

2001 年芸予地震を経験した RC 造学校校舎の耐震性能と被害の関係 RELATIONSHIP BETWEEN SEISMIC CAPACITY AND DAMAGE OF REINFORCED CONCRETE SCHOOL BUILDINGS THAT HAVE EXPERIENCED THE 2001 GEIYO EARTHQUAKE

村岡七重*, 山崎文雄**, 松岡昌志***, 山下忠道***, 南宏一****

*Nanae MURAOKA, Fumio YAMAZAKI, Masashi MATSUOKA, Tadamichi YAMASHITA
and Koichi MINAMI*

Structural damage of reinforced concrete school buildings in Kure City, Hiroshima Prefecture due to the 2001 Geiyo earthquake was investigated based on the results of seismic capacity evaluation and detailed damage survey. Many school buildings suffered from minor to moderate damages since the level of input motion was one in which the structures start to exhibit inelastic responses. Larger level of damages were observed for the buildings constructed before 1971, especially those having low concrete strength. Good correlation between the seismic index (I_s) of structure and the damage grade is observed when the sites were classified by their predominant period.

Keywords: *The 2001 Geiyo Earthquake, Seismic capacity evaluation, Seismic index of structure, Reinforced concrete school building, Earthquake damage*

2001 年芸予地震, 耐震診断, 構造耐震指標, RC 造学校校舎, 地震被害

1. はじめに

1995 年兵庫県南部地震では, 被害を受けた建物の大部分が 1981 年以前の基準で設計・施工されたものであることが指摘された¹⁾。この教訓から同年 12 月に「建築物の耐震改修の促進に関する法律」が施行され, 多数の人が利用する用途で, 3 階建て以上かつ 1000m² 以上の建築物であって, 現行の耐震関係規定に適合しない特定建築物の所有者は, 建築物が現行の耐震基準と同等以上の耐震性能を確保するよう耐震診断や改修に努めることが求められた。翌年には(旧)文部省が公立学校施設の耐震改修 5 ヶ年計画を開始した。このような流れから, 現在では全国的に学校施設の耐震改修が進められている。

学校建築は災害時に地域の防災拠点となるケースが想定され, 地震後も建物本来の機能維持が求められるため, 耐震安全性の確保が急務である。RC 造学校校舎の耐震性能は, 「既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準 同解説」^{2),3)}に従い評価されている。耐震診断は, その計算の手間と精度から第 1 次診断から第 3 次診断までの 3 つのレベルがある。なかでも第 2 次診断は, 柱崩壊型建物の耐震性能を簡略的に評価することを目的としたもので, 旧基準の建物では一般的な破壊形式と考えられるため適用性が高く, 多くの校舎

がこれで評価されている。ところが, この評価には依然として多くの時間と費用が必要とされるため, 地域によってはまだ多くの校舎が未診断のままである。公立学校の耐震性能評価が進まない状況を受けて, 文部科学省は耐震診断の行われていない建物について早急に診断を行うよう通知した⁴⁾。この通知では, 壁や柱の断面積から耐震性能を簡易に評価する手法の導入も提案されている。しかし, これまで第 1 次診断による診断結果は, 第 2 次診断による結果ほど重要視されておらず, その評価の精度や地震被害との関係など明らかでない点も多い。

過去の震害から, 志賀⁵⁾は 1968 年十勝沖地震による建物被害について, 無被害建物と被害を受けた建物は壁量と柱・壁均しせん断応力度の 2 つのスケールにより区別できることを示した。鈴木ら⁶⁾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関係を示した。岡田ら⁷⁾, 前田ら⁸⁾は 1995 年兵庫県南部地震で被災した学校校舎について構造耐震指標 I_s と被災度を比較して, I_s が耐震性能を評価する指標として概ね妥当であることを示した。しかし, いずれも被害程度の大きい建物を中心とされた報告で, その地域の全建物を対象とした場合と比較して,

* 東京大学大学院生 修士(工学)

** 千葉大学工学部都市環境システム学科 教授・工博

*** 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 博士(工学)

**** 福山大学工学部建築学科 教授・工博

Graduate Student, Department of Civil Engineering, The University of Tokyo
Prof., Dept. of Urban Environment Systems, Faculty of Engineering, Chiba Univ.,
Dr.Eng.

Earthquake Disaster Mitigation Research Center, NIED, Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Fukuyama Univ., Dr. Eng.

耐震性能が低い建物の割合が多いと推測される。また、この地震では校舎の方向性、強度レベルと地震動の方向性について指摘されたが、実際の地震動レベルと被害レベルの関係については課題が残されている^{1), 9)-11)}。

これまで、耐震診断がある地域の建物全数に対して行われ、建物群の耐震性能が把握された後にその近くで地震が発生した事例はなかった。しかし1995年以降、各地で精力的に耐震診断が進められたことをうけて、2001年に発生した芸予地震では、震源から近い呉市で事前の耐震診断結果と実際の地震による損傷の関係について、直接的な比較が可能となった。そこで本論文では、呉市の鉄筋コンクリート(RC)造小中学校校舎を対象に建物群の耐震性能の把握を行い、被害調査を行う。被害調査では校舎の被害程度をみるとともに各校舎の立地する地盤の特性を計測して、建物の耐震性能と損傷程度との関係について入力地震動の違いを考慮した分析を行う。近年、2001年芸予地震や2003年宮城県北部地震のような中程度の地震動や、2003年十勝沖地震のように大きな地震動であっても、建物被害の程度が比較的軽微にとどまる地震が多く発生している。従来の取り扱いでは、被害の大きいものについて着目され、考察がされてきたが、建物の耐震性能評価という観点から考えると頻度の高い地震に対して、その損傷の程度を定量化することも重要だと考える。また、これらの地震による被害は、建物が弾性的な変形をする過程で生じており、この挙動を忠実に評価するという点で重要である。

