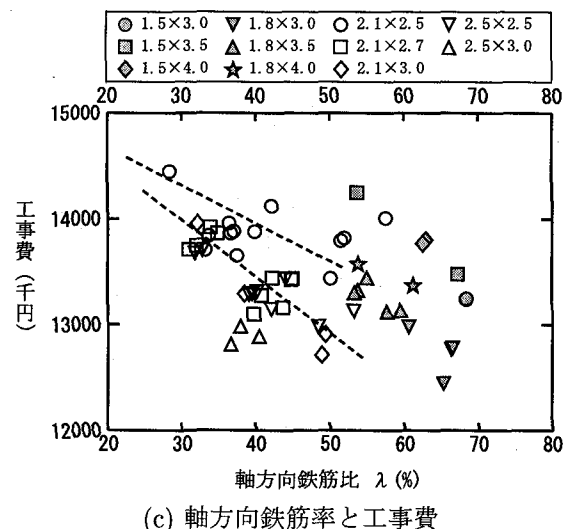
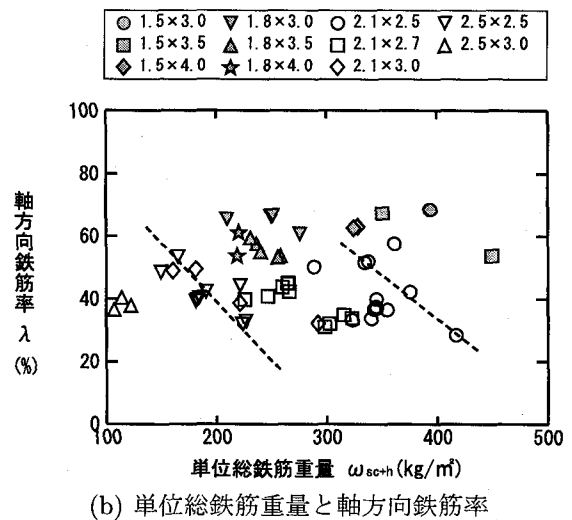
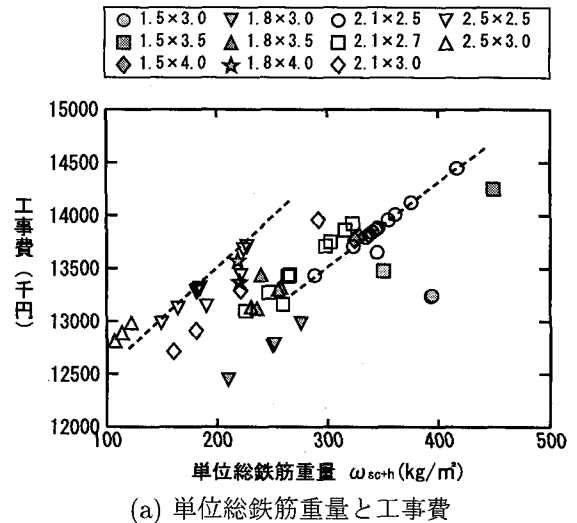


図-8 配筋量と工事費の関係

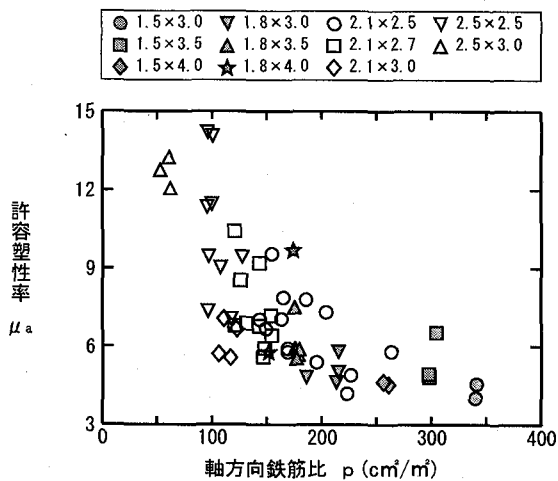


図-9 単位軸方向鉄筋量と許容塑性率 (橋軸方向)

