

建物被害に対応した地震動強さを損傷を受けた整形な

鉄筋コンクリート造建物から求める方法

Method of Estimating Seismic Intensity Corresponding to Buildings Damage
from Damaged Regular Reinforced Concrete Buildings

小杉慎司¹, 境有紀²

Shinji KOSUGI¹, Yuki SAKAI²

¹筑波大学大学院システム情報工学研究科 大学院生

Graduate Student, Graduate School of Systems and Information Eng., Univ. of Tsukuba

²筑波大学大学院システム情報工学研究科 助教授 工学博士

Assoc. Prof., Graduate School of Systems and Information Eng., Univ. of Tsukuba, Dr. Eng

SUMMARY: We proposed a method of estimating seismic intensity by using resistant capacity and damage of regular reinforced concrete buildings. Seismic intensity based on vulnerability function or response spectra in period ranges 1-2s which correspond to heavy damage to buildings and 0.5-1s which correspond to moderate damage to buildings is used as seismic intensity. Resistant capacity and damage of regular reinforced concrete buildings is defined as base shear coefficient and a deformation angle based on damage ratio, respectively. By using past strong motion records and damage ratio of buildings in the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, we formulated an equation of estimating seismic intensity using base shear coefficient multiplied by a distortion angle. Finally, we calculated seismic intensity at Kitamura Elementary School which had heavy damage in the 2003 Miyagi-ken Hokubu Earthquake .

1 はじめに

実際の建物被害と対応した地震動強さの面的分布を知ることが、大地震発生直後の迅速かつ的確な対応を可能にし、更には、今後発生する地震の被害想定をきめ細かく行うことができるなど地震防災上重要である。近年、気象庁や地方自治体の設置する震度計、防災科学研究所のK-NET、KiK-netなど強震観測網の整備により数多くの強震記録が得られるようになってきたが、表層地盤や直下地震での震源メカニズム等の影響により局所的に変化する地震動強さの面的分布を正確に把握するのには密度が不足している。例えば、2003年宮城県北部地震では、観測点の設置されている場所から2~4km離れた南郷町二郷、河南町広淵において甚大な被害を受けている建物が多く、大きな揺れであったと考えられているが、強震記録は取れていない^[1]。

地震動強さの面的分布を推定する方法として、従来、墓石の転倒率や、木造家屋の被害が用いられてきた^[2]。しかし、墓石の転倒率の場合、設置状況により転倒率が大きく変化してしまうこと、墓石の転倒から導かれる加速度と建物被害とは相関が低いことが指摘されており^[2]、木造家屋の被害は、耐震性能に地域差があるという問題がある。

そこで、地震動強さの面的分布を推定する対象物として、学校や役所建物などの整形な鉄筋コンクリート（以下、RC）造建物に着目した。これらの建物は人の住んでいる

地域に1~2kmの一定間隔で存在している。RC造建物は地域によらず均質で、整形な建物であれば解析が容易であり耐震性能を定量的に評価できるとともに被災度判定^[3]により定量的に被害レベルを把握することができる。

建物の被害程度は地震動強さだけではなく、建物の耐震性能にも依存する。地震動強さが同じ場合、建物の耐力が大きければ被害は小さく、耐力が小さければ被害は大きくなる。この関係から、耐震性能と損傷度の積により地震動強さを推定できる可能性がある。

そこで、過去の大きな地震における強震記録によって地震動強さを求め、観測点周辺の整形なRC造建物の耐震性能と損傷度の積との関係を検討した。また、以上の方法では十分なサンプル数が得られなかったため、1995年兵庫県南部地震における被害調査の建物被害率から地震動強さを求め、整形なRC造建物の耐震性能を含めた被害と相関をみた。以上の2つを検討して耐震性能と損傷度から地震動強さを推定する式を導いた。そして、導いた式を用いて、2003年宮城県北部地震で大きな被害を受けたが強震記録が取れていない北村小学校の地震動強さの推定を試みた。

