鳥取県西部地震および平成13年 芸予地震における鉄筋コンク リート造被害建物の耐震性能

片谷陽子 — * 1 栂山健二 — * 2
荒木秀夫 — * 3 菅野俊介 — * 4

キーワード:

被災 RC 建物, 鳥取県西部地震, 2001 芸予地震, 耐震性能, 耐震診断, 損傷割合, コンクリート強度

Keywords:

Damaged RC building, Tottori-ken seibu earthquake, 2001 Geiyo earthquake, Seismic evaluation, Seismic performance, Damage level, Concrete strength

SEISMIC PERFORMANCE OF DAMAGED REINFORCED CONCRETE BUILDINGS IN TOTTORI-KEN SEIBU EARTHQUAKE AND 2001 GEIYO EARTHQUAKE

Yoko KATADANI — * 1 Kenji KABAYAMA — * 2
Hideo ARAKI — * 3 Shunsuke SUGANO — * 4

2000.10.6 Tottori-ken seibu earthquake and 2001.3.24 Geiyo earthquake hit at Chugoku area, fortunately the extensive damage and economic losses did not occur though accelerations of 1g or greater on the horizontal were recorded at several sites. Concerning reinforced concrete buildings, only one apartment building collapsed and one school building was severely damaged. A few numbers of buildings were moderately damaged. Objective of this study is to clarify the seismic performance of damaged RC buildings in two earthquakes using results of seismic evaluation method and data from the inspections. It is pointed out following results 1) it is difficult to evaluate the seismic performance only using seismic performance Indices Is. 2) it is necessary to consider concrete strength and defect sprung up at the constructions.

1. はじめに

一昨年の鳥取県西部地震（2000.10.6），昨年の平成13年芸予地震（2001.3.24）といずれも震度6を超える地震が中国地方で相次いで発生し，1000Gal以上の地表面加速度も数多く観測された。兵庫県南部地震（1995.1.17）以後，地震被害軽減を目的として各県で大規模地震被害想定が実施されている中で，相次いで発生した2つの地震はまさに想定通りの地震であった。しかし，人的，物的被害は想定被害よりはるかに小さく，RC造建物の被害についてみると鳥取県西部地震で中破3棟，小破数棟，平成13年芸予地震で大破倒壊2棟，中破数棟にとどまっている。表1に2つの地震の諸元，概要を示す¹⁾。同表中に兵庫県南部地震の概要も示すが，このたびの地震被害は桁違いに小さいことがわかる。鳥取県西部地震では気象庁マグニチュードが兵庫県南部地震を上回り，芸予地震ではモーメントマグニチュードが兵庫県南部地震とほぼ同じ値である。また気象庁とリンクしている各市町村役場の最大加速度記録では鳥取県日野町で1482Gal，広島県河内町で1121Galと兵庫県南部地震における神戸海洋気象台記録881Galを大きく上回り，独立行政法人防災科学研究所のK-NETやKiK-netで観測された最大加速度は神戸海洋気象台の値にほぼ匹敵している。一方，文献¹⁾では建物に影響を与える強震記録から求められる総入力エネルギーの速度換算値のスペクトルからは鳥取県西部地震の日野観測点の記録以外はその大きさや周期域の広がり兵庫県南部地震のものとは比べると小さく，記録震度の割に建物被害が少くないことを説明できるとしている。このように地盤振動の規模が徐々に明らかにされて行く中で，このたびの地震で被害を受けた建

表1 地震諸元および概要

地震名	鳥取県西部地震	平成13年芸予地震	兵庫県南部地震
発生日月日	2000.10.6	2001.3.24	1995.1.17
発生時間	13:30	15:28	5:46
震源緯度	北緯 35.3	北緯 34.1	北緯 34.6
震源経度	東経 133.4	東経 132.7	東経 135.0
震源深さ	11km	51km	17km
気象庁 M	7.3	6.7	7.2
モーメント M	6.4	6.8	6.9
最大震度	6 強	6 弱	7(旧震度)
最大加速度 (Gal)	1482(日野町) 922(KiK-net)	1121(河内町) 832(K-NET)	881 (神戸海洋気象台)
死者	0	2	6310
全半壊家屋	921	130	20 万以上

