

[建築構造]

阪神・淡路大震災における被災建築物の統計的分析 (2)

—鉄筋コンクリート造系建物の耐震診断—

関 松太郎 杉山公一 吉岡研三
 江戸宏彰 田中宏 八木貞樹
 (本店 建築設計第7部) (本店 建築設計第7部)

概 要

兵庫県南部地震における神戸市内の震度VIおよびVIIの地域を対象として被害建物の調査・分析を行った。被害分析の対象とした建物は、被害建物の中から被害調査を実施し、かつ分析に必要な構造図等が入りてきたものから選択した。被害分析の方法は、(財)日本建築防災協会の耐震診断基準を用いている。耐震診断から得られる構造耐震指標(Is)は建物の耐震性能を実用的な観点に立ち簡便な数値で表したものである。診断結果によれば、今回の地震で中破以上の被害が生じない限界として、本論文で取り上げた調査建物の範囲においては、1次診断のIs指標では1.0程度、2次・3次診断では0.8程度となり、現在、通常想定されている地震動に対するIs指標より大きい値となっている。

1. はじめに

兵庫県南部地震の被害調査対象となった神戸市内の建物の中から概略分析が可能な建物を取り上げて被害分析を実施した。まず、柱率・壁率と1次診断を用いて簡略的に表現される建物の耐震性と地震被害との関係について検討した。次に、さらに詳細な2次診断および3次診断を行い、同様に地震被害との関係を検討した。

Table 1 検討建物一覧
List of Investigated Buildings

No.	建物用途	所在地	設計年	構造種別	規模		被害程度
					地上	地下	
1	事務所	中央区	1983	SRC	10	1	中破
2	店舗	中央区	1964	RC	6	1	小破
3	共同住宅	灘区	1980	RC	7	-	軽微
4	共同住宅	灘区	1980	RC	7	-	中破
5	店舗	中央区	1965	RC	4	1	大破
6	事務所	中央区	1974	RC	6	1	大破
7	事務所	中央区	1987	SRC	9	-	小破
8	事務所 共同住宅	中央区	1972	SRC	10	1	中破
9	事務所	中央区	1984*	RC	8	1	中破
10	事務所	中央区	1973	SRC	7	-	中破
11	事務所	中央区	1966	RC	4	1	中破
12	事務所	中央区	1966	RC	4	-	軽微
13	共同住宅	芦屋市	1973	RC	7	-	中破
14	事務所	中央区	1985	RC	9	-	軽微
15	共同住宅	灘区	1992	RC	8	-	中破
16	事務所	中央区	1970	SRC	12	1	大破
17	事務所	中央区	1984	SRC	8	1	中破
18	事務所	中央区	1979	SRC	9	-	軽微
19	共同住宅	中央区	1980	RC	5	-	軽微
20	共同住宅	長田区	1973	SRC	23	3	中破
21	共同住宅	中央区	1972	RC	6	-	軽微
22	店舗	中央区	1966	RC	4	1	大破
23	事務所	中央区	1979	SRC	12	1	大破
24	事務所	兵庫県	1970*	SRC	9	2	中破
25	共同住宅	中央区	1979	RC	5	1	軽微
26	店舗	中央区	1971	RC	6	1	大破
27	店舗 共同住宅	須磨区	1986	RC	9	-	中破
28	事務所	中央区	1988	SRC	8	-	軽微

註) 設計年欄の*印は竣工年を示す。

2. 柱率・壁率と第1次耐震診断

2.1 検討方法

2.1.1 対象建物 検討対象建物の一覧をTable 1に示す。建物は神戸市内の震度VI、およびVIIの地域を対象として、被害建物と無被害建物、RC造建物とSRC造建物、新耐震設計法施行以前と以後の建物を含んでいる。表中の被害ランクは、大破(崩壊を含む)、中破、小破、軽微(無被害を含む)の4段階に分類しており、具体的な被害内容を文献^{1), 2)}に準じて判定した。