2 耐震性能・損傷度・地震動強さの評価方法

建物の被害程度が地震動強さだけでなく、保有する耐力に依存していることを考慮すると、損傷度、耐震性能と地

震動強さの関係は式(1)のように表すことが出来る．

$$\text{損傷度} = \frac{\text{地震動強さ}}{\text{耐震性能}} \quad (1)$$

この関係式を変形することで、耐震性能と損傷度の積で地震動強さを表現できる．整形なRC造建物の耐震性能はベースシア係数(以下、 C_y)、損傷度は最大応答変形角(以下、変形角 R)を用いることとし、その積を $C_y R$ と表す．耐震性能の指標として用いる C_y は、整形な建物において構造図面の部材断面寸法とコンクリート設計基準強度から、式(2)^{[3][4]}を用いて求める．

$$C_y = \frac{\tau_c A_c + \tau_w A_w}{w \sum A_f} \quad (2)$$

ここで、 τ_c :柱の終局せん断応力度(MPa)、 A_c :1階柱断面面積の合計(m^2)、 τ_w :壁の終局せん断応力度(MPa、 τ_w は両側柱付壁 w_1 、片側柱付壁 w_2 、柱なし壁 w_3 の区別をする)、 A_w :1階壁断面面積の合計(m^2)、 w :単位面積当たりの建物重量(N/m^2 、 $0.12kN/m^2$ と仮定)、 A_f :1階以上の延べ床面積(m^2)である．この方法は、耐震診断基準^[5]の1次診断にほぼ対応するが、終局せん断応力度は、志賀による検討^[3]で使われた $\tau_c = 1.2MPa$ 、 $\tau_w = 3.3MPa$ が1968年十勝沖地震以前のコンクリート強度 $F_c = 18MPa$ ^[5]に対応しているものとして、 $\tau_c = F_c/15$ 、 $\tau_w = 11F_c/60$ 、 $\tau_w = 11F_c/90$ 、 $w_3 = 11F_c/180$ と変化させた． F_c が不明な場合、1968年より前に竣工した建物で $F_c = 18MPa$ 、1968年以降に竣工した建物で $F_c = 21MPa$ と仮定する．

損傷度の指標として用いる変形角 $R(\%)$ は、被災度判定基準^[6]による建物躯体の損傷割合 D を部材試験^[7]の結果と対応させることで設定した^[8](Table 1)．ただし、損傷割合 $D = 50$ で倒壊と判断され、倒壊より大破の値が大きくなる場合があるので、大破の最大値である $D = 100$ を倒壊時の損傷割合とし、変形角 R は大破の関係式に $D = 100$ を代入した値 $R = 4.88\%$ を用いることにした．

Table 1 Relationship between damage rate and distortion angle

被災度区分	損傷割合 D	関係式
被害軽微	$D \leq 5$	$R = 0.08D + 0.4$
小破	$5 < D \leq 10$	$R = 0.14D + 0.1$
中破	$10 < D \leq 50$	$R = 0.0375D + 1.125$
大破	$50 < D$	$R = 0.0375D + 1.125$
倒壊	$D = 100$	$R = 4.88$

地震動強さを表す指標には、建物被害と相関を持つように提案された震度^{[9][10]}を用いる．今回用いる震度算定式は、建物の周期が、大破、倒壊の大きな被害で1-2秒、中破、小破、被害軽微の中小被害で0.5-1秒に伸びる等価周期の概念に基づき、強震記録と観測点周辺の建物被害との対応から導出したものである．強震記録より求めた速度応答を式(3)、(4)に代入することで震度が求まる．

$$I_M = 2.030 \times \log(V_M) + 1.251 \quad (3)$$

$$I_H = 2.171 \times \log(V_H) + 1.002 \quad (4)$$

ここで、 I_M :0.5-1秒震度、 V_M :0.5-1秒速度応答、 I_H :1-2秒震度、 V_H :1-2秒速度応答である．

3 強震記録より求めた地震動強さによる検討

まず、過去の大地震において強震記録が得られた観測点周辺で被害を受けた整形なRC造建物を用い、地震動強さと建物被災度の関係について検討した．過去の大地震で強震記録が得られた観測点から300m以内に存在する整形なRC造建物について、被害が生じた方向で C_y を計算し、変形角 R は損傷度 D が不明な建物については被災度区分における平均値(例えば、小破なら $0.14 \times 7.5 + 0.1 = 1.15\%$)とした．観測点1点につき複数の建物がある場合、平均した $C_y R$ を用いた．

