

木造・RC造建築物の耐震診断・補強に関する 実践的技術者教育の取組について*

高谷 富也¹

要旨：本研究は、本校での地震防災教育の地域への還元や地域貢献を目指して、学生による建築物の無料耐震診断や補強案の提示に関する実践的な教育実習を行ってきた。木造住宅の耐震診断・補強案の提示については、住宅訪問による平面図作成等の作業を通じた耐震診断結果を得るとともに、その耐震診断結果に基づいたいくつかの耐震補強案、上部構造評点および補強材料費の提示を行っている。一方、鉄骨ブレース以外のRC造建築物の耐震補強工法として新たに本校で開発研究を行った炭素繊維ロッドによるACMブレース工法について説明するとともに、ACMブレース工法による本校学寮における耐震補強の施工方法実験について概説する。

キーワード：木造・RC造建築物の耐震診断・補強、ACMブレース工法の開発

1. まえがき

昭和56年6月以前に建てられた建築物に関しては耐震性に問題があるということで、耐震診断や耐震改修工事を行うことにより、現在、建築物の耐震化率を平成27年までに90%に引き上げるという数値目標が立てられている¹⁾。この目標に向けて、各地方自治体は具体的な耐震化率向上に向けた各種の取組を行っている。

そこで、本校での地震防災教育の地域への還元や地域貢献を目指して、学生による建築物の無料耐震診断や補強案の提示に関する実践的な教育実習を行ってきた。本文では、学生が行った木造住宅の耐震診断や補強案の提示およびRC造建築物の耐震診断やACMブレース工法によるRC造建築物に対する耐震補強の施工実験を紹介する。

木造住宅の耐震診断・補強案の提示については、住宅訪問による平面図作成等の作業を通じた耐震診断結果を得るとともに、その耐震診断結果に基づいたいくつかの耐震補強案、上部構造評点および補強材料費の提示を行っている。

一方、RC造建築物の耐震診断・補強案の提示については、RC造建築物の設計図面からのデータ拾い出し作業、紙ベース図面からのCAD図面作成および3DCG作成を行うとともに、鉄骨ブレースや壁増し打ち等の耐震補強案とその耐震補強対策に対する構造耐震指標 I_s 値を提示している。また、鉄骨ブレース

以外の簡易耐震補強工法として新たに本校で開発研究を行った炭素繊維ロッドによるACMブレース工法について説明するとともに、ACMブレース工法による本校学寮における耐震補強の施工実験についても概説する。

いずれの耐震診断や補強対策に関する取組も、本科や専攻科の学生が「建築耐震」という防災教育の一環として主体的に取り組んだ教育成果となっている。今後、「建築耐震工学」という新たな授業科目を専攻科に設置して、この取組事業の継続を図っていく予定である。また、これらの教育研究成果は、地域住民を対象とした「住宅耐震フェア」、「高専ピールフェスティバル」や「オープンカレッジ」などを通じて、学生によるデモンストレーションや説明会を行うことで公開していくものである。

2. 建築物の耐震補強について

本節では、建築物の耐震診断および耐震補強に関する地震防災に関して、学生が実施している携帯型振動台を用いた住宅の耐震補強に関するデモンストレーション、学生による技術者教育の地域還元事業の一つとして行っている木造住宅やRC造建築物の耐震診断・補強案の提示について述べる。また、本校で開発したACMブレース工法による学寮の耐震補強工事についても概説する。

2.1 携帯型振動台による耐震補強デモ

Photo 1は携帯型振動台を、またPhoto 2は携帯型振動台に設置された筋かいを有するフレーム構造の住宅模型を示したものである。この住宅模型を使って、「高専PRフェスティバル」や「オープンカレッ

* 論文集「高専教育」第32号に掲載されたものに加筆修正を行ったものである。

1 舞鶴工業高等専門学校 建設システム工学科 教授

ジ」では、学生が耐震補強の重要性について地域住民などに説明を行うことで、住宅に対する地震対策の重要性を地域住民に啓蒙することになる。Photo 3はそのデモの様子を示したものである。学生による耐震補強のデモや説明では、質問もあるので、しっかりとした専門知識の習得が必要であり、地震防災技術者としての姿勢が問われる。

