

# 論文 仙台市の公共施設における耐震改修と地震リスクの評価

四十万 智博<sup>\*1</sup>・前田 匡樹<sup>\*2</sup>

**要旨**：宮城県沖地震の再来が確実視される中，市有施設の中でも特に地域の防災計画で避難場所と位置付けられている学校施設に着目し，耐震性能の実態を調査することで仙台市の耐震改修の進捗状況を把握する。また，2つのタイプの想定地震を用いて地震被害の推定を行った。各建物の  $I_s$  値を補強前時点・2004年度末時点・目標  $I_{so}=0.4\sim 0.7$  と仮定して補強がすべて完了した時点の計6通りについて建物被害や人的被害を推定し，仙台市 RC 造学校校舎の被害状況の把握と，合理的な耐震補強の目標  $I_{so}$  値について，経済的・人的被害の低減効果の視点から検討する。

**キーワード**：学校建築，耐震改修，地震被害推定

## 1. はじめに

宮城県沖ではマグニチュード 7.5 程度の大地震が平均活動間隔 37 年で繰り返し発生しており，今後 20 年以内に約 80%，30 年以内では 90%を越す極めて高い確率で再来が予想されている。そこで建物の耐震性を高めることは重要であるが，中でも地域の防災計画で避難所に位置付けられている学校施設や，病院・役所・消防署といった市有施設はその重要度は特に高い。そこで本研究ではまず仙台市が有する RC 造学校建築物について建築年代や延べ床面積，耐震診断結果等について，データベースを作成し耐震改修の実施状況について調査する。さらにこのデータベースを用いて地震被害を推定・検討することにより，今後の耐震改修計画に役立たせる。

## 2. 仙台市立 RC 造学校建築物の耐震性能

### 2.1 建物データベースの作成

仙台市立小・中・高校全 194 校各校において Exp.J があるものや明らかに構造的に一体でないものを区別して数えた校舎棟数全 440 棟について，「平成 15 年度 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>1)</sup>より，各学校についての RC 造校舎の所在

地・建築年代・階数・延べ床面積・構造種・各階  $I_s$  値を，全 440 棟の内 1981 年以前建築の建物で 240 棟，1982 年以降建築の建物で 7 棟の計 247 棟においてデータベース化した。

### 2.2 耐震診断・耐震補強の実施状況

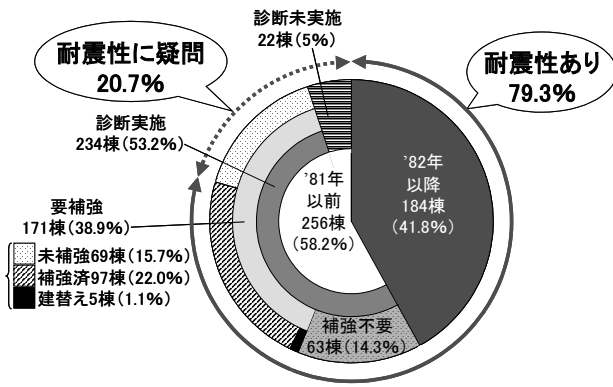
仙台市では，構造耐震指標  $I_s \geq 0.7$  で耐震性あり，即ち補強不要， $I_s < 0.7$  で要補強と判定される。以上にそって 440 棟の耐震化の状況を分類し，その結果を図-1に示す。また仙台市と全国の耐震化の状況を比較し，表-1に示す。ここで

- ・1982 年以降建築のもの
- ・1981 年以前建築で耐震診断を実施したもののうち補強不要と診断されたもの
- ・要補強と診断され建替えまたは補強済みなもの

は一応の耐震性があると言え，それらが全体に占める割合を耐震化率と定義すると，仙台市の耐震化率は 79.3%である。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。これは，全国と比較してかなり高いものとなっている。しかし，全体の 20.7%については耐震性に疑問がある。今後はこれらについても診断・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。

\*1 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 修士課程 (正会員)