該当する10棟(Table 2)は、被害軽微、小破、中破の中小被害なので、強震記録の水平2方向ベクトル和から、0.5-1秒平均速度応答を計算し、式(3)に代入することで震度を求めた．震度- $C_y R$ 関係をFig. 1に示す．観測点毎に平均するとサンプル数は6点と少なく、大破以上の被害を受けた建物がなかったため大きな被害についての検討が出来ておらず相関も低い．

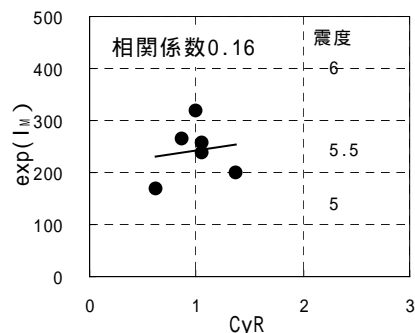
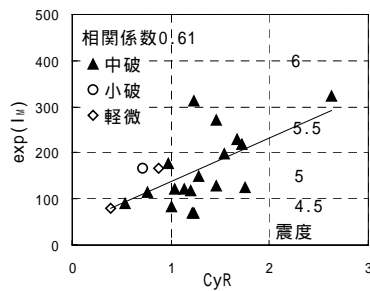


Fig. 1 Relationship between Seismic intensity from strong motion and $C_y R$

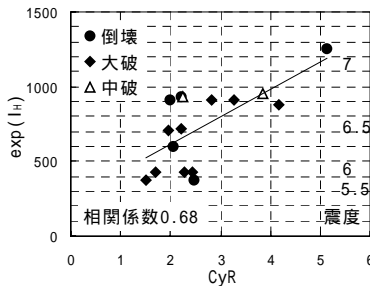
Table 2 Damaged regular reinforced concrete buildings around the seismic station

地震名	観測点	建物名	L	F_c	C_y	DL	R	V_M	I_M
1993年釧路沖	釧路JMA	釧路JMA	0	21	1.16	小破	1.15	119	5.47
1993年釧路沖	釧路JMA	北海道開発庁	50	21	0.67	小破	1.15	119	5.47
1994年三陸はるか沖	八戸市役所	八戸市役所旧館	0	15	0.47	中破	2.25	131	5.55
1995年兵庫県南部	本山第一小	本山第一小南棟	0	18	1.46	軽微	0.6	136	5.58
1995年兵庫県南部	本山第一小	本山第一小西棟	0	18	0.75	小破	1.15	136	5.58
1995年兵庫県南部	尼崎高架橋	阪神養護南	300	18	0.65	中破	2.67	99	5.3
1995年兵庫県南部	尼崎高架橋	城内小	300	15	0.42	中破	2.4	99	5.3
1995年兵庫県南部	関電総合技研	小園小北棟	200	15	0.68	小破	1.15	166	5.76
1995年兵庫県南部	関電総合技研	小園小南棟	200	15	0.6	中破	2.04	166	5.76
2003年宮城県北部	鹿島台町役場	鹿島台町役場	0	18	0.53	小破	1.15	83	5.14

L:建物と観測点の距離(m)、 F_c :コンクリート設計基準強度(MPa)、 C_y :ベースシア係数、DL:被災度区分、R:損傷割合 D に対する変形角 R 、 V_M :0.5-1秒速度応答(cm/s)、 I_M :0.5-1秒震度



(1) Moderate damage



(2) Heavy damage

Fig. 2 Relationship between seismic intensity from ratio of buildings damage and CyR

