

論文 耐震補強された RC 造学校建築物の性能評価

佐藤久騎*1・栢山健二*2

要旨：旧耐震基準で設計され、2001年に耐震補強が施された RC 造学校建築物の耐震性能を評価する。現地調査にて対象建物の構造部材の確認及び常時微動計測を実施した。耐震診断では補強前後について第2次診断を行い、補強前では複数の階で安全に疑問ありの判定が出たのに対し、補強後では全階で安全の判定となり補強の有効性を確認した。立体フレーム解析では補強前後のモデルを作成し、静的増分解析及び地震応答解析を行った。静的増分解析では補強によるベースシア係数の上昇を確認した。地震応答解析では、補強の有効性を確認した。しかし、地震波によっては補強後でも顕著な損傷を生じる恐れがあることを示した。

キーワード：耐震補強, 耐震診断, 静的増分解析, 地震応答解析, 常時微動計測, 吹き抜け

1. はじめに

1995年の阪神・淡路大震災の後、耐震診断および耐震改修による建築物の耐震化は日本の地震対策の柱となり、広く普及・発展してきた。ただし、次に記す課題が依然として残されていることを忘れてはならない。まず、学校施設は地震後の避難場所など災害拠点の役割を担うべく、倒壊安全性のみだけでなく機能維持も求められる。さらに、耐震診断による安全性の判定は、1968年十勝沖地震や1978年宮城県沖地震の被害経験に基づいており、より強い地震や周波数特性の異なる地震に対する安全性が明確でない点は、特に留意されるべきである。そこで本研究では、旧耐震基準に則って1968年に建設され、新耐震基準に沿って2001年に耐震補強が施された RC 造の学校建築物を対象として、補強前後の耐震性能を耐震診断と立体フレーム解析モデルを用いた静的増分解析、地震応答解析を行い、補強の効果と課題を把握することを目的とする。

2. 対象建物

建物概要を表-1に、南東面の建物外観を図-1に、建物内観を図-2に示す。また、2階壁3階伏せ図を図-3に示す。建物の中央に大きな吹き抜けがあり、屋上スラブにも天窗用に大きな開口があるため剛床を仮定できない。表-2に示すように、耐震性能改善のため多種多様な耐震補強工法が適用された。図-4にB構面架構図を示す。

表-1 対象建物の概要

所在地：埼玉県さいたま市見沼区大字深作 307
竣工：1968年3月, 耐震補強：2001年1月
構造：RC ラーメン構造で一部耐震壁 (基礎：PC 杭)
階数：地上5階建 (地下階なし)
階高：1,2階：4.2m 3~5階：3.4m



図-1 建物外観(南東面)

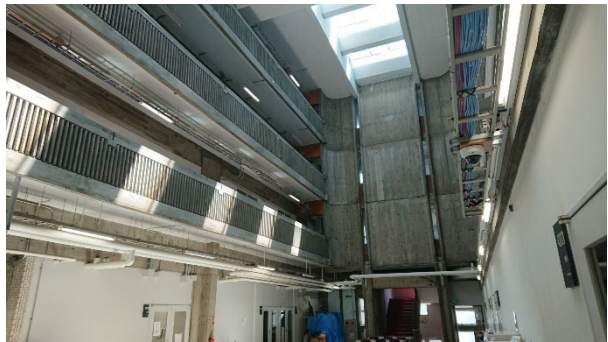


図-2 建物内の巨大な吹き抜け

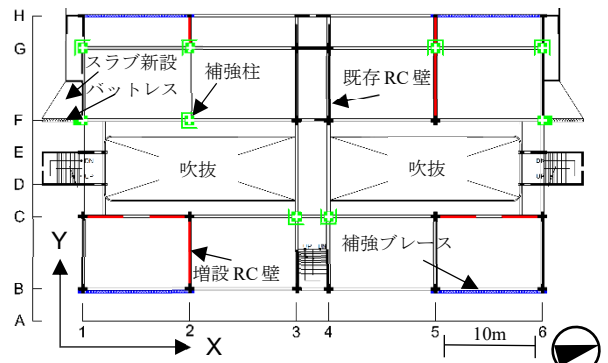


図-3 対象建物の2階壁3階伏せ図と補強工法

*1 芝浦工業大学大学院 理工学研究科 (正会員)

*2 芝浦工業大学 建築学部 博(工) (正会員)

