

# 仙台市における鉄筋コンクリート造学校建築物の耐震性能の調査と地震被害の予測

# SEISMIC PERFORMANCE EVALUATION AND SEISMIC DAMAGE PREDICTION OF RC SCHOOL BUILDINGS IN SENDAI CITY

堀 則男 ——\*1 赤沼芙美子 ——\*2  
前田匡樹 ——\*3

Norio HORI ——\*1 Fumiko AKANUMA ——\*2  
Masaki MAEDA ——\*3

キーワード：  
鉄筋コンクリート, 学校建築物, 耐震診断, 耐震補強, 修復・耐震補強費用

Keywords:  
Reinforced concrete, School building, Seismic performance evaluation, Seismic retrofit, Retrofitting cost, Rehabilitation cost

Seismic retrofit of existing vulnerable buildings is important to reduce damages during earthquakes. In this paper, seismic performance index,  $I_s$ , of school buildings, which were seismically evaluated and/or retrofitted by Sendai city, were analyzed and  $I_s$ -index distribution for all the reinforced concrete school buildings was estimated. Improvement of seismic performance as a result of retrofit and mitigation of predicted damage ratio were presented. Moreover, retrofitting cost and expected loss were compared and validity of seismic retrofit was discussed from the point of cost effectiveness.

## 1. はじめに

既存建物の耐震改修を進めることは地震被害低減のために重要であり、中でも、地域の防災計画で避難場所と位置付けられる学校施設はその重要度も高い。本研究では、仙台市立の鉄筋コンクリート造（以下、RC造と称する）学校建築物を対象とし、まず耐震診断や耐震補強の実施状況から耐震性能の実態を把握し、次に構造耐震指標  $I_s$  値<sup>1)</sup>に注目して、その分布を建築年代や耐震補強の実施状況によって分析する。さらに兵庫県南部地震の際の  $I_s$  値と被害確率の関係から被災度を推定し、修復・耐震補強に要するコストの観点から大地震時の被害についての予測・検討を行う。

## 2. 仙台市立 RC 造学校建築物の耐震性能

### 2.1 耐震診断・耐震補強の実施状況

調査対象を仙台市立 RC 造学校建築物（全 440 棟）とし、「仙台市施設台帳（小中高校等）」及び「仙台市有建築物の耐震診断と耐震補強」<sup>2)</sup>より、各学校についての RC 造校舎の棟数、建築年代、耐震診断・耐震補強のデータ等について調査した。仙台市では 1995 年度～2000 年度に、1981 年以前建築の既存建物を中心に学校建築物の耐震診断（二次診断）が行われており、構造耐震指標  $I_s \geq 0.7$  で「耐震性あり」、即ち「補強不要」、 $I_s < 0.7$  で「要補強」と判定されている。耐震化の状況を分類し、図1に示す。ここで、全 440 棟のうち、

- ・1982 年以降建築のもの
- ・1981 年以前建築で耐震診断が行われたもののうち  
「補強不要」と判定されたもの  
「要補強」と判定され、建替えまたは耐震補強済みのもの

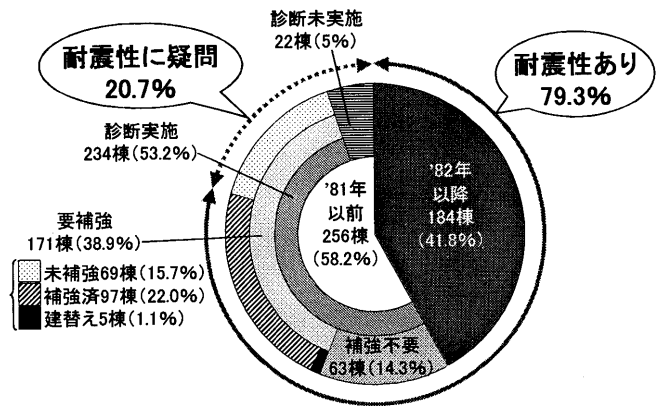


図1 仙台市立 RC 造学校建築物(全 440 棟)の耐震診断・耐震補強の実施状況(2003 年度末現在)