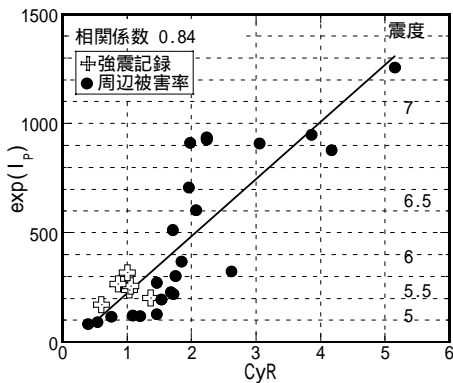


Fig. 3 Relationship between seismic intensity and CyR

4 周辺の建物被害から求めた地震動強さによる検討

そこで、1995 年兵庫県南部地震の被害調査^[11]から被害を受けた整形なRC造建物周辺の建物被害率を求め、それを震度に交換することでCyRとの関係を検討した。対象となる整形なRC造建物は詳細図面が入手できたものから、無被害、曲げ破壊した建物、偏心が大きい建物、被害が最も大きかった階が1階以外のものを除いた。

被害を受けた整形なRC造建物の周辺の建物被害率として整形なRC造建物を中心とした半径200mの円を描き、そこにかかる町丁目の低層建物(戸建住宅、集合住宅、商店、事務所)について、全壊率、全半壊率(半壊以上の被害建物の割合)を求めた。建物被害に相関がある震度の定式化の際に用いた被害関数^[10]を式変形することにより、整形なRC造建物が大きな被害の場合は全壊率を用い式(5)から、中小被害の場合は全半壊率を用い式(6)からそれぞれ震度を計算する。

$$I_M = (-1(D_M) + 9.308) / 1.155 \quad (5)$$

Table 3 Ratio of buildings damage around the damaged regular reinforced concrete building in the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake

学校名	Cy	DL	R	D _H	D _M	I _M	I _H
本山第一小南棟	1.46	軽微	0.60	8.6	18.3	5.1	6.0
水堂小本館	0.58	軽微	0.67	0.7	2.9	4.4	5.4
本山第一小西棟	0.75	小破	0.95	8.6	18.3	5.1	6.0
大社幼稚園保育部	1.60	中破	1.64	36.7	52.7	5.8	6.6
神戸女学院大高中3号館	0.97	中破	1.77	17.1	47.5	5.4	6.3
武庫南小南棟	0.43	中破	1.77	2.6	7.2	4.7	5.7
小園小北校	0.68	中破	1.79	0.3	7.5	4.2	5.3
武庫北小南校舎	0.55	中破	1.90	3.1	6.8	4.8	5.7
上ヶ原中北校舎	0.50	中破	1.95	10.0	24.5	5.2	6.1
上ヶ原小北館	0.64	中破	1.99	6.3	27.0	5.0	5.9
武庫北小北校舎	0.56	中破	2.00	3.1	6.8	4.8	5.7
小園小南校	0.60	中破	2.04	0.3	7.5	4.2	5.3
広田小北校舎	0.78	中破	2.16	18.8	41.0	5.4	6.3
城内中分校本館	0.22	中破	2.39	1.0	4.7	4.5	5.5
城内小	0.42	中破	2.40	0.7	5.5	4.4	5.4
須磨高本館	0.60	中破	2.42	3.7	38.0	4.8	5.8
県立西宮高本館	0.49	中破	2.43	3.0	21.4	4.8	5.7
県立芦屋高本館	0.50	中破	2.47	34.6	52.5	5.7	6.6
マリスト国際北棟	0.58	中破	2.51	26.7	61.4	5.6	6.4
北野小北館	0.57	中破	2.69	13.3	30.4	5.3	6.2
阪神養護南棟	0.65	中破	2.71	3.6	12.5	4.8	5.8
原田中東館	1.00	中破	2.22	53.2	*70.7	6.1	6.8
本山第二小本館	1.96	中破	1.97	54.2	*69.4	6.1	6.9
本山中本館東棟	1.36	大破	3.07	48.8	*64.2	6.0	6.8
上ヶ原小南館	0.48	大破	3.11	6.3	27.0	5.0	5.9
灘小新館	0.60	大破	3.26	33.9	51.3	5.7	6.6
上ヶ原中南校舎	0.51	大破	3.33	10.0	24.5	5.2	6.1
神戸理容美容専門旧館	0.89	大破	3.65	51.0	72.4	6.0	6.8
神戸理容美容専門増築	0.71	大破	4.00	51.0	72.4	6.0	6.8
上ヶ原中中校舎	0.59	大破	4.13	10.0	24.5	5.2	6.1
上ヶ原中西校舎	0.54	大破	4.20	10.0	24.5	5.2	6.1
県立芦屋高南館	0.50	大破	4.41	34.6	52.5	5.7	6.6
上ヶ原小東館	0.51	倒壊	4.88	6.3	27.0	5.0	5.9
飛松中5号館	0.42	倒壊	4.88	24.3	58.5	5.6	6.4
鷹匠中東館	0.41	倒壊	4.88	51.3	*66.6	6.0	6.8
市神戸商高管理棟	0.46	倒壊	4.88	52.6	*64.8	6.0	6.8
大橋中北校舎東側	1.06	倒壊	4.88	72.6	*85.0	6.4	7.1