2. 耐震診断

2.1 既存 RC 造建築物の耐震診断

わが国の耐震規定は、過去の地震被害を反映して改正が重ねられてきた。例えば1968年十勝沖地震では、それまで耐震性に優れていると考えられていた RC 造建築物の柱のせん断破壊が目立った。これにより1971年に建築基準法が改正されて、とくに柱の靱性を確保するために、帯筋間隔が短く規定された。そして、1971年サンフェルナンド地震は大都市部近郊を襲った地震であり、わが国における都市部の震災対策や、耐震規定を見直すきっかけとなった¹²⁾。しかし、その後の1978年伊豆大島近海地震、宮城県沖地震でもかなりの RC 造建物が被害を受けたことから、1980年には新耐震設計法と呼ばれる建築基準法の大幅な改訂が行われた。耐震規定の改正に伴い既存不適格の建物が生じる。耐震診断はこれら建物の既存不適格の程度や耐震性能を明らかにするものである。耐震診断では、建物の耐震性能を数値で表して評価する。本研究で対象とした校舎は RC 造耐震診断基準^{2), 3)}に基づき評価されている。

RC 造耐震診断基準は、既存の中低層 RC 造建物を対象として、計算レベルの異なる第1次から3次までの診断法を目的に応じて採用する。次数が上がるほどその計算は複雑になるが、精度は向上すると考えられる。耐震性の判定は構造耐震指標 I_s の値が構造耐震判定指標 I_{so} 以上の場合に、必要な耐震性能を満たしていると判断される。

I_s は(1), (2)式により算定する。

$$I_s = E_0 \times S_D \times T \cdots \cdots (1)$$

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

E_0 は構造物の耐震性能を評価する上で基本となる指標で、構造物の保有する耐力を建物の重量で割ったせん断力係数の形で示される強度指標 C と靱性を表す指標 F と各階の補正係数の積で表される。 S_D は形状指標で、構造物の平面形状および立面形状の非整合性を評価するものである。 T は経年指標で、構造物に生じている亀裂や変形、老朽化等の経年劣化を評価する指標である。

I_{so} は(3)式により算定する。

$$I_{so} = E_s \times Z \times G \times U \cdots \cdots (3)$$

E_s は耐震判定基本指標で第1次診断では0.8, 第2次および第3次診断では0.6を基準とする。なお、この値は過去の地震被害から統計的に線引きされたものであり、耐震安全性を保障したものではないことに注意する必要がある。 Z, G, U はそれぞれ地域指標、地盤指標、用途指標を示す。これらの指標は地震活動度、地盤条件、建物の重要性から考慮される値だが、現行では多くの場合 $Z \times G \times U = 1.0$ とされている。

2.2 呉市におけるRC造学校小中学校校舎の耐震性能

呉市は、図1に示すように広島県の南西部に位置し、瀬戸内海に面している。市域面積の54%が標高300~800mの急峻な山塊であり、平坦地が少ない。海岸部は、臨海型工業施設と港湾施設によって占められており、住宅や学校は山塊の急傾斜地にまで広がっている。

小中学校は54校あり、このうち耐震診断の対象となる1981年以前の基準で建築された学校は49校102棟である。呉市の小中学校に対する耐震診断は1996年から始められ、2000年までに全棟評価が

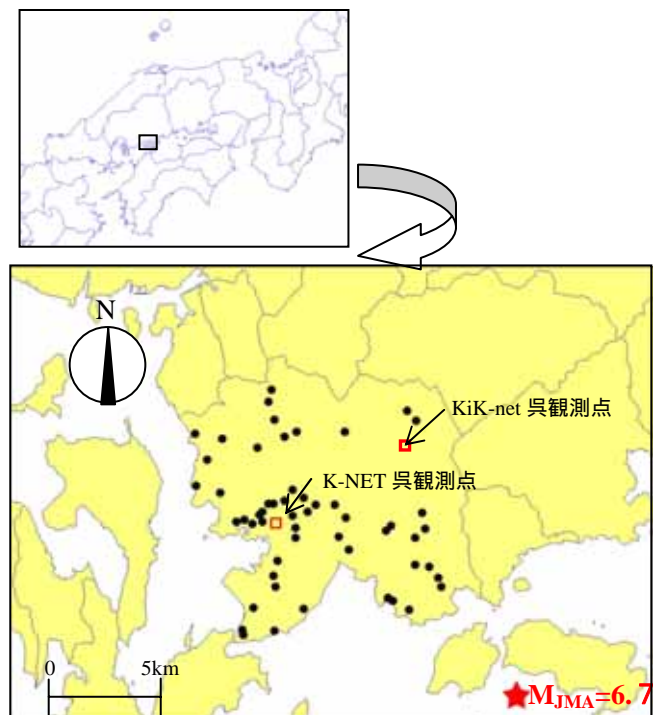


図1 呉市の小中学校およびK-NET, KiK-net 観測点の位置と震源位置(印は小中学校を示す)

終了した。校舎は柱と壁の平面配置から図2に示すように区分することができる¹³⁾。A,B,Cそれぞれの型は、教室を単位として4本,6本,8本の柱で囲む形式である。形式の違いは建物耐力に影響するが、呉市の校舎の多くは教室を6本の柱で囲み、片持ち梁型の開放方廊下をもつB-2の形式である(図3)。開放廊下の校舎は全国的にみると少ないが、呉市の小中学校の約9割がこの形式を採用しており、この地域の学校の特徴となっている(写真1)。この廊下は、建築費の削減や火災時の排煙がしやすいという利点がある。一方、気象条件の変化を受けやすく内装や設備の劣化が早いという問題がある。

校舎は3,4階建てが多く、建築面積200~600m²程度の規模の棟が多く建築されている(図4,5)。竣工年は、1971年の建築基準法施行令改正以前のもの、改正後のものが約半数ずつあり、診断されたものなかには建築後30年を経過した校舎も数多く含まれている(図6)。しかし、著しく老朽化した建物はなく耐震診断に支障はないと考えられる。

