

## 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

九州大学大学院 非会員 修士課程 ○ 高 文君  
九州大学大学院 正会員 工博 大塚 久哲  
八千代エンジニアリング(株) 川崎 啓史  
西日本高速道路(株) 今村 壮宏

Abstract : Frame type reinforced concrete piers with shear walls have been used for the high piers of the mountainous high way. The pier is characterized by the absorption of the earthquake energy through shear wall. The failure pattern obtained by the horizontal thrust augmentation tests is different from the shear failure and bending failure by the previous study. The purpose of this paper is to clarify the assessment of the horizontal shear strength. As to the evaluation formula, part of the literature are summarized in the field of highway bridges and building construction guideline. The influence of the shear strength, the relevant parameter and effective section design is further discussed and the evaluation formula is proposed.

Key words : Shear walls , Horizontal shear strength , Evaluation formula

## 1. はじめに

耐震壁を有する門型 RC 橋脚は、山間地の高速道路高橋脚などに用いられ、橋軸方向にフレキシブルな橋脚である。本橋脚の橋軸直角方向水平せん断耐力の評価に関し、著者らは文献<sup>1)</sup>において、慣行のせん断耐力算定式に従えば、例えば後述の標準断面では実験値の 60%程度しかせん断耐力を評価できないことを示し、有効 RC 断面の取り方や評価対象鉄筋に関して、改良の余地があることを指摘した。

本研究は耐力算定式を参照して、建築分野の文献<sup>2) 3) 4)</sup>および道路橋示方書<sup>5)</sup>にまとめられている、耐力算定方法や、せん断耐力に影響を与えるパラメータ、有効断面の設定を検討し、精度の良い算定式の提案を行うものである。また、当該橋脚の合理的な水平耐力算定式を得るための基礎研究として、既存の耐震壁を有する門型 RC 橋脚の縮尺模型を作製し、柱帯鉄筋と壁横方向鉄筋が水平耐力に及ぼす影響について実験的に検討した<sup>6)</sup>。

## 2. 水平加力実験の概要

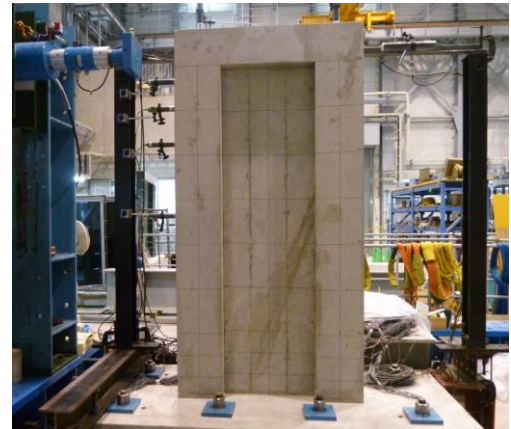
本実験の供試体は、横方向鉄筋が水平耐力に及ぼす影響を確認するため、柱の帯鉄筋および壁の横鉄筋（帯鉄筋に相当する）をパラメータとした供試体である。表-1に実験ケースを示す。供試体 No.1 を標準断面とし、供試体 No.2 と No.3 は柱の帯鉄筋を増やした供試体、供試体 No.4 は壁の横方向鉄筋を増やした供試体、供試体 No.5 は逆に壁の横方向鉄筋を減らした供試体としている。各供試体の橋脚部の高さは 2000mm、横方向長さ（幅）は 1000mm である。壁部分の内法高さは 1800mm、内法長さは 500mm、厚さは 60mm である。両側柱の断面寸法は 200×250mm の矩形断面である。梁及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。供試体の詳しい配筋図は文献<sup>6)</sup>を参照されたい。

供試体と実験载荷装置を写真-1に示す。载荷に関しては基礎フーチングを PC 鋼棒 (8Φ32mm) 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とした。水平単調漸増载荷としたのは、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知るた

めである。また、今回の実験では軸力の影響を無視したが、このことは一般に水平耐力に対して安全側の評価となると思われるが、軸力の影響の詳細は別途明らかにする必要がある。

表－1 実験ケース

供試体 No.	鉄筋径及び配筋間隔 (鉄筋比 (%))			
	柱主鉄筋	柱帯鉄筋	壁縦鉄筋	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)