2.1.2 柱率・壁率 地震被害を比較的簡便に説明できることから今日まで多用されている志賀マップ(文献³⁾)を用いて検討を行った。柱率・壁率やせん断応力度を求めるのに必要な床面積(Af)や建物重量(W)は構造図をもとに設計用プログラムで再計算し、柱や壁の断面積は文献⁴⁾の新耐震設計法による方法を用いて求めた。ラーメン内と外に存在する雑壁はできるだけ壁量に加えた。

2.1.3 第1次診断値 文献^{5), 6)}による耐震診断基準の1次診断値を計算した。構造耐震指標Isは、次頁に示す式から算定した。ただし、強度指標Cの求め方は文献⁴⁾に従い、RC造とSRC造建物は同じ方法を用いた。

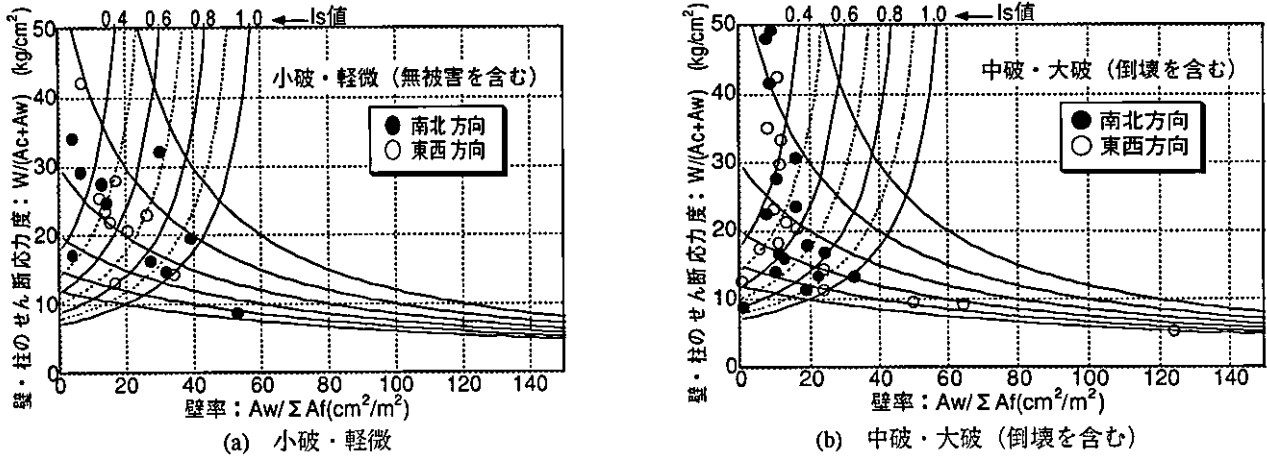


Fig. 1 1次診断用Is値と地震被害
1st Is Index and Earthquake Damage

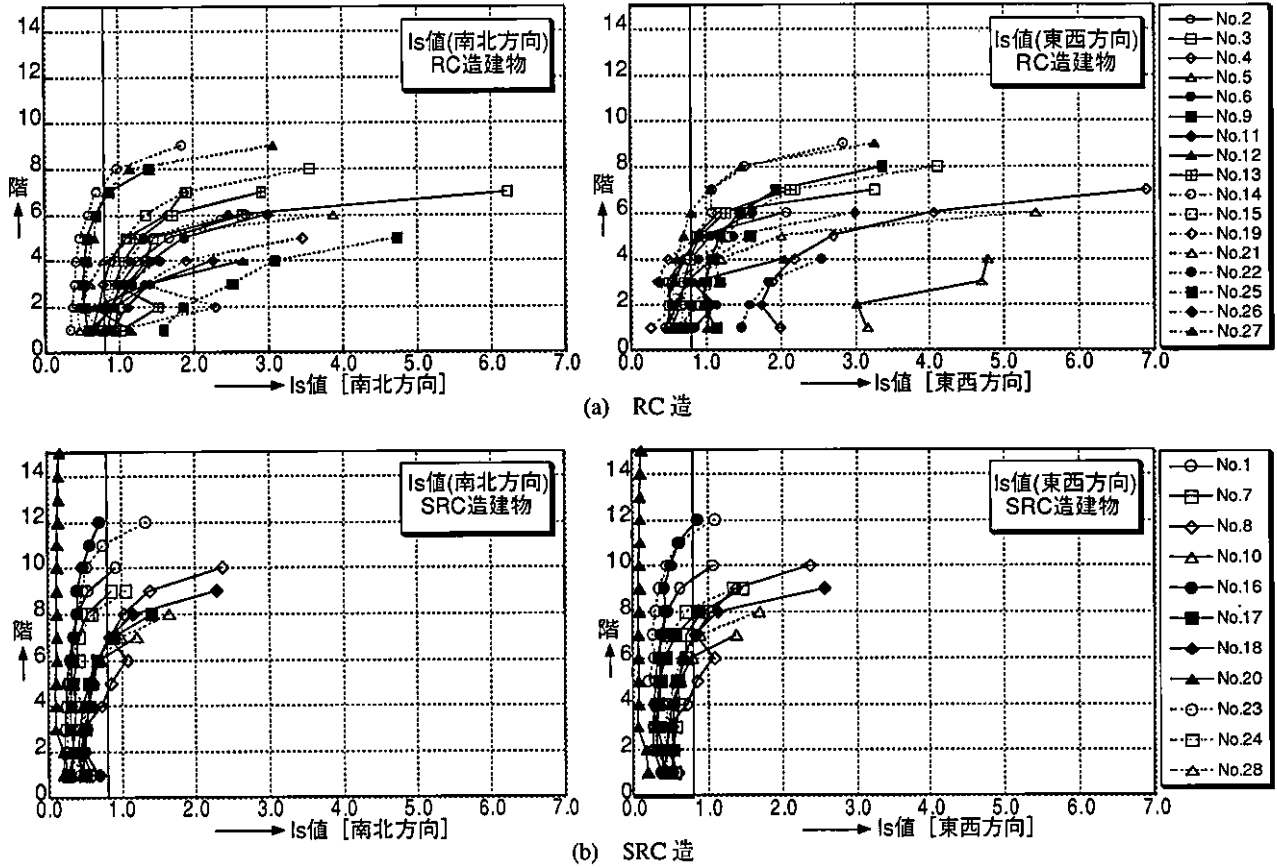


Fig. 2 1次診断用Is値の高さ方向分布
Distribution of 1st Is Index

$$Is = Eo \times SD \times T \dots\dots\dots (1)$$

$$Eo = C \times F \dots\dots\dots (2)$$

ここで, $SD = T = 1.0$, $F = 1.0$ とする。

