

## 論文 既存 RC 系中高層集合住宅の柱梁接合部の耐震性能に関する研究

小室 達也\*1・鈴木 伸吾\*2・広沢 雅也\*3

**要旨：**兵庫県南部地震での新しい被害の1つとして、RC系建物の柱梁接合部被害が注目を集めた。そこで、現行耐震規定施行以前に建設された既存RC系中高層集合住宅34棟のデータを基に、柱梁接合部のせん断余裕度等の検討を行い、また地震被害や既往実験データの分析を行った。その結果、既存RC系中高層集合住宅の柱梁接合部は偏心接合等の影響から耐震性に疑問がある接合部が多いこと、また、現在提案されている接合部検討式ではスケールイフェクトによる影響が考慮されていないこと等から地震被害との整合性が説明できていないことを明らかにした。

**キーワード：**柱梁接合部、せん断余裕度、偏心接合、スケールイフェクト

## 1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震では各種の構造による建物にこれまであまり見られなかった新しいタイプの被害が見られた。その1つとして、RC系建物の柱梁接合部の被害が挙げられる(写真-1, 2)。それまで日本のRC系建物では柱梁接合部の被害はほとんど無かったことから、一般の建物の耐震設計では柱梁接合部の検討は通常行われていなかった。しかし、柱梁接合部の被害が見られた建物の多くが、現行の耐震設計法によって設計された建物であったことから注目を集めた。また、柱梁接合部に被害を受けたほとんどの建物は改修が難しく解体されているのが現状である。

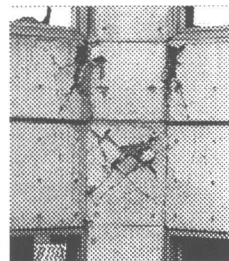
これまでの研究により、柱梁接合部のせん断耐力は柱と梁の偏心接合により耐力低下を生じること、また柱梁接合部の塑性変形能力は接合部のせん断余裕度と相関性があることなどが明らかにされている。そこで、本研究では既存のRC系中高層集合住宅の設計資料に基づく柱梁接合部耐震安全性の検討を行う。また、既往の実験データに基づく柱梁接合部のせん断耐力に

対するスケールイフェクトの影響の程度についての検討を通して、柱梁接合部の耐震安全性の検討方法に関する問題点を示すものである。

## 2. 検討対象建物の概要及び検討項目

## 2.1 検討対象建物の概要

RC造、SRC造のラーメン構造の中高層集合住宅の耐震診断では一般に第2次診断法に近い診断法が適用されることが多い。今回の検討では新耐震施行以前に建設された診断済みの建物を対象としたが、第2次診断法では柱と壁の検討を中心としているため、柱梁接合部の検討に必要な梁に関する設計資料が収録されていない場合が少なくない。そこで梁の情報が記載され

写真-1 RC造建物  
(損傷度 4)写真-2 SRC造建物  
(損傷度 4)

\*1 工学院大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)

\*2 工学院大学大学院 工学研究科建築学専攻

\*3 工学院大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

ているものの中から無作為に 34 棟を抽出して検討した。これらの建物の概要を表-1 に示す。

## 2.2 検討項目

これら 34 棟の建物について以下の諸値を求め、種々の検討を行った。

- 1) 柱と梁の偏心接合による接合部のせん断耐力低下率  $\beta_{jt}$  及び  $\beta_{jt}$  を考慮した接合部せん断余裕度  $S_{jt}$  の検討
- 2) 全ての階における代表的な柱梁接合部のせん断耐力に基づく各階の接合部せん断破壊時せん断力係数の偏心接合の影響を加味した等価せん断力係数  $C_{jt}$  の検討
- 3)  $S_{jt}$ ,  $C_{jt}$  を小さくする影響因子の検討

## 3. 既存柱梁接合部の評価方法

### 3.1 概要

本論文では、柱梁接合部の耐震安全性を評価するための指標として、柱梁接合部のせん断余裕度を用いることとする。せん断余裕度  $S_j$  を求める式として、RC 造では靱性指針式 ①, SRC 造では終局指針式 ②を用いた。靱性指針式では梁の偏心を有効体積により評価されているが、偏心の影響については文献 ③)などではかなり大きな耐力低下が見られたとの報告がある。また、この式は、丸鋼への適用はされていないが、今回は幾つかの建物について適用した。さらに、日本建築学会の報告書 ④)に記されている柱梁の偏心接合による耐力低下を評価する係数  $\beta_{jt}$  及び等価せん断力係数  $C_{ju}$  を用いた。ここで、 $C_{ju}$  は各階全ての柱梁接合部が同時にせん断破壊するときの保有水平耐力を各階のせん断力係数として表したもので、 $C_{jt}$  はこれに振りの耐力低下