写真－1 供試体と荷装置

### 3. 建築分野による終局せん断耐力算定手法

#### 3.1 建築分野における終局せん断耐力算定式

耐震壁は建物の耐震性に大きな影響を及ぼす部材であり、建築分野では数十年前から耐震壁についての研究が行われている。耐震壁のせん断耐力に限定しても、これまでに開口及び多層構造を有する耐震壁のせん断耐力、炭素繊維を用いた耐震壁の補修・補強、FEM解析による耐震壁のせん断耐力算定などの数多くの研究が発表されている。耐震壁のせん断に関しては、日本建築学会の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<sup>2)</sup>、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<sup>3)</sup>、および建築耐震設計における保有耐力と変形性能<sup>4)</sup>などの文献にまとめられている。文献3)は文献2)と同じ考え方である。以下に、各指針の算定式と特徴を述べる。

##### 3.1.1 靱性保証型耐震設計指針・同解説に基づく終局せん断強度 $V_u$

式－1は、文献2)に基づく終局せん断強度式である。

$$V_u = t_w l_{wb} p_s \sigma_{sy} \cot \phi + \tan \theta (1 - \beta) t_w l_{wa} v \sigma_B / 2 \quad \text{(式－1)}$$

ここに、
$$\tan \theta = \left[ \sqrt{(h_w / l_{wa})^2 + 1} - h_w / l_{wa} \right]$$

$$\beta = (1 + \cot^2 \phi) p_s \sigma_{sy} / (v \sigma_B)$$

$t_w$ :耐震壁の厚さ;  $l_{wb}$ :トラス機構の等価壁長さ;  $p_s$ :耐震壁のせん断補強筋比;  $\sigma_{sy}$ :耐震壁のせん断補強筋の強度;  $\phi$ :トラス機構のコンクリート圧縮束の角度;  $l_{wa}$ :アーチ機構の等価壁長さ;  $v$ :コンクリート圧縮強度の有効係数;  $\sigma_B$ :コンクリートの圧縮強度;  $\beta$ :耐震壁のトラスによるせん断強度の負担比;  $h_w$ :耐震壁の高さ

建築分野の耐震壁は原則として最下階から最上階まで連続する連層耐震壁とし、そのせん断破壊は、上下の梁の間で生じるものと、梁を横切って生じるものの2種類がある。この式は、上下の梁の間で生じる破壊を対象としたものであり、第1項の斜め45度のトラス機構から算定するせん断強度と第2項の角度 $\theta$ のアーチ機構から算定されるせん断強度の和を終局せん断強度としており、理論的に導出している。ちなみに、第1項はせん断補強筋が負担するせん断耐力であり、第2項はコンクリートが負担するせん断耐力を表している。

##### 3.1.2 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 $Q_u$

式－2は、文献4)に基づくせん断強度の算定式である。

$$Q_u = \left( \frac{0.053 p_{te}^{0.23} (F_c + 180)}{M / (Q \cdot D) + 0.12} + 2.7 \sqrt{\sigma_{oh} \cdot p_{oh} + 0.1 \sigma_0} \right) b_e \cdot j \quad \text{(式－2)}$$

ここに、

$p_{ie}$ : 等価引張主筋比;  $F_c$ : コンクリートの圧縮強度;  $b_e$ : I型断面を長さと同断面積が等しい等価長方形断面に置き換えたときの幅;  $M$ : 危険断面に作用する曲げモーメント;  $Q$ : 危険断面に作用するせん断力;  $D$ : 壁の全長さ;  $\sigma_{oh}$ : 水平せん断補強筋の降伏点強度;  $p_{oh}$ :  $b_e$ を厚さと考えた場合の水平せん断補強筋比;  $\sigma_0$ : 全断面積に対する平均軸方向応力度;  $j$ :  $7/8 \times d$ ;  $d$ : I型断面の場合  $D - D_c/2$  ( $D_c$ は圧縮側柱のせい)

この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ている。また、壁のせん断強度を安全側にまらめたものである。

### 3.2 各算定式による終局せん断耐力算定結果

今回実験を行った供試体 No.1 から No.5 の最大せん断耐力について、 $V_u$ および  $Q_u$ の評価を行った。各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。各算定式より得られた結果および実験値と計算値の比を表-2に示す。

日本建築学会で定められている終局せん断耐力式の計算結果および実験値と計算値との比較では、式-2の  $Q_u$ が実験値を精度よく、しかも安全側に評価できることを確認できた。したがって、本研究で用いた供試体は建築分野での耐震壁と類似した性能を有していると言える。

表-2 実験値と計算値との比較

供試体 No.	コンクリートの圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	帯鉄筋降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )		実験値 $S$ (kN)	計算値 (kN)		実験値 / 計算値	
		柱部分	壁部分		$V_u$	$Q_u$	$S/V_u$	$S/Q_u$
1	34.4	409	345	345	419	282	0.82	1.22
2	36.7	409	345	352	427	288	0.82	1.22
3	31.5	409	345	314	409	274	0.77	1.15
4	35.7	409	345	343	675	344	0.51	1.00
5	30.3	409	363	299	303	238	0.99	1.26