$$C = 25AW1 / \Sigma W + 10AW2 / \Sigma W + 7AC / \Sigma W$$

AW1: 耐震壁の断面積,

AW2: 雑壁の断面積,

AC : 柱の断面積,

ΣW : 該当階より上の建物総重量,

平均せん断応力度 (τ): 25kgf/cm² 耐震壁

10kgf/cm² 雑壁

7kgf/cm² 柱

2.2 柱率・壁率と第1次診断の検討結果

2.2.1 柱率・壁率と第1次診断値 壁率・柱率, 1次診断値を文献⁷⁾ にならって被害ランク別に Fig. 1 に示す。図中には, 同一建物の東西方向と南北方向の両方の値を

プロットした。

中破および大破した建物 (Fig. 1 (b)) は18棟あり、全棟とも南北方向の方が大きな被害を受けている。したがって、東西方向に壁量が多くても南北方向に壁量が少ないために大破した建物も存在する。ここで検討した中・大破の建物のIs値の上限値はおおよそ1.0程度であるといえる。

小破・軽微の建物 (Fig. 1 (a)) では、壁量が少ない建物、すなわち、Is値が0.5を下回るものでも小破以下の被害にとどまっている。これは、本論文で検討対象とした建物 (Table 1) の階数が7階以上の中高層建物が多く、低層建物に比べてラーメン構造が主体で壁の少ない設計となっているためである。この図からだけでは被害が小さい原因を正確に把握するのは困難であるので、より高次の2次および3次の診断を行う必要がある。