Cy: ベーシア係数, DL: 被害度区分, R: 部材試験による変形角R, D_H: 全壊率(%), D_M: 全半壊率(%)*は全壊が半壊率の1/3を超えているもの, I_M: 全半壊率被害関数から求めた0.5-1秒震度, I_H: 全壊率被害関数から求めた1-2秒震度

$$I_H = (-1(D_H) + 12.03) / 1.770 \quad (6)$$

ここで、D_M: 全半壊率(%), D_H: 全壊率(%), $\Phi^{-1}(x)$: 標準正規分布の累積確率の逆数である。また、被災度区分が大破以下でも全壊率が半壊率の1/3を上回った場合は全壊する周期の影響が強いので式(6)で計算する。得られた37棟のCy, 変形角R, 震度をTable 3, 震度-CyR関係のうち中小被害に関してFig. 2(1), 大きな被害に関してFig. 2(2)に示す。

そして、Fig. 2で同じ敷地内にある建物についてはCyRを平均し、3章の検討結果と合わせた震度-CyR関係をFig. 3に示す。Fig. 3の近似曲線から整形なRC造建物のCyRから震度を推定する式(7)が導かれる。

$$I_P = \log(239.9 \times CyR - 16.9) \quad (7)$$

ここで、I_P: 推定震度である。

参考までに全く同様の方法で、気象庁計測震度を推定する式(8)が得られる。ただし、気象庁計測震度は建物被害との相関が低くなることに注意する必要がある。

$$I_J = \log(322.3 \times CyR - 10.8) \quad (8)$$

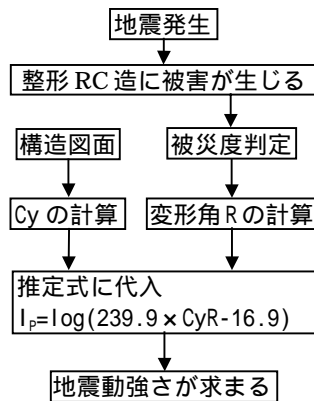


Fig. 4 Flow of estimating seismic intensity

ここで、 I_p ：気象庁計測震度である。

地震動強さの推定手順を Fig. 4 に示す。地震が発生して整形な RC 造建物に被害が生じた場合、被災度判定により損傷割合 D を求め、Table 1 に示す被災度区分に対応した関係式より変形角 R が求まる。また、床、柱、壁の部材寸法とコンクリート強度から C_y が求まる。 C_y と変形角 R を推定式に代入することによって地震動強さとして震度が求まる。

5 地震動強さの推定例

4 章で求めた推定式を用いて、2003 年宮城県北部地震で大きな被害を受けた北村小学校における地震動の強さを推定した。北村小学校はこの地震の震源となった旭山丘陵の東麓に位置し、最寄りの強震観測点まで 2km 程離れており強震記録は取れていない。建物は 1972 年に建設された、桁行き方向がラーメン構造、梁間方向が耐震壁付ラーメン構造の典型的な学校校舎である。Fig. 5 に北村小学校の平面図を示す。被害を受けた桁行方向の C_y を式(2)から求める。