表1 仙台市と全国の学校建築物の耐震化状況

	仙台市 <sup>2)</sup>	全国 <sup>3)</sup>
全施設数	194 施設	50,931 施設
全棟数	440 棟	151,624 棟
うち、耐震化されている棟数	349 棟	69,588 棟
耐震化率	79.3%	45.9%
1981 年以前建築の棟数	256 棟	100,243 棟
うち、耐震化されている棟数	165 棟	18,207 棟
耐震化率	64.5%	18.2%

\*1 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 助手・博士(工学)  
(〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)  
\*2 東北大学工学部建築学科  
\*3 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 助教授・博士(工学)

\*1 Research Assoc., Department of Architecture and Building Science, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Dr. Eng.  
\*2 Department of Architecture, Faculty of Engineering, Tohoku University  
\*3 Assoc. Prof., Department of Architecture and Building Science, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Dr. Eng.

については一応の耐震性がある（耐震化されている）と考え、それらが全体に占める割合を耐震化率と定義すると、仙台市における耐震化率は79.3%となる。また、1981年以前建築のものに注目すると、その耐震化率は64.5%である。仙台市と、内閣府の調査<sup>3)</sup>による2003年1月現在の全国の学校建築物の耐震化状況を表1に示すが、仙台市においては全国の水準よりかなり高いものとなっている。しかし20.7%については未だ耐震性に疑問があるため、これらについても耐震診断・耐震補強を行うことが必要であり、仙台市では今後数年以内に実施を予定している。

2.2 診断建物のIs値分布

次に、耐震診断が行われた建物の構造耐震指標Is値に注目し、その分布を建築年代や耐震補強の実施状況の観点で調査・検討した。ここで、一般的な校舎では耐震壁の少ない桁行方向のIs値が低く、被害も桁行方向に生じることが多いため、以降の検討には桁行方向のIs値を用いた。

耐震診断が行われた243棟について、建築基準法が改正された年代により3期（1971年以前、1972～1981年、1982年以降）に分類してIs値の頻度分布を求めた。図2にその結果を示すが、建築年代が新しくなるにつれて頻度分布が高いほうに推移していることが分かる。また、診断建物を建築年代と補強の可否によって分類した場合の、Is値の平均及び標準偏差を表2に示す。

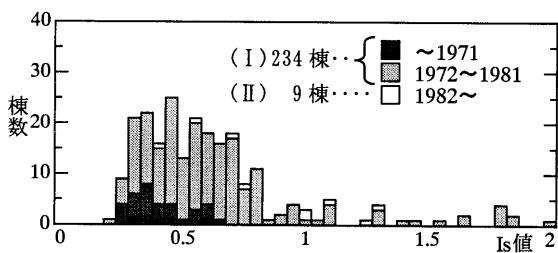


図2 診断建物(243棟)のIs値頻度分布

表2 診断建物(243棟)のIs値分布

	棟数	平均	標準偏差
(I)1981年以前全体	234棟	0.60	0.33
うち、要補強 (Is<0.7)	171棟	0.47	0.17
補強不要 (Is≥0.7)	63棟	1.33	0.81
(II)1982年以降	9棟	0.90	0.30

「要補強」と診断され耐震補強を行った97棟のうち、補強後のIs値が分かっている76棟についての、補強後のIs値は、平均0.75、標準偏差0.11であった。補強後のIs値は0.7～0.75付近に集中しており、これは、仙台市が学校建築物の目標Is値を0.7としているためと考えられる。