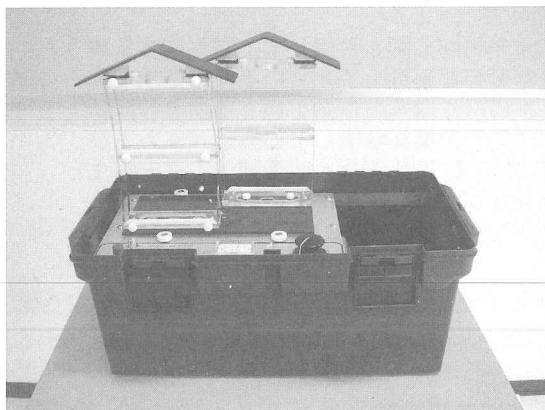


Photo 1 Vibration Box

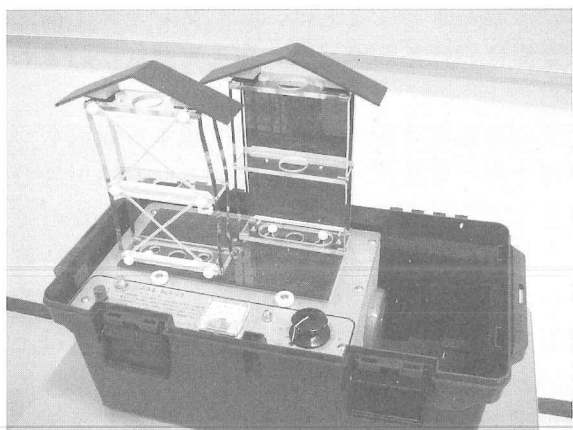


Photo 2 Seismic Retrofitting Model

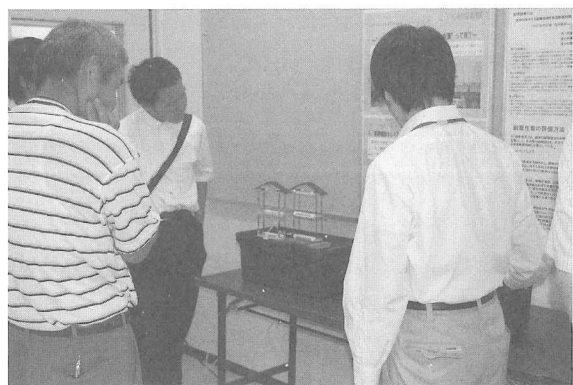


Photo 3 Demonstration by a Student

2. 2 木造住宅の耐震診断と補強案の提示

木造住宅の診断調査を行う場合、平面図を描いて柱、壁等の位置や寸法などを確認するとともに、住

宅の基礎や天井裏などの調査も行うことになる。これらの調査結果に基づいて木造住宅の耐震診断が行われることになる²⁾。耐震診断対象となる木造住宅の平面図および家屋調査等に基づいて、住宅が有する上部構造評点を算定して、得られた評点から Table 1 に示す耐震診断がなされる。なお、上部構造評点は次式により求められる²⁾。

$$\text{上部構造評点} = \text{保有耐力 } Pd / \text{必要耐力 } Qr \quad (1)$$

また、保有耐力 Pd および必要耐力 Qr は次式より算定される。なお、式の中に見られる用語の詳細については文献 2) に譲る。

Table 1 Seismic Performance Value of Structure²⁾

上部構造評点	耐震診断結果
1.5 以上	倒壊しない
1.0~1.5 未満	一応倒壊しない
0.7~1.0 未満	倒壊する可能性がある
0.7 未満	倒壊する可能性が高い

$$\text{保有耐力 } Pd = \text{壁強さ} \times \text{耐力要素の配置等による低減係数} \times \text{劣化度} \quad (2)$$

$$\text{必要耐力 } Qr = \text{床面積} \times \text{必要耐力係数} \times \text{多雪区域加算} \times \text{地震係数} \times \text{軟弱地盤割増} \times \text{形状割増} \times \text{混構造割増} \quad (3)$$

専攻科における「特別実験」の授業において、教員は専攻科生と一緒に、木造住宅の無料耐震診断を希望している家を訪問した。この特別授業は5週にわたって実施しており、その時間数は50分×30回となっている。診断対象となった木造住宅の1例を Photo 4 およびその平面図を Fig.1 に示しておく。耐



Photo 4 An Old Wooden House

震診断に必要な住宅の平面図を作成するとともに、基礎・外観・床下等の調査および家主からの増改築等の聞き取り調査を行った。なお、なるべく迅速に耐震診断調査を行うために、それぞれの学生には担当する調査箇所割り振りをした。この家屋の調査時間は約1時間程度であった。

学生達はそれぞれの調査箇所や作成した平面図よ

り、統一した1枚の平面図の作成および調査結果に基づいて、対象とした木造住宅の耐震診断結果を得ることになる。Table 2は、Fig.1に示した木造住宅に対する耐震診断結果を示したものである。