表-1 検討対象建物の概要

No.	構造	建設年	建物階数	延床面積 (m <sup>2</sup> )	桁行×梁間 (m)×(m)	住戸タイプ	ピロティの有無 <sup>*1</sup>	F <sub>c</sub> <sup>*2</sup> (N/mm <sup>2</sup> )	鉄筋 <sup>*3</sup>	鉄骨 <sup>*3</sup>	偏心
1	RC	1962	4	1963.2	46.6×41.8	中廊下型	6/9	18.0	SR235	—	有
2		1971	5	2961.1	56.0×8.6	外側片廊下型	8/10	18.0	SD295	—	有
3		1966	5	1260.0	42.0×6.0	外側片廊下型	4/6	18.0	SR235	—	有
4		1966	5	935.8	46.9×6.1	階段室型	6/9	18.0	SR235	—	有
5		1969	5	2904.0	80.2×6.7	外側片廊下型	8/11	18.0	SR235	—	有
6		1966	6	2130.9	47.3×23.0	内側片廊下型	1/7	18.0	SR245	—	有
7		1975	5	2267.2	44.1×9.0	外側片廊下型	2/7	21.0	SD295	—	有
8		1964	7	3638.3	54.0×7.2	外側片廊下型	無	21.0	SD295	—	有
9		1973	7	5269.8	56.7×9.0	外側片廊下型	無	21.0	SD295	—	有
10		1977	8	1621.1	23.56×8.4	外側片廊下型	5/14	21.0	SD295	—	有
11		1969	5	1486.8	36.1×6.3	外側片廊下型	2/9	18.0	SR235	—	有
12		1967	6	2515.5	42.8×9.0	内側片廊下型	無	21.0	SD295	—	有
13		1976	7	5794.0	100.8×13.1	外側片廊下型	1/14	24.0	SD295	—	有
14		1968	7	4738.3	57.6×11.74	外側片廊下型	無	21.0	SD295	—	有
15	SRC	1977	7	3244.1	45.5×8.2	外側片廊下型	無	21.0	SD295	—	有
16		1971	14	14882.1	93.0×8.35	外側片廊下型	13/18	22.5	SD345	SS400	有
17		1969	11	13506.8	64.5×17.1	中廊下型	14/14	22.5	SD345	SS400	有
18		1974	7	3242.5	48.6×8.4	外側片廊下型	無	21.0	SD295	SS400	有
19		1970	10	4170.0	33.9×9.7	外側片廊下型	無	21.0	SD295	SS400	有
20		1975	11	5261.7	32.0×24.0	内側片廊下型	3/4	24.0	SD295	SS400	有
21		1978	13	5776.7	13.7×35.0	中廊下型	1/5	21.0	SD345	SS400	有
22		1978	13	6981.8	54.0×9.6	内側片廊下型	5/6	27.0	SD345	SS400	有
23		1979	14	3481.4	17.0×17.0	内側片廊下型	無	21.0	SD295	SS400	有
24		1976	8	3187.3	19.4×19.4	外側片廊下型	1/4	24.0	SD295	SS400	有
25		1971	12	7626.2	50.4×9.0	外側片廊下型	無	21.0	SD295	SS400	有
26	RC/SRC (SRC 上部 RC)	1978	13	6298.0	52.3×8.1	内側片廊下型	8/9	24.0	SD295	SS400	有
27		1973	11	10600.6	93.1×7.8	外側片廊下型	6/18	22.5	SD345	SS400	有
28		1969	9	10020.4	95.4×9.6	外側片廊下型	17/19	21.0	SD295	SS400	有
29		1967	11	8508.2	78.2×9.1	外側片廊下型	5/11	21.0	SD345	SS400	有
30		1967	11	3240.8	33.2×8.1	外側片廊下型	2/6	21.0	SD345	SS400	有
31		1964	10	6865.0	44.015.2	中廊下型	5/8	21.0	SD295	SS400	有
32		1971	11	5280.0	60.0×8.0	外側片廊下型	無	22.5	SD345	SS400	有
33		1973	11	9812.3	70.2×25.7	外側片廊下型	5/10	24.0	SD345	SS400	有
34		1979	8	4058.3	52.3×9.0	内側片廊下型	無	21.0	SD295	SS400	有