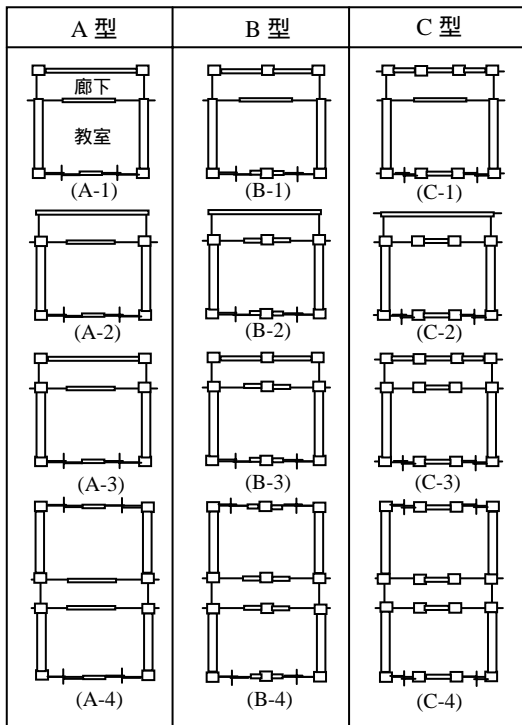


図2 校舎の柱と壁の平面配置からみた構造区分

コンクリートの強度を図7に示す。呉市の校舎は耐震診断の際、棟の各階から1~3本のコアを抜き圧縮強度試験を実施している。そこで、これら(建物階数×1~3本)の平均値を求め、棟のコンクリート強度とした。現行の設計基準強度が21N/mm²以上であることから、約半数の校舎で十分なコンクリート強度を保有していることがわかる。

校舎の構造的な特性を把握するため、図8に校舎の竣工年と壁・柱率の関係を示す。壁・柱率は(4)式から算出される。

$${}_0C_{CW} = \frac{\sum 2.5A_W + \sum 0.7A_C}{ZWA_i} \dots \dots (4)$$

A_Wはその階の対象とする方向に有効な壁断面積の総和、A_Cはその階の柱断面積の総和、Zは地震活動度や地震動強さを考慮するために地域指標、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、2.5, 0.7はそれぞれ壁・柱の終局せん断応力

