

## 耐震壁を有する門型RC橋脚の橋軸直角方向の水平せん断耐力算定モデルの検討

九州大学大学院	博士課程	○ 高 文君
九州大学大学院	正会員 工博	大塚 久哲
九州大学大学院	博(工)	崔 準祐
西日本高速道路(株)		今村 壮宏

Abstract : Frame type reinforced concrete piers with shear wall absorb the earthquake energy through shear wall and columns. The purpose of this paper is to clarify the analytical model for the evaluation of the horizontal shear strength. As to the evaluation formula, standard specifications for concrete structures by JSCE is used in addition to design code used in the field of highway bridges and buildings. The calculated results considering different effective concrete sections and reinforcement are compared to experimental results. The model that was thought most effectively is suggested.

Key words : Shear wall, Analytical model, Horizontal shear strength

## 1. はじめに

耐震壁を有する門型 RC 橋脚 (I 型断面フレキシブル RC 橋脚と呼ばれる) は高架橋の橋脚などで多用されている。この橋脚は橋軸方向にはフレキシブルで地震力を橋台などに分散するが、橋軸直角方向には剛性の高い特徴を有している。この橋脚の橋軸直角方向に対する水平せん断耐力を評価するため、著者らは水平加力実験でのせん断耐力を適切に評価するための有効断面の取り方をいくつか提案し<sup>1)</sup>、道路橋示方書<sup>2)</sup>および建築分野の文献<sup>3) 4) 5)</sup>で定められている算定式によるせん断耐力と実験結果との比較検討を行った。

本文では、新たに土木学会のコンクリート標準示方書<sup>6)</sup>で定められているせん断耐力算定式を用いて検討を行い、これまでの研究<sup>1)</sup>結果と併せて、精度の良いせん断耐力算定モデルを提示する。

## 2. 水平加力実験の概要

本実験の供試体は、実橋梁に採用した門型 RC 橋脚を対象とし、橋脚の高さや断面形状を参考にして縮尺約 1/10 の模型を製作したものである。本実験は文献 1)にて既に報告しているが、表-1に実験ケースを再記する。供試体 No.1 を標準断面とし、供試体 No.2 と No.3 は柱の帯鉄筋を増加させた供試体、供試体 No.4 と No.5 はそれぞれ壁の横方向鉄筋を増加させた供試体と減少させた供試体である。各供試体の橋脚部の高さは 2000mm、横方向長さ(幅)は 1000mm、壁部分の内法高さは 1800mm、内法長さ(幅)は 500mm、厚さは 60mm である。両側柱の断面は 200×250mm の寸法を有する矩形断面である。コンクリートは設計基準強度 24N/mm<sup>2</sup>で配合しており、鉄筋は SD345 を用いている。材料試験から得られた各供試体のコンクリートおよび鉄筋の材料特性を表-2、表-3に示す。梁およびフーチングに関しては、载荷によって橋脚の壁や両側柱より先に破壊することがないように十分な配筋と断面寸法を確保している。供試体の配筋図は文献 7) を参照されたい。

供試体と実験载荷装置を図-1に示す。载荷に関しては、フーチングを 8 本の Φ32mm PC 鋼棒で反力床に緊結し、500kN オイルジャッキを反力壁に固定させ、供試体頂部の梁部に载荷した。载荷方法は、損傷を受けていない本供試体の水平耐力と破壊メカニズムを把握するため、水平単調漸増载荷とした。

図-2に各供試体の荷重-変位曲線関係を示す。荷重はジャッキ先端のロードセルにより計測した値で、変位は供試体頂部の荷点反対側の水平変位を変位計で計測した値である。各供試体の一次剛性変化はわずかであり、壁にひび割れが発生する90kN前後が第1勾配(第1折点まで)となっている。第2勾配では、供試体によって若干の差が生じながら、引張側の柱主鉄筋や壁縦方向鉄筋が降伏し始め、250kN付近で剛性に大きな変化が生じている。第2折点の荷重において差が見られるのは、表-2に示したようにコンクリートの圧縮強度が異なるためと思われる。すなわち、コンクリートの圧縮強度が同じであれば、各供試体の最大耐力には差が現れなかったと考えられる。その後、骨格曲線は第3次勾配となり、緩やかに荷重は増加する。本供試体が示す荷重-変位曲線は曲げ靱性を伴った破壊形態を示しているが、これは帯鉄筋量もたらすせん断耐力の変化をとらえた実験とはなっていないからである。