\*1: (ピロティ部スパン数)/(全スパン数) \*2: コンクリートの設計基準強度 \*3: 代表的な1階の部材

を考慮したものである。

### 3.2 接合部せん断余裕度 $S_j$ 及び偏心接合を考慮した $S_{jt}$

接合部せん断余裕度は次の表-2 に示す式によって求める。

表-2 接合部せん断余裕度の評価式

	RC 造 <sup>1),3)</sup>	SRC 造 <sup>2),3),4)</sup>
$V_{ju}$	$\kappa \cdot \phi \cdot F_j \cdot b_j \cdot D_j$	$\kappa \cdot \phi_{SRC} \cdot F_j \cdot b_j \cdot D_j$
$V_j$	$T+T^v+T_s - V_c$	$T+T^v+T_s - V_c$
$S_j$	$V_{ju}/V_j$	$V_{ju}/V_j$
$S_{jt}$	$\beta_{jt} \cdot V_{ju}/V_j$	$\beta_{jt} \cdot V_{ju}/V_j$

ここで、耐力低下率  $\beta_{jt}$  は RC 造、SRC 造共に次式による。

$$\beta_{jt} = \left\{ 1 + \left( \frac{e_1 \cdot K_{ju}}{K_T} \right)^2 \right\}^{-0.5}$$

$$e_1 = e / \text{Min}(b_c, D_c)$$

$$K_{ju} = V_{ju} / (b_c \cdot D_c)$$

$$K_T = T / \text{Min}(b_c \cdot D_c^2, b_c^2 \cdot D_c) \\ = 0.80 \sqrt{\sigma_B} + 0.45 p_j \cdot \sigma_{jy}$$

注) 式及び記号説明は参考文献による。

### 3.3 接合部せん断破壊時等価せん断力係数 $C_{ju}$ 及び偏心接合を考慮した $C_{jt}$

接合部等価せん断力係数は次の表-3 に示す式によって求める。

表-3 接合部等価せん断力係数の評価式

	RC 造 <sup>1),3)</sup>	SRC 造 <sup>2),3),4)</sup>
$C_{ju}$	$\frac{\sigma_B^{0.7} \cdot \bar{f}_j \cdot \bar{\alpha}_j \cdot a_{ci}}{w_i \cdot A_i}$	$\frac{\sigma_B \cdot \bar{f}_j \cdot \bar{\alpha}_j \cdot a_{ci}}{w_i \cdot A_i}$
$C_{jt}$	$\beta_{jt} \cdot \frac{\sigma_B^{0.7} \cdot \bar{f}_j \cdot \bar{\alpha}_j \cdot a_{ci}}{w_i \cdot A_i}$	$\beta_{jt} \cdot \frac{\sigma_B \cdot \bar{f}_j \cdot \bar{\alpha}_j \cdot a_{ci}}{w_i \cdot A_i}$

$\bar{f}_j$  : i 階の接合部における  $f_j$  の平均的な値

$$f_j = V_c / V_j = 0.8q / \{0.5(1+z)(1-r) - 0.8q \cdot z\}$$

$\bar{\alpha}_j$  : i 階の接合部における接合部耐力係数  $\alpha_j$  の平均的な値

$$\text{(RC 造)} \quad \alpha_j = 1.6 \kappa \cdot \phi \cdot (b_j/b_c) \cdot (D_j/D_c)$$

$$\text{(SRC 造)} \quad \alpha_j = 0.12 \kappa \cdot \phi_{SRC} \cdot (b_j/b_c) \cdot (D_j/D_c)$$

$a_{ci}$  : 延べ床面積柱率で、その階の柱の断面積の合計を  $\Sigma A_{ci}$  ( $\text{cm}^2$ ), R 階からその階までの床面積の合計を  $\Sigma A_{fi}$  ( $\text{m}^2$ ) とした時、  
 $a_{ci} = \Sigma A_{ci} / \Sigma A_{fi}$  ( $\text{cm}^2/\text{m}^2$ )