### 4. 道路橋示方書<sup>5)</sup>によるせん断耐力算定手法

道路橋示方書の耐震設計編によると、単柱橋脚（矩形断面・円形断面・中空矩形断面等）のせん断耐力は、式-3に示すようにコンクリートが負担する部分（式-4）と帯鉄筋が負担する部分（式-5）に分けてせん断耐力を算出している。

$$P_s = S_c + S_s \tag{式-3}$$

$$S_c = c_c c_e c_{pr} \tau_c b d \tag{式-4}$$

$$S_s = \frac{A_w \sigma_{sy} d (\sin \theta + \cos \theta)}{1.15a} \tag{式-5}$$

ここに、 $P_s$ : せん断耐力;  $S_c$ : コンクリートが負担するせん断耐力;  $\tau_c$ : コンクリートが負担できる平均せん断応力度;  $c_c$ : 荷重の正負交番繰り返し作用の影響に関する補正係数;  $c_e$ : 橋脚断面の有効高  $d$ に関する補正係数;  $c_{pr}$ : 軸方向引張鉄筋比  $P_t$ に関する補正係数;  $b$ : せん断耐力を算定する方向に直角な方向の橋脚断面の幅;  $d$ : せん断耐力を算定する方向に平行な方向の橋脚断面の有効高;  $P_t$ : 軸方向引張鉄筋比;  $S_s$ : 帯鉄筋が負担するせん断耐力;  $A_w$ : 間隔  $a$ 及び角度  $\theta$ で配筋される帯鉄筋の断面積;  $\sigma_{sy}$ : 帯鉄筋の降伏点;  $\theta$ : 帯鉄筋と鉛直軸とのなす角度;  $a$ : 帯鉄筋の間隔

耐震壁を有するI型RC橋脚のせん断耐力については、道路橋示方書や土木学会のコンクリート標準示方書<sup>7)</sup>等に明確な基準が記されていないために、現在で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 (図-1のモデル C1-S2参照)。

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、式-3の精度やせん断耐力に影響を与える各パラメータ、有効断面の設定を検討する必要がある。

### 5. 提案するせん断耐力算定手法

#### 5.1 せん断耐力算定モデル

耐震壁を有する門型 RC 橋脚のせん断耐力を評価するためにその都度、FEM 解析でせん断耐力を算出することは非効率であることから、なるべく道路橋示方書の式を用いた算出方法が望ましいと言える。ここでは、当該橋脚のせん断耐力に影響を与えると思われるコンクリート断面の取り方や柱帯鉄筋と壁横筋をパラメータとして、せん断耐力算定モデルを 8 通り考えた。算定モデルの考え方を図-1に示す。

モデル C1 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とするもので、これに対して、モデル C2 シリーズはコンクリートが負担するせん断耐力には二つの柱断面と耐震壁断面をそれぞれ独立した断面と考えて合計したものである。帯鉄筋は柱帯鉄筋と壁横筋をどのように考慮するかで 4 通り考えた。S1 は各断面ごとに柱帯鉄筋と壁横筋をそれぞれ有効としたモデルである。S2 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。S3 は耐震壁の横鉄筋が両側柱まで有効としたモデルである。S4 は耐震壁の内法長さ範囲の横鉄筋のみ有効としたモデルである。以上の 4 通りと C1, C2 を組み合わせて図-1に示している算定モデルを考えた。