写真-1は各供試体の破壊状況を示したものであり、各供試体の破壊形式には大きな差異はない。引張側柱の水平曲げひび割れが壁へ伸展して斜めせん断ひび割れとなり、さらに圧縮側柱には斜めせん断ひび割れが生じ、圧縮側柱基部の縁端部のコンクリートが剥離・欠落した。壁および圧縮側柱における斜めせん断ひび割れの幅が急激に増加し、圧縮側柱の基部がコンクリートの圧壊と共に壁がせん断破壊して耐力を失った。

表-1 実験ケース

供試体 No.	鉄筋径および配筋間隔 (鉄筋比 (%))			
	柱主鉄筋	柱帯鉄筋	壁縦筋	壁横鉄筋
1	6-D16, 2-D10 (2.67)	D6ctc120 (0.26)	5-D10 (1.19)	D13ctc120 (1.76)
2	6-D16, 2-D10 (2.67)	D6ctc60 (0.53)	5-D10 (1.19)	D13ctc120 (1.76)
3	6-D16, 2-D10 (2.67)	D6ctc40 (0.79)	5-D10 (1.19)	D13ctc120 (1.76)
4	6-D16, 2-D10 (2.67)	D6ctc120 (0.26)	5-D10 (1.19)	D13ctc60 (3.52)
5	6-D16, 2-D10 (2.67)	D6ctc120 (0.26)	5-D10 (1.19)	D10ctc120 (0.99)

表-2 コンクリートの材料試験結果

供試体 No.	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	材齢 (日)
1	34.4	3	2.49 × 10 <sup>4</sup>	18
2	36.7	3.3	2.59 × 10 <sup>4</sup>	22
3	31.5	3	2.32 × 10 <sup>4</sup>	20
4	35.7	3.1	2.35 × 10 <sup>4</sup>	14
5	30.3	3	2.27 × 10 <sup>4</sup>	17

表-3 鉄筋の材料試験結果

鉄筋径	降伏応力 (N/mm <sup>2</sup> )	降伏ひずみ (μ)	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )
D 6	409	2045	2.00 × 10 <sup>5</sup>
D 10	363	1994	1.82 × 10 <sup>5</sup>
D 13	345	2193	1.79 × 10 <sup>5</sup>
D 16	385	2152	1.84 × 10 <sup>5</sup>