$A_i$  : i 階の地震時層せん断力の分布係数

$w_i$  : i 階より上部の部分について算出した建物単位重量 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )

注) 式及び記号説明は参考文献による。

### 3.4 計算に用いる材料強度の仮定

前記、各項の計算においては、以下の仮定値を用いることとする。

- 1) コンクリートの圧縮強度は設計基準強度  $F_c$  とする。
- 2) 鉄筋は SR 材が  $295\text{N}/\text{mm}^2$ 、SD 材が規格値  $+50\text{N}/\text{mm}^2$  とする。
- 3) 鉄骨は規格値の 1.1 倍とする。
- 4) 床スラブの有効幅は 1m とし、床スラブ筋が不詳の時は、上端下端筋共に  $D10@200$  とする。
- 5) 外柱接合部における梁主筋の水平投影長は一律に柱せいの 0.75 倍とする。

## 4. 柱梁接合部の検討結果

### 4.1 検討対象建物の柱梁接合部の特徴

全ての検討建物において、柱梁接合部は偏心接合となっている。表-4 には偏心率  $e_1$  と接合部せん断耐力低下率  $\beta_{jt}$  の建物構造別の最小値 (Min)~最大値 (Max), 平均値 (Ave), 標準偏差 ( $\sigma$ ) を示す。これらから以下の事項が明らかとなった。

- 1) 柱と梁は南側、北側共に内面合せとなった偏心接合部が 34 例中 22 例 (約 65%) を占めている。
- 2) RC 造と SRC 造では SRC 造の方が偏心率

表-4 偏心率  $e_1$  とせん断耐力低下率  $\beta_{jt}$

		Min~Max	Ave	$\sigma$
$e_1$	RC	0.000~0.571	0.179	0.048
	SRC	0.056~0.607	0.191	0.036
	RC/SRC	0.000~1.050	0.178	0.064
$\beta_{jt}$	RC	0.486~1.000	0.895	0.062
	SRC	0.436~0.992	0.793	0.091
	RC/SRC	0.446~1.000	0.833	0.109

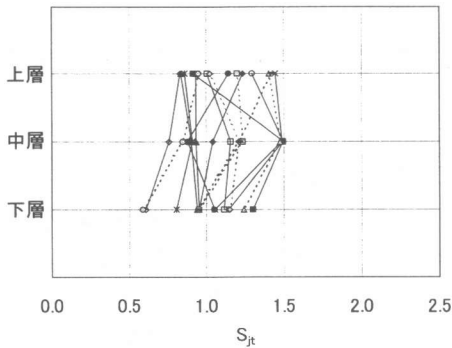
$e_1$  が大きく、約 7% 増となっている。このため、耐力低下率  $\beta_{jt}$  は SRC 造が RC 造の約 0.89 倍であり、耐力低下が大きくなる。

#### 4.2 $S_{jt}$ 及び $C_{jt}$ の階別分布状況

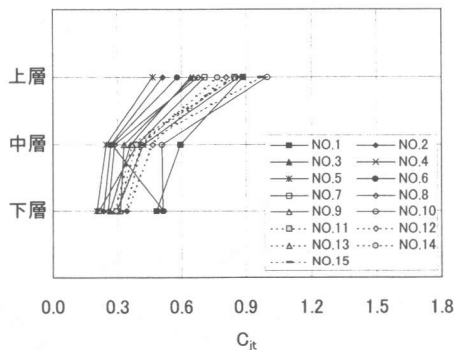
$S_{jt}$  や  $C_{jt}$  について、階別分布の傾向を明確にするため、図-1, 2 に示すように、RC 造・SRC 造それぞれの  $S_{jt}$ 、 $C_{jt}$  を上層部、中層部、下層部に分け、それらの平均値を比較した。これらの図から以下の事項が明らかとなった。

【 $S_{jt}$  について】

- 1)  $S_{jt}$  は RC 造と SRC 造共、ばらつきが大きく階別分布も一定とはならないが、RC 造では中層部、SRC 造では上層部でやや大きな値となる。
- 2) 上、中、下層で  $S_{jt}$  は概ね RC 造では 1.1 前後、SRC 造で 1.4 前後となっている。