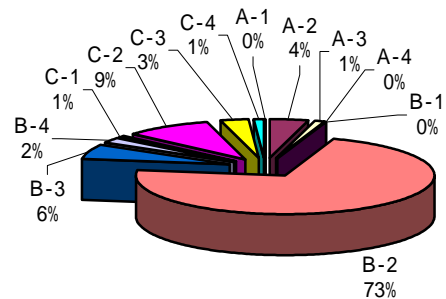


図3 耐震診断済み校舎の構造区分ごとの棟数割合



写真1 呉市内の小中学校に多い開放廊下

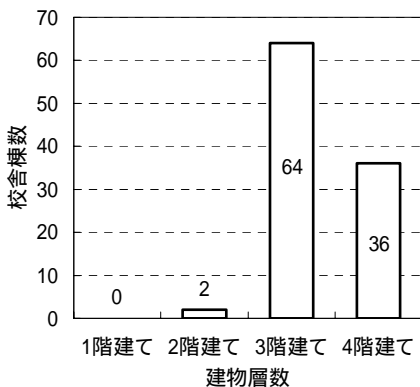


図4 診断済み校舎の建物層数ごとの棟数

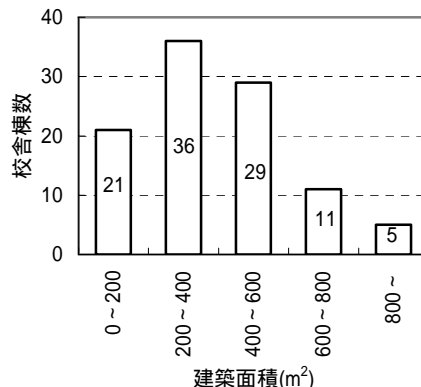


図5 診断済み校舎の建築面積ごとの棟数

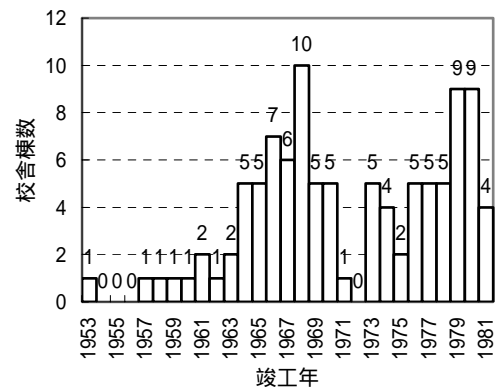


図6 診断済み校舎の竣工年と棟数

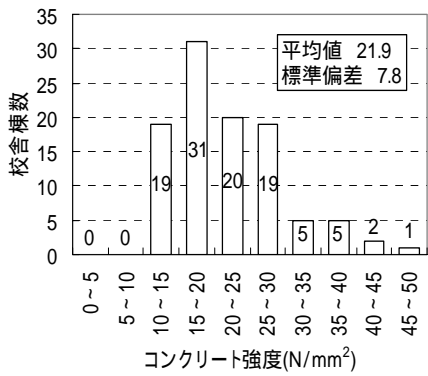


図7 各棟におけるコンクリートコア圧縮強度の平均値

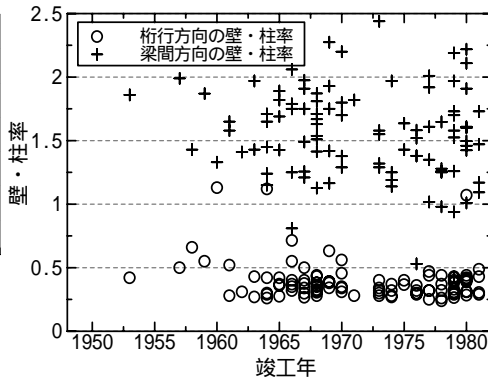


図8 校舎の竣工年と桁行および梁間方向の壁・柱率の関係

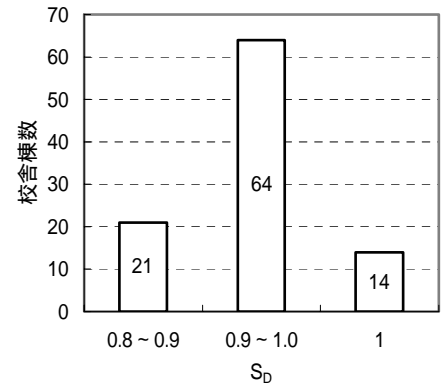


図9 形状指標指標 S_D と校舎棟数

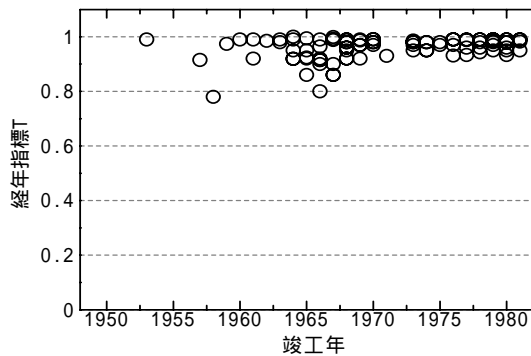


図10 校舎の竣工年と経年指標 T の関係

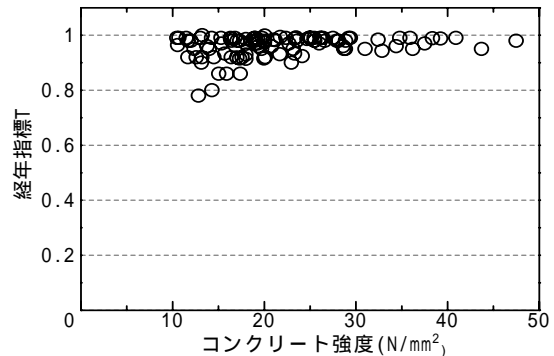


図11 コンクリート強度と経年指標の関係

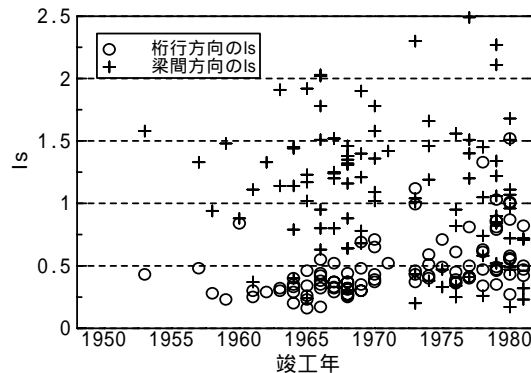


図12 校舎の竣工年と桁行および梁間方向の Is の関係

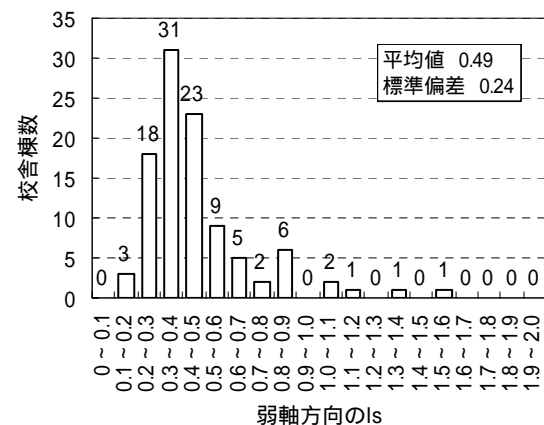


図13 校舎の弱軸方向の Is 分布

度(N/mm²)である。既往の研究⁵⁾において指摘されているように、呉市の校舎も桁行方向と梁間方向の壁・柱率を比較すると、梁間方向の値が大きく壁量が多いことがわかる。これは校舎の平面プランで桁行方向に開口部とり、梁間方向に耐震壁が配置されるためである。両方向において竣工年による壁・柱率の値の変化はほとんどみられない。

形状指標 S_D は建物の平面・立面形状および建物の剛性の平面・立面的分布などの耐震性能に及ぼす影響を定量化する値である。校舎は用途が一定で、棟ごとのプランに大きな違いはなく、形状が整形であるため、基準値 1.0 に近い値をとる(図9)。経年指標 T は構造体に生じている「亀裂」「変形」「老朽化」等の構造的欠陥が建物に及ぼす影響を評価する指標である。この値はコンクリート強度が直接

反映されるのではなく、外観調査から構造部材の亀裂や剥落の程度が考慮されるものである。亀裂や剥落はコンクリートの劣化から進展するものであるため、一部の劣化が進んだ校舎や竣工年の古い校舎で T が低く算出される(図10, 11)。

S_D, T が考慮された Is と竣工年の関係を図12に示す。Is は建物の各階、各方向(桁行、梁間)について算出される。ここでは、第2次診断による結果を用いて棟ごとに各方向の最小 Is をプロットした。桁行方向が弱軸となる場合が多く、呉市では1971年以前に竣工した校舎の弱軸はすべて桁行方向となっている。桁行方向では建物に必要とされる Is が 0.6 以上の校舎は少なく、1971年以前に竣工した校舎の大半が 0.6 以下である。1971年以降に竣工した校舎で Is が向上しているが、これは建築基準法施行令の改正により RC 柱の帯筋間

隔を狭めて靱性を確保したことが耐震性能の向上につながったと考えられる。梁間方向では竣工年による I_s の特徴的な変化はなく、一部の校舎では梁間方向の値が弱軸になっている。弱軸方向の I_s の分布から、 I_s が 0.6 以上ある校舎は全体の 2 割程度である(図 13)。耐震補強を検討することが望ましい I_s が 0.3 以下の校舎も 2 割程度あり、呉市の校舎群は耐震性能の十分でないものを多く含んでいることがわかる。

3. 2001 年芸予地震における建物被害

3.1 地震概要と呉市の被害概要

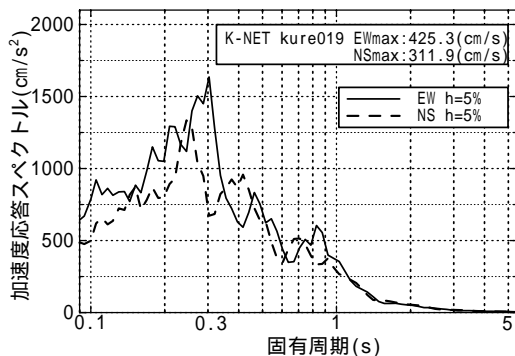
2001 年 3 月 24 日 15 時 28 分に発生した芸予地震は、安芸灘を震源とする地震で、震源位置は東経 132.7 度、北緯 34.1 度、深さ 51km、気象庁マグニチュード 6.7、最大震度 6 弱(大崎町、熊野町、河内町)を記録した。この地震は 1995 年兵庫県南部地震以降、2000 年鳥取県西部地震に続く被害地震である。