2.2.2 Is値の高さ方向分布 Fig. 2にIs値の建物高さ方向分布を示す。Fig. 2 (a) はRC造建物を南北方向と東西方向に分けて示している。Fig. 2 (b) はSRC造建物について同様な表現をしている。これらの図は、平均終局せん断応力を用いた建物の保有耐力の高さ方向分布を示している。Fig. 2によると、RC造建物は、1階のIs値はおおむね0.5以上で、上階での増加率が高いのに対して、SRC造建物では、1階のIs値はおおむね0.25以上で、上階での増加率もRC造建物ほど大きくない。これは、前述したようにSRC造建物の構造種別の差に起因するものと考えられる。

2.3 まとめ

本章は、略算的な検討による被害建物の耐震性の評価を行ったものであり、限られた建物数ではあるが以下の知見が得られた。

1) 建物の柱率・壁率および1次診断値を検討した結果、今回の地震においては中破以上の被害はIs値でおおよそ1.0以上あれば発生していない結果となっている。

2) 壁が少ない中高層建物の被害を正確に推定する場合、壁率・柱率等の方法では必ずしも適切ではなく、高次診断によることが望ましいことが再確認された。

3. 第2次・第3次耐震診断

3.1 耐震診断の方法

3.1.1 対象建物 対象建物をTable 2に示す。検討対象とした建物は1次診断で検討した建物の中などから構造図などが完備している合計22棟である。

3.1.2 耐震診断の方法 RC造およびSRC造建物の2次および3次診断の両方を耐震診断基準 (文献^{9), 10)) に準拠して行った。なお、充腹型SRC造は耐震診断基準の適用外であるが、本論文では他の建物との比較のため同基準を適用し評価した。構造耐震指標Isを(1)式と(2)式で算定する。式中の値には下記の仮定を用いる。}

T (経年指標) : 1.0と仮定する。

C (強度指標) : 柱, 梁, 耐震壁の終局強度に基づいた

Table 2 保有性能基本指標Eoと構造耐震指標Is
Eo Index and Is Index

No.	診断	基本指標Eo		偏心率		剛性率		地下階	耐震指標Is		被害程度
1	3次	NS	0.52	NS	2	NS	0	有	NS	0.50 [1]	中破
		EW	0.65	EW	1	EW	0	1.20	EW	0.70 [2]	
2	3次	NS	0.80	NS	2	NS	0	有	NS	0.77 [5]	小破
		EW	0.30	EW	2	EW	0	1.20	EW	0.28 [3]	
4	2次	NS	0.79	NS	0	NS	0	無	NS	0.79 [1]	中破
		EW	1.30	EW	1	EW	0	1.00	EW	1.17 [1]	
5	3次	NS	0.75	NS	0	NS	1	有	NS	0.81 [1]	大破
		EW	1.69	EW	2	EW	0	1.20	EW	1.62 [1]	
6	3次	NS	0.63	NS	0	NS	1	有	NS	0.68 [1]	大破
		EW	0.57	EW	0	EW	0	1.20	EW	0.68 [3]	
7	3次	NS	0.70	NS	0	NS	0	無	NS	0.70 [5]	小破
		EW	0.43	EW	0	EW	0	1.00	EW	0.43 [5]	
8	2次	NS	0.73	NS	0	NS	0	有	NS	0.88 [1]	中破
		EW	0.84	EW	0	EW	0	1.20	EW	1.01 [1]	
9	2次	NS	0.55	NS	1	NS	0	有	NS	0.59 [5]	中破
		EW	0.87	EW	0	EW	0	1.20	EW	1.04 [3]	
10	3次	NS	0.83	NS	1	NS	0	無	NS	0.74 [2]	中破
		EW	0.86	EW	2	EW	0	1.00	EW	0.69 [3]	
12	2次	NS	0.59	NS	0	NS	0	無	NS	0.59 [2]	軽微
		EW	0.66	EW	2	EW	0	1.00	EW	0.45 [3]	
14	3次	NS	0.57	NS	2	NS	0	無	NS	0.46 [2]	軽微
		EW	0.95	EW	1	EW	0	1.00	EW	0.86 [4]	
15	3次	NS	0.61	NS	2	NS	0	無	NS	0.49 [1]	中破
		EW	0.89	EW	2	EW	0	1.00	EW	0.72 [1]	
16	3次	NS	0.57	NS	0	NS	0	有	NS	0.68 [4]	大破
		EW	0.66	EW	0	EW	0	1.20	EW	0.79 [4]	
17	3次	NS	0.63	NS	2	NS	0	有	NS	0.60 [1]	中破
		EW	0.82	EW	2	EW	0	1.20	EW	0.79 [1]	
18	3次	NS	0.94	NS	1	NS	0	有	NS	1.02 [4]	軽微
		EW	0.73	EW	2	EW	0	1.20	EW	0.70 [4]	
22	2次	NS	0.78	NS	2	NS	0	有	NS	0.75 [1]	大破
		EW	1.37	EW	1	EW	0	1.20	EW	1.48 [1]	
24	2次	NS	0.54	NS	0	NS	0	有	NS	0.65 [3]	中破
		EW	0.54	EW	0	EW	0	1.20	EW	0.65 [3]	
25	2次	NS	1.75	NS	0	NS	0	有	NS	2.10 [1]	軽微
		EW	0.57	EW	0	EW	0	1.20	EW	0.68 [2]	
26	2次	NS	0.75	NS	2	NS	0	有	NS	0.72 [1]	大破
		EW	0.61	EW	2	EW	1	1.20	EW	0.53 [2]	
27	2次	NS	0.53	NS	1	NS	0	無	NS	0.48 [6]	中破
		EW	0.77	EW	2	EW	0	1.00	EW	0.62 [1]	
28	3次	NS	0.64	NS	2	NS	0	無	NS	0.51 [2]	軽微
		EW	0.76	EW	2	EW	0	1.00	EW	0.60 [1]	
29	3次	NS	0.39	NS	0	NS	2	無	NS	0.31 [2]	大破
		EW	0.43	EW	2	EW	1	1.00	EW	0.31 [2]	