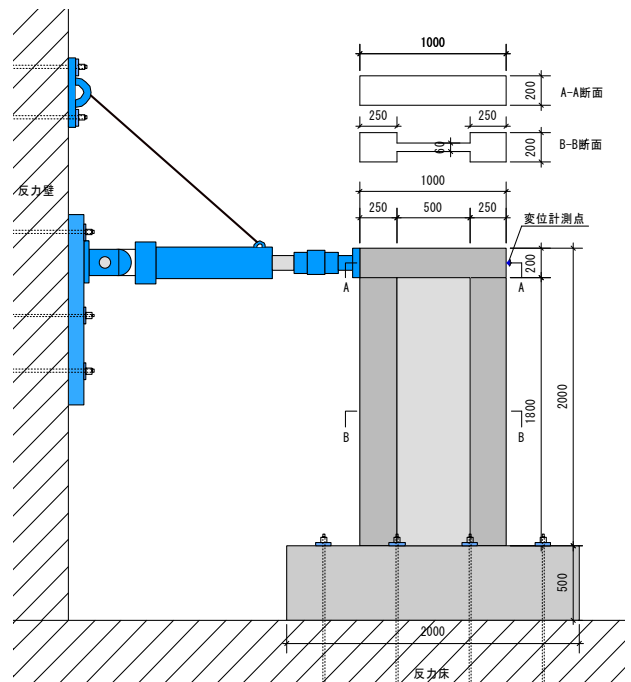


図-1 供試体と実験載荷装置

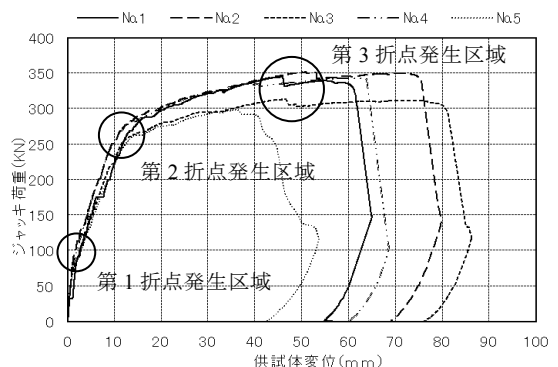


図-2 荷重-変位曲線



(a) 供試体 No.1 (b) 供試体 No.2 (c) 供試体 No.3 (d) 供試体 No.4 (e) 供試体 No.5

写真－1 各供試体の破壊状況

### 3. コンクリート標準示方書によるせん断耐力算定手法

土木学会のコンクリート標準示方書・設計編<sup>6)</sup>によると、RC 橋脚のせん断力に対する限界値は、せん断補強鋼材のない棒部材の設計せん断耐力（コンクリートが分担する部分）とせん断補強鉄筋により受け持たれる設計せん断耐力（帯鉄筋が分担する部分）に分けて算出している。コンクリートの負担部分は、コンクリート強度、部材高さ、鉄筋比および軸方向力の影響を考慮して算出されている。また、帯鉄筋の負担部分は、せん断補強鋼材の降伏を仮定し、圧縮斜材角を 45 度としたトラス理論により算定されている。

ところで、耐震壁を有する門型 RC 橋脚のせん断耐力については、道路橋示方書やコンクリート標準示方書等に明確な基準が記されていないために、実務では、耐震壁を両端柱に貫通させた仮想コンクリート壁断面が負担するせん断耐力 ( $S_c$ ) と柱帯鉄筋が負担するせん断耐力 ( $S_s$ ) の和で算出しているようである（図－3 のモデル DC1-DS2）。

### 4. 提案するせん断耐力算定手法

#### 4.1 せん断耐力算定モデル

現段階では、耐震壁を有する門型 RC 橋脚のせん断耐力に関する研究や知見が少ないことから、せん断耐力に影響を与えるコンクリートの有効断面の取り方や柱帯鉄筋と壁横鉄筋の取り方にバリエーションをもたせて、せん断耐力算定モデルを図－3 に示すように 8 通り提案する。

モデル DC1 シリーズはコンクリートが負担するせん断耐力には、耐震壁とそれを両端柱に貫通させた仮想コンクリート壁断面が有効であるとするもので、これに対して、モデル DC2 シリーズは I 型断面の断面積と等価な面積となるような仮想の壁断面に置換させて計算するものである。

帯鉄筋は柱帯鉄筋と壁横鉄筋をどのように考慮するかで 4 通りある。DS1 は柱帯鉄筋と壁横鉄筋を共に有効としたモデルである。DS2 は柱帯鉄筋のみ有効としたモデルである。ただし、両柱は一体として挙動すると仮定した。DS3 は耐震壁の横鉄筋が両側柱まで貫通させたモデルである。DS4 は耐震壁内の横鉄筋のみ有効としたモデルである。以上の 4 通りと DC1, DC 2 の組み合わせにより、図－3 に示す 8 通りの算定モデルが得られる。

また、図－3 に建築耐震設計における保有耐力と変形性能に基づく終局せん断強度<sup>5)</sup>の算定モデル (Building  $Q_u$ ) を併せて示す。文献 5) による算定式の特徴は壁と柱を足し合わせた長さを固定させ、I 型断面の断面積と等価な面積となるような壁断面に置換させて計算し、壁のせん断強度を安全側にまらめたものである。