\*2 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) (正会員)



図－1 仙台市の耐震診断・補強の実施状況

表－1 仙台市と全国の耐震化率 (%)

	仙台市	全国※
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%

※内閣府防災情報：平成 15 年 01 月 15 日 地震防災施設の現状に関する全国調査（最終報告）より出典

### 3. 地震被害推定

#### 3.1 推定手法

2.1 で作成した建物データベースを用いて、仙台市の RC 造学校校舎について地震被害推定を行った。その際、仙台市が行った被害想定に基づいて、大きな被害をもたらす可能性のある活断層に起因する「直下型地震」、及びプレート境界に発生する「プレート境界型地震」として、3.2 に示す 2 つの想定地震を設定した。<sup>2)</sup>

データベースから Is 値と住所を抽出し、3.2 に示す震度分布から各建物における Is 値と所在地の推定震度を算出する。さらに 3.3 で作成する建物の被害率曲線 (Is 値－震度の関係) を用いて各建物の被害確率を推定する。

本研究では推定する場合分けとして以下の 6 通りを設定し、各時点での建物の Is 値を考慮して推定を行った。これらの推定結果を比較検討することにより、目標 Iso 値の最適値・妥当性の

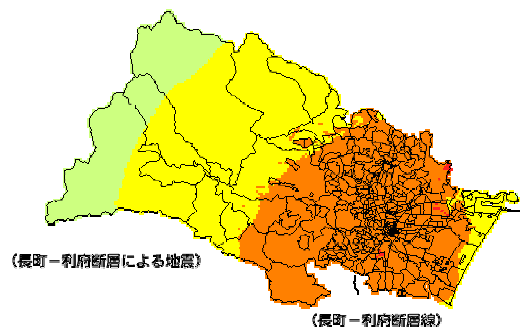
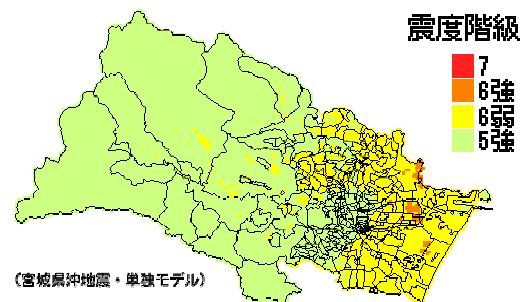
検討も同時に行った。

- ・補強前：耐震診断が行われた時点（現時点で補強済みの建物も未補強と仮定）
  - ・2004 年度末現在
  - ・目標 Iso 値まで補強完了時：Iso=0.4~0.7 と仮定して補強を行った時点
- その際補強後の Is 値の平均値が目標 Iso 値の +0.05 であることを考慮して推定する。  
(例：Iso=0.6 の場合、Is=0.6 未満の建物は Is=0.65 まで補強済みと仮定した時点)

#### 3.2 想定地震

本研究で想定地震として用いた地震モデルは「仙台市地震被害想定調査報告書」<sup>2)</sup>で推定された以下に示す 2 つとする。これらの想定地震における仙台市の推定震度分布図を図－2 に示す。

- 宮城県沖地震の単独モデルによる地震 (M7.5 程度)  
宮城県沖地震の中で、陸寄りの海域に想定される震源域の中だけが破壊した地震。予想発生確率は今後 20 年以内に 80%、30 年以内に 90%以上と高い。
- 長町－利府断層を起震断層とした地震 (M7.5 程度)  
活断層に起因した都市直下型地震。発生確率は低い最も被害は大きいと予想される。



図－2 推定震度分布

### 3.3 被害率曲線の推定

建物の被害確率を推定するため、 $I_s$  値と被害確率の関係を算出した。文献(3)では 1995 年兵庫県南部地震の際に被害を受けた学校建築物のうち 79 棟について行われた被災度区分判定および耐震診断(2次診断)結果を基に  $I_s$  値と被害確率の関係を算出している。各建物を震度 7 地域及び震度 6 以下地域に分類し、各被災度区分の  $I_s$  値の分布を対数正規分布により近似する。これに全数調査<sup>4)</sup> (407 棟)が行われた西宮市、神戸市東灘区・灘区・中央区・兵庫区の RC 造学校校舎の被害率を掛け、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たものを、図-3 に示す。