被害は 1 階南面の柱 3 本がせん断破壊し、その他多くの柱、袖壁付き柱にも大きなせん断ひび割れが多数生じるなど桁行き方向に大きな被害を受けており^[12]、被災度判定によって損傷割合 $D = 54$ の大破と判定された。これを Table 1 の被災度区分が大破の関係式に代入することで変形角 R を求める。

C_y と変形角 R を式(7)、(8)に代入して、 $I_p = 6.5$ 、 $I_j = 6.8$ （ともに震度 7 相当）が求まる。推定した震度 7 は河南町広淵を囲む強震記録の取れた地点の最大の震度 6 強より大きく、北村小学校周辺が局所的に大きく揺れたことを示す結果となった。

6 まとめ

整形な RC 造建物の耐震性能と損傷度の積によって実際の被害建物と対応した地震強さの推定式を提案した。耐震性能はベースシア係数 C_y 、損傷度は変形角 R を被災度判定基準による建物躯体の損傷割合 D から求め、これらの積 $C_y R$ から建物被害に対応した震度を推定することができる。推定式を用い、2003 年宮城県北部地震で強震記録の取れていない河南町広淵に位置する北村小学校での地震動強さを検討した結果、周辺の強震記録より大きな震度

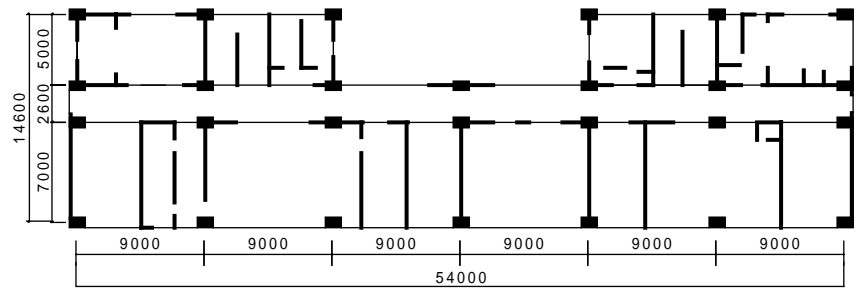


Fig. 5 First floor plan of Kitamura Elementary School

が推定された。

謝辞

建物被害データは文献^[11]のものを使用させていただきました。建物被害データ収集では、東北大学前田匡樹先生にご協力いただきました。強震記録は、気象庁、建築研究所、震災予防協会、関西地震観測研究協議会から提供していただきました。

参考文献

- [1] 境有紀，瀧澤一起，坂上実：強震観測点周辺の建物被害状況，2003 年宮城県北部地震シンポジウム 地震から 6 ヶ月震源域の地盤調査・地震災害調査で何が解明されたか，pp.49-56，2004.1.
- [2] 宇津徳治，嶋悦三，吉井敏敏，山科健一郎：地震の辞典 第 2 版，朝倉書店，pp.370，2001.
- [3] 志賀敏男：構造物の振動，大学講座建築学構造編 2，257-264，1976.
- [4] 日本建築センター：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 版，pp.8，1997.
- [5] 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付解説，pp.61，1977.
- [6] 日本建築防災協会：被災建築物等の被災度判定基準および復旧技術指針(RC 造)，1991.
- [7] 文野正裕，幸村信行，前田匡樹，壁谷澤寿海：軸方向変形拘束を受ける RC 梁部材の挙動に関する実験研究，コンクリート工学会年次論文報告集，Vol.21，No.3，pp.517-522，1999.
- [8] 境有紀，吉岡伸悟，瀧澤一起，壁谷澤寿海：1999 年台湾集集地震に基づいた建物被害を予測する地震動の破壊力指標の検討，日本建築学会構造系論文集，第 549 号，pp.43-50，2001.
- [9] 境有紀，瀧澤一起，神野達夫：建物被害率の予測を目的とした地震動の破壊力指標の提案，日本建築学会構造系論文集，第 555 号，pp.85-91，2002.
- [10] 境有紀，神野達夫，瀧澤一起：震度の高低によって地震動の周期帯を変化させた震度算定法の提案，日本建築学会構造系論文集，第 585 号，pp.71-76，2004.11.
- [11] 建設省建築研究所：平成 7 年兵庫県南部地震被害調査最終報告書，1996.
- [12] 井上範夫，前田匡樹，堀則男：建築構造物の被害調査-RC 造を中心として，2003 年宮城県北部地震シンポジウム 地震から 6 ヶ月震源域の地盤調査・地震災害調査で何が解明されたか，pp.65-70，2004.1.