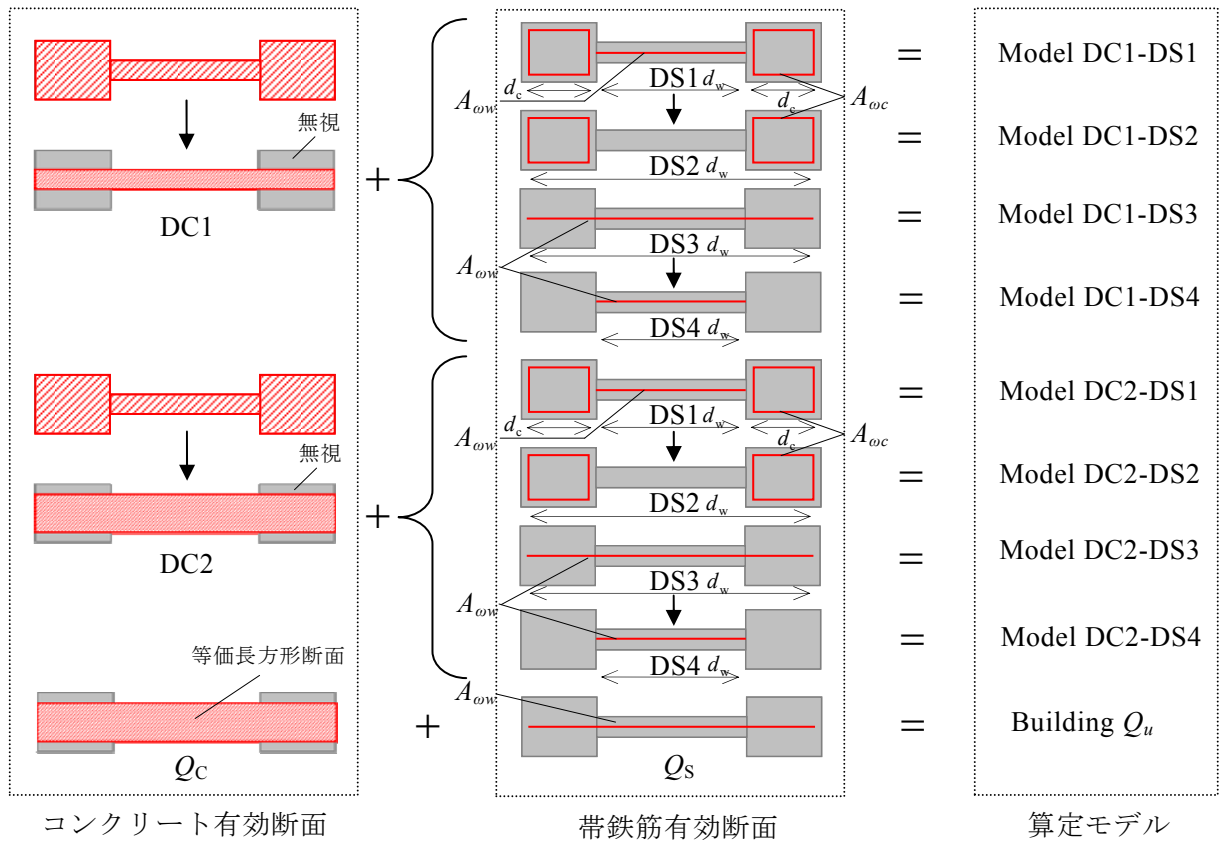


図-3 算定モデルの考え方

4.2 算定モデルによるせん断耐力算定結果

実験を行った供試体 No.1 から No.5 に関し、土木学会のコンクリート標準示方書<sup>6)</sup>の算定式を用い、モデル DC1-DS1 からモデル DC2-DS4 によるせん断耐力を計算した。算定式におけるコンクリートの圧縮強度および鉄筋の降伏強度は、材料試験結果から得られた値を用いている(表-2, 表-3 参照)。算定式より得られた結果と実験値の比較を表-4 に示す。また、表-4 に建築耐震設計における保有耐力と変形性能<sup>5)</sup>に基づく終局せん断強度の算定結果 (Building  $Q_u$ ) を併せて示す。

表-4 の結果をもとに実験値と計算値の比をプロットすると図-4, 図-5 を得る。図-4 は柱

表-4 実験値と計算値の比較

供試体 No.	実験値 (kN)	計算値 (kN)								
		Model DC1-DS1	Model DC1-DS2	Model DC1-DS3	Model DC1-DS4	Model DC2-DS1	Model DC2-DS2	Model DC2-DS3	Model DC2-DS4	Building $Q_u$
1	345	289	232	356	210	324	267	391	245	282
2	352	369	413	357	211	404	448	392	246	288
3	314	445	591	355	209	478	624	388	242	274
4	343	449	233	661	370	484	268	696	405	344
5	299	223	230	230	144	256	263	263	177	238
供試体 No.	実験値 (kN)	実験値 / 計算値								
		Model DC1-DS1	Model DC1-DS2	Model DC1-DS3	Model DC1-DS4	Model DC2-DS1	Model DC2-DS2	Model DC2-DS3	Model DC2-DS4	Building $Q_u$
1	345	1.19	1.49	0.97	1.64	1.06	1.29	0.88	1.41	1.22
2	352	0.95	0.85	0.99	1.67	0.87	0.79	0.90	1.43	1.22
3	314	0.71	0.53	0.88	1.50	0.66	0.50	0.81	1.30	1.15
4	343	0.76	1.47	0.52	0.93	0.71	1.28	0.49	0.85	1.00
5	299	1.34	1.30	1.30	2.08	1.17	1.14	1.14	1.69	1.26