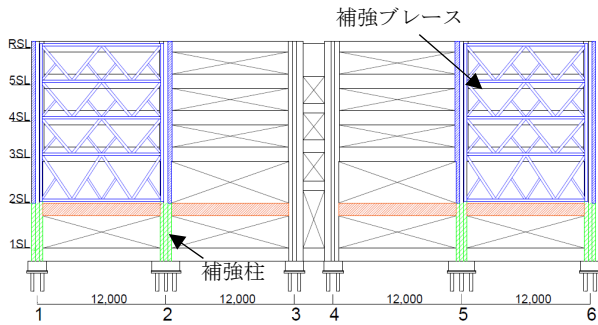


図-4 B 構面架構図

表-2 適用された主要な耐震補強工法

補強方法	階	構面・位置
W型鉄骨枠付きブレース補強 (側柱はコンクリート増設)	2~5	B通 1-2間・5-6間
	3~5	G通 1-2間・5-6間
	2	H通 1-2間・5-6間
バットレス	1~3	F通の両端部
十字型柱の鋼板巻き立て	1,2	2-F, 3-C, 4-C 1-G, 2-G, 5-G, 6-G
	1	1-B, 2-B, 5-B, 6-B
RC耐力壁の増設 (厚さ 200mm)	2	C通 1-2間・5-6間 2通 B-C間・G-H間 5通 F-G間・G-H間
	1	A通・H通 1-2間・5-6間

3. 常時微動計測

3.1 常時微動計測の計画

建物の現状における振動特性を把握するため、2022年10月に常時微動計測調査を実施した。計測は速度型地震センサ(KVS-300(株)近計システム)を4台用いて行った。設置場所は対象建物の1階、2階、3階、R階にセンサを設置し、セットごとにセンサの設置場所を対象建物の南側、北側、中央に変え、計3セット行った。各階に設置するセンサの平面位置を同一として、縦方向を揃え、1セット0.01秒刻みで1000秒間、常時微動を測定した。図-5に各センサの設置位置を示す。

3.2 固有周期

計測によって得られたデータを解析スパン 1024 データで区切り、移動スパン 512 データずつずらしながらフーリエ変換を繰り返し行い、求めた各スペクトルを平均することで各計測結果の平均フーリエスペクトルを作成した。地盤からのノイズ成分と上下の振動成分の影響を軽減するためR階のフーリエスペクトルを1階のフーリエスペクトルとUD方向のフーリエスペクトル比で除しフーリエスペクトル比を算出した。