次に、それぞれの学生はTable 2に示された耐震診断結果に基づいて、それぞれの補強案の提示を行うことになる。この場合、目標とする上部構造評点

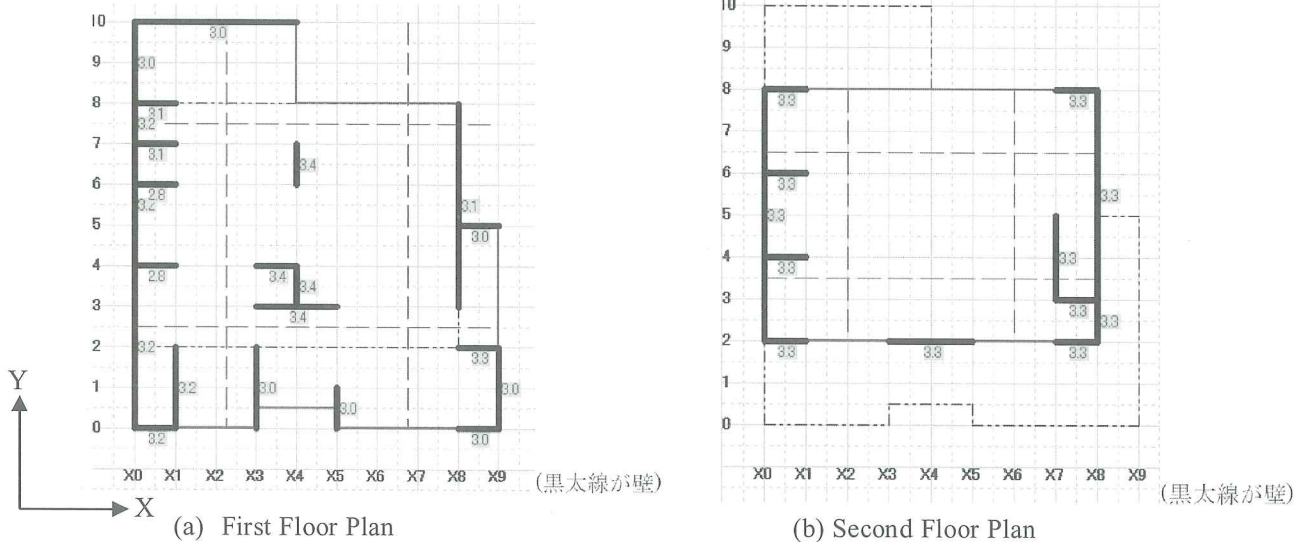


Fig.1 Plan of a Wooden House

Table 2 Seismic Performance Result of an Old Wooden House

階	方向	強さ P (kN)	配置などによる 軽減係数 E	劣化度 D	保有耐力 Pd (kN)	必要耐力 Qr (kN)	上部構造評点 Pd/Qr
2	X	18.43	0.80	0.70	10.32	34.22	0.30
	Y	23.92	1.00	0.70	16.74	34.22	0.49
1	X	57.97	0.75	0.70	30.44	90.54	0.34
	Y	79.86	1.00	0.70	55.90	90.54	0.62

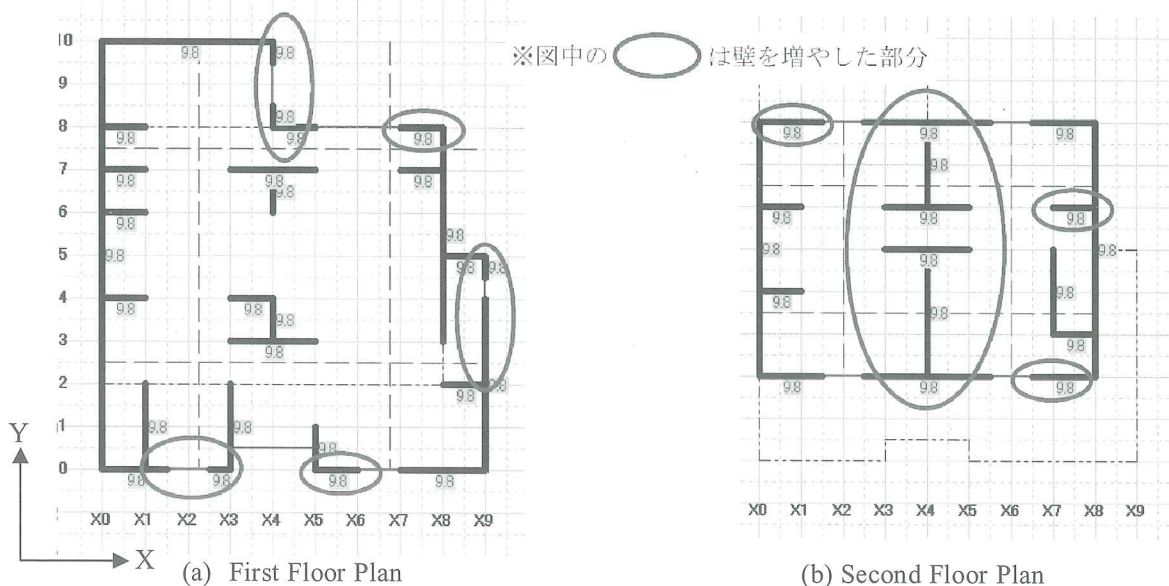


Fig.2 Seismic Retrofitting Design

Table 3 Seismic Performance Result for a Seismic Retrofitting Design

階	方向	強さ P (kN)	配置などによる 軽減係数 E	劣化度 D	保有耐力 Pd (kN)	必要耐力 Qr (kN)	上部構造評点 Pd/Qr
2	X	44.06	1.00	0.70	30.84	27.29	1.13
	Y	42.20	1.00	0.70	29.54	27.29	1.08
1	X	147.17	1.00	0.70	103.02	74.76	1.38
	Y	172.31	1.00	0.70	120.61	74.76	1.61