この地震により、呉市では石積擁壁の被害が多発した¹⁴⁾。住家に関しては、主に斜面上の石積みや基礎部分の被害が生じ、斜面の中腹部においてとくに被害が大きいことが報告された¹⁵⁻¹⁷⁾。学校も斜面中腹部に位置する校舎での被害が複数報告されている。被害が多数報告された地域のほぼ中心に防災科学技術研究所の地震観測網 K-NET 呉観測点がある。K-NET 呉観測点は呉市役所に隣接する公園内の平坦地に設置されており、ここは埋土の下に砂または砂質土が 20m 程度堆積した地盤である。観測された最大加速度は 425Gal(EW 方向)で、図 14(a)にこの地震動の加速度応答スペクトルを示す。これ

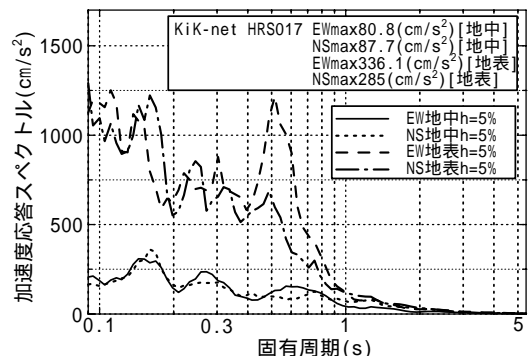
により、この観測点では水平 2 方向ともに 0.25 ~ 0.3 秒付近の短周期成分が卓越していることがわかる。この結果には表層地盤の影響が含まれていると考えられることから、(b)に地震観測網 KiK-net 呉観測点の加速度応答スペクトルを示す。KiK-net では地中および地表で地震動が観測されている。KiK-net 呉観測点は呉大学の中にあり、ここは厚さ 50cm の表土と砂質土の下に砂礫が 16m 程度堆積し、その下は花崗岩の地盤である。地中地震計は地表面から 80m 下の岩盤中に設置しており、水平 2 方向とも 0.15 秒付近の成分が卓越していることが読み取れる。これら K-NET および KiK-net の地震観測記録は、その設置場所の地盤条件から K-NET の記録は 2 種地盤上、KiK-net(地中)の記録は工学的基盤上の地震動と位置づけることができる。この結果をもとに、K-NET 設置点と同じ 2 種地盤に立地する呉市内の学校では 0.25 ~ 0.3 秒付近が卓越する特性をもった地震動が入ったと考えられ、これと地盤の固有周期の重なるところでは、地震動が増幅されて、建物により大きなエネルギーとして入力したものと推測される。

3.2 呉市の小中学校の被害調査

芸予地震による呉市の学校被害は、いくつかの報告により明らかにされている^{11),18)}。しかし、それらは個別建物に関する報告で、被害の詳細や全棟について把握することは困難であった。そこで著者は呉市の小中学校を全棟調査し、被害の詳細と敷地の地盤特性を把握することにした。調査は 2002 年 5 月 28 日から 31 日の 4 日間で行った。その内容は、ヒアリングおよび目視観察により校舎の被害



