

広島県呉市における RC 造学校校舎の耐震性能評価

村岡 七重* 南 宏一**

Seismic Capacity Evaluation of the Reinforced Concrete School Buildings in Kure, Hiroshima

Nanae MURAOKA* Koichi MINAMI**

ABSTRACT

After the seismic capacity evaluation of many buildings was performed, the Geiyo earthquake occurred in 2001. Therefore, the result of the seismic capacity evaluation of many buildings and the relation of damage can be known. This paper investigates the building damage by the Geiyo earthquake in 2001, and considers the relation between earthquake-proof ability and damage. Seismic index is used in order to evaluate earthquake-proof safety. The result which looked for what affects the damage of a building in the element which constitutes Seismic Index, the power-proof and damage of a building had correlation. Even if it has the same earthquake-proof ability, the damage level changes by the earthquake motion. Therefore, examination including the correlation of a building and the foundation is needed from now on.

キーワード：耐震診断，耐震性能，RC 造，学校校舎，2001 年芸予地震

Keywords: checking for seismic safety, earthquake-proof ability, reinforced concrete, school buildings, the 2001 Geiyo Earthquake

1. はじめに

1995 年兵庫県南部地震の経験から、耐震診断および耐震改修の促進が将来における地震災害の軽減につながるという認識のもと「建築物の耐震改修の促進に関する法律」が施行され、全国で耐震診断が進められるようになった。1981 年以降の建築基準法改定以降の建物については中程度の地震動および大きな地震動に対する安全性が構造計算によって行われている。しかし、1981 年建築基準法改定以前の建物については、中程度の地震動（地震動の目安としては震度 V 弱）に対する安全性までしか構造計算によって確認されていないため、耐震診断によって大きな地震動（震度 V 強から震度 VII）に対する安全性を確認する必要があるが生じている。広島県においても建築物耐震診断等評価委員会（委員長：南宏一）によって、2002 年 3 月の時点で 500 棟以上の鉄筋コンクリート造（以下 RC 造とする）建物の評価が終了している。

2001 年芸予地震は、多くの建物の耐震診断を行った後に発生した地震で、多くの建物の耐震性能と地震による被害程度との関係を分析することができる。過去の被害において、志賀は 1968 年十勝沖地震による建物被害について評価を行い、無被害建物と被害のあった建物は壁量と柱・壁均しせん断応力度の二つのスケールによって区別できることを示した^[1]。鈴木・原らは 1968 年十勝沖地震、1978 年宮城県沖地震、1978 年伊豆大島近海地震および 1987 年千葉県東方沖地震を対象として被害、無被害建物の第 2 次診断結果と地震被害の程度を示した^[2]。中埜・岡田らは地震被害を受けた建物の耐震性能をもとに信頼性理論による耐震安全性評価を実データに基づいて示した^[3]。これらの文献では被災後に被害程度の大きいものを中心にいくつかの建物の耐震性能と被害程度の検討が行われている。しかし、被害程度が小さいもの、無被害建物を含めた全数調査による建物の耐震性能と地震による被害程度が分析された事例はほとんどな