物の耐震性能を調べ，その被害発生メカニズムを建物側から検証しておくことは重要であり，このことは兵庫県南部地震と同じ年に公布された耐震改修促進法²⁾によって進められている耐震診断とも関連し，今後予想される地震に対する被害軽減にも役立つと思われる。

本報告は，被害建物の耐震診断による構造耐震指標と損傷割合との関係について兵庫県南部地震の場合と比較しながら検討を加え，また建物のコンクリート強度と損傷割合との関係についても調査したものである。

2. 建物概要

表2に本報告で対象とした文教施設，庁舎および倒壊した集合住宅計15棟に関する建物概要を示す。同表中には被害程度は軽いながら強

*1 広島大学大学院工学研究科 社会環境システム専攻 大学院生
(〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

*2 広島大学大学院工学研究科 社会環境システム専攻 助手・博士(工学)

*3 広島大学大学院工学研究科 社会環境システム専攻 助教授・工博

*4 広島大学大学院工学研究科 社会環境システム専攻 教授・工博

*1 Graduate Student, Graduate School of Engineering, Hiroshima University

*2 Research Assoc., Graduate School of Engineering, Hiroshima University

*3 Assoc. Prof., Graduate School of Engineering, Hiroshima University

*4 Prof., Graduate School of Engineering, Hiroshima University

表 2 建物概要

地震	建物番号	用途	震源距離 (km)	推定震度	建設年	階数	スパン	被害程度	最大D値	Is 1次	Is 2次	C _t S ₀	被害の概要および備考
鳥取県西部地震	①	校舎	7	5強	1967	3	2×15	中破*	32.9	0.55	0.57	0.26	1, 2階の柱がせん断破壊 (取り壊し)
	②	校舎	5	5強	1972	3	2×12	軽微	2.5	0.71	0.7	0.7	1, 2階の柱に曲げひび割れ KIK-net 観測点直近
	③	校舎	10	5強	1969	3	1×11	軽微	2.5	0.53	0.63	0.62	1, 2階の柱に曲げひび割れ 建物④の直近
	④	庁舎	10	5強	1966	3	2×5	中破*	36.1	0.59	0.59	0.6	1, 2階の柱がせん断破壊 (取り壊し)
	⑤-1	病院	30	5強	1967	4	3×10	小破	7.5	0.18	0.38	0.41	極短柱(高窓)のせん断破壊 (補強)
	⑤-2				1967	2	4×12	小破	7.5	0.25	0.46	0.43	極短柱(高窓)のせん断破壊 (補強)
	⑥	庁舎	5	6弱	1959	2	5×7	中破*	22.1	1.15	1.5	1.5	1階の柱がせん断破壊 (取り壊し)
平成13年芸予地震	⑦-1	校舎	26	4	1970	4	1×23	大破*	71.7	0.18	0.27	0.27	1, 2階の柱がせん断破壊 (取り壊し)
	⑦-2				1970	4	1×21	中破*	19.2	0.23	0.38	0.39	1, 2階の柱にせん断ひび割れ (取り壊し)
	⑧	庁舎	28	6弱	1966	2	1×7	中破*	30.9	0.43	0.53	0.53	1階柱1本がせん断破壊 (補強予定)
	⑨	図書館	38	5強	1971	3	5×9	小破*	7		0.41		1, 2階の柱がせん断破壊 (補強予定)
	⑩-1	校舎	34	5強	1967	3	3×9	中破*	27.4		0.46		1階の柱がせん断破壊 (取り壊し)
	⑩-2				1964	3	3×13	軽微*	3.9		0.25	0.25	1階の柱がせん断破壊 (補強)
	⑩-3				1964	3	6×9	中破*	17.1		0.3	0.3	1階の柱がせん断破壊 (補強)
	⑪	住宅	31	5強	1970	3	1×4	倒壊*	50		0.38		ピロティ階の落階 (取り壊し)