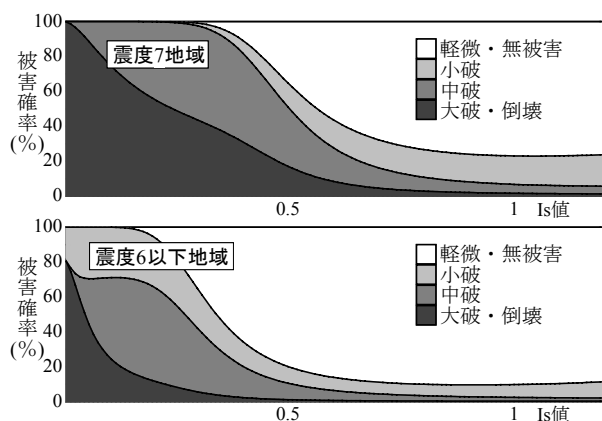


図-3  $I_s$  値と被害確率

この被害率曲線は、震度 7 及び震度 6 についてのみ推定されたものであり、震度階級が細分化された現行のものとは一致しない。また構造種別や建築年等を考慮して推定されたものであり、 $I_s$  値ごとの被害率曲線は作成されていない。そこでこの  $I_s$  値と被害確率の関係を基に、 $I_s$  値ごとに現行の震度階級に従った震度と被害確率の関係を算出した。例として  $I_s$  値 0.3 の建物が大破・倒壊する被害率曲線の推定手法を示す。

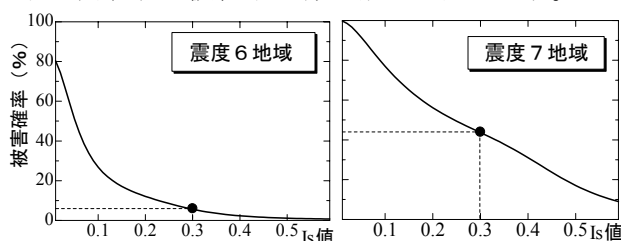


図-4 各震度での被害確率

図-4 のように、既往の研究により作成された  $I_s$  値と被害確率の曲線から、該当する  $I_s$  値における被害確率をそれぞれ求め、この 2 点を対数正規分布の累積密度関数で回帰することにより震度と被害確率曲線を作成する。平均値と標準偏差の対数をそれぞれ  $\mu, \sigma$  とし、この 2 点が正規分布を取ると仮定すると式(1)が成り立つ。

$$\begin{cases} \text{震度 6 : } x_6 = \mu - \phi(x_6)\sigma \\ \text{震度 7 : } x_7 = \mu - \phi(x_7)\sigma \end{cases} \quad (1)$$

この連立方程式から  $\mu$  および  $\sigma$  を算出し累積密度関数を定める。その際の x 軸の値として現行の震度と加速度の関係を考慮し、以下に示す加速度  $a$  の値を採用する。現行の震度階級の概要としては、デジタル加速度記録 3 成分にある特性のフィルターを掛ける。それを合成したベクトル波形の絶対値が  $a$  以上となる時間の合計がちょうど 0.3 秒となるような  $a$  を求める。この  $a$  から  $I = 2 \log a + 0.94$  により計測震度  $I$  を計算し、震度階級を算出している。