註) Eo指標欄の[]は最小値となった階もしくは最も被害の大きい階を示す。
 偏心率のグレード: e<0.15 → 0 剛性率のグレード: s≧0.60 → 0
 0.15≦e<0.30 → 1 0.60>s≧0.30 → 1
 0.30≦e → 2 0.30>s → 2

各階の終局耐力を用いる。

F (靱性指標) : 耐震診断基準に基づきRC造建物とSRC造建物に対応するF指標を用いる。

SD (形状指標) : 剛性率と偏心率だけを考慮する。これらの値は、文献⁴⁾の新耐震設計法による方法で求めた。耐震診断基準の偏心率に対するSD指標は0.15未満で1.0, 0.15以上0.3未満で0.9, 0.3以上で0.8を設定し、剛性率に対しては0.6以上で1.0, 0.6未満0.3以上で0.9, 0.3未満で0.8を設定した。

なお、3次診断において保有耐力(C)を求める際は以下の主な仮定にしたがった。ラーメン部分は節点振分法、連層壁は外力分布をAi分布とした仮想仕事法による。壁には、剛性低下率を考慮し、ラーメン部分の側柱には地震時の変動軸力を用いた。耐震診断における一連の作業の中で、重量・軸力、偏心率・剛性率等は当社の一貫設計用プログラム「STREAM-V2」、部材強度・構造種別・靱性指標等はRC造系建物の耐震診断プログラム「SIRCOS」によって求めた。