* 防災科学技術研究所地震防災フロンティア研究センター（福山大学大学院工学研究科建築学専攻 2002 年 3 月修了）

** 福山大学工学部

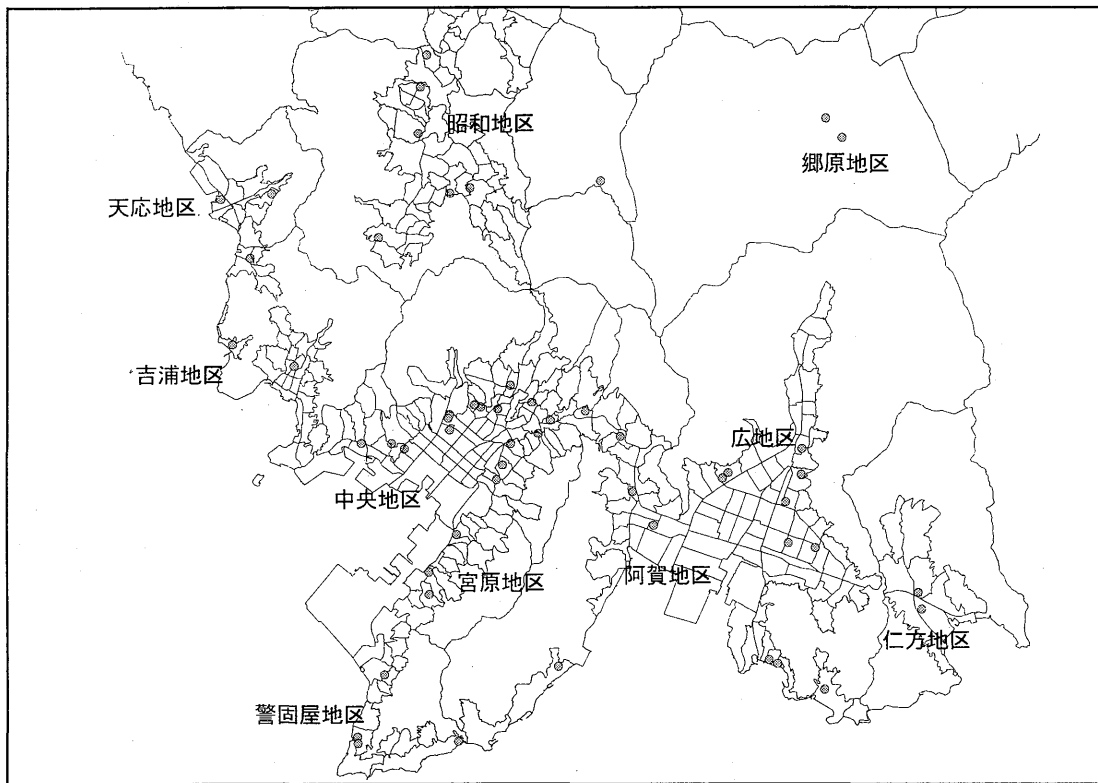


図1 呉市公立小中学校の位置

Fig.1 The position of the public elementary school and a junior high school in Kure

い。そこで本研究では2001年芸予地震の震源から近く多くの建物の被害が報告された広島県呉市において⁵⁾、構造種別および用途をRC造公立小中学校に限定して校舎被害の全数調査を行い、地震被害予測のための被害率曲線の精度向上を行うとともに、建物の耐震性能と被害程度に関して分析を行い、建物被害に影響を及ぼす要素を検討する。RC造公立小中学校校舎の耐震性能は広島県建築物耐震診断等評価委員会が評価した第2次耐震診断結果を用いる。なお、呉市の公立小中学校では1981年建築基準法施行令改定以前に竣工された校舎に関しては全棟耐震診断が行われ、評価が終了している。

2. 耐震診断の行われたRC造公立小中学校概要

2.1 公立小中学校数と所在地

図1に示すように広島県呉市内には、54校の公立小中学校ある。そのうち耐震診断および評価の終了した建物は、RC造学校建築49校112棟で、1981年建築基準法施行令改正以前に竣工した校舎について全棟終了している。

2.2 既存RC造建築物の耐震診断手法について

耐震診断とは、既存建築物の耐震性能を診断する技術のことである。1968年十勝沖地震後、建設省では国有建築物、文部省では学校建築、建設会社では自社建設ビルを対象にそれぞれ耐震診断法を開発した。その後耐

震診断技術の統合化を図るため、財団法人日本建築防災協会から「既存建築物の耐震診断基準・耐震改修指針」⁶⁾が刊行されている。ここでは、呉市RC造学校建築の耐震性能を診断する際に用いられている、財団法人日本建築防災協会のRC造耐震診断基準の考え方を示す。

RC造耐震診断基準は、既存の中低層RC造建築物を対象として、計算レベルの異なる第1次診断法、第2次診断法、第3次診断法を、診断の目的、対象建物の構造特性などに応じて適切な診断法を採用する。なお、耐震性の判定は $I_s \geq I_{s0}$ の場合に安全と判断する。

I_s 値（構造耐震指標）は構造体の耐震性能を表す指標で、最も簡略な第1次診断から最も詳細な第3次診断までの各次数の診断とも次式で計算を行う。

$$I_s = E_0 \times S_p \times T \quad (1)$$

$$E_0 = C \times F \times \phi \quad (2)$$

E_0 は建物が保有している基本的な耐震性能を表す指標で、構成部材の強度指標C、靱性指標Fと各階の補正係数 ϕ を組み合わせで計算される。 S_p は形状指標、Tは経年指標で、共に E_0 を補正する指標である。