の帯鉄筋をパラメータにした供試体 No.1, No.2, No.3 の結果, 図-5 は壁の横方向鉄筋をパラメータにした供試体 No.1, No.4, No.5 の結果をそれぞれ示したものである。好ましいモデルは, 実験値と計算値の比が 1 近傍かつ 1 より大きい (安全側の評価となる) もの, また供試体によってこの比が大きくばらつかない (鉄筋量によって算定式の精度が左右されない) ものである。この観点から, 両図に示された結果を見ると, 建築学会の建築耐震設計における保有耐力と変形性能<sup>5)</sup>に基づく終局せん断強度の算定結果 (Building  $Q_u$ ) が最も適していることがわかる。理論的には, DS1 のように柱の帯鉄筋量と壁の横方向鉄筋量の両方が考慮されているモデルが望ましいと考えられるが, 供試体 No.3, No.4 のような柱の帯鉄筋や壁の横方向鉄筋の量が多い供試体で計算値が過大となっている事実を見れば, DS1 モデルを使用する場合, 有効とする鉄筋量の上限を決めるなどの配慮が必要と思われる。

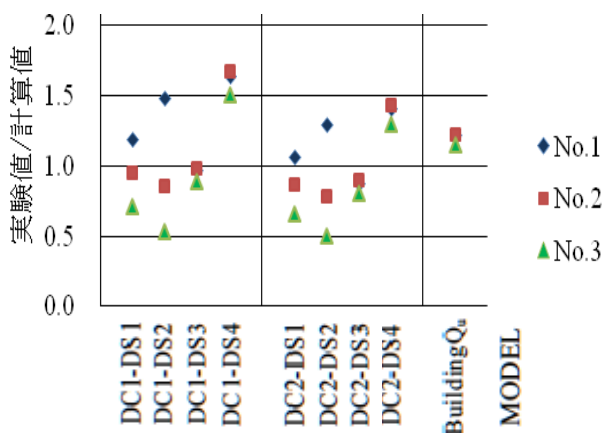


図-4 柱の帯鉄筋をパラメータにした供試体

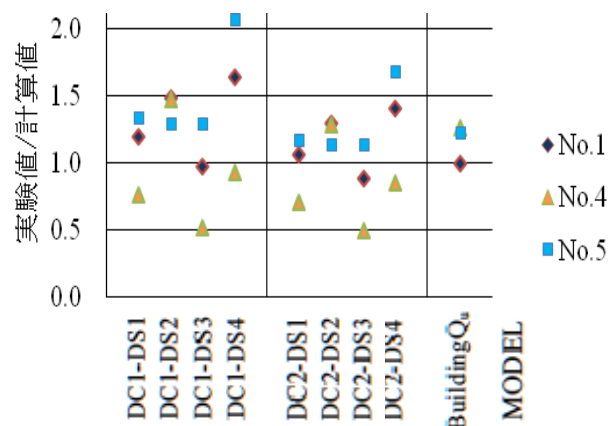
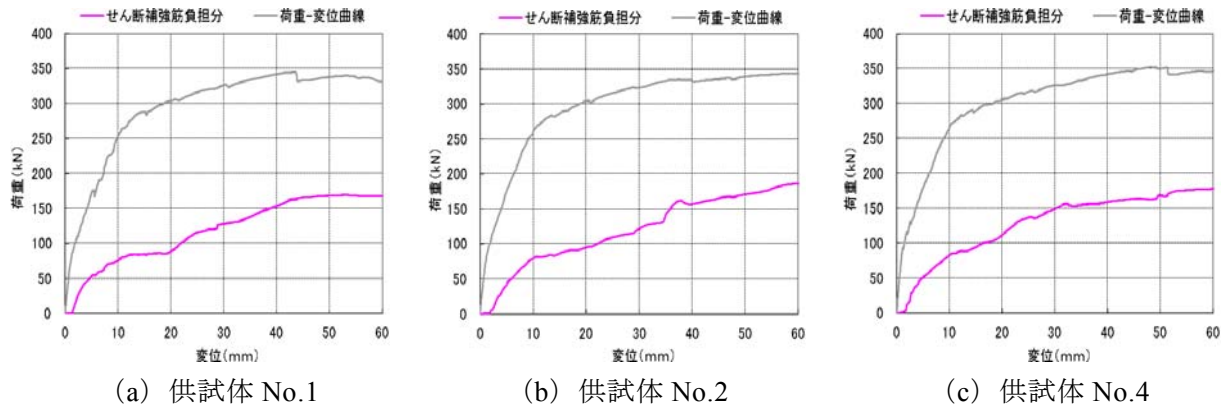