(a) K-NET 呉観測点の加速度応答スペクトル



(b) KiK-net 呉観測点の加速度応答スペクトル

図 14 芸予地震における水平成分の加速度応答スペクトル

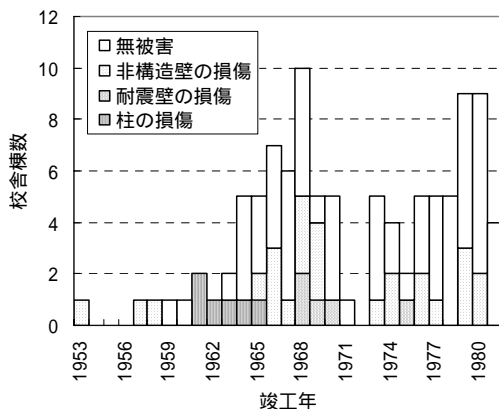


図 15 呉市の校舎の竣工年と建物被害

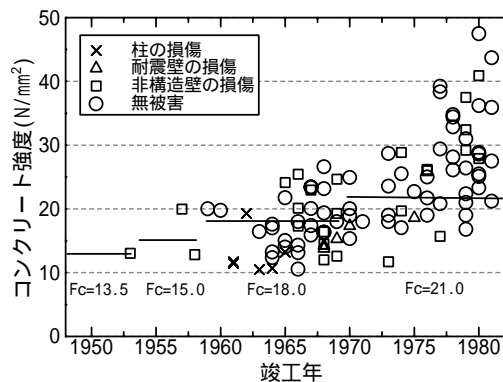


図 16 校舎の竣工年とコンクリート強度

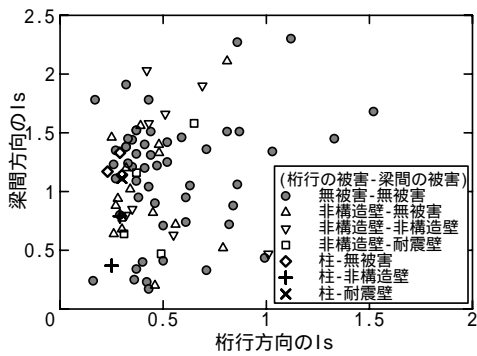


図 17 校舎ごとの I_s と建物被害

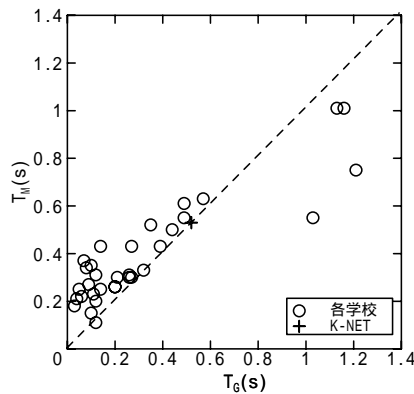


図 18 N 値から算定される地盤の卓越周期 T_G と微動計測から求められる卓越周期 T_M の関係

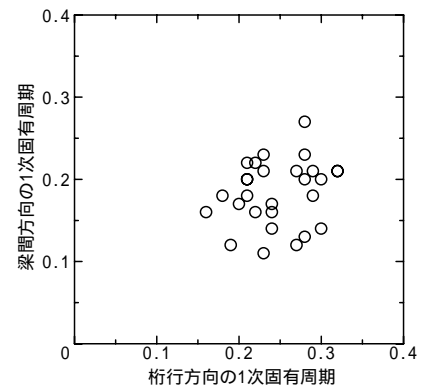
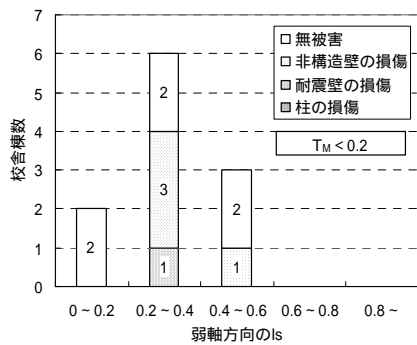
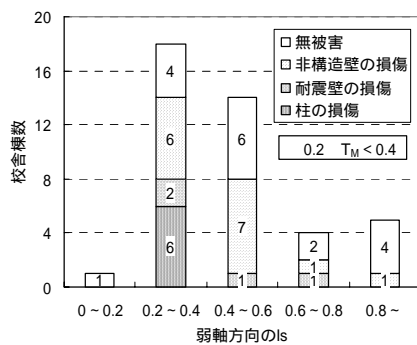


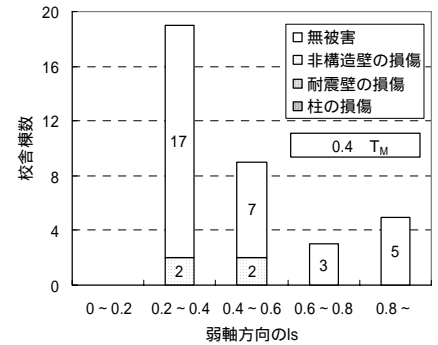
図 19 校舎の桁行方向と梁間方向の固有周期



(a) $T_M < 0.2$ に立地する校舎



(b) $0.2 < T_M < 0.4$ に立地する校舎



(c) T_M に立地する校舎

図 20 建物の地盤特性ごとの I_s と損傷の関係

の種類・程度と被害箇所を確認、さらに地盤特性が被害に及ぼす影響を評価するために校舎近傍において常時微動観測を行った。微動計測には周期 2 秒程度まではほぼ平坦な振幅特性をもつ速度計を用い、100Hz サンプリングで 32,768 個のデータ(約 5.5 分)を連続して取得した。得られた波形は 12.5Hz のローパスフィルタを通した後、16 ビットの A/D 変換を行い、これから振幅が安定している 5 組の 2,048 個のデータを取り出してフーリエ変換し、0.4Hz の Parzen window で平滑化して、水平動 2 成分、上下動 1 成分のスペクトルを求めた。ここでは、水平動スペクトル 2 成分の 2 乗和の平方根を上下動スペクトルで除して求めた H/V スペクトル比¹⁹⁾5 組について平均したものを各学校での H/V スペクトル比とした。

校舎の被害はその損傷箇所と程度から、「柱の損傷」「耐震壁の損傷」「非構造壁の損傷」「無被害」の 4 種類に分類した。ここでは、柱の損傷とは柱にせん断亀裂が生じた校舎、耐震壁の損傷とはラーメンの中に一体化して組み込まれた壁²⁰⁾にせん断亀裂が生じた校舎、非構造壁の損傷とは腰壁・たれ壁等の雑壁が亀裂や、部分的に剥落した校舎、無被害とは被害がみられない校舎およびエキスパンションジョイントの損傷のみでその他の部分に損傷の認められないものと定義した。柱は壁と比較して部材のひび割れ変形角が大きいため、柱が損傷した校舎では、その他に耐震壁や非構造壁の損傷があった。

竣工年ごとの校舎数に損傷の種類をあわせて図 15 に示す。損傷は棟の両方向で程度の大いものを採用した。柱や耐震壁の損傷は 1971 年以前の校舎でみられ、1971 年以降の校舎では無被害あるいは非構造壁の損傷が大半を占める。校舎のコンクリート強度と竣工年

の関係に加えて損傷の程度を図 16 に示す。図中の実線は設計基準強度を示す。柱を損傷した校舎は設計基準強度と比較して、とくにコンクリート強度が低いことが読みとれる。コンクリート強度の高い校舎ほど損傷が軽微であることから、コンクリート強度が建物被害の程度に影響することがわかる。

校舎の両方向の I_s とそれぞれの方向に生じた損傷の種類を記号を変えて図 17 に示す。凡例に示すように、桁行-梁間の順で各方向の損傷の程度を表している。桁行方向の I_s が 0.4 以下の範囲で校舎に被害が生じたものが多いが、無被害の校舎も多く含まれており、関係はそれほど明確ではない。耐震性能と損傷の関係がそれほど明確でないのは、震源距離のほぼ等しい呉市内であっても、立地場所により地震動が異なったであろうことが理由のひとつとして挙げられる。

入力地震動は地盤特性により異なると考えられるので、各学校の校舎付近の地盤の卓越周期を図 18 に示す。各学校では十分な深さまで標準貫入試験が行われており²¹⁾、N 値から地盤の卓越周期(特性値) T_G を算出することができる²²⁾。しかし、 T_G は N 値から各層のせん断波速度を推定し、その値と層厚から算出される値であり、とくに前者の関係式はばらつきが大きいため²³⁾、その精度は高いとはいえない。常時微動の H/V 比を地盤の卓越周期が近似することは、中村²⁴⁾をはじめ多数の事例が報告されている²⁵⁾。そこで図 18 では常時微動観測結果から地盤の卓越周期 T_M を求めて T_G との関係と比較する。 T_M が 0.5 秒以下の範囲では T_G が短く算定される傾向があり、0.5 秒以上の範囲では逆に T_G は長く算定される傾向がある。したがって、