(a)  $S_{jt}$  の分布



(b)  $C_{jt}$  の分布

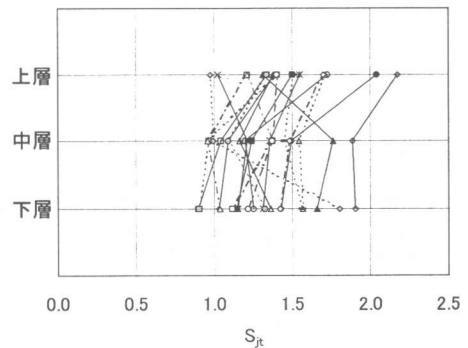
図-1 RC 造の上・中・下層別  $S_{jt}$ 、 $C_{jt}$  の分布

【 $C_{jt}$  について】

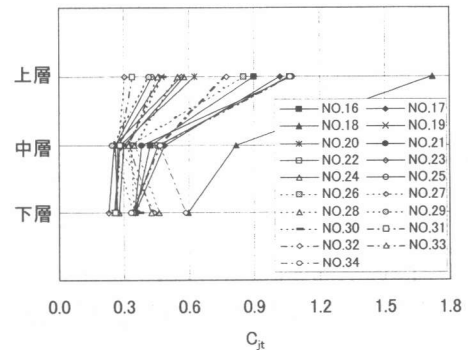
- 1) RC 造、SRC 造共、絶対値、ばらつきの範囲、階別分布について特に顕著な差はない。
- 2) 階別分布は概ね下層から上層になるにつれて  $C_{jt}$  は大きくなり、上層部でやや大きくなる。しかし、SRC 造では 19 例中 8 例で中間層が低くなっている。
- 3)  $C_{jt}$  の最小値は RC 造下層部で 0.12、SRC 造下層部で 0.22 となり、かなり小さくなっている。

#### 4.3 $S_{jt}$ 及び $C_{jt}$ の頻度分布状況

図-3 には全ての建物について算出した各階の代表的な内柱接合部の  $S_{jt}$  と  $C_{jt}$  の頻度分布を示す。ここで、構造別に示すために RC+SRC 造の 8 例は SRC 造部分と RC 造部分で別けて示した。これらの図から以下のような事柄が明らかとなった。



(a)  $S_{jt}$  の分布



(b)  $C_{jt}$  の分布

図-2 SRC 造の上・中・下層別  $S_{jt}$ 、 $C_{jt}$  の分布

【 $S_{jt}$  について】

- 1) 内柱接合部の  $S_{jt}$  の値は、RC 造、SRC 造共に 1.0 以上のものが多い。RC 造と SRC 造では SRC 造の方が大きく、また SRC 造の RC 造部分の  $S_{jt}$  は純 RC 造のもの比べて平均値で 20% 前後増となっている。
- 2)  $S_{jt}$  の値は構造の如何によらず、ばらつきが大きく、最小値と最大値では約 3~5 倍の開きが見られる。

【 $C_{jt}$  について】

- 1)  $C_{jt}$  の値は多くが概ね 0.3~0.5 の間の値となっていて、構造別の違いも少ない。
- 2) RC+SRC 造の建物の RC 部分の接合部で  $C_{jt}$  の平均値が低くなっている。

4.3  $S_{jt}$  及び  $C_{jt}$  に影響する要因

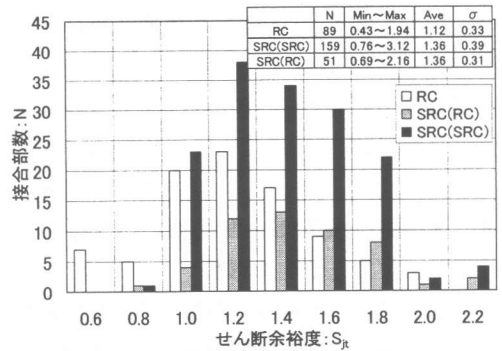
表-5 には  $S_{jt}$  と  $C_{jt}$  の構成因子の内、建物間でのばらつきの大きい因子とばらつきの範囲を示した。この表から以下のことがわかる。