図-5 壁の横鉄筋をパラメータにした供試体

次に, コンクリートと鉄筋によるせん断耐力の負担割合について検討結果を示す。鉄筋が負担するせん断耐力は, せん断補強筋に貼付したひずみゲージの値からせん断補強筋による負担力を算定する。ひずみゲージは両側柱の帯鉄筋と, 壁横鉄筋に貼付しており, 各ひずみの平均値に材料試験から得られた弾性係数を乗じた値を平均応力とし, この値を土木学会のコンクリート標準示方書・設計編<sup>6)</sup>に示されているせん断補強筋が負担するせん断耐力式のせん断補強鉄筋の設計降伏強度 ( $f_{wyd}$ ) に代入してせん断補強筋の負担するせん断耐力を求めた。その結果を, 例えば供試体 No.1, No.2, No.4 に関して示すと図-6 を得る。コンクリート負担力に関しては, ジャッキ荷重からせん断補強筋負担力を差し引いた値をコンクリートが負担するせん断耐力と考えることができる。以上の方法によりコンクリートとせん断補強筋の負担比率を算定すると, 最大荷重付近においてほぼ 1.0 となっている。

しかし, 土木学会のコンクリート標準示方書<sup>6)</sup>や道路橋示方書<sup>2)</sup>の算定式によると, 例えば供試体 No.1 に関してコンクリートとせん断補強筋の負担比率はそれぞれ 0.37 ( $V_{cd}/V_{sd} = 87KN/237KN \approx 0.37$ ) と 0.25 ( $S_c/S_s = 60KN/237KN \approx 0.25$ ) であり, 実験値とかけ離れた負担比率となっていることがわかる。

一方, 建築耐震設計における保有耐力と変形性能<sup>5)</sup>に基づく終局せん断強度の算定結果 (文献 1) の表-3 参照) では, コンクリート負担部分と帯鉄筋負担部分との比較はおよそ 1.0 ( $V_c/V_s = 141KN/141KN = 1.0$ ) となっている。したがって, 建築耐震設計における保有耐力と変形性能に基づいて終局せん断強度を算定した結果が最も実験結果と整合がとれていることがわかる。すなわち算定モデル Building  $Q_u$  の精度の良い理由がこの点にあるのではないかと推察される。



図ー6 各供試体におけるせん断補強筋の負担割合

## 5. おわりに

本研究では、実験での最大せん断耐力を適切に評価するためのコンクリートと鉄筋の有効断面の取り方をいくつか提案し、土木学会のコンクリート標準示方書、道路橋示方書、および建築学会の建築耐震設計における保有耐力と変形性能に基づくせん断耐力算定式を用いて、耐震壁を有する門型 RC 橋脚の算定モデルの検討を行った。その結果、建築学会の建築耐震設計における保有耐力と変形性能<sup>5)</sup>に基づく終局せん断強度の算定結果 (Building  $Q_u$ ) が実験値に近く、かつ安全側に評価しており、最も適していることがわかった。また、せん断耐力におけるコンクリートとせん断補強筋の負担比率に関しても、建築学会の建築耐震設計における保有耐力と変形性能<sup>5)</sup>に基いて算定した値が実験値に近いことがわかった。

現段階では実験データが少なく、今後は、軸力の影響や交番載荷の影響を検討するため、追加の実験を行い、算定モデルの妥当性と評価式の精度を明確にしたい。

## 参考文献

- 1) 高文君, 大塚久哲, 川崎啓史, 今村壮宏: 耐震壁を有する門型 RC 橋脚の橋軸直角方向の水平せん断耐力に関する検討, 第 20 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, PP.357-362, 2011.10
- 2) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説/V 耐震設計編, 2002
- 3) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説, 1990
- 5) 日本建築学会: 建築耐震設計における保有耐力と変形性能, PP.401-402, 1990
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書・設計編, PP.532-533, 2007
- 7) 高文君, 大塚久哲, 福永靖雄, 川崎啓史: I 型断面フレキシブル RC 橋脚の水平耐力に及ぼす横方向鉄筋の効果に関する研究, コンクリート工学年次論文集 Vol.33, No.2, PP.439-444, 2011.6