I_{s0} は構造耐震判定指標で各次数の診断に対して次式で算出する。

$$I_{s0} = E_s \times Z \times G \times U \quad (3)$$

E_s は耐震判定基本指標で建築物の桁行き方向および梁

表1 公立小中学校の層数割合

Table.1 The number rate of layers of a public elementary school and a junior high school

	棟数	%
1階建て	0	0
2階建て	3	3
3階建て	71	63
4階建て	38	34
合計	112	100

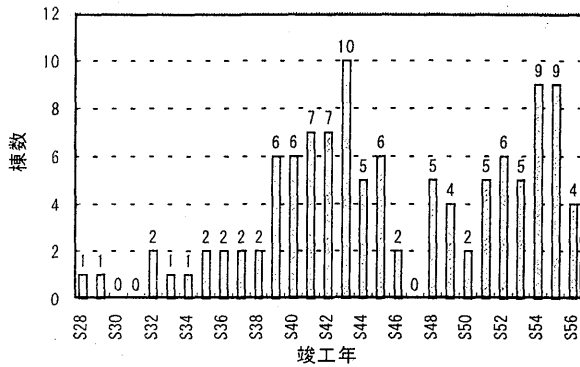


図2 竣工年分布

Fig.2 The distribution of a completion year

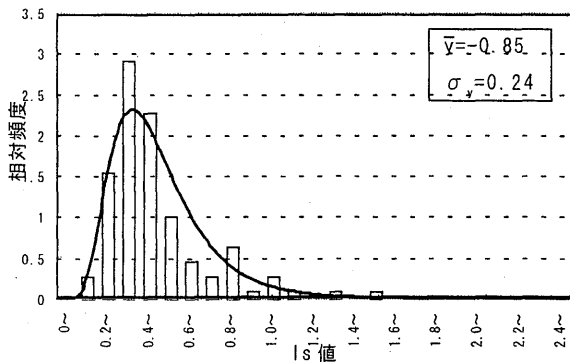


図3 Is値相対頻度分布

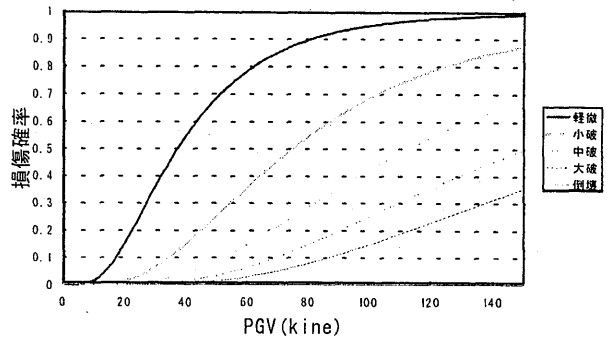
Fig.3 Relative frequency distribution of seismic index of structure

間方向に関わらず、第1次診断では0.8、第2次・第3次診断では0.6を基準とする。Zは地域係数、Gは地盤指標、Uは用途指標を示す。現行では多くの場合 $Z \times G \times U = 1.0$ としている。

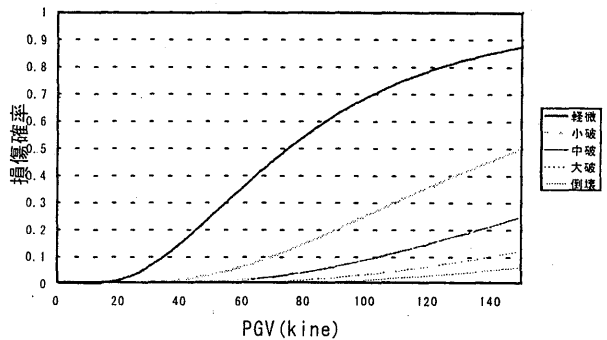
2.3 呉市内RC造学校建築の建物概略と耐震診断結果

呉市内RC造学校建築の建物概略として、表1に対象とする建物の層数割合、図2に竣工年の分布を示す。3～4階建てが大半を占め、半数以上の建物が竣工後30年以上経過している。

第2次診断により算定された呉市内小中学校のIs値の相対頻度分布を図3に示す。学校建築では、多くの場合桁行方向に開口部をとり、梁間方向に壁を配置する。そのため、地震発生時には壁量の少ない桁行方向に被害