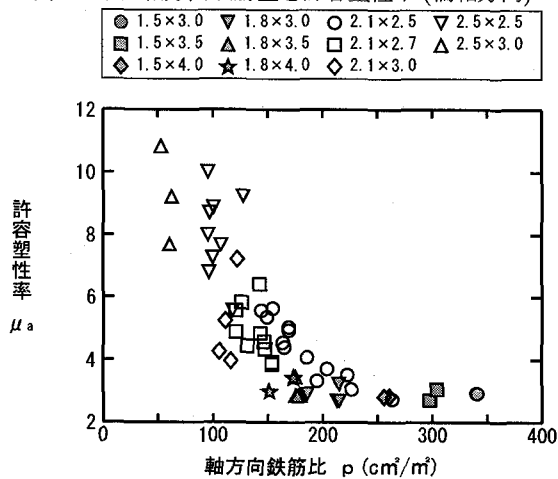


図-10 単位軸方向鉄筋量と許容塑性率 (直角方向)

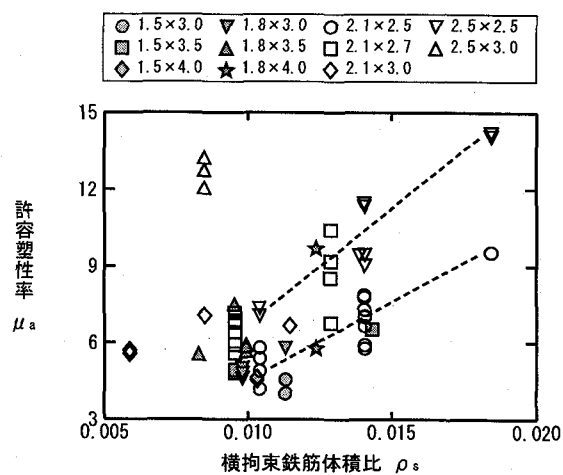


図-11 横拘束鉄筋体積比と許容塑性率 (橋軸方向)

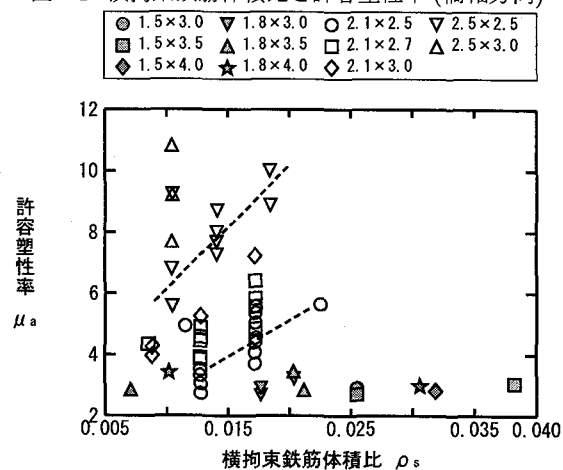


図-12 横拘束鉄筋体積比と許容塑性率 (直角方向)

② 最も経済的な断面を探索する場合には、断面寸法を変化させて検討する必要がある。

この結果、一般の設計実務では一度設定した断面寸法を大きく変化させての比較検討を行うことが少ないことから、設計結果をより最適解に近づけるためには、検討対象とする断面寸法の初期値の設定が重要であることが再認識された。

図-9及び図-10はそれぞれ橋軸方向・橋軸直角方向の橋脚柱の単位軸方向鉄筋量と許容塑性率(タイプII地震時)と単位軸方向鉄筋量 p との関係を、図-11及び図-12は、同様に許容塑性率(タイプII地震時)と横拘束鉄筋体積比 ρ_s との関係を示している。これらのグラフの対比から以下のことがわかる。

- ① 辺長比 γ の大きな断面ほど、単位軸方向鉄筋量 p は大きくなるが、逆に許容塑性率は小さくなる傾向にある(図-9, 10)。
- ② 同一断面寸法では橋脚柱の許容塑性率は、横拘束鉄筋体積比の大きさに比例して大きくなる(図-11, 12)。