常時微動計測により得られたX、Y方向の基準化フーリエスペクトル比(RF/1F/UD)のグラフを図-6、図-7に

示す。そこから算出された固有周期を表-3に示す。Y方向の卓越部分の範囲が広いのは、吹抜けの影響で様々な振動成分を含んでいるためと考えられる。

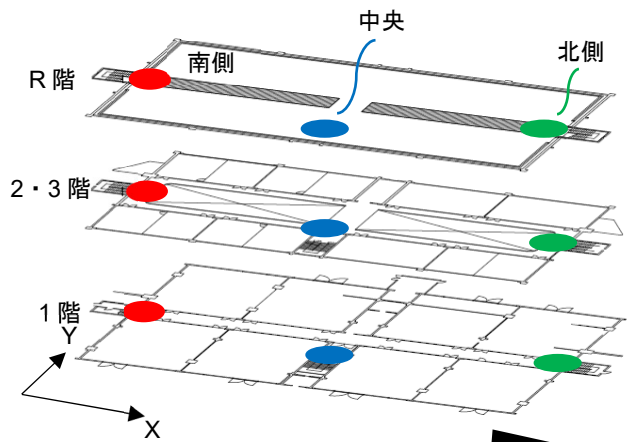


図-5 センサの設置位置

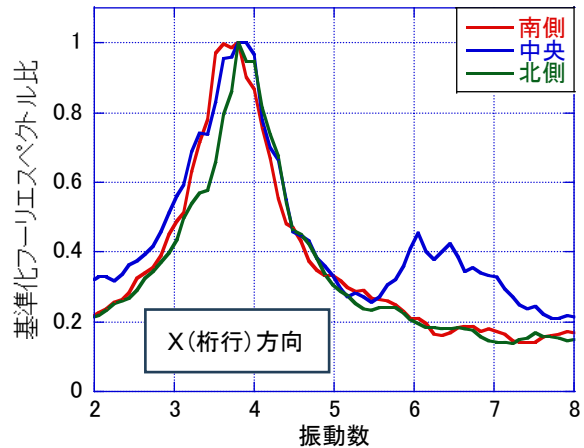


図-6 X方向基準化フーリエスペクトル比

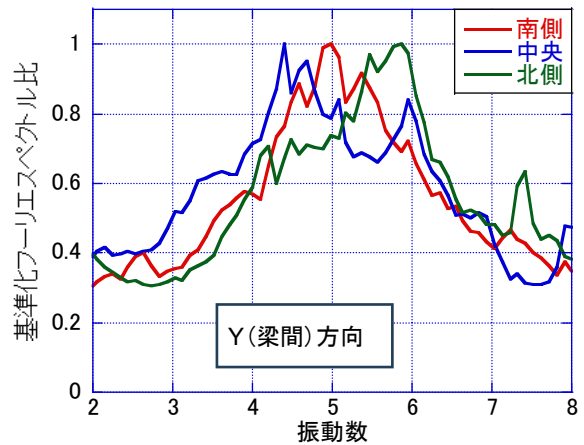


図-7 Y方向基準化フーリエスペクトル比

表-3 固有周期(常時微動計測)

計測箇所	X方向	Y方向
南側	0.262s	0.200s
中央	0.262s	0.227s
北側	0.262s	0.170s

4. 耐震診断

4.1 耐震診断の方法

補強前後の耐震診断には、耐震診断プログラム「BUILD.耐震 RC I & II/2017年基準 Ver.8(株)構造ソフト」を使用し、文献¹⁾に従って第2次診断を行う。

耐震診断で用いる材料特性を表-4に示す。経年指標Tは2001年の調査を基に0.933、形状指標S_bは吹き抜けの影響を考慮して0.975とした。

各階、各方向についての構造耐震指標I_sを算出し構造耐震判定指標I_{so}と比較することで耐震性能の検討を行う。また、学校建築物であることからI_{so}は0.7を採用する。十字型柱、T字型柱は図-8のように矩形断面にモデル化し、耐震診断に用いる。

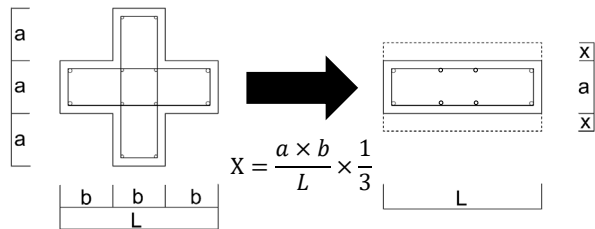


図-8 十字型柱のモデル化

4.2 耐震診断の結果

X方向の診断結果を図-9、Y方向の診断結果を図-10に示す。補強前ではX方向は耐震壁が少なく、1階から4階でI_s値が0.7を下回る結果となった。また、Y方向に関しては耐震壁の少ない2階が目立って低く、次に耐震壁の少ない3階が0.7を下回る結果となった。補強後のX方向では、2階～5階の鉄骨枠付きブレースの設置、1階～3階のバットレスの設置によって耐震性能が向上し全階安全という結果となった。Y方向では、2,3階のRC壁の増設、柱補強等が効果を発揮して安全という結果となった。図-11に補強前後のX方向についてのCT-F関係を示す。

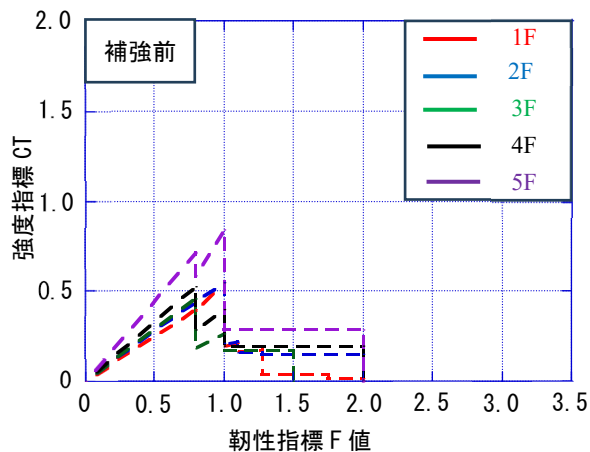


表-4 材料特性

コンクリート 圧縮強度[N/mm ²] (2001年調査時)	1階	2階	3階	4階	5階
	37.0	23.7	31.2	28.1	30.7
鉄筋	主筋・壁筋：SD295 せん断補強筋：SR235				