(a) Is値=0.3のとき



(b) Is値=0.6のとき

図4 Is値ごとの被害率曲線

Fig.4 Fragility curves of damage for every seismic index of structure

が生じやすくなる。したがって、Is値の相対頻度分布には桁行方向で最も小さなIs値をとる階の値を用いた。Is値0.3～0.4の建物の割合が高く、Is値 ≥ 0.6 を満たす建物の割合は低い。

3. 耐震診断結果を用いた呉市RC造学校建築の被害率曲線

地震による地域の建築物の被害評価には被害率曲線を用いることが効果的である。過去の地震経験によりさまざまな建物被害関数や建物被害率曲線が構築されてきたが、1995年兵庫県南部地震では貴重なデータを得ることができ、それを用いた構造種別・年代別の被害率曲線が構築された。本研究では、林らの構築したIs値ごとの被害率曲線^[13]をもとに、耐震診断結果を用いた呉市の被害率曲線を構築する。

呉市の被害率曲線を構築するためには、呉市の耐震診断結果に掛けあわせるIs値ごとの被害率曲線を求める必要があるが、本論では兵庫県南部地震におけるRC造建物の被害率データと神戸市から宝塚・伊丹・尼崎市に至る広域で推定された最大地動加速度の平均的關係を示す被害率曲線から算定された、Is値ごとの損傷確率を適用することにする。図4に建物のIs値が0.3である場合と0.6である場合の被害率曲線を示す。この二つ

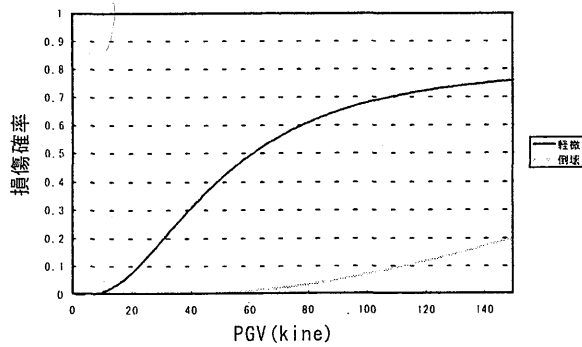


図5 呉市RC造学校建築の被害率曲線

Fig. 5 Fragility curves of damage of reinforced concrete schools in kure

表2 被害の割合
Table2. The rate of damage

被害	%
柱亀裂	5
耐震壁亀裂	9
非耐震壁亀裂	26
EXP 破損・無被害	60

の図は I_s 値が小さくなるほど、同程度の地震動で被害を受ける確率が高くなることを示している。なお、この I_s 値ごとの被害率曲線は個別建物の所在地に関わらず一定の値を示すものと仮定する。

呉市RC造学校建築の被害率曲線の構築にあたって、 I_s 値ごとの被害率曲線は個別建物の所在地に関わらず一定の値を示すものと仮定して建物被害率関数 P_D を求める。建物被害率関数 P_D は I_s 値ごとの建物被害率関数 P_f と図3に示す I_s 値の相対頻度分布の積を積分して算出する。被害率曲線は下式で表されるものとする。

$$P_D = \Phi((\ln(V) - \lambda_D) / \xi_D) \quad (4)$$

ここで、 Φ は標準正規分布で、 λ は $\ln(V)$ の平均値、 ξ は $\ln(V)$ の標準偏差である。この被害関数は、ある最大加速度のときにある被害程度以上の被害が発生する確率は、標準正規累積分布を用いて、対数正規分布で表せると仮定している。

建物の損傷確率 $P_f(V, I_s)$ が対数正規分布

$$P_f = (V, I_s) = \Phi((\ln(V) - \lambda_f(I_s)) / \xi_f(I_s)) \quad (5)$$

で表されるものとして、 I_s 値の相対頻度分布を $R(I_s)$ と表すと、被害率 $P_D(V)$ は以下のように表される。

$$P_D = \int R(I_s) \cdot P_f(V, I_s) dI_s \quad (6)$$

(6)式により求められた呉市の軽微と倒壊に対する被害率曲線を図5に示す。

2001年芸予地震による呉市内の最大地動速度はK-net 呉で23kine, JMA 呉で18kineと推定されている。これらの地動速度より図5から軽微な被害が生ずる損