建物被害に対応した地震動強さを損傷を受けた整形な鉄筋コンクリート造建物から求める方法

小杉慎司* (筑波大), 境有紀 (筑波大)

Method of Estimating Seismic Intensity Corresponding to Buildings Damage from Damaged Regular Reinforced Concrete Buildings

Shinji KOSUGI* (Univ. of Tsukuba), Yuki SAKAI (Univ. of Tsukuba)

地震動強さの面的分布を推定する対象物として、学校や役所建物などの整形なRC造建物に着目した。これらは、人の住んでいる地域に一定間隔で存在し、数は少ないものの地域によらず均質で、被災度判定により被害程度を定量的に判断できる。整形であれば解析が容易で耐震性能を定量的に評価することもできる。

そこで、建物の被害程度が地震動強さと耐震性能に依存することから、整形なRC造建物の耐震性能と損傷度の積から地震動強さの推定を試みた。耐震性能にはベースシア係数 C_y 、損傷度には変形角 R (被災度判定基準の損傷割合 D から求める)、地震動強さには等価周期に基づく建物被害に対応した震度を用いた。

これらの関係を決定するために、過去の大地震において得られた強震記録と1995年兵庫県南部地震の被害調査を用いた。その結果、Fig. 1に示す震度- C_yR 関係が求まり、近似曲線から整形なRC造建物の C_yR から震度 I_p を推定する式(1)が導かれた。

$$I_p = \log(239.9 \times C_y R - 16.9) \quad (1)$$

Fig. 2に示す手順で、2003年宮城県北部地震で大きな被害の見られた河南町広淵に位置する北村小学校での地震動強さを検討したところ、震度7相当となり、周辺で取れた強震記録より大きな震度が推定された。

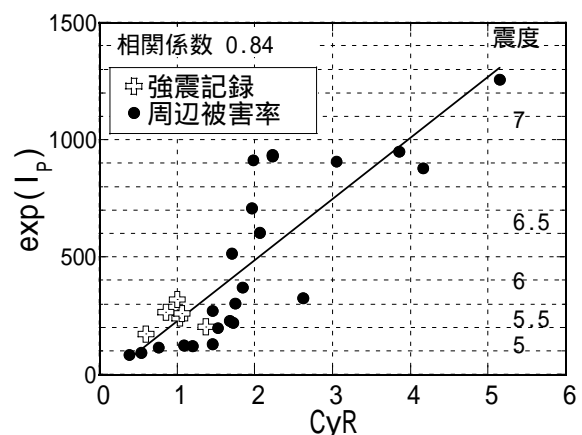


Fig. 1 Relationship between seismic intensity and $C_y R$

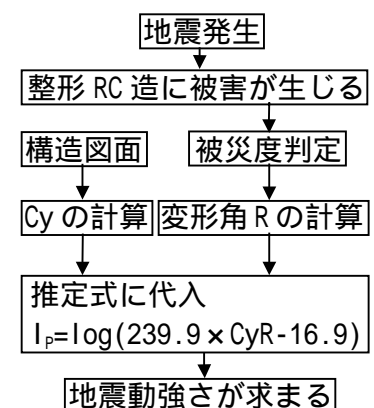


Fig. 2 Flow of estimating seismic intensity