は 1.0 としている。

1 例として、Table 2 の耐震診断結果に基づいて提案された耐震補強案を Fig.2 に示す。この図以外の耐震補強案についても、耐震診断報告書に記載して、後日家主さんへ耐震診断結果と補強案の提示をした。また、Fig.2 に示された耐震補強案に対する耐震診断結果を Table 3 に示しておく。Table 2 および Table 3 から明らかなように、この木造住宅は昭和 10 年に建てられたため、劣化度 D の値が 0.70 となっている。このため、上部構造評点はこの劣化度 D 値に大きく影響していることがわかる。したがって、Fig.2 から明らかなように、非常に多くの補強金具、壁や筋かいの設置が必要となる耐震補強案となっている。

Photo 5 は、学生による無料の木造住宅の耐震診断に関する新聞記事³⁾を示したものである。このように、高専生による地域住民を対象とした技術還元や地域貢献に関する記事が多く掲載されることは、耐震診断を行った学生にとっては、非常に大きな喜びであり、技術者としての誇りを持つものである。

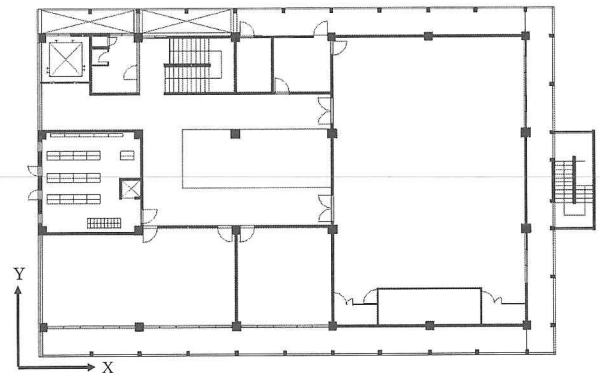


Photo 5 Newspaper on Seismic Performance Diagnosis of Wooden House³⁾

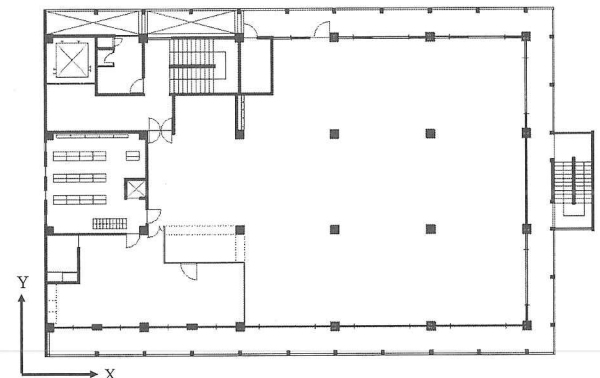
2. 3 RC 造建築物の耐震診断と補強案の提示

RC 造建築物の耐震診断は、「既存鉄筋コンクリー

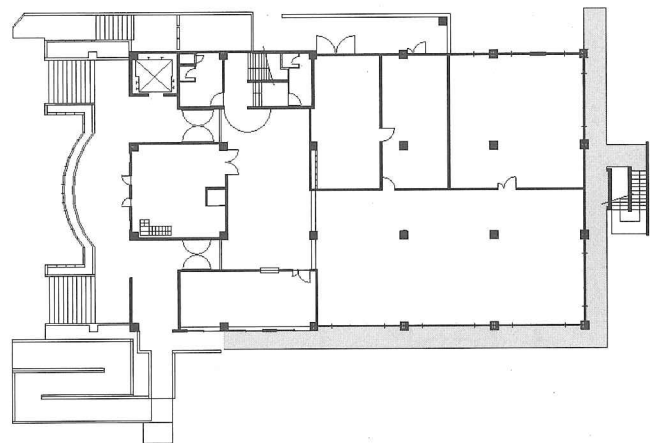
ト構造物の耐震診断」⁴⁾に基づいて行うことになっている。このため、文献 4) に示されている耐震診断



(a) Third Floor



(b) Second Floor



(c) First Floor

Fig.3 Plan of Library Building Structure

手法である「第2次診断法」に基づいて、昭和40年代に建設された本校のRC造3階建て図書館および学寮「鶴友寮」である3号館、4号館および5号館RC造建築物の耐震診断を行った。第2次診断法は、柱と壁の強度と靱性を考慮して耐震性能を算出する手法である。第1次診断より精密な判定法であり、第1次診断では考慮しなかった柱と壁の鉄筋量も入れて構造解析し、終局強度・破壊形式・靱性を求めてから、詳細な検討を行う方法である。現在、最も多く採用される耐震診断法で信頼性の高い結果が得られる。なお、これらの耐震診断には専攻科生の特別研究としてExcelによる耐震診断ソフトを開発した⁵⁾。なお、ExcelによるRC造建築物の耐震診断ソフトの妥当性を検討するために、既に専門家によって診断された本校の図書館の耐震診断結果⁶⁾との比較を行った。Fig.3は本校の図書館の平面図を示したものである。この図に示されている平面図より、柱や壁等の部材に対する寸法、材料やその強度等の情報を入力することにより、RC造建築物の各階ごとに構造耐震指標 I_s が算定される。この構造耐震指標 I_s は次式により求められる⁴⁾。