軸方向鉄筋量が断面形状(辺長比 γ)によってある程度決定されることを考えると、辺長比 γ と横方向拘束鉄筋体積比 ρ_s が橋脚柱の許容塑性率を決定しているともいえる。

4.4 各パラメータと地震時保有耐力との関係

地震時保有水平耐力法による耐震設計法の基本は、想定地震動の中で、対象構造物が次式を満足することである。

$$k_{he} \cdot W \leq P_a \quad (5)$$

ここに

k_{he} : 保耐法に用いる等価水平震度
 W : 保耐法に用いる等価重量(N)
 P_a : 橋脚の地震時保有耐力(N)

また

$$k_{he} = \frac{k_{hc}}{\sqrt{2\mu_a - 1}} \quad (6)$$

$$\mu_a = 1 + \frac{\delta_u - \delta_y}{\alpha \cdot \delta_y} \quad (7)$$

ここに

k_{hc} : 保耐法に用いる水平震度
 μ_a : 橋脚の許容塑性率
 δ_u : 橋脚の終局変位(m)
 δ_y : 橋脚の降伏変位(m)
 α : 安全係数

新耐震基準では、保耐法(タイプII地震時)における橋脚柱(矩形断面)の終局変位 δ_u は、柱断面の圧縮側軸方向鉄筋位置に置けるコンクリートの圧縮ひずみ ε が式(11)に示す終局ひずみ ε_{cu} に達した時点の上部工慣性力作用位置の変位として求められ、コンクリートの圧縮応力度とひずみの関係は以下のように規程されている。

$$\sigma_{cc} = \sigma_{ck} + 0.76\rho_s\sigma_{sy} \quad (8)$$

$$\varepsilon_{cc} = 0.002 + 0.0132 \frac{\rho_s\sigma_{sy}}{\sigma_{ck}} \quad (9)$$

$$E_{des} = 11.2 \frac{\sigma_{ck}^2}{\rho_s\sigma_{sy}} \quad (10)$$

$$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cc} + \frac{0.2\sigma_{cc}}{E_{des}} \quad (11)$$

ここに

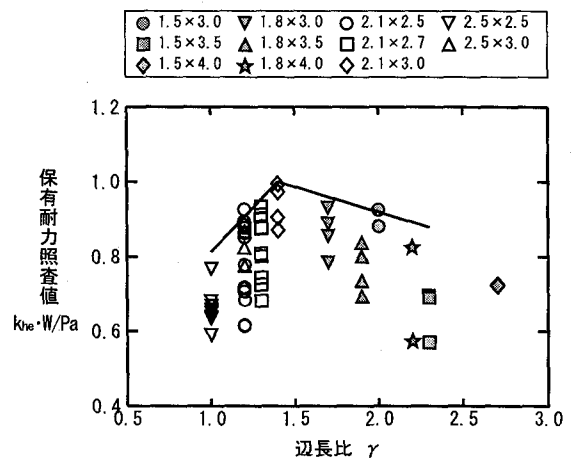
σ_{cc} : 横拘束筋で拘束されたコンクリートの強度(N/mm²)

σ_{ck} : コンクリートの設計基準強度(N/mm²)

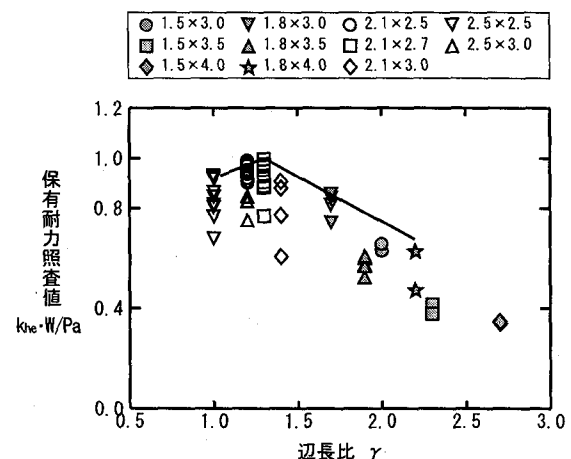
σ_{sy} : 横拘束筋の降伏点(N/mm²)