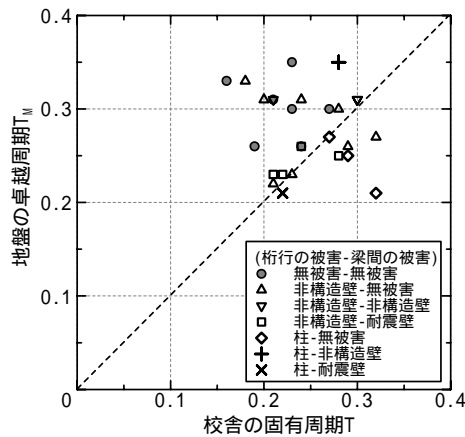


図 21 校舎の 1 次固有周期と被害および地盤卓越周期の関係

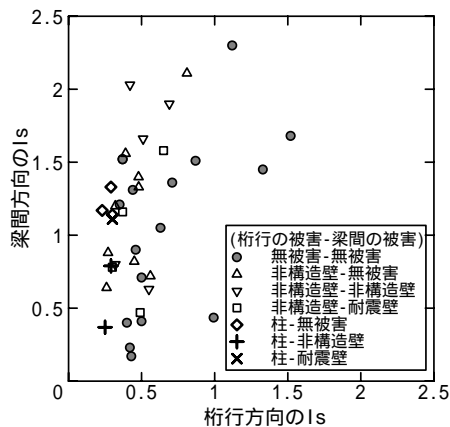


図 22 0.2 $T_M < 0.4$ に建つ校舎の I_s と被害の関係

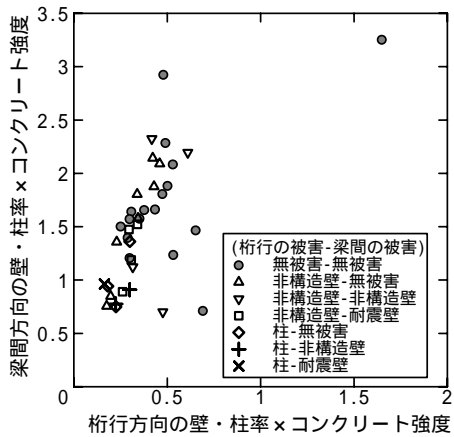


図 23 0.2 $T_M < 0.4$ に建つ校舎の壁・柱率とコンクリート強度から求められる耐力と被害の関係

ここでは微動から求められる T_M を地盤分類に用いる。

校舎の固有周期 T も常時微動計測から求められる値とした。校舎の最上階と近傍の地表で 2 点同時観測を行い、最上階の計測点における水平成分のフーリエスペクトルと地表の計測点における水平成分のスペクトルの比から建物の 1 次固有周期を求めた。3~4 階建ての多い呉市の校舎は、桁行方向で 0.2~0.3 秒、梁間方向で 0.12~0.23 秒付近を固有周期に持つ。壁が多く配置される梁間方向の固有周期は桁行方向の固有周期より短く、1/2 程度であることがわかる(図 19)。

各校舎を地盤特性の似た 3 つのグループに区分して、 I_s と被害の関係を分析する。各グループは、地盤の卓越周期から区分される地盤種別と校舎の固有周期をもとに分類した(図 20)。 T_M が 0.2 秒から 0.4 秒の範囲の地盤上に建つ校舎では損傷が大きく、 I_s の高い校舎でも耐震壁や非構造壁の損傷がみられた。これに対して、 T_M が 0.2 秒未満あるいは 0.4 秒以上の校舎では I_s が低くても無被害あるいは非構造壁の損傷というように軽微な損傷だった。このことから、地盤特性により建物被害の傾向は異なり、耐震性能と建物の損傷に関する分析を行う際には地盤特性を考慮して検討する必要があるといえる。

そこで、地盤特性により T_M が 0.2 から 0.4 秒の範囲に限定して耐震性能と損傷について分析を行う。まず、地盤の卓越周期と校舎の固有周期の関係を図 21 に示す。構造部材の被害は、建物の固有周期と地盤の卓越周期の近い校舎において生じている。さらに芸予地震は図 14(a)に示したように、短周期成分が卓越した地震動を持つことから、建物周期特性、地盤周期特性と地震動特性などの条件が重なったところで被害が発生したと推測される。

次に、耐震性能と被害の関係について検討する。各方向の I_s と損傷程度との関係を図 22 に示す。構造部材の損傷は桁行方向の I_s が 0.3 以下の校舎でみられた。梁間方向が弱軸であり、 I_s の低い校舎が存在するにもかかわらず無被害であることから、建物の損傷は桁行方向の I_s の影響を大きく受けるものと考えられる。一般に耐震診断では、桁行、梁間の耐震性能が分けて考えられる。学校のように一方方向に多く壁を配置する建物ではその方向の I_s が高く評価され、損傷しにくいように受け取れがちであるが、図 22 にもあるように梁間方向の I_s が 1.0 以上あっても耐震壁にせん断亀裂が入ることもある。これは、桁行方向の低い耐震性能の影響を受けたもので、実際に建物の耐震性能を評価する際にはこれら両方向の耐震性能を総合して評価する必要がある。

また、耐震診断がなかなか進まない背景をうけて、壁や柱の断面積から耐震性能の簡略な把握が提案されている⁴⁾。これを踏まえ、コンクリート強度と壁・柱率から建物の見かけ上の耐力を求め、その値を簡易に計算される耐震指標として建物損傷との関係を分析する(図 23)。なお、ここで用いる壁・柱率は(4)式から算出される値とする。 I_s は強度と靱性から倒壊の危険性を評価するのに対して、壁・柱率とコンクリート強度から求まる見かけ上の耐力は強度により耐震性能を評価するものである。構造部材の被害は建物両方向でこの耐力の小さい校舎においてみられた。呉市の校舎の場合、同じプランのものが多いため、建物ごとの壁・柱率に大きな違いはみられなかった。そのため、コンクリート強度の影響を大きく受けてこのような関係を示したと考えられる。図 22 に示したように I_s と被害の関係では建物全体の損傷は主に弱軸である桁行方向の値で決まり、それぞれの方向の被害は桁行方向では I_s との関係がみられるが、梁間方向ではそれほど明確でない。一方、図 23 に示す見かけ上の耐力と被害の関係では、建物全体およびそれぞれの方向において耐力と損傷の程度に関係がみられる。ここでは芸予地震の一例を示したのみで、この見かけ上の耐力を耐震性能指標として用いるにはさらに検討を重ねる必要があるが、耐震診断あるいは補強を行うための順序付けには適用の可能性のあるものと考えられる。