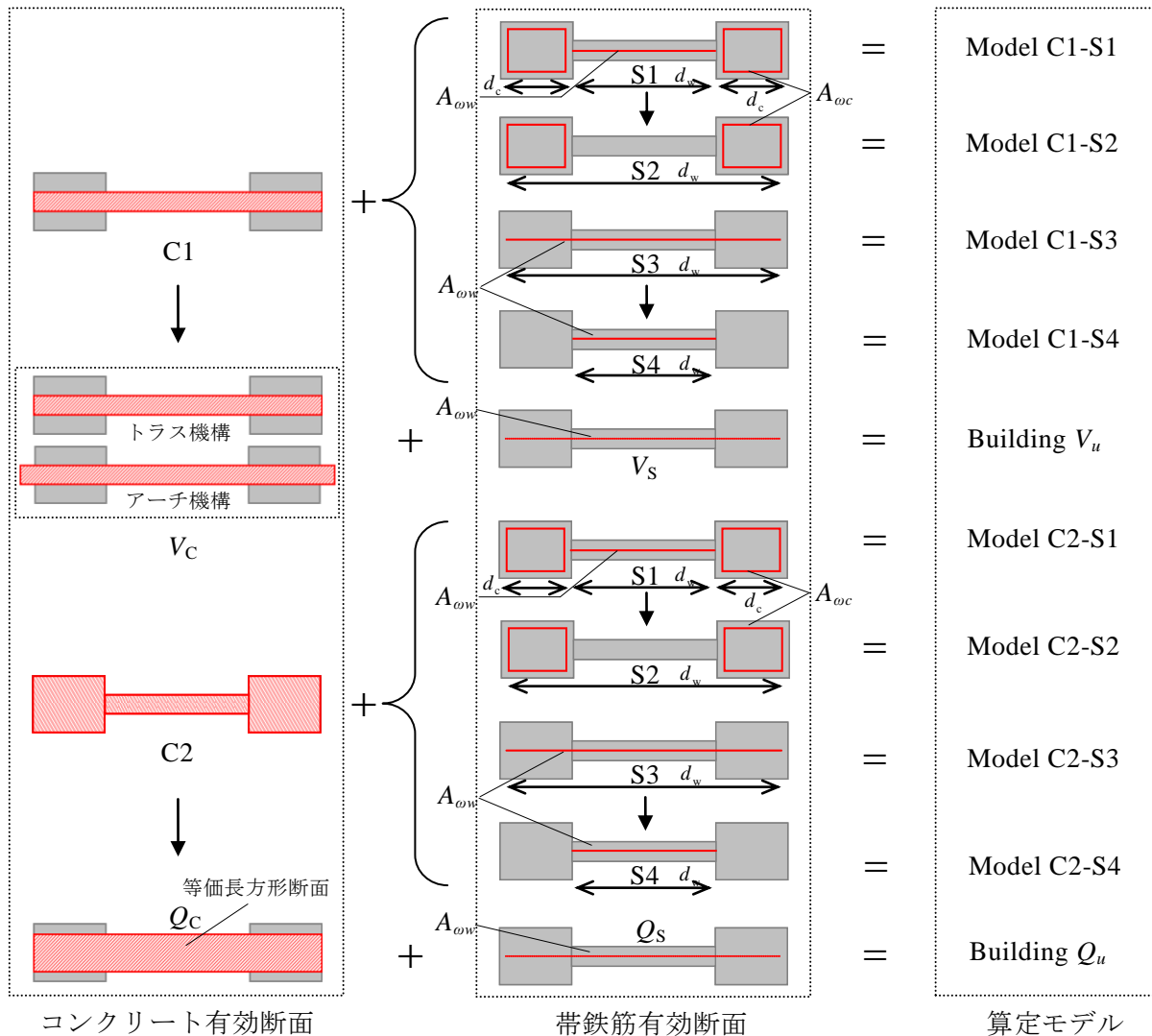


図-1 算定モデルの考え方

### 5.2 提案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 のせん断耐力について、モデル C1-S1 からモデル C2-S4 の考え方にしたがって算定式-3を用いて評価を行った。各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。算定式より得られた結果を表-3および表-4に示す。表-3は各モデルにおけるコンクリート負担部分と帯鉄筋負担部分をそれぞれに示す。表-4は実験値と計算値との比較を示す。

考察を以下に箇条書きで示す。

- (a) C1 と C2 であれば、C2の方が耐力を大きく評価しているが、その差はわずかである。
- (b) S1 の考え方は、おおむね実験結果と整合がとれている。
- (c) S2 は柱の帯鉄筋を増やした供試体 No.2 と No.3 に対して柱のせん断耐力を過大に評価する傾向にある。
- (d) S3 と S4 では、S4 は帯鉄筋効果を過小評価しており、S3 の考え方が実験値とあっているが、壁の横鉄筋を増やした供試体 No.4 に対して壁のせん断耐力を過大に評価する傾向にある。
- (e) 慣行の設計 (モデル C1-S2) によって求められるせん断耐力と実験での最大耐力を比較したところ、安全側と危険側の両方にばらつきの大きい結果となった。