2.3 全建物のIs値分布の推定

以上の調査結果を基に、仙台市立RC造学校建築物（全440棟）のIs値の頻度分布を、耐震補強の実施状況ごとに推定した。耐震補強の実施状況は、以下の3段階を考える。

(a)補強前：耐震補強が全く行われていない状態。1982年以降建築の184棟と補強不要の63棟にのみ耐震性がある状態で（図1参照）、耐震化率は56.1%。

(b)2003年度末現在：2003年度末現在で建替えまたは耐震補強を実施済みの状態。2.1節で示したように、耐震化率は79.3%。

(c)補強完了時：耐震性の不足している全てについて、建替えまたは耐震補強が完了したと仮定した状態。耐震化率は100%。

頻度分布の推定は以下の手順で行った。

- ①診断建物を建築年代により(I)1981年以前と(II)1982年以降に分類する（図2参照）。
- ②1981年以前の建築物は、補強不要、2003年度末現在で未補強・補強済の3グループに分類してそれぞれの頻度分布を推定する。
- ③1982年以降の建築物は、診断建物のデータを用いて極値II型分布によりモデル化し、それに準じて頻度分布を与える。
- ④各グループの分布を合計して全体の頻度分布とする。

「要補強」建築物の、補強後のIs値分布については、すでに補強済みの建物（97棟）のIs値分布と同じ分布形状をとると仮定し、頻度分布を棟数で割増して算定した。

1982年以降の建築物は診断建物数が少ないため（9棟）、ここでは適当な分布モデルを近似曲線として仮定し、それに準じて頻度分布を与えることとした。ほとんどの建物でIs≥0.7になると考えられるため、分布モデルとしては極値II型分布を用いた。

以上より、耐震補強の実施状況ごとの、全建物のIs値の頻度分布を推定し、図3のヒストグラムに示す。耐震補強が進むにつれてIs<0.7の分布が減少し、Is=0.7～0.75付近に集中して増加している。

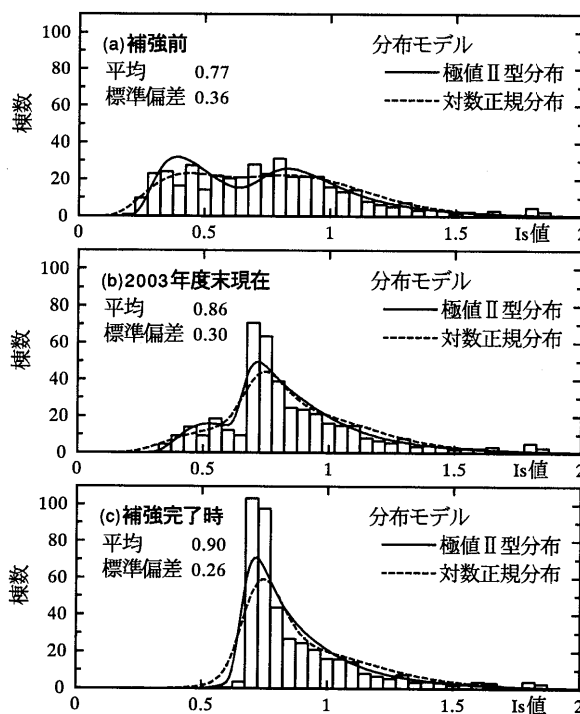


図3 全建物(440棟)のIs値分布の推定

また、推定した頻度分布のヒストグラムに対して近似曲線を算定し、図3の頻度分布に併せて示す。分布モデルとしては、極値II型分布、及び既存RC造建築物のIs値分布モデルとして一般的な対数正規分布を用い、①～③でグループ分けして推定した頻度分布それぞれについて近似曲線を算定し、それらが全建物に占める割合で重

み付けして足し合わせることによって全建物に対する近似曲線を算定した。耐震補強の際には  $I_s \geq 0.7$  という目標があるため、値が小さい側の分布の裾野の状況をより適切に評価できるモデルとして、ここでは極値Ⅱ型分布を用いることとした。

### 3. 地震被害の予測

#### 3.1 兵庫県南部地震の際の被害確率

1995年兵庫県南部地震の際、大きな被害を受けたものを中心に、RC造学校校舎79棟について被災度区分判定および耐震診断(二次診断)が行われており<sup>4)</sup>、各建物を建設地で震度7地域と震度6地域に分類し、被災度ごとの  $I_s$  値の頻度分布を対数正規分布により近似した結果<sup>5)</sup>を図4に示す。