ε_{cc} : 最大圧縮応力時ひずみ

ε_{cu} : 横拘束筋で拘束されたコンクリートの終局ひずみ(タイプII地震時)



(a) 辺長比と保有耐力照査値(橋軸方向)

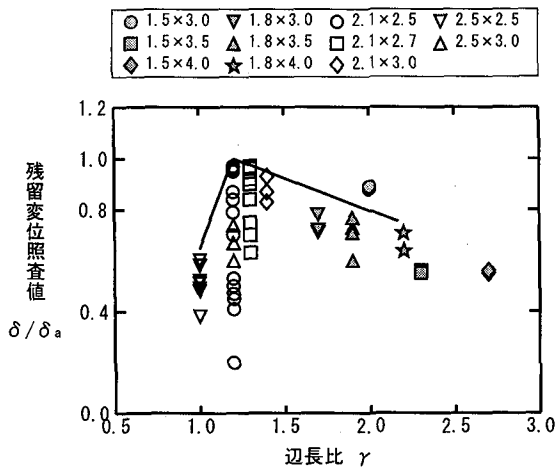


(b) 辺長比と保有耐力照査値(直角方向)

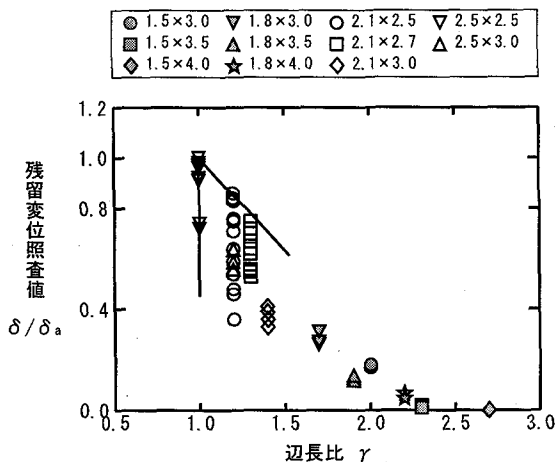
図-13 辺長比と保有耐力照査値

(1) 許容塑性率と鉄筋量・辺長比

以上の保有耐力に関する数式上より以下のことがいえる。



(a) 辺長比と残留変位照査値 (橋軸方向)



(b) 辺長比と残留変位照査値 (直角方向)

図-14 辺長比と残留変位照査値

位軸方向鉄筋量を最大化することで得られることを示している。

脚柱断面寸法の変化が耐震性能に与える影響を整理するため、辺長比 γ と保有耐力の照査値 ($k_{he} \cdot W/P_a$: 保有耐力に対する地震時慣性力の割合)、ならびに残留変位量の照査値 (δ/δ_a : 許容変位量に占める残留変位量の割合) について検討した。それぞれの結果を図-13 および図-14 に示す。

図-13 および図-14 では、明らかに上に凸の分布傾向があり、保有耐力と変形性能を効率的に発揮するため、柱断面辺長比 γ の最適値が存在することを示唆している。

この結果より、橋脚高さ $h = 10\text{m}$ についての検討結果を見ると、橋軸方向に対しては次のことがいえる。

- ① 橋脚柱の辺長比 $\gamma = 1.4$ のとき、保有耐力に対する地震時慣性力の割合が最大 (耐力に対する効率が最大) となる (図-13(a))。
- ② 橋脚柱の辺長比 $\gamma = 1.2$ のとき、許容変位量に対する残留変位量の割合が最大 (変形性能に対する効率が最大) となる (図-13(b))。

同様に橋軸直角方向に対しては、以下のことがわかる

- ③ 橋脚柱の辺長比 $\gamma = 1.3$ のとき、保有耐力に対する地震時慣性力の割合が最大 (耐力に対する効率が最大) となる (図-14(a))。
- ④ 橋脚柱の辺長比 $\gamma = 1.0$ のとき、許容変位量に対する残留変位量の割合が最大 (変形性能に対する効率が最大) となる (図-14(b))。