$$I_s = E_0 \times S_D \times T \quad (4)$$

ここに、 E_0 は保有性能基本指標、 S_D は形状指標、 T は経年指標である。なお、それぞれの指標についての詳細については文献4)に譲る。

RC構造物の耐震性の判定は、構造耐震指標 I_s とこれに対応する構造耐震判定指標 I_{S0} を用いて

$$I_s \geq I_{S0} \quad (5)$$

であれば「安全(想定する地震動に対して所要の耐震性を確保している)」とし、そうでなければ耐震性に「疑問あり」とする。構造耐震判定指標 I_{S0} の求め方は、階の位置に係らず次式で求める⁴⁾。

$$I_{S0} = E_s \times Z \times G \times U \quad (6)$$

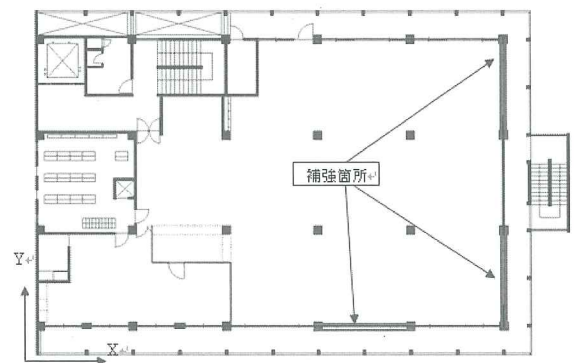
ここに、 E_s は耐震判定基本指標で、第2次診断用では $E_s=0.6$ であるが、学校施設では0.7となっている。また、 Z は地域指標、 G は地盤指標、 U は用途指標である。なお、それぞれの指標の詳細については文献4)に譲る。

Table 4はExcelによる図書館の耐震診断結果および専門家による結果との比較を示したものである。この表より、1階部分のXおよびY軸方向、2階のY軸方向ともに、両者による構造耐震指標 I_s 値は構造耐震判定指標 I_{S0} 値0.7を下回っていることがわか

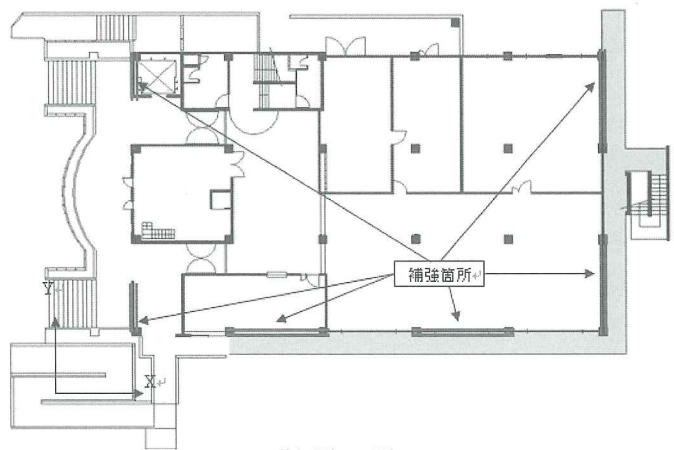
る。しかしながら、2階のX軸方向は両者ともに I_{S0} 値0.7を上回っているものの、値に違いが生じている。この理由としては、壁と窓の取り扱いの違いお

Table 4 Seismic Index Value, I_s , of Library Building

階	方向	Excel による I_s 値	専門家による I_s 値
3	X	1.53	2.27
	Y	1.38	1.45
2	X	1.24	0.75
	Y	0.50 (NG)	0.66 (NG)
1	X	0.52 (NG)	0.49 (NG)
	Y	0.50 (NG)	0.64 (NG)



(a) Second Floor



(b) First Floor

Fig.4 Seismic Retrofitting Design

Table 5 Seismic Index Value, I_s , of Library Building

階	加力方向 (検討方向)	Excel による I_s 値
3	X	1.53
	Y	1.38
2	X	1.24
	Y	0.82
1	X	0.76
	Y	0.74

よび荷重の分配の違いが考えられる。Excel による診断法においては、簡略化のため窓のある壁はすべて壁が無いものとして扱い、また壁厚 12cm 以下の壁を保有性能基本指標 E_0 に考慮したが、専門家の使用したソフトでは窓のある壁の計算も考慮に入れおり、また壁厚 12cm 以下の壁は荷重のみを考慮していた。一方、Table 4 より 3 階についてはいずれも構造耐震判定指標 I_{S0} 値 0.7 を上回っていることがわかる。

Fig.4 は、Excel による耐震診断結果に基づいて提案した図書館の補強対策案を示したものである。それぞれの方向に Fig.4 (a) に示すように壁を新たに配置または増幅し補強する。図中に見られる太線の場合が補強箇所である。図書館 2 階は Y 軸方向側の I_S 値が 0.7 以下となっているので壁を増幅し補強する。また、X 軸方向も Table 4 に示す I_S 値が 0.75 であり構造耐震判定指標 $I_{S0}=0.7$ の値に近いため 1 箇所壁を配置し、Fig.4 (b) のように補強する。また、Fig.4 に示す耐震補強案に対する診断結果を Table 5 に示しておく。