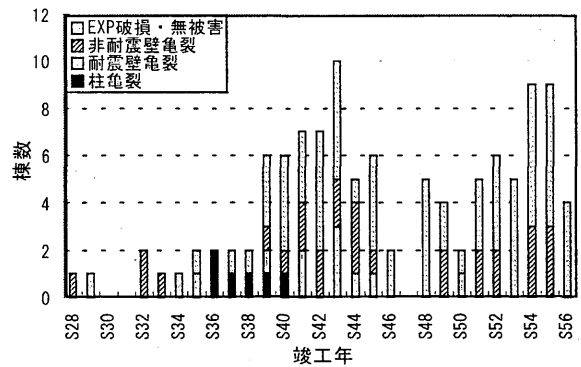


図6 竣工年別建物被害

Fig. 6 Building damage according to completion year

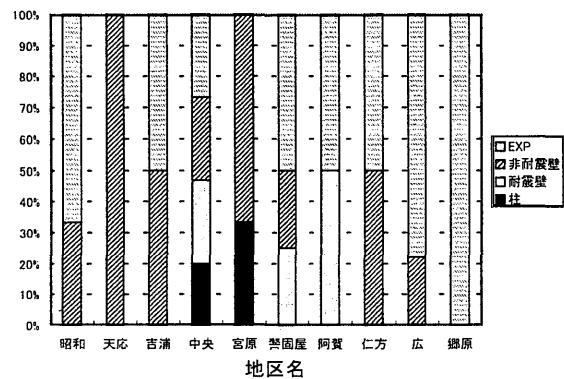


図7 地区ごとの建物被害割合

Fig. 7 Building damage rate for every area

傷確率は10%前後と推定され、表2の柱亀裂5%、耐震壁亀裂9%の数値とほぼ対応する結果を示すことがわかる。

4. 現地調査地域および調査方法

呉市は、広島県の南西部に位置し前面は瀬戸内海、背後は急峻な山により、昭和、天応、吉浦、中央、宮原、警固屋、阿賀、仁方、広、郷原の各地区に区分されている。なかでも市の中心である中央地区は三方を山に囲まれたすり鉢状になっており、平坦地が狭小で特異な地形になっている。公立小中学校は図1に示したように各地区に所在し、震源からの距離は約41～47kmである。

被害調査は呉市内の公立小中学校を対象として、各学校教員にヒアリングを行い、それを基に目視観察によりRC造学校建築の被害箇所と被害程度の確認を行った。

5. 建物被害調査結果

5.1 建造物の被害形態

2001年芸予地震による、呉市内のRC造学校建築の被害は以下に示すとおりで、構造的被害の程度に応じて4つに分ける。

・柱せん断亀裂。耐力の低い桁行方向に垂壁腰壁がつい

表3 竣工年代ごとの設計基準強度

Table3. Concrete design-criteria intensity for every completion age

竣工年	平均的な設計基準強度 (N/mm ²)
昭和28年以前	Fc=13.5
昭和29～33年	Fc=15.0
昭和34～44年	Fc=18.0
昭和45年以降	Fc=21.0

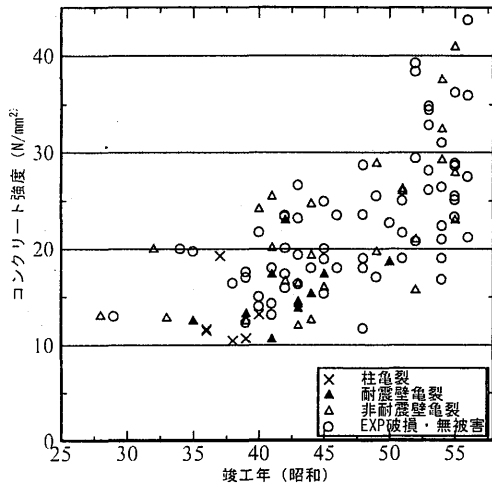


図8 コンクリート強度と被害程度

Fig8. The relation about concrete intensity and damage

て短柱化した柱にせん断亀裂が生じている (以下、これを柱亀裂とする)。

- ・耐震壁の亀裂。ここでは、ラーメンの中に一体化して組み込まれた壁を耐震壁と定義する (以下、これを耐震壁亀裂とする)。

- ・腰壁・垂壁の亀裂 (以下、非耐震壁亀裂とする)。

- ・エキスパンションの破損、あるいは外観から被害の認められなかったもの (以下、EXP 破損・無被害とする)。

調査の結果、1981年以降の新耐震設計法で設計された学校建築5校について外観から構造的被害が認められなかった。そこで、建物の耐震性能と地震被害については、呉市内にある1981年以前に竣工した建物112棟について検討を行う。表2に、耐震診断の行われた旧基準建物の各被害の割合、図6には建物の竣工年と被害割合を示す。公立小中学校の柱および耐震壁の構造部材亀裂は全体の約14%にあたり、昭和46年以前に竣工された建物に多い。図7は地区ごとの被害程度とその割合について示す。中央地区では、柱亀裂あるいは壁亀裂が多くの建物に生じたのに対して、阿賀・仁方地区の建物被害はEXP破損あるいは無被害で、地区によって地震による