この加速度ベクトル波形の絶対値  $a$  に着目し、震度階級ごとの加速度  $a$  を式(2)より求め、 $I_s$  値と被害確率の関係における x 軸の比率とした。震度階級と加速度  $a$  の関係を表-2 に示す。

$$a = \sqrt{10^{(I-0.94)}} \quad (2)$$

表-2 震度階級と加速度  $a$  の関係

震度階級	計測震度 $I$	$a$
震度 5 弱	4.5 ~ 5.0	60.3 ~ 107.2
震度 5 強	5.0 ~ 5.5	107.2 ~ 190.5
震度 6 弱	5.5 ~ 6.0	190.5 ~ 338.8
震度 6 強	6.0 ~ 6.5	338.8 ~ 602.6
震度 7	6.5 ~ 7.0	602.6 ~ 1071.5

これより震度 6 における加速度  $a_6=338.8$ 、震度 7 における加速度  $a_7=(602.6+1071.5)/2=803.5$  と求め、この値を式(1)の  $x_6, x_7$  にそれぞれ代入し累積密度関数を定める。その結果を図-5 に示す。以上の手法に従い、 $I_s$  値 0.2~1.0 における被災度ごとの被害率曲線を作成した。 $I_s$  値の刻みは 0.05 とし、被害推定の際は、 $I_s$  値が 1.0 以上を有する建物の場合は  $I_s=1.0$  とした。

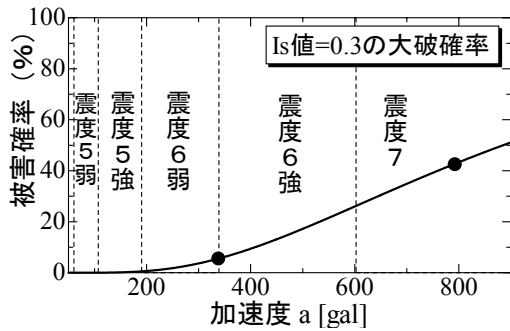


図-5 Is=0.3の大破率曲線の推定

### 3.4 被害推定結果

#### (1) 建物被害率

3.3 で作成した被害率曲線を用いて各建物の被害率を推定する。各震度には加速度に幅があるため、被害率の推定には各震度における加速度の下限値・平均値・上限値の3段階について算出する。対象である仙台市内のRC造学校校舎440棟の内、耐震診断済みで作成した建物データベースに入力されている建物は1981年以前で237棟、1982年以降で7棟である。そこでデータが不明である建物についても同じ確率で被害を受けると仮定して、1981年以前と1982年以降に分けてそれぞれ各建物の被害率を算出し、その平均値を取ることで年代別の被害率として推定した。図-6に各想定地震における被災度別被害確率の推移のグラフを示す。

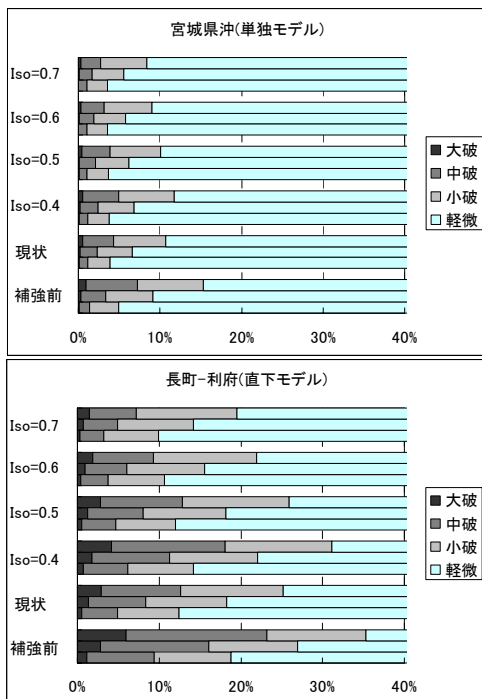


図-6 被災度別被害確率の推移

#### (2) 人的被害

(1)で算出した建物被害率から人的被害率を推定する。用いる予測式は仙台市が行った「仙台市地震被害想定調査報告書」<sup>2)</sup>において用いられた式(3), (4)とし、以下に示す。