このように、窓のある壁や壁厚などの取り扱いに関する違いはあるものの、ほぼ同じような構造耐震指標 I_S 値が得られることがわかった。今後はさらに改良を進めることで、市販されている耐震診断ソフト⁷⁾と同じ程度の精度で構造耐震指標 I_S 値が得られるものを目指す予定である。

2. 4 ACM ブレース工法による耐震補強

平成 19 年度に実施された本校学寮の耐震補強工事については、限られた耐震補強予算内において、できるだけ多くの学寮に対して耐震補強を行うことを目標としたため、できるだけ安価な工法で短期に施工できる補強工法を適用することとなった。

そこで、鉄骨ブレースに代わり経済性に優れた ACM (Advanced Composite Material) ブレース工法を併用した。ACM ブレース工法は、Fig.5 に示すように骨組構造枠型の面内にブレースを配置し骨組の

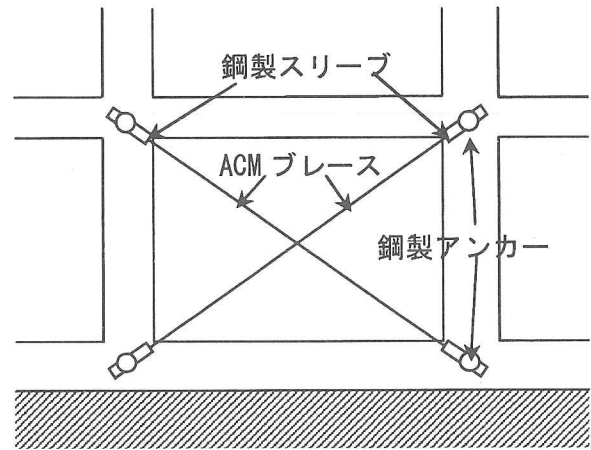


Fig.5 Sketch of ACM Bracing Method

ん断耐力を増加させる耐震補強工法である。ACM ブレースは Fig.6 に見られる CFRP ロッドを引張材とし、その両端をエポキシ樹脂によって鋼管スリーブに定着したもので、ACM ブレースは引張荷重にのみ抵抗できる仕組となっている。ブレースは柱に埋め込んだ鋼製アンカーとナットによって固定する。地震時荷重の衝撃的な载荷の緩和のため、ナットとアンカー間には弾性ワッシャー(緩衝材)を挿入する。また、鋼製アンカー取付部のコンクリート表面には炭素繊維シートを貼付し、この部分のコンクリートを保護する。既に、本校では RC 造建築物の耐震補強工法として ACM ブレース工法に関する引張耐力や RC 柱に埋設されるアンカー周辺の補強を考慮した要素試験等を実施した。

Photo 6 は科学技術振興機構イノベーションプラザ京都からの可能性試験研究⁸⁾により実施したアンカーの引張耐力確認試験の供試体を示したものである。本科生および専攻科生の協力によって、引張耐力確認試験の供試体を作成し、さらに引張試験を実施した。その結果、RC 表面を炭素繊維シートの貼付により補強することにより必要とするアンカーの引張耐力が確認できた。Photo 7 は引張耐力確認試験中の様子を示したものである。