5. まとめ

道路橋 R C 橋脚の設計に際して、設計成果を最適解に近づけるためには、設計初期断面の設定が重要であることが明らかとなった。

さらに、橋脚柱断面に関して、効率的に最適解を探索するための合理的な設計初期断面の設定に関する知見を得た。

本研究では、橋脚の設計パラメータとして、橋脚柱断面の、軸方向鉄筋比 p 、軸方向鉄筋率 λ 、横拘束鉄筋体積比 ρ_s および 辺長比 γ に着目し、これらが橋脚性能やコストに及ぼす影響の感度を分析した。得られた結果は以下のとおりである。

- ① 橋脚柱の地震時保有水平耐力の確保のためには、その軸方向鉄筋比 p および横拘束鉄筋体積比 ρ_s を大きくすることが有効である。
- ② 橋脚柱の保有耐力を増加させるためには、横拘束鉄筋体積比 ρ_s の増加より、総鉄筋量に占める軸方向鉄筋率 λ の増加をはかることが効果的である。
- ③ 同一断面寸法の橋脚柱では、その耐震性能を最大限発揮させるための最適 (局所) 解は、その単位軸方向鉄筋量を最大化することで得られる。
- ④ 耐震性能 (保有耐力に対する地震時慣性力の割合) は、辺長比 γ によって最大値を示す領域がある。
- ⑤ 耐震性能 (許容変位量に占める残留変位量の割合) についても、辺長比 γ によって最大値を示す領域がある。

- ① 軸方向鉄筋比 p の増大は、 $P_a (= P_y = P_u)$ すなわち耐力を直接的に増大させることができるが、靱性の拡大につながる δ_u の増大にはつながらない。
- ② 一方で、式 (9)、(10) より ρ_s の増加は ε_{cu} を増大させる。この結果 δ_u が大きくなって、許容塑性率 μ_a が増加し、多くの場合等価設計震度 k_{he} を低減することができることとなる。

これらの傾向に対し、本研究ではパラメトリックな分析により、橋脚柱に必要な保有耐力の確保のためには②の帯鉄筋横拘束鉄筋量の増大により圧縮側コンクリートの耐荷力を増加させることより、①の軸方向鉄筋を十分に配筋する方が合理的な設計となることを明らかにした (図-8(c))。

4.5 辺長比と耐震性能

橋脚柱の耐震性能を向上させるためには、設定された脚柱断面に、可能な限り軸方向鉄筋を配置することが有効であることが判明した。このことは、何らかの条件で仮定された脚柱断面を固定した場合の、耐震性能を最大限発揮させるための最適 (局所) 解は、その単

本研究の対象としたモデル橋梁の実務では、その橋脚柱断面に $2.1 \times 2.7\text{m}$ を採用している。この断面は、橋軸直角方向の保有水平耐力と橋軸方向の残留変位で決定されており、従来の設計成果としては十分に評価できるものである。

しかしながら今回の研究成果によれば、橋軸方向の保有水平耐力の余裕に着目し、 $2.1 \times 3.0\text{m}$ とすることで、またさらに探索範囲を広げて $1.8 \times 3.0\text{m}$ とすれば、更なるコスト縮減が可能であったことが明らかとなった。

このことは、たとえばコスト縮減を最大目的とした性能設計においては、技術者の経験的判断による初期断面設定では、最適解に至らず局所(最適)解に陥ってしまう可能性が高いことを示している。

今後性能照査形設計への移行をにらみながら、更なるデータ収集とパラメトリック解析を通じて、道路橋 RC 橋脚の最適設計に効果的な設計変数を検討し、その手法を最適設計ツールとして発展させていく予定である。