表-3 コンクリート負担部分と帯鉄筋の負担部分との比較

供試体 No.	Model C1-S1			Model C1-S2			Model C1-S3			Model C1-S4			Building Vu			
	C1	S1	合計	C1	S2	合計	C1	S3	合計	C1	S4	合計	Vc	Vs	合計	
1	柱	0	79	79	0	180	180	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	壁	30	158	188	30	0	30	30	304	334	30	158	189	55	364	419
	合計	30	237	267	30	180	210	30	304	334	30	158	189	55	364	419
2	柱	0	158	158	0	360	360	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	壁	30	158	188	30	0	30	30	304	334	30	158	189	62	365	427
	合計	30	316	346	30	360	390	30	304	334	30	158	189	62	365	427
3	柱	0	236	236	0	540	540	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	壁	30	158	189	30	0	30	30	304	334	30	158	189	45	364	409
	合計	30	394	425	30	540	571	30	304	334	30	158	189	45	364	409
4	柱	0	79	79	0	180	180	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	壁	30	317	347	30	0	30	30	608	638	30	317	347	-54	729	675
	合計	30	396	426	30	180	210	30	608	638	30	317	347	-54	729	675
5	柱	0	79	79	0	180	180	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	壁	30	167	197	30	0	30	30	320	350	30	167	197	87	216	303
	合計	30	246	276	30	180	210	30	320	350	30	167	197	87	216	303
供試体 No.	Model C2-S1			Model C2-S2			Model C2-S3			Model C2-S4			Building Qu			
	C2	S1	合計	C2	S2	合計	C2	S3	合計	C2	S4	合計	Qc	Qs	合計	
1	柱	44	79	123	44	180	224	44	0	44	44	0	44	0	0	0
	壁	16	158	174	16	0	16	16	304	320	16	158	174	141	141	282
	合計	60	237	297	60	180	240	60	304	364	60	158	218	141	141	282
2	柱	44	158	202	44	360	404	44	0	44	44	0	44	0	0	0
	壁	16	158	174	16	0	16	16	304	320	16	158	174	147	141	288
	合計	60	316	376	60	360	420	60	304	364	60	158	218	147	141	288
3	柱	44	236	280	44	540	584	44	0	44	44	0	44	0	0	0
	壁	16	158	174	16	0	16	16	304	320	16	158	174	133	141	274
	合計	60	394	455	60	540	600	60	304	364	60	158	218	133	141	274
4	柱	44	79	123	44	180	224	44	0	44	44	0	44	0	0	0
	壁	16	317	332	16	0	16	16	608	624	16	317	333	145	199	344
	合計	60	396	455	60	180	240	60	608	668	60	317	377	145	199	344
5	柱	44	79	123	44	180	224	44	0	44	44	0	44	0	0	0
	壁	16	167	182	16	0	16	16	320	336	16	167	182	130	108	238
	合計	60	246	305	60	180	240	60	320	380	60	167	226	130	108	238

表－4 実験値と計算値との比較

供試体 No.	実験値 (kN)	計算値 (kN)								実験値/計算値							
		Model C1-S1	Model C1-S2	Model C1-S3	Model C1-S4	Model C2-S1	Model C2-S2	Model C2-S3	Model C2-S4	Model C1-S1	Model C1-S2	Model C1-S3	Model C1-S4	Model C2-S1	Model C2-S2	Model C2-S3	Model C2-S4
1	345	267	210	334	189	297	240	364	218	1.29	1.64	1.03	1.83	1.16	1.44	0.95	1.58
2	352	346	390	334	189	376	420	364	218	1.02	0.90	1.05	1.86	0.94	0.84	0.97	1.61
3	314	425	571	334	189	455	600	364	218	0.74	0.55	0.94	1.66	0.69	0.52	0.86	1.44
4	343	426	210	638	347	455	240	668	377	0.81	1.63	0.54	0.99	0.75	1.43	0.51	0.91
5	299	276	210	350	197	305	240	380	226	1.08	1.42	0.85	1.52	0.98	1.25	0.79	1.32

## 6. 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有効断面をいくつか提案し、道路橋示方書のせん断耐力算定式を用いて比較検討を行った。また、建築分野のせん断耐力算定式を用いた計算結果と比較した。

建築分野のせん断耐力算定式を用いた計算値および道路橋示方書のせん断耐力算定式を用いた計算値と比較すると、建築分野算定式はコンクリート圧縮強度の影響が強く、道路橋示方書算定式は帯鉄筋の間隔の影響が強くでる傾向であった。

耐震壁を有する門型 RC 橋脚供試体に対して、建築分野の算定手法を用いた計算結果がバランス良い結果を得られたが、標準断面供試体である No.1 に対して道路橋示方書のせん断耐力式を用いたモデル C1-S3 の精度は良い。また、全供試体に対して道路橋示方書のせん断耐力式を用いたモデル C1-S4 およびモデル C2-S4 の結果は安全側の評価となることが分かった。

### 参考文献

- 1) 川崎・大塚・福永・今村・山崎：耐震壁を有する門型 RC 高橋脚の水平せん断力向上に関する研究，土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集 V，2010.9
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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，1990
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説/V 耐震設計編，2002
- 6) 高・大塚・福永・川崎：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.33，2011.7
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書・設計編，2007