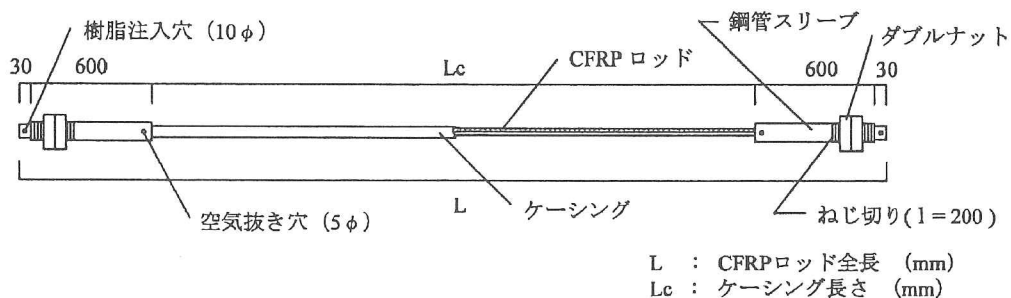


Fig.6 CFRP Rod

Fig.7 は、耐震診断を行った学寮 4・5 号館の 1 階の平面図を示したものである。また、Table 6 は 4 号



Photo 6 Pull-Out Test Models of Steel Anchor

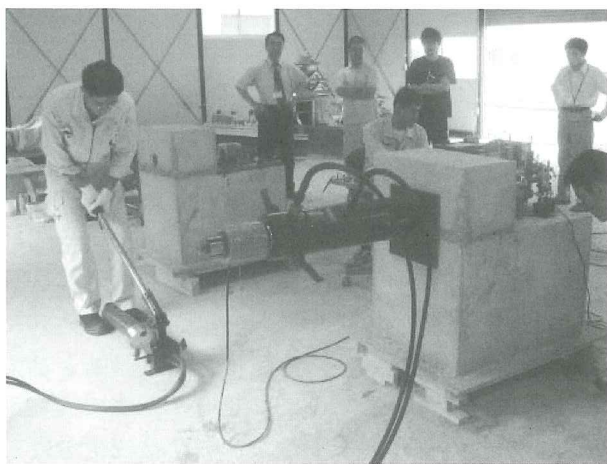


Photo 7 Pull-Out Test of Steel Anchor

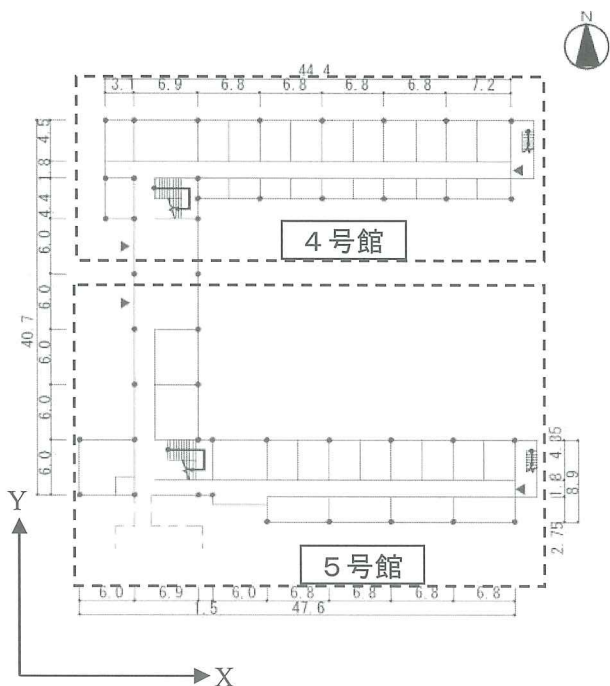


Fig.7 First Floor Plan of Dormitory (Unit:m)

館の耐震診断結果および鉄骨ブレースによる耐震補強後の結果⁹⁾も合わせて示している。

Fig.8 は、Table 6 に示されている耐震診断結果に基づいて設計された学寮 4・5 号館の耐震補強の立面図を示したものである。この図から明らかなように、北側および南側の鉄骨ブレースと ACM ブレースの施工箇所が X 軸について対称となるように設置されている。また、柱と梁の交差部分は鉄筋が密集しているために、その部分を避けるように、交差部の上下に鋼製アンカーの設置位置を設けている。

Photo 8 および Photo 9 は、それぞれ学寮 4 号館

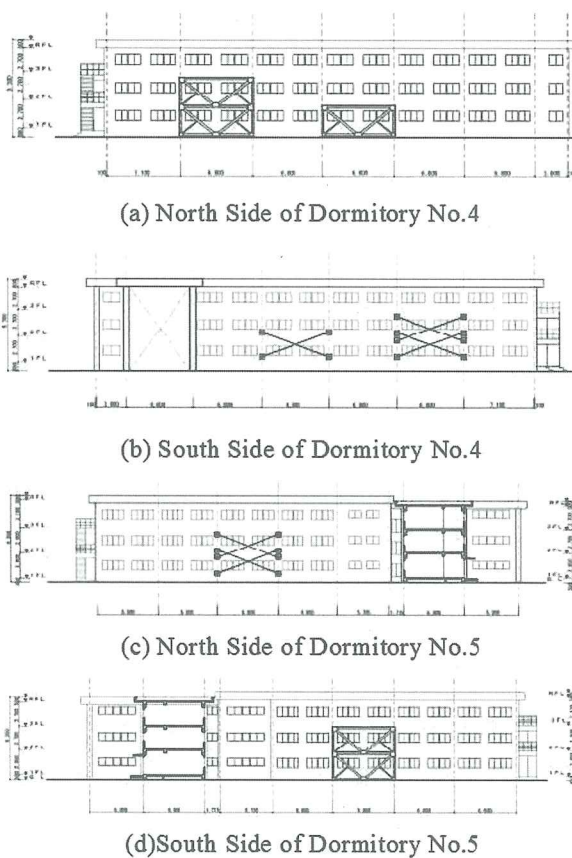


Fig.8 Seismic Retrofitting Design for Dormitory Nos. 4 and 5

Table 6 Seismic Performance Result of Dormitory No.4

階	方向	補強前	補強後
3	X	1.12	1.12
2		0.69 (NG)	0.76
1		0.57 (NG)	0.78
3	Y	0.79	1.42
2		0.98	0.98
1		0.91	0.91