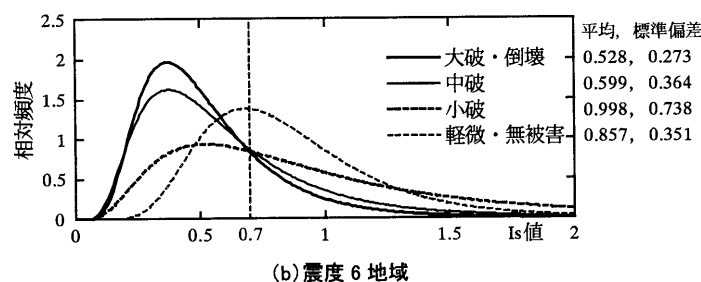
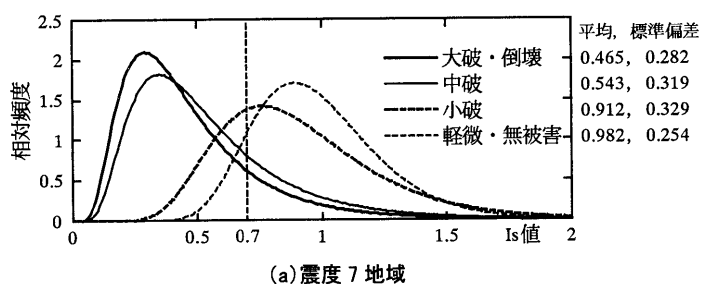


図4 被災度ごとの  $I_s$  値分布(79棟)

ここで表3は、西宮市、神戸市東灘区・灘区・中央区・兵庫区で行われた公立小・中・高校RC造校舎の全数調査(407棟)<sup>4)</sup>における各被災度の棟数とその比率である。図4に示した  $I_s$  値分布は大きな被害を受けた建物を中心としたデータに基づいており、全ての校舎の  $I_s$  値分布とは対応せず、比較的  $I_s$  値の低い建物が多く含まれる分布であると考えられる。そこで、図4の分布曲線に表3の各被災度の比率を掛け、それらを足し合わせることで全校舎の  $I_s$  値の分布曲線を推定した。これを100%積上げ面グラフにし、 $I_s$  値と被害確率の関係を求め、図5に示す。

$I_s=0.7$  の場合、中破以上の被害を受ける確率は震度7地域で16%、震度6地域で4%であり、 $I_s \geq 0.7$  とすることによって被害が大きく低減されるといえる。

表3 全数調査に基づく各被災度の棟数とその比率

	軽微・無被害	小破	中破	大破・倒壊
震度7地域 (165棟)	99棟 60.0%	25棟 15.1%	26棟 15.8%	15棟 9.1%
震度6地域 (242棟)	202棟 83.5%	24棟 9.9%	14棟 5.8%	2棟 0.8%

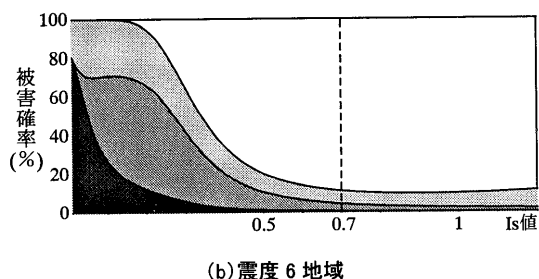
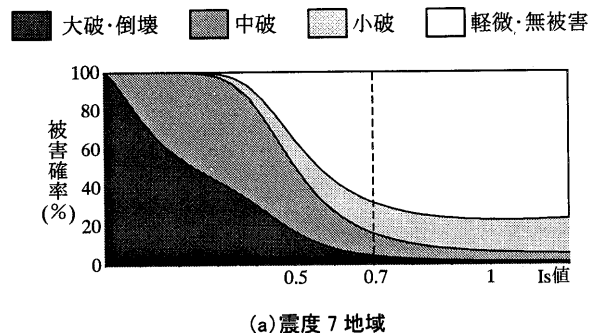