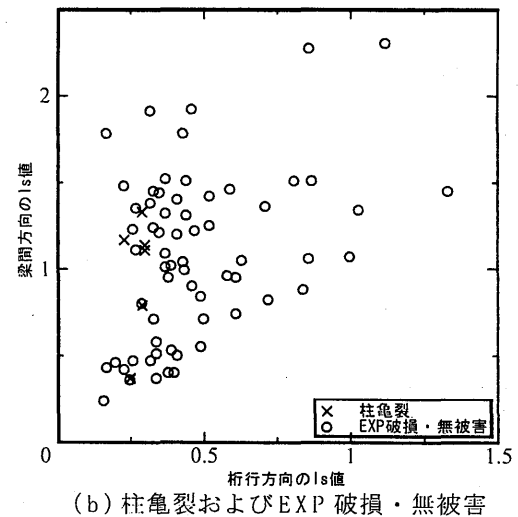
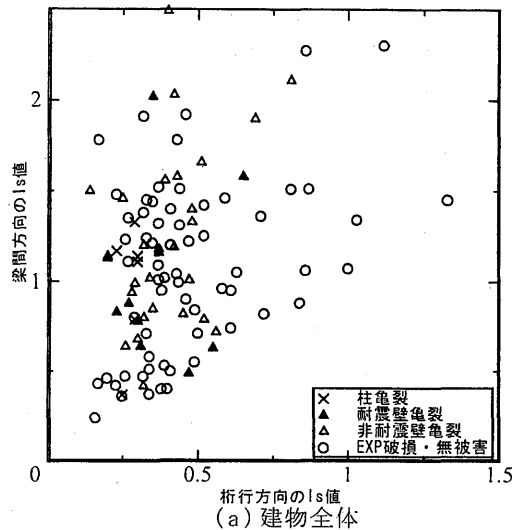


図9 Is値分布と被害程度

Fig9. The distribution of seismic index of structure, and the grade of damage

建物被害の程度に差が見られた。

5.2 コンクリート強度と被害程度

被害調査の際、いくつかの学校に外観よりコンクリート劣化が認められた。RC造建物ではコンクリート強度が建物強度に大きく影響を与えられことから、建物被害とコンクリート強度の関係を図8に示す。この図は、横軸に棟ごとの竣工年、縦軸にコンクリート強度をとり、同時に被害の程度を示している。ここではコンクリート強度は設計基準強度ではなく、耐震診断時に各階からコアを採取して圧縮試験を行った結果を平均した値を用いている。なお、竣工年代ごとの平均的な設計基準強度を表3に示す。呉市の公立小中学校校舎のこ