*文献³⁾による判定

震観測地点 (KIK-net) 近くの建物②や被害建物の直近の建物③のデータも含まれている。これらの建物は文献¹⁾で報告されている被害を受けた鉄筋コンクリート造建物をほぼ網羅しているが、必要図面等がそろわずデータとして不完全なものもあるが報告の速報性も考え掲載した。⑤, ⑦, ⑩の建物は同一敷地内にある複数の建物である。用途は文教施設, 庁舎, 病院, 集合住宅となっている。推定震度は建物所在地における気象庁発表震度であるが、その観測点は気象台や市町村役場であり、建物の立地位置そのものではないことに留意しておく必要がある。また、建設年は1棟を除き、1971年の建築基準法施行令改定以前のいわゆる旧基準によって設計建設されたものである。階数は2階～4階である。このたびの地震における大破・倒壊建物は芸予地震における2棟のみであり、報告されている中破は7棟である。被災度判定にあたっては文献³⁾を用いて行ない、文献³⁾に従わない場合はひび割れ写真によって判断した。文献³⁾による損傷判定は各柱の損傷をその階ごとに集計して損傷割合D値 (以下D値) で表すもので、軽微 ($D \leq 5$)、小破 ($5 < D \leq 10$)、中破 ($10 < D \leq 50$)、大破 ($D > 50$)、倒壊 ($=50$) で区分される。

倒壊した集合住宅 (建物番号⑪) は1階が駐車場となっているピロティ型であり、1階柱のせん断破壊、あるいは柱端部の曲げせん断破壊により軸力保持能力を喪失して層崩壊に至ったものと考えられる。この倒壊した集合住宅以外の建物の被害程度はいずれもRC柱のせん断破壊、せん断ひび割れが主でこれまでの地震被害と大きな相違はない。

同表中に示す構造耐震指標Is値 (以下Is値)、 $C_t \cdot S_0$ の値は次節で述べる耐震診断で求めたものである。これらの各値は被害の大きい方向で、かつ各階における最小値を示したものである。

写真1に被害を受けた柱の被害状況を例示する。写真の柱はいずれも損傷度IVと判定されたものである。

3. 分析結果の検討

3.1 耐震診断結果と被害との関係

耐震診断は財団法人日本建築防災協会指針⁴⁾に基づき行なった。被害建物から採取した試験片によるコンクリート強度の多くは同診断

鳥取県西部地震
建物① 平成13年芸予地震
建物⑦-1

写真1 典型的な柱のせん断破壊

の適用可能下限値 13.5N/mm^2 を下回っており、本報告の診断にあたっては設計時における耐震性能を比較検討するため、設計図書にある設計基準強度を用いている。また設計図書に記載がない場合は当時の一般的な値として 18N/mm^2 を使用した。鉄筋強度も同様に設計図書にある数値を用い、記載が無い場合はSR235として計算した。

図1にD値と二次診断のIs値の関係を示す。同図中に兵庫県南部地震を分析した文献⁵⁾の値も示す。二次診断の耐震判定基本指標 $E_s (=0.6)$ で被害が出る危険性が高いとされている。このたびの地震被害では $0.6 < Is$ の範囲で1棟中破がある以外はこの判定基本指標をほぼ満足している。中破判定のD値分布状況は $0.3 < Is \leq 0.6$ に集まる傾向にあり、その値は $10 < D \leq 50$ の全域にばらついている。兵庫県南部地震では $0.6 < Is$ でも大破判定の建物が数棟見られるが、このたびの地震では大破倒壊はなく、先に述べた中破が1棟あるのみである。このような建物はこれまでの計算法によるIs値のみでは耐震性能を正しく評価できないことを意味している。文献³⁾では付着割裂の評価、残留変形の評価が判定に大きく影響を与えているとしているが、このたびの地震でIs値が大きいかにかかわらず中破判定となった建物については、施工不良の柱のせん断破壊 (写真2) が直接建物全体の判定に影響したものと思われる。

図1 二次診断による Is 値と損傷割合 D 値の関係 図2 二次診断による Is 値と $C_T \cdot S_D$ 値の関係

全般的傾向としては Is 値が大きくなれば D 値は小さくなる右下がりの形となる。しかしながら、ここで注意しておきたいのは文献⁵⁾が対象としている建物は調査依頼を受けたものに限られ、被害の少ないものや被害の無いものについては調査されていない可能性が有ることである。つまり実際は Is が非常に小さくても被害が少なければ調査対象となっていない可能性がある。本地震では Is 値 0.2 のように低いものでも損傷度はそれほど大きくない建物も見られる。