図5  $I_s$  値と被害確率の関係

#### 3.2 仙台市における修復・耐震補強コストの算出・検討

仙台市におけるRC造学校建築物の  $I_s$  値分布を図3の極値Ⅱ型分布の曲線と仮定した場合に、図5を用いて、まず  $I_s$  値ごとに各被災度の棟数を算定する。次に、各被災度ごとの棟数を全  $I_s$  値にわたって合計し、全建物に占める割合を図6に示す。耐震補強の進捗に従って、特に大破・倒壊の比率が大きく低減されることが分かる。

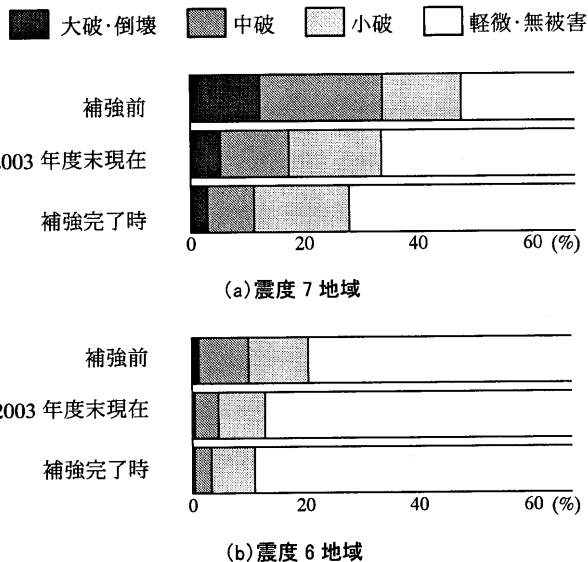


図6 予測される各被災度の割合

#### 1) 被災建物の修復コスト

兵庫県南部地震で被災したRC造校舎について、兵庫県教育委員会が保管する「災害復旧工事設計書」から算定した各建物別修復コスト<sup>6)</sup>より、被災度別の平均修復単価を算出し、小破で3,100円/m<sup>2</sup>、中破で17,200円/m<sup>2</sup>とした。軽微・無被害の建物は0円/m<sup>2</sup>とし、大破・倒壊による新築費用は、兵庫県教育委員会の「新築復旧工事費算出表」により21.3万円/m<sup>2</sup>とした。

仙台市立のRC造学校建築物の総延床面積 1,019,827m<sup>2</sup>に図6の各被災度の割合と平均修復単価を乗じ、それらを合計して被災建物の修復コストを想定震度7、想定震度6のそれぞれについて算出し、表4、図7に示す。但し、現実的には仙台市全域が震度7になることはありえないと思われるため、この結果は想定される上限の値と考えられる。

表4 仙台市における地震時の予想修復コスト(億円)

		軽微・無被害	小破	中破	大破・倒壊	合計
震度7	補強前	0	4.4	37.7	291.3	333.4
	2003年度末現在	0	5.1	21.3	125.2	151.6
	補強完了時	0	5.3	14.5	70.6	90.4
震度6	補強前	0	3.3	15.6	28.6	47.5
	2003年度末現在	0	2.6	7.3	12.1	22.0
	補強完了時	0	2.4	5.3	8.6	16.3

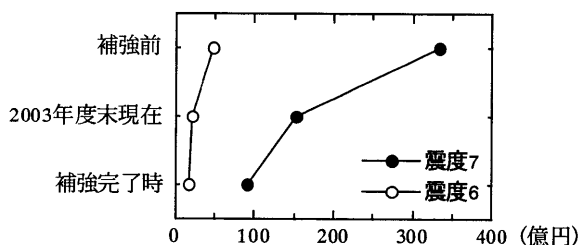


図7 耐震補強の実施状況による予想修復コストの比較

2) 耐震補強のコスト

仙台市が平成10、11年度に行ったRC造学校校舎26棟の耐震補強工事に関する資料<sup>2)</sup>から、Is値増加量0.1あたりの工事単価を平均5,400円/m<sup>2</sup>と算出した。