4. まとめ

2001年芸予地震におけるRC造学校校舎の被害について、校舎群の耐震性能を把握するために、呉市の小中学校の全棟に対し被害調査と常時微動観測を実施し、立地場所による入力地震動の違いを考慮して耐震性能と建物被害の関係について分析を行った。その結果を以下にまとめる。

- 1) 耐震診断の行われた呉市の小中学校の多くが、6本の柱から構成された教室に開放方廊下をもつ特徴的なプランである。これまで校舎は桁行方向を弱軸にとることが指摘されてきたが、呉市の校舎も、壁・柱率および I_s とも、その多くが桁行方向を弱軸にとる。建物に必要とされる I_s が0.6以上ある校舎は全体の約2割で、 I_s の十分でない校舎が多く存在するが芸予地震では無被害の校舎も多かった。
- 2) 呉市が経験した地震動レベルでは、構造部材にせん断亀裂を生じた校舎の割合は小さかった。柱にせん断亀裂が生じた建物のコンクリート強度は極めて低く、コンクリート強度が高くなるほど軽微な損傷であることが明らかになった。コンクリート強度が校舎被害に強く関係していることが示唆される。
- 3) 同程度の耐震性能をもつ校舎であっても、地盤特性により損傷の程度は異なる。芸予地震では短周期の地震動が卓越し、建物固有周期と地盤卓越周期がこれと重なるようなところでは耐震性能が高い校舎であっても損傷を受けている。したがって、耐震性能と被害の関係を分析するときには、地盤特性を考慮する必要がある。
- 4) 芸予地震における呉市の校舎は、主として弱軸である桁行方向の I_s の値が損傷の程度に関係した。さらに、見かけ上の耐力が建物の各方向において損傷の程度に関係がみられることが明らかになった。

謝辞

ここで用いた耐震診断結果は広島県建築士事務所協会、建築物耐震診断等評価委員会より提供いただきました。地盤調査では呉市教育委員会、各学校校長のご支援をいただきました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告 建築編-2 プレストレストコンクリート造建築物 鉄筋コンクリート造構造壁構造建築物，1997.7
- 2) 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，2001.10
- 3) 日本建築防災協会：1990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，1990.12
- 4) 文部科学省：学校施設耐震化推進指針，2003.7
- 5) 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
- 6) 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 構造耐震指標と被災程度，日本建築学会学術講演梗概集 1989年度C，pp.869-870，1989.10
- 7) 岡田恒男，壁谷澤寿海，中埜良昭，前田匡樹，田才晃，加藤大介，市之瀬敏勝，北山和宏：鉄筋コンクリート造学校建築の耐震診断指標値と被災度，第10回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.177-182，1998.11
- 8) 前田匡樹，迫田丈志，田才晃，加藤大介，壁谷澤寿海：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，日本建築学会学術講演梗概集 C-2，pp.379-380，1996.9
- 9) 日本建築学会：1995年兵庫県南部地震鉄筋コンクリート造建築物の被害調査報告集 第 編学校建築，1997.3
 - 10) 林康裕，鈴木祥之，宮腰淳一，渡辺基史：耐震診断結果を利用した既存RC造建築物の地震リスク表示，地域安全学会論文集，No.2，pp.235-242，2000.11
 - 11) 日本建築学会：2000年鳥取県西部地震災害調査報告 2001年芸予地震災害調査報告，2001.10
 - 12) 柴田明德：最新耐震構造解析，森北出版，pp.287-288，2001.3
 - 13) 細田招司，広沢雅也，清水泰，周東建：関東地方 A 県における学校校舎の耐震性能，日本建築学会学術講演梗概集 C-2，pp.625-626，1998.9
 - 14) 重松尚久，森伸一郎，河村進一，依司：2001年芸予地震における広島県内のアンケート調査および呉市の被害について，土木学会第57回年次学術講演会，pp.1503-1504，2002.9
 - 15) 鎌田泰子，高田至郎，上野淳一：斜面地形の住家被害と地震動特性～平成12年芸予地震における呉市の場合～，日本地震工学学会論文集 第3巻 第2号，2003.5
 - 16) 松田昌之，津川澄夫，三浦賢治，山中浩明：2001年芸予地震における沖積地盤の応答特性，第11回地震工学シンポジウム，pp.247-250，2002.11
 - 17) 林康裕，鈴木祥之，後藤正美，小嶋伸仁：2001年芸予地震における木造家屋の被害の分析，日本建築学会構造系論文集 No.556，pp.35-42，2002.6
 - 18) 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 報告書，2002.3
 - 19) 時松孝次，新井洋：レイリー波とラブ波の振幅比が微動の水平鉛直スペクトル比に与える影響，日本建築学会構造系論文集，No.511，pp.69-75，1998.9
 - 20) 嶋津孝之，福原安洋，佐藤立美：鉄筋コンクリート構造，森北出版，pp.52-53，pp.77，1992.3
 - 21) 中国地方基礎地盤研究会：広島県地盤図'97，1997.1
 - 22) 社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 耐震設計編，pp.25-26，2002.3
 - 23) 田村勇，山崎文雄：K-NET と横浜市強震計ネットワークの地盤調査データに基づくS波速度推定式，土木学会論文集 No.696/ -58，pp.237-248，2002.1
 - 24) 中村豊：常時微動計測に基づく表層地盤の地震動特性の推定，鉄道総研報告，pp.18-27，1988.
 - 25) 大熊裕輝，松岡昌志，山崎文雄，原田隆典：宮崎県における常時微動スペクトル比を用いた地震動の推定，土木学会論文集 No.696/ -58，pp.261-272，2002.1