Photo 8 Steel Brace on North Side Wall of Dormitory No.4

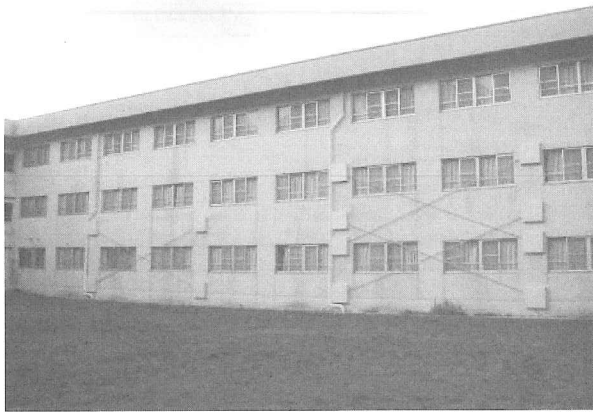


Photo 9 ACM Brace on South Side Wall of Dormitory No.4



Photo 10 Newspaper on ACM Bracing Method¹⁰⁾

および5号館の北側および南側に設置された鉄骨ブレースとACMブレースを示したものである。これらの写真より、ACMブレースによる耐震補強は景観的にもすっきりとしていることがわかる。今回の学寮の耐震補強は、従来の鉄骨ブレース工法との併用で施工を行った。両者それぞれ5箇所のブレースの施工をしたが、施工期間は鉄骨ブレース工法が54日、ACMブレース工法が37日であった。ACMブレース工

法は初めての施工であったが、従来の鉄骨ブレース工法の約2/3の工費で施工できた。これより、RC造建築物のより合理的な耐震補強を目指して開発したACMブレース工法は、従来の鉄骨ブレース工法に比べて、工期の短縮、工費の節減を図ることができ、かつ建物の外観や居住者へ与える影響が軽減できることがわかった。

Photo 10は、鉄骨ブレースと新たに開発したACMブレース工法を用いた耐震補強改修工事が完成した学寮についての新聞記事を示したものである。なお、いくつかの新聞社も地方版において同様の記事の掲載があったことを付記しておく。

このように、学生達が研究開発した耐震補強工法が自分達が実際に住んでいる学寮に対して適用されたことは、社会への技術還元や貢献の第一歩となるもので、大きな喜びでもある。

3. あとがき

本研究は、学生達が行ってきた本科での卒業研究や専攻科での特別研究、特別実験を通じて、地域への技術還元や貢献を目指して実施してきている取組内容を紹介したものである。とくに、簡易携帯型振動台を用いた耐震補強の重要性に関するデモンストレーション、木造住宅の無料耐震診断とそれに基づく耐震補強案の提示、RC造建築物の耐震診断と補強案の提示および開発したACMブレース工法の実施工などを通じて、将来従事することになる技術分野での社会への技術還元や地域への貢献を身をもって学生時代に体験できたことは、学生達にとって非常に有益なものとなるであろう。このように、学校で学んだ技術の社会への還元や地域貢献という実践的な技術者教育を今後とも行っていくことが学生教育において非常に重要なものとなる。

今後は、卒業研究、特別研究や特別実験などの授業を通じて、ACMブレース工法の木造一般住宅の耐震補強への適用に取り組んでいく予定である。

最後に、これらの実践的な技術者教育への経費の支出を積極的に行って戴いた小野紘一校長をはじめ、ACMブレース工法の開発や実施工実験のためにご協力を戴いた企業や教職員の皆様に感謝の意を表したい。また、ACMブレース工法の開発は、(独)科学技術振興機構イノベーションプラザ京都 可能性試験(実用化検討)研究(課題番号10-H19-14)により行われたことを付記し、関係各位に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 改正耐震改修促進法：国土交通省，2006。

- 2) 木造住宅の耐震診断と補強方法 一般診断法による診断の実務：(財)日本建築防災協会，2007.
- 3) 舞鶴市民新聞，平成19年10月19日掲載記事，2007.
- 4) 2001年度版 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準同解説：(財)日本建築防災協会，2006.
- 5) Excelを用いたRC造建築物の耐震診断と補強対策について：高谷富也・村岡正樹，舞鶴工業高等専門学校紀要，第43号，pp.51-59，2008.
- 6) 舞鶴工業高等専門学校耐震診断業務 図書館棟診断報告書：(株)山崎設計，2006. (2008.11.7受付)
- 7) 例えば，ユニオンシステム Super Build SS2
- 8) (独)科学技術振興機構イノベーションプラザ京都 可能性試験(実用化検討)研究：高谷富也，課題番号10-H19-14，2007.
- 9) 舞鶴工業高等専門学校耐震診断業務 学寮棟診断報告書：(株)山崎設計，2007.
- 10) 朝日新聞，平成20年4月3日京都丹後丹波版の掲載記事，2008.

ENGINEERING EDUCATION ON SEISMIC PERFORMANCE DIAGNOSIS AND SEISMIC RETROFITTING WORK FOR WOODEN HOUSE AND RC BUILDING STRUCTURE

Tomiya TAKATANI

ABSTRACT: This paper deals with an engineering education of earthquake engineering and a contribution for local community by the students learned about a seismic retrofitting technique for both house and RC building structure. They have already conducted a demonstration of seismic reinforced frame structure using a simple vibration table, seismic performance diagnosis for an old wooden house and RC building structure, and seismic retrofitting construction using ACM bracing method developed at Maizuru National College of Technology.

Key Words: *Seismic performance diagnosis, Seismic retrofitting method, Advanced composite material bracing method, Carbon fiber reinforced plastic rod*