非木造建物被害による死者数

$$= 0.0078 \times \text{非木造建物大破率}(\%) \times \text{非木造滞留者数} \quad (3)$$

負傷者数

$$\begin{aligned} &= 0.01 \times \text{屋内人口} \quad (0.375 \leq X) \\ &= 0.07 - 0.16X \times \text{屋内人口} \quad (0.25 \leq X < 0.375) \\ &= 0.12X \times \text{屋内人口} \quad (0 \leq X < 0.25) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、仙台市の推定ではX:建物被害率(全壊率+1/2×半壊率)としているが、本研究においてはX:大破率として算出する。建物滞留者数としては、仙台市勢要覧2004に掲載されている、平成15年5月1日時点における仙台市内の小学校・中学校・高等学校の在学者数及び本務教員数の総数130,403人とし、地震発生時に全ての人数が学校内に滞留していると仮定した場合の死傷者数を推定した。各想定地震における死傷者数を図-7に示す。

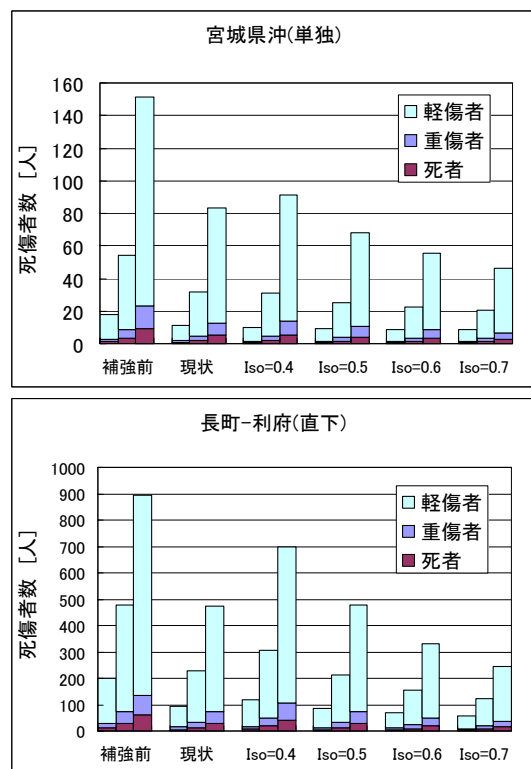


図-7 推定死傷者数

#### 4. 地震被害額と補強費用の算出

##### 4.1 修復コストの算出

3.4 の(1)で建物ごとに算出した各損傷度の被害確率に延べ床面積を乗じることにより、各被災度の被災面積を算出する。その値に単位面積当たりの修復コストを掛け合わせることにより各建物の修復コストを建物被害額として算出した。各被災度の平均修復コスト<sup>3)</sup>は兵庫県南部地震で被害にあった10棟について平均値を出したものであり、構造体の他、設備や什器も含まれた値となっている。表-3にその値を示す。

表-3 各被災度の平均修復コスト(千円/m<sup>2</sup>)

軽微(1棟)	小破(4棟)	中破(3棟)	大破・倒壊
0	3.1	17.2	213

以上の通りに算出した修復コストの結果を図-8に示す。長町-利府モデルの場合では補強前と比べて目標 Iso=0.7 とするとその被害額を約1/4程度に削減できることが分かる。またどちらも目標 Iso 値を高くするほど修復コストを抑えることができるが、宮城県沖地震の場合で比較すると低減されるコストはΔIso=0.1で約1億円程度とそれほど大きい値ではない。しかし目標 Iso 値を高くするほど推定コストのばらつきを抑えることが出来る。