- 1)  $S_{jt}$  の最小値は RC 造建物で 0.29~1.17, SRC 造の RC 部分で 0.66~1.30, SRC 造の SRC 部分で 0.74~1.34 となり、1.0 を下回るものが多い。
- 2)  $C_{jt}$  の最小値は RC 造建物で 0.17~0.48, SRC 造の RC 部分で 0.21~0.42, SRC 造の SRC 部分で 0.24~0.59 となっている。
- 3)  $S_{jt}$ ,  $C_{jt}$  のばらつきに対する最も大きな要因は柱太さの相対的な尺度に関する因子で、 $S_{jt}$  は梁主筋の降伏力に対する柱断面積の割合 ( $b_c \cdot D_c / \Sigma T$ ) で、 $C_{jt}$  は延床面積柱率の  $A_i$  に対する比 ( $a_{ci} / A_i$ ) として評価できる。

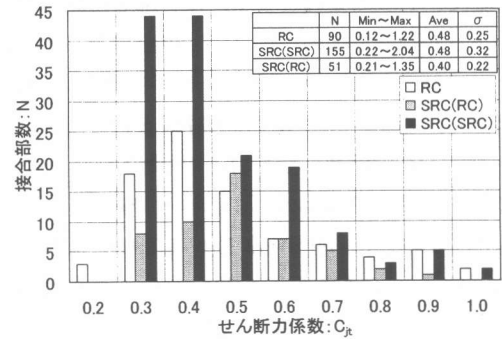
5. 兵庫県南部地震の柱梁接合部被害

兵庫県南部地震では柱梁接合部せん断余裕度が 1.5 前後とかなり大きいにも関わらず顕著な被害が認められた建物があった<sup>5),6)</sup>。図-4 には RC 造 SRC 造, HFW(中高層壁式ラーメン)造の 3 つの建物の柱梁接合部における損傷度とせん断余裕度の関係を示してある。

この図から、損傷度と  $S_{jt}$  とは相関性があり、 $S_{jt}$  の小さい接合部では損傷度が大きくなって



(a) 代表的な内柱接合部



(b) 建物全体

図-3 各建物の  $S_{jt}$ ,  $C_{jt}$  の頻度分布

表-5  $S_{jt}$ ,  $C_{jt}$  の最小値に対する影響因子

	影響因子	(各要因の値)/(平均値)			
		Min	Max	Max-Min	
$S_{jt}$	RC 造	1. $b_c \cdot D_c / \Sigma T$	0.42	1.40	0.98
		2. $\beta_{jt}$	0.70	1.17	0.47
		3. $1+b_g/b_c$	0.92	1.12	0.20
		4. $f_i$	0.95	1.04	0.09
	SRC 造 (RC 部分)	1. $b_c \cdot D_c / \Sigma T$	0.54	1.27	0.73
		2. $\beta_{jt}$	0.86	1.13	0.27
		3. $1+b_g/b_c$	0.89	1.12	0.23
		4. $f_i$	0.97	1.03	0.06
	SRC 造 (SRC 部分)	1. $b_c \cdot D_c / \Sigma T$	0.63	1.71	1.08
		2. $\beta_{jt}$	0.68	1.46	0.78
		3. $1+b_g/b_c$	0.78	1.22	0.44
		4. $\phi_{SRC}$	0.85	1.22	0.37
$C_{jt}$	RC 造	1. $a_{ci} / A_i$	0.74	1.41	0.67
		2. $\beta_{jt}$	0.69	1.13	0.44
		3. $w_i$	0.77	1.18	0.41
		4. $D_g/h$	0.80	1.16	0.36
	SRC 造 (RC 部分)	1. $a_{ci} / A_i$	0.67	1.73	1.06
		2. $D_g/h$	0.87	1.23	0.36
		3. $w_i$	0.75	1.11	0.36
		4. $\beta_{jt}$	0.90	1.12	0.22
	SRC 造 (SRC 部分)	1. $a_{ci} / A_i$	0.66	1.57	0.91
		2. $\beta_{jt}$	0.66	1.41	0.75
		3. $D_g/h$	0.68	1.22	0.54
		4. $w_i$	0.75	1.22	0.47

注) 表中の記号は 3 章で示す参考文献<sup>1),2),3),4)</sup>による。

但し、梁主筋の降伏力:  $\Sigma T = T + T_s$

(ここで、 $T_s$  はスラブの有効幅中のスラブ筋の降伏力)

いることがわかる。しかし、損傷度3及び4の接合部と $S_{jt}$ の平均値は1.66及び1.43でかなり大きな余裕度があるにもかかわらず著しい被害を受けている。