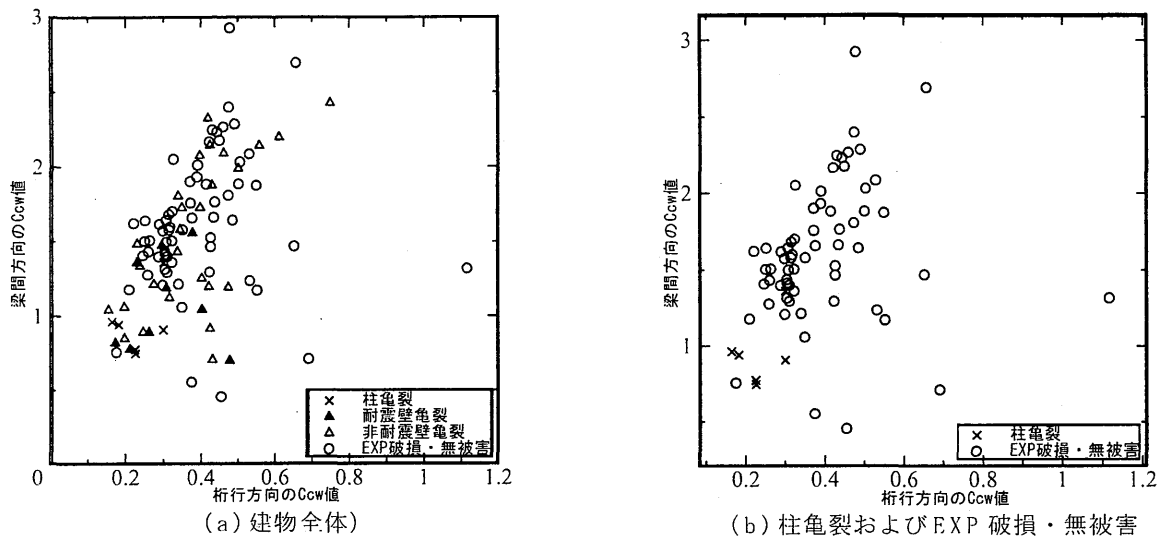


図 10 建物強度 C_{cw} 値分布と被害程度

Fig.10 The strength C_{cw} value distribution and damage grade of a building

ンクリート強度は $10 \sim 45\text{N/mm}^2$ の範囲に広く分布しているが、そのうち 20N/mm^2 以下の建物に柱や耐震壁に亀裂が生じている。

5. 3 構造耐震指標 I_s 値と被害程度の関係

第 2 次診断法により診断を行った結果を用いて、構造耐震指標 I_s 値と地震被害の関係を図 9 (a), (b) に示す。この図は横軸に建物の桁行方向、縦軸に梁間方向の I_s 値を示すようにプロットして、同時に被害の程度を示している。ここで用いた I_s 値は地震により被害が生じた階の I_s 値である。対象建物全体の被害程度をみると、2001 年芸予地震において呉市では桁行方向の I_s 値が 0.7 以下の建物に構造部材（柱・耐震壁）の被害が生じ、柱亀裂は I_s 値 0.3 以下の建物に生じている。次に、柱の破壊が建物の致命的な破壊につながるという考えから、柱亀裂と EXP 破損のみの建物あるいは外観より無被害であった建物について抜き出しその結果を (b) 図に示す。この図から、梁間方向の I_s 値の大小にかかわらず、桁行方向の I_s 値が 0.3 以下の建物に柱亀裂が生じたことがわかる。

5. 4 建物強度 C_{cw} 値と被害程度の関係

RC 造学校建築の保有する建物の強度と、地震による被害程度を図 10 に示す。横軸に桁行方向、縦軸に梁間方向の建物強度をプロットして、同時に地震による被害の程度を表す。この建物強度は、 I_s 値を算定する際に用いる強度指標 C 値を用いるのではなく、耐震診断時に算定される壁・柱率の (7) 式にコンクリート強度をかけた (8) 式で建物強度を算定する。本論では (8) 式で求まる建物強度を耐震診断時に算定される強度指標 C 値と区別するために C_{cw} 値と表す。

$$C_{cw} = \frac{(\sum 25A_w + \sum 7A_c)}{ZWA_i} \quad (7)$$

$$C_{cw} = \frac{(\sum 25A_w + \sum 7A_c)}{ZWA_i} \times (F_c / 200) \quad (8)$$

なお、 A_w はその階の対象とする方向に有効な壁断面面積の総和、 A_c はその階の柱断面面積の総和、 Z は地震活動度や地震動強さの強度を考慮するための地域指標、 W はその階より上の建物重量、 A_i は層せん断力の高さ方向の分布を示す係数、25、7 はそれぞれ壁、柱の終局時平均せん断応力度、 F_c はコアコンクリート圧縮試験の結果によるコンクリート強度を示す。

2001 年芸予地震による呉市内公立小中学校の被害は、図 9 に示されるように桁行方向の I_s 値が 0.3 以下の建物に柱のせん断亀裂が生じているが、同時にその範囲内には無被害建物も多く含まれる。それに対して図 10 の建物強度 C_{cw} による被害程度の分析では、梁間・桁行両方向の建物強度 C_{cw} 値が小さいものに柱せん断亀裂が生じ、それぞれの値がおおきくなるに従い被害程度は小さくなる傾向がみられた。

6. まとめ

呉市の公立小中学校の耐震診断結果を用いて、呉市 RC 造学校建築の被害率曲線を構築し、2001 年芸予地震による被害との関係をもとに、耐震診断業務が進められる中でどの要素が建物被害と相関がみられるか検討した。2001 年芸予地震による呉の最大地動速度は K-NET 呉で 23kine 、JMA 呉で 18kine と推定されている。それら地動速度より呉の RC 造学校建築の被害率を推定すると約 10% の建物が軽微な被害を受けることになる。被害調査によると、柱亀裂は全体の 5%、