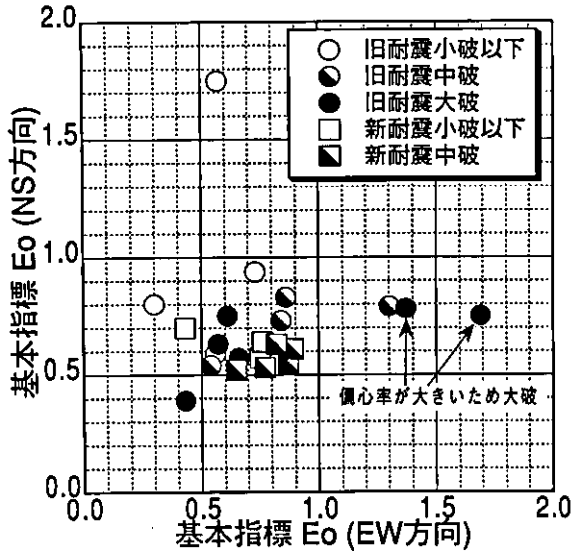


Fig. 3 Eo指標と地震被害
Eo Index and Earthquake Damage

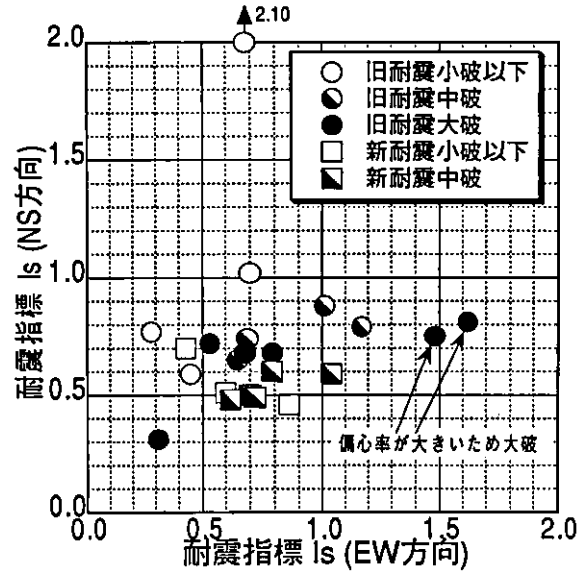


Fig. 4 Is指標と地震被害
Is Index and Earthquake Damage

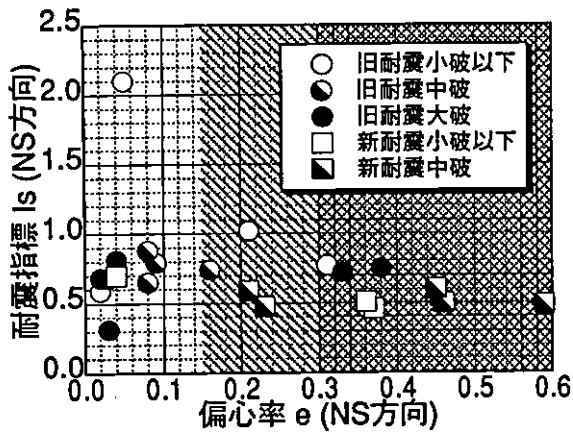


Fig. 5 Is指標と偏心率
Is Index and Eccentricity

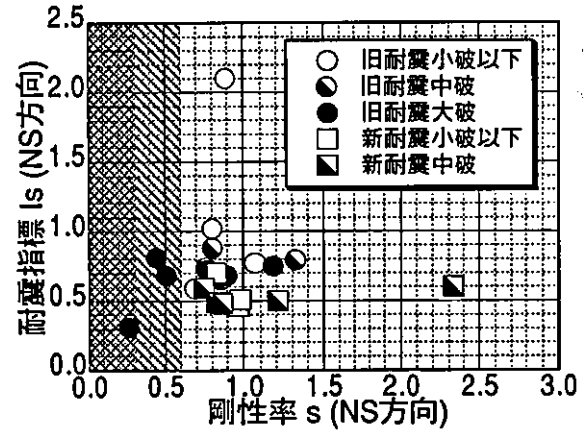


Fig. 6 Is指標と剛性率
Is Index and Stiffness

3.2 耐震診断結果

3.2.1 保有性能基本指標 (Eo) Table 2に耐震診断結果を示す。各建物のEo指標は、2次診断と3次診断を行い、その結果と地震被害とを比べて整合性が高い方を採用した。また、原則としてその建物の被害がいちばん大きい階のEo値を採用し、地震被害階が特定できない場合には後述するIs値が最小となる階のEo値を用いた。3次診断を行った建物の中で梁崩壊等の破壊形式が支配的なものについては、診断基準に基づきモードの優遇係数 ($\alpha = 2(2n+1) / 3(n+1)$; nは階数) が表中のEo値に乘じられている。Fig. 3にEo指標を示す。横軸は東西方向、縦軸は南北方向の値を図示した。図より、東西方向のEo指標の大小にかかわらず南北方向のEo指標がおおむね0.8以上あれば中破以上の被害は生じていない。これは、地震動の強さが南北方向に強かったことを示している。また、新耐震設計法施行(1981年)以前に設計された建物の方が新耐