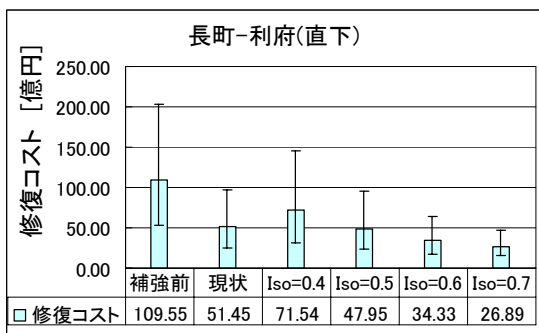
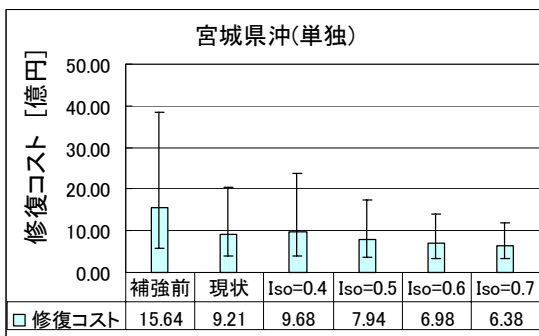


図-8 推定修復コスト

##### 4.2 人的被害額の算出

3.4 の(2)で求めた死傷者数から負傷者の治療費用を算出する。推定式(5)は「地震による被災住民の生活再建にかかわる経済被害の評価に関する研究」<sup>5)</sup>で推定された式である。

総治療費用

$$=21,600(\text{円}) \times 37.8(\text{日}) \times \text{入院者数} \\ +4,500(\text{円}) \times 55.6(\text{日}) \times \text{重傷者数} \\ +4,500(\text{円}) \times 8.8(\text{日}) \times \text{軽傷者数} \quad (5)$$

また入院者数については、兵庫県南部地震による死傷者調査<sup>5)</sup>において、重傷者数の約3割の人数が入院者数となっていることから、3.3で算出した重傷者数に0.3を掛ける事により求めた。

表-4に求めた総治療費用の一覧を示す。

表-4 推定総治療費用

	宮城県沖(单独)			長町-利府(直下)		
	下限	平均	上限	下限	平均	上限
補強前	139.1	429.7	1201.1	1573.2	3748.5	6616.2
現状	89.5	249.9	656.6	757.0	1807.4	3693.1
Iso=0.4	79.9	245.3	720.7	925.2	2440.7	5449.5
Iso=0.5	71.5	199.9	538.5	680.8	1684.5	3788.8
Iso=0.6	69.3	177.3	434.6	542.6	1231.5	2605.2
Iso=0.7	67.6	160.3	364.2	455.7	965.2	1931.8

##### 4.3 補強費用の算出

「仙台市有建築物の耐震診断と耐震補強」<sup>1)</sup>に記載されている、仙台市が行ったRC造学校校舎の耐震補強の費用に関する資料から、Is 値増加量0.1あたりの平均単価を5.4(千円/m<sup>2</sup>・ΔIs)と算出している。<sup>3)</sup>この値に各建物のIs 値増加量ΔIs を掛ける事により補強費用を算出した。結果を図-9に示す。現在目標 Iso=0.7 で補強が行われているので、現時点で50億円程度の補強が完了しており、全ての補強が完了するまで残り30億円程度が必要であることが分かる。

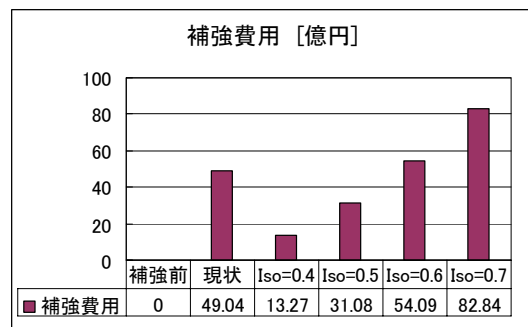


図-9 推定補強費用

#### 4.4 トータルコストの算出と検討

4.1 で算出した修復コスト、4.2 で算出した負傷に対する総治療費用及び 4.3 で算出した補強費用を足し合わせ、地震におけるトータルコストとして算出した。ただし、費用には死者に対する補償や、建物が使用できないことによる間接的な被害金額は含んでいない。図-10 に各想定地震におけるトータルコストをそれぞれ示す。