耐震壁亀裂は9%の建物に生じた。被害率曲線の精度向上には1995年兵庫県南部地震では十分なデータ数を得ることができなかった最大値動速度の小さい範囲を、2000年鳥取県西部地震、2001年芸予地震の実被害データを用いて再度構築する必要がある。

耐震診断結果と建物の被害程度では、学校建築のように用途が明確である建物は壁量に大差なく、コンクリート強度が低い建物ほど被害が大きくなる傾向がみられ、かつ建物所在地により被害程度が異なることがわかった。従来検討されている構造耐震指標 I_s 値と被害程度では桁行方向の I_s 値が0.3以下の建物に柱せん断亀裂が生じていた。 I_s 値分布と被害程度の図によると梁間方向の I_s 値の大小は被害との相関がみられないが、建物の壁・柱率にコンクリート強度を考慮した建物強度 C_{iw} と被害程度の図をみると、桁行・梁間両方向の建物強度が小さいものに被害が生じ、建物強度が大きくなるほど被害程度が小さいことが分かった。したがって被害程度は I_s 値より建物強度のほうが精度よく抽出できることが判明した。なお、同程度の耐震性能を保有しても地盤の影響により被害程度が変わることから、今後は地盤の相互作用も含めた詳細な検討を行う必要がある。

謝辞

本論は村岡の福山大学に提出した修士論文の一部に2002年5月に地震防災フロンティア研究センターで実施した呉市の被害全数調査の一部をまとめたものである。ここで用いた耐震診断結果は広島県耐震評価委員会より提供いただいた。また、広島工業大学佐藤立美教授、地震防災フロンティア研究センター松岡昌志氏、山下忠道氏の多大なる助言を得た。記して謝意を表す。

参考文献

- [1] 志賀敏男：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，pp. 45-48，1975.11
- [2] 鈴木貴博，原健二，大網浩一，村上雅也：1987年千葉県東方沖地震による被災鉄筋コンクリート造建物の耐震診断 その2 構造耐震指標値と被災程度，日本建築学会学術講演梗概集，pp. 869-870，1989年10月
- [3] 中埜良昭，岡田恒男：信頼性理論による鉄筋コンクリート造建築物の耐震安全性に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集，第406号，pp. 37-43，1989年12月
- [4] 梅村魁，岡田恒男，村上雅也：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論文集（近畿），pp. 1537-1538，昭和55年9月
- [5] 社団法人日本コンクリート工学協会：2000年鳥取県

- 西部地震および2001年芸予地震被害調査WG，2002.3
- [6] 財団法人日本建築防災協会：2001年度改訂版 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準 同解説
- [7] 高井伸雄，岡田成幸：地震被害調査のための鉄筋コンクリート造建物の破壊パターン分類，日本建築学会構造系論文集，第549号，pp. 67-74，2001.11
- [8] 李康碩，中埜良昭，隈澤文俊，岡田恒男：1995年兵庫県南部地震のより被災した建物の耐震性能と被災度に関する研究 - 淡路島における鉄筋コンクリート造建物の耐震性能 -，構造工学論文集，Vol. 42B，pp. 9-14，1996.3
- [9] 最知正芳，三橋博三，田中礼治，四戸英男，柴田明徳：東北地方の既存建築物のコンクリート強度に関する調査研究，日本建築学会構造系論文集，第546号，pp. 9-16，2001.8
- [10] 宮腰淳一，林康裕，渡辺宏一，田村和夫：1995年兵庫県南部地震の建物被害に基づく建物の耐震性能評価，構造工学論文集，Vol. 43B，pp. 269-276，1997.3
- [11] 田村正男，田中淳夫：耐震診断における既存RC造建物の耐震性能評価に関する統計的研究，構造工学論文集，Vol. 45B，pp. 297-304，1999.3
- [12] 犬飼伴幸：釧路市内の学校建築の常時微動測定，日本建築学会技術報告集，第2号，pp. 89-93，1996.3
- [13] 林康裕，北原昭男，平山貴之，鈴木祥之：2000年鳥取県西部地震の地震動強さの評価，日本建築学会構造系論文集，第548号，pp. 35-41，2001.1