震以後の建物より同じEo指標でも被害が大きい傾向が見られる。

3.2.2 構造耐震指標 (Is) Is指標はEo指標に形状指標(SD)を考慮したものである。考慮する項目は、3.1.2項で設定した剛性率と偏心率に加えて、入力低減に関する地下室の有無(有る場合は1.2の割り増し係数を用いる)である。計算結果をTable 2およびFig. 4に示す。これによるとEo指標とほぼ同様な傾向を示し、南北方向のIs指標がおおむね0.8以上確保されていれば大きな被害には至らないこと、新耐震以後の建物はIs指標が若干低くても大破には至らないこと等がわかる。なお、耐震診断基準で通常想定される地震動に対して設定されている耐震判定指標(Is0)は0.6であるが今回の地震ではそれを上回っている。

3.2.3 構造耐震指標 (Is) と偏心率 Fig. 5にIs指標と偏心率の関係を示す。この図では建物の被害が南北方向

で起こっているなのでこの方向を建物の代表値としている。この図より偏心率の大きさと建物被害には相関性がみられ、特に新耐震以前の大破した建物には偏心率が大きいものが見られる。一方、新耐震施行以後の建物の中には偏心率が大きくても大きな被害に至らない建物も存在している。

3.2.4 構造耐震指標 (I_s) と剛性率 Fig. 6 に Fig. 5 と同様に南北方向の I_s 指標と剛性率の関係を示す。ここで対象とした建物は新耐震以前の大破した1棟の建物を除いて剛性率がよいとされる1.0付近に分布している。したがって、これらの建物については、被害におよぼす剛性率の影響が明確に判断できない結果となっている。

3.3 まとめ

高次の耐震診断を行い、限られた建物棟数であるが以下の知見が得られた。

- 1) 今回の地震では構造耐震指標 (I_s) がおおむね0.8以上あれば中破以上の被害は生じていない傾向がある。
- 2) 建物被害は南北方向に大きく、一般に言われている地震動の性質をよく反映している。

4. 結論

本論文は、神戸市内の震度VI, VII地域の被災建物の耐震性を「耐震診断基準」によって評価したものである。その結果、建物が中破以上の被害が生じない限界として、ここで扱った建物の範囲においては、1次診断の構造耐震指標 (I_s) で1.0, 2次・3次診断では0.8程度となり、現在、通常、想定されている地震動に対する I_s 指標より大きな値となっている。

なお、耐震診断値は建物の耐震性能を実用的観点に立って簡便な数値で表わしたものであり、地震時の挙動

をより精度よく評価すると同時に、入力地震動の大きさを推定するためには、さらに地震応答計算等による手法によって判断する必要がある。同名論文(3)ではそれらの検討結果を述べる予定である。

謝 辞

本検討にあたり、技術研究所の被害分析グループで著者以外の高橋主席、鈴木主席、津田、時野谷、永原、栗栖、佐野、諏訪、奥田、稲葉、高田、小林、佐藤、関根、内海の各研究員と関係者、ならびに東京本社、大阪本店、神戸支店の関係者の方々に多大の御協力を頂き謝意を表します。

参考文献

- 1) (社)日本建築学会：1968年十勝沖地震災害調査報告、(1968)
- 2) (財)日本建築防災協会：震災建築物等の被災度判定基準および復旧技術指針(鉄筋コンクリート編)、(1991)
- 3) 志賀：鉄筋コンクリート造建物の壁率と震害予測、日本建築学会東北支部研究発表会、(1975)
- 4) (財)日本建築センター：構造計算指針・同解説、(1991)
- 5) (財)日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説、(1990)
- 6) (財)日本建築防災協会：既存鉄骨鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説、(1983)
- 7) 梅村、岡田、村上：鉄筋コンクリート造建物の耐震診断基準のための耐震判定指標について、日本建築学会大会学術講演梗概集、(1980)