次に $C_T \cdot S_D$ と Is の関係を図2に示す。この中で $Is < 0.6$ かつ $C_T \cdot S_D < 0.3$ の限界値を下回っている建物は、大破1棟、中破2棟、小破1棟である。また、 $Is < 0.6$ の範囲で、 $C_T \cdot S_D$ が0.6あたりでまで中破が見られる。図中に文献⁵⁾の値も示すが、この文献では、 Is 値が大きくなっても $C_T \cdot S_D$ 0.45あたりまで大破、倒壊となる可能性があることが示されている。また、この度の地震の場合と同様に兵庫県南部地震でも $C_T \cdot S_D$ が0.6~0.7がほぼ中破の限界値になっていることが分かる。 Is が1.6あたりまで中破の建物が存在している。被害の程度は Is 値よりむしろ $C_T \cdot S_D$ によって支配される傾向がある。

以上の結果からみるこの度の地震における被害建物の耐震診断結果と被害程度との関係は兵庫県南部地震のそれとほぼ同じで、基本的に $C_T \cdot S_D < 0.7$ で中破以上の被害が出る可能性があることがわかる。

3.2 コンクリート強度と損傷割合の関係

これまでの耐震診断を行なった建物のコンクリート強度は文献⁶⁾をみると 9~50N/mm² までの広い範囲に分布している。数こそ多くな

いが 10 N/mm² 以下のコンクリートも現実に存在している。前項で述べた耐震診断の適用限界値は 13.5N/mm² であるので、このような建物は本来耐震診断の適用外である。しかし、設計基準強度より低いコンクリート強度が得られた場合にはその値を用いて診断を行なうのではなく設計基準強度を用いる場合もあり、材料的な実状を反映した建物の診断になっているとはいいがたい。しかし、被害の実態は鉄筋コンクリート柱のせん断破壊が主なものである。コンクリート強度が部材のせん断耐力に直接影響を与え柱部材のせん断破壊が建物全体崩壊への引き鉄と考えると、このコンクリート強度は重要な検討要素と言わねばならない。しかしながら 3.1 で述べた耐震診断結果と損傷度との関係を検討した例は前出の文献⁵⁾などがあるが、地震被害とコンクリート強度との関係を調べた例はあまりない。撤去される大破・倒壊建物はコンクリート強度をわざわざ調べる必要はないし、補強して継続使用する場合は建物の資産価値とも関係してコンクリート強度が公表されることは少ないためである。この度の地震では幸いにも数例の被害建物についてコンクリートコアを採取する機会を得たので、既に診断業務で得られたコンクリート強度も含めて損傷度合いとの関連についてについて検討した。一般の耐震診断業務では建物1階あたり3本のコンクリートコアを採取するので、建物全体では3×階数の圧縮強度が得られる。また、コンクリートコアは雑壁等から採取する場合が多く結果はばらつくケースが多いため、大破・倒壊建物からは耐力壁等の構造躯体から採取した。

コンクリート強度と D 値の関係を示したものが図3である。本論文では得られたコンクリート強度の最大値、最小値および平均値について検討した。最小値をみると、いずれも 15N/mm² 以下であり、多くの値は 10N/mm² あたりである。この値以下の低すぎるコンクリート強度は被害に直接結びつく可能性があることがわかる。コンクリート強度の最大値をみると 16N/mm² から 40N/mm² まで大きくばらついている。全体的な傾向をみるとコンクリート強度が大きくなるに従い、 D 値は低下する傾向にある事がわかる。コンクリート強度の平均値と D 値の相関係数は約 0.6 程度であり、両者の間にはかなりの相関があると考えられる。平均値の回帰直線を図中に示す。この直線を描くことによってコンクリート強度の平均値が 15N/mm² を下回ると D 値 30 以上の損傷を受ける可能性があることがわかる。しかし、平均値が 11N/mm² 程度でも D 値が 20 程度にとどまるものもあり損傷に寄与するものがコンクリート強度だけではないことを示している。

図3 コンクリート強度と損傷割合 D 値の関係

3.3 その他の被害要因

このたびの地震では被害建物が少なかったこともあり、それぞれの建物について詳細に調査する機会を得た。その中で被害発生の大きな要因と推測できる欠陥も多く見られた。以下に顕著な例を示す。

写真2 打ち継ぎ面におけるコンクリートの分離

写真2は柱中間部のコンクリート打ち継ぎ面でコンクリートが分離している様子を示している。分離層の厚さはおよそ60mmにもなっている。その上のコンクリートは砂利、砂のみでセメントの硬化体はあまり見られない。したがって、この間のせん断力伝達はほとんど期待できないことになる。加えてこの建物は改修中であり、この柱がある構面の袖壁を一部撤去した状態で、より多くのせん断力が入力した可能性がある。ちなみにこの建物の I_s 値は一次も二次も1以上あり、耐震性能を十分有している建物と診断されている。