付録 I 使用ソフトウェア

本研究では、以下に示す市販のソフトウェアを使用した。

・土木・建築システム SUCCES for Windows(下部工統合システム V.1.15, 橋脚の設計計算 V.1.33), 川田テクノシステム株式会社

参考文献

- 1) 藤城泰行：合理的な橋梁構造を求めて，土木研究所講演会講演集，Vol.1996，pp.91-106，1997.
- 2) (社)建設コンサルタンツ協会：鋼桁橋の合理化に関する調査研究，鋼橋の合理化設計および耐風・耐震設計に関する調査研究 鋼橋研究委員会報告書，pp.3-63，1998.
- 3) 藤城泰行，西川和広 ほか：コンクリート橋の設計・施工の省力化に関する共同研究報告書，土木研究所共同研究報告書，No.155，1996.
- 4) 大久保禎二，P.B.R.Dissanayake：建設費および美観を考慮した橋梁システムの多目的フェジイ最適設計法，第47回応用力学連合講演会講演予稿集，pp.253-254，1998
- 5) 藤井則義：公共事業の効率化，月刊建設，Vol.44，No.7，pp.30-32，2000.
- 6) 川島一彦 (監訳)，M.J.N.Priestley，F.Seible，G.M.Calvi：橋梁の耐震設計と耐震補強，技報堂出版，pp.31-32，1998.4
- 7) 秋山充良，松中亮治，土井充，鈴木基行：地震時保有水平耐力法により設計された RC 橋脚の耐震安全性のばらつきに関する確率論的考察，土木学会地震工学委員会，第4回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.7-12，2000.12
- 8) 大住道生，運上茂樹，足立幸郎，星隈順一：道路橋の耐震信頼性評価に関する研究，土木学会地震工学委員会，第4回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.13-16，2000.12
- 9) 山田 善一：耐震構造設計論，京都大学学術出版社，pp.181-190，1997.
- 10) 杉本博之，村部剛史，朝日啓太，古川浩平，高久達将：鋼製橋脚の最適耐震設計法の一試み，土木学会地震工学委員会，第4回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.251-256，2000.12
- 11) 秋山充良，松中亮治，土井充，鈴木基行：構造系信頼性評価法と構造最適化手法を用いた RC 橋脚と場所打ち杭基礎間の耐力階層化に関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol.47A，pp.743-752，2000.3
- 12) 廣瀬 彰則，近田 康夫：道路橋 RC 橋脚設計への SOM の援用に関する研究，構造工学論文集，Vol.47A，pp.219-225，2001.3.
- 13) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説，耐震設計編，丸善，1999.
- 14) 杉本博之，渡辺忠朋，斎藤裕俊：RC ラーメン高架橋の耐震補強最適化に関する研究，構造工学論文集，Vol.46A，pp.385-394，2000.3.
- 15) 杉本博之：最適設計技術，プレストレストコンクリート，Vol.43，No.2，pp.54-pp.59，2001.3.
- 16) 秋山充良，土井充，鈴木基行，松中亮治：信頼性理論を用いた構造最適設計手法の提案および RC 橋脚の耐震安全性評価への適用，土木学会論文集，No.662，pp.185-204，2000.
- 17) 大西陽子，園田佳巨，柚辰夫：地震時保有水平耐力法に基づく連続桁橋の耐震設計への GA の適用に関する研究，土木学会第55回年次学術講演会概要集，I-A158，2000.
- 18) 柚辰夫，園田佳巨，大西陽子，彦坂照：連続橋における地震時保有水平耐力設計法への GA の適用に関する研究，構造工学論文集，Vol.47A，pp.249-256，2001.3
- 19) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，IV 下部構造編，1996.12
- 20) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V 耐震設計編，1996.12
- 21) 藤谷秀雄：性能を基盤とした新構造設計体系，土木学会誌，Vol.83，pp.36-39，1998.
- 22) 香月 智，竹本憲介：遺伝的アルゴリズムの落橋防止システム性能設計への応用，土木学会第55回年次学術講演会概要集，I-A165，2000.
- 23) 廣瀬彰則 ほか：道路橋 RC 橋脚の最適設計に関する一考察，中央復建技報，第30号，pp.42-47，1999.
- 24) 「道路橋示方書・同解説 V耐震設計編の追加修正」のお知らせ，道路，1999.10，pp.95，1999

(2001年9月14日受付)