耐震診断を行った建物のうち、2003年度末現在で補強済み、及び未補強(今後、補強予定)の建物の総延床面積ΣAはそれぞれ表5の通りである。補強済みの97棟のうち、補強後のIs値が分かっている76棟については、補強後のIs値の平均は0.75、Is値増加量の平均は0.35である。一方、今後補強予定の69棟については、補強前のIs値の平均は0.52である。これより、Is値の平均が0.75となるように耐震補強を実施すると仮定した場合のコストを算出し、表5に示す。

表5 仙台市における耐震補強のコスト

	ΣA(m <sup>2</sup> )	Is値増加量の平均	耐震補強のコスト(億円)
補強済み(97棟)	265,472	0.35	50.2
補強予定(69棟)	173,704	0.23	21.6

3) 修復と耐震補強のためのトータルコスト

表4と表5の結果を合計し、修復・耐震補強に要するトータルコストを耐震補強の実施状況ごとに算出し、表6、図8に示す。震度6の地震に対しては耐震補強のコストが高くつくことになるものの、震度7では被害の低減に非常に有効である。

但しコストの評価に人的・社会的被害などの間接的被害は含まれていないので、この結果は、震度6の地震を想定するのであれば耐震改修を行わない方が経済的に得であることを意味するものではなく、むしろ、これらの間接的被害を適切に評価することが重要であることを示すものである。

表6 仙台市における修復・耐震補強のトータルコスト(億円)

	震度7	震度6
補強前	333.4	47.5
2003年度末現在	201.8	72.2
補強完了時	162.2	88.0

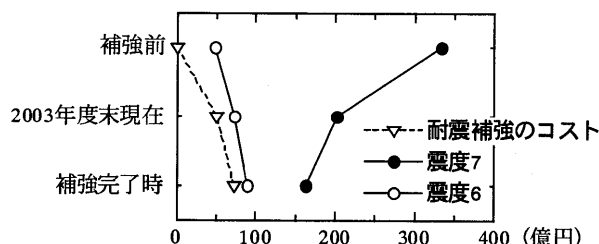


図8 耐震補強の実施状況によるトータルコストの比較

4. まとめ

本研究では、仙台市におけるRC造学校建築物の耐震性能を調査・分析して実態を把握し、さらに耐震補強の実施状況ごとの修復コスト、耐震補強コストという指標を算出できる可能性を示した。今後は、その精度の向上のためさらに多くのデータを調査・分析すると共に、人的・社会的被害などの間接的な被害も考慮した上で地震被害を評価し、耐震補強の効果について検討していくことが必要である。

謝辞

本研究で用いた仙台市の学校施設の耐震診断・耐震補強に関する資料は仙台市都市整備局建築指導課より提供いただきました。深く感謝いたします。

<参考文献>

- 1) 日本建築防災協会：2001年改訂版 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
- 2) 仙台市都市整備局指導部建築構造室建築部営繕課：仙台市有建築物の耐震診断と耐震補強，2003.2
- 3) 内閣府(防災担当)記者発表資料「地震防災施設の現状に関する全国調査(最終報告)について」，2003.1  
http://www.bousai.go.jp/oshirase/h15/030115shisetu.html
- 4) 日本建築学会 構造委員会鉄筋コンクリート構造運営委員会 兵庫県南部地震災害調査小委員会：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書 第II編 学校建築，1997.3
- 5) 堀 伸輔，横松竜司，前田匡樹：1995年兵庫県南部地震により被災したRC造学校建築物の構造耐震指標 Is 値と被害の関係に関する考察，日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)c-2，pp.511-512，1997.9
- 6) 前田匡樹，本多祐子，康 大彦：地震被害を受けた鉄筋コンクリート造学校建築の被災度と修復コスト，第11回日本地震工学シンポジウム CD-RO M 論文集，No.388，2002.11

[2004年4月19日原稿受理 2004年7月29日採用決定]