## 6. 柱梁接合部のせん断耐力に関するスケールイフェクトの影響

上記のように、ねじりの影響を考慮したせん断余裕度 $S_{jt}$ でも地震被害状況を説明できない。そこで、1つの要因として、接合部せん断耐力が小さくなる要因の1つとして供試体のスケールイフェクトについて検討する。図-5は1998年までに報告された267体の柱梁接合の実験データで、接合部せん断耐力(実験値： $t_{V_{ju}}$ )/(計算値： $cV_{ju}$ )と接合部せい( $D_j$ )との関係を示したものである。この図から、 $D_j$ が20→60cmになると約30%の耐力低下が見られることがわかる。このことから、実大に近い寸法の接合部による実験データの蓄積が必要であると思われる。

## 7. まとめ

偏心接合による耐力低下を考慮した柱梁接合部のせん断余裕度 $S_{jt}$ や接合部破壊時等価せん断力係数 $C_{jt}$ にスケールイフェクトの影響による耐力の約30%を割り引いて考慮すると、概ね $S_{jt}=1.4$ 、 $C_{jt}=0.45$ 程度を目安にゆとりを持たせた柱梁接合部の設計が必要になると考える。

また、今回検討した34棟の既存RC系中高層集合住宅の柱梁接合部では、建物によるばらつきはあるものの、 $S_{jt}=1.4$ 、 $C_{jt}=0.45$ を下回るものが多いことから、他の建物の柱梁接合部の耐震安全性の検討も行う必要があると思われる。

## 8. 今後の課題

今回の検討結果から以下の問題点や課題が明らかとなり、今後さらに検討する必要がある。

- 1) スケールイフェクトの影響を考慮した評価式の提案
- 2) 柱梁接合部の実験は静的加力が多いことから、動的加力によるデータの蓄積

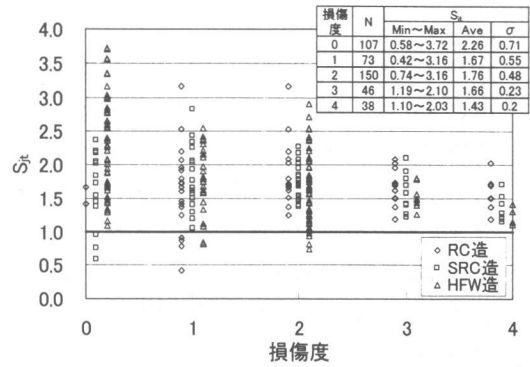


図-4 兵庫県南部地震における接合部損傷度と $S_{jt}$ の比較

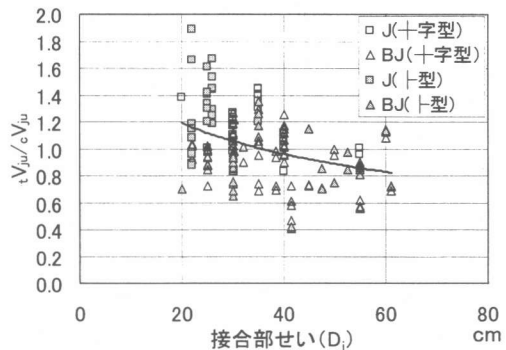


図-5 スケールイフェクトによる接合部せん断耐力の低下

## 参考文献

- 1) 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、1999.7
- 2) 日本建築学会：建築物の構造規定・建築基準法施行令第3章の解説と運用・1997年版、1998.5
- 3) 日本建築学会：阪神・淡路大震災と今後のRC構造設計、1998.10
- 4) 広沢雅也：既存RC・SRC造建物の柱梁接合部検討の重要性を訴える、建築技術、pp208-215、1998.7
- 5) 鈴木伸吾ほか：鉄筋コンクリート系建物の柱・梁接合部耐震性能の検証、日本建築学会学術講演集(東北)、pp833-834、2000.9
- 6) 鈴木伸吾ほか：SRC造建物柱梁接合部の地震被害の検討、工学院大学研究報告第88号、pp143-151、2000.4
- 7) 中西三和ほか：鉄筋コンクリート造T型柱梁接合部の静的および動的載荷実験、日本建築学会学術講演集(九州)、pp547-548、1998.9