これを見ると全体に対する補強費用の割合が高く、特に宮城県沖地震の場合となると、低減できる修復コストに比べて必要な補強費用はかなり高いため、コスト面のみ考えると目標 Iso=0.4~0.5 で十分であると言える。しかし長町-利府断層による地震のような極めて大きな地震の場合では、補強費用に対する修復コストの低減効果が大きく、目標 Iso 値を高くすることによりある程度の効果が得られる。目標 Iso=0.6~0.7 が適当であると考えられる。

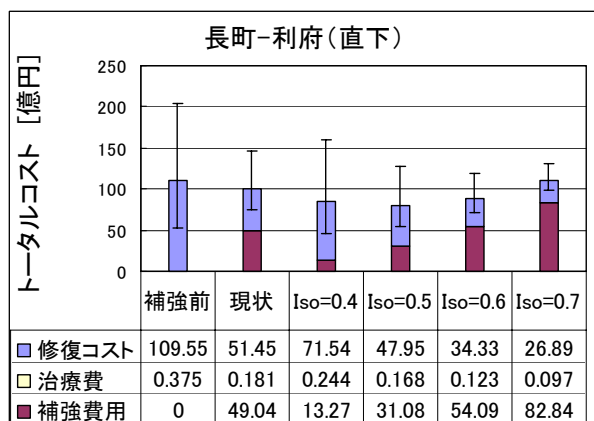
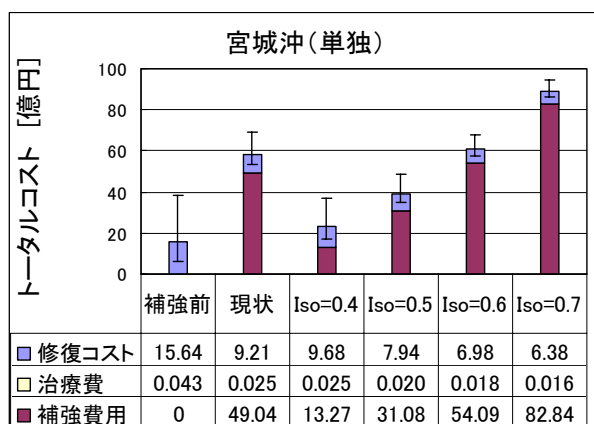


図-10 推定トータルコスト

#### 5 まとめ

仙台市 RC 造学校校舎を対象に、耐震改修の実施状況の調査を行った。その結果仙台市の耐震化率は 79.3%と、全国と比較してかなり高いものとなっている。しかし残りの 20.7%については耐震性に疑問があり、仙台市では今後数年以内に実施を予定している。

さらに既往の研究を基に現行の震度階級に従った Is 値ごとの被害率曲線を作成し、想定地震に対する被害推定を行った。その結果、宮城県沖地震の場合、低減できる修復コストに比べて必要な補強費用はかなり高いため、コストの面のみ考えると目標 Iso=0.4~0.5 で十分であると言えるが、当然死亡などの人的被害を考慮するとこれだけでは不十分である。長町-利府断層の地震のような極めて大きな地震の場合は、目標 Iso を高くすれば補強費用に対する修復コストの低減効果が高く、死傷者数もかなり低減できるため、コスト・人的被害両面から目標 Iso=0.6~0.7 が適当であると考えられる。

本研究では死亡に対する評価や建物の使用不可能期間に対する損害など、費用では表せない被害についての検討はなされていないため、今後はこれらも考慮した推定が必要であると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 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
- 2) 仙台市地震被害想定調査報告書 平成 14 年 12 月
- 3) 赤沼英美子：仙台市における RC 造学校建築物の耐震性能の調査と地震被害予測に関する研究 平成 15 年度東北大学卒業論文
- 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) 損害保険料率算定会：地震による被災住民の生活再建にかかわる経済被害の評価に関する研究，平成 13 年 11 月