写真3 かぶり厚さ不足による鉄筋の錆

写真3はかぶり厚さ不足によりコンクリートの中性化が主筋位置に及び、鉄筋全周にわたって浮き錆が生じている様子である。文献⁷⁾による錆の判定区分はⅡ～Ⅲとなっている。また、このようにかぶりが少ない場合は付着割裂先行による耐力喪失が十分考えられる。また、この建物のコンクリート強度の平均値は 9N/mm^2 以下であり、かつ I_s 値は0.6を大きく下回っている。

写真4 ジャンカに起因すると思われるせん断ひび割れ

写真4は仕上げ材の剥落によってジャンカ（＝豆板）の存在が明らかとなった様子を示している。ジャンカは柱のコアコンクリート深くまで及んでおり、この周辺のコンクリートは完全に中性化していた。この建物は1階の損傷割合が大きく中破と判定されているが、この柱は2階で唯一せん断ひび割れしたものである。

兵庫県南部地震では施工不良も被害原因の一つとしてあげられたが、入力の大きさに加えて建物被害数が甚大であったため、マイナーな要素としてかたづけられた。しかし、この度の地震のように入力がそれほど大きくないにも拘わらず被害を受けた建物の実態からみると、耐震診断等によって評価される低い構造耐震性能だけでは必ずしも被害発生に結びつかず、低いコンクリート強度のような材料的欠陥、更には施工時に生じた欠陥が誘因となって、建物全体の被害に至る可能性が考えられる。今後はこれらの要因をどのような形で定量的に耐震診断の中に取り入れるかが緊急の課題と思われる。

4. まとめ

鳥取県西部地震および平成13年芸予地震で被災したRC造建築物の耐震性について耐震診断結果やコンクリート強度、施工状態について検討した。

- 1) 二次診断における構造耐震指標 I_s 値と損傷値の全体的な傾向は兵庫県南部地震の結果とほぼ類似していた。
- 2) $C_r \cdot S_D$ をみると被害が少ないとされる0.3以上でも中破判定の結果も見られる。その限界値は兵庫県南部地震と同様に0.6～0.7程度であった。
- 3) 被害建物のコンクリート強度と損傷割合の間には相関関係が見られ、コンクリート強度が下がるに従い損傷割合は増加する。また、 10N/mm^2 以下の建物も多くあり、直接被害に結びついた可能性が考えられるが、被害の程度は大きくばらついていた。
- 4) 材料・施工における欠陥の存在によって、もともと低い耐震性能しか持たない建物の被害がより顕在化したことが考えられる。

謝辞

建物被害調査にあたっては建物所有者の皆様には多大の協力を得るとともに、データを提供していただきました。またデータ処理にあたっては広島大学工学研究科大学院生、近畿大学工学部生の協力を得ました。また、計算結果の一部は広島工業大学左藤立美教授、高知工科大学中田慎介教授、山口大学稲井栄一助教授に提供頂きました。ここに併せて深謝いたします。

参考文献

- 1) 日本建築学会：2000年鳥取県西部地震・2001年芸予地震被害調査報告，2001.10
- 2) 「建築物の耐震改修の促進に関する法律」第3条「特定建築物の耐震診断及び耐震改修に関する指針」（建設省告示第2089号）
- 3) 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（鉄筋コンクリート造編），1991
- 4) 日本建築防災協会：改訂版・既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・改修設計指針同解説，1990年版
- 5) 岡田恒男，中埜良昭，他：1995年兵庫県南部地震により被災した文教施設の被害調査報告，その1～その19，日本建築学会学術講演梗概集，pp.857～876，1995，pp.365～380，1996
- 6) 坂巻健太，広沢雅也，清水泰，周建東：既存鉄筋コンクリート造建築物のコンクリート強度に関する研究，（その1）設計基準強度の変遷および圧縮強度の分布，日本建築学会学術講演梗概集，pp.801～802，2001
- 7) 第一法規出版：既存鉄筋コンクリート造学校建物の耐力測定

[2001年10月19日原稿受理 2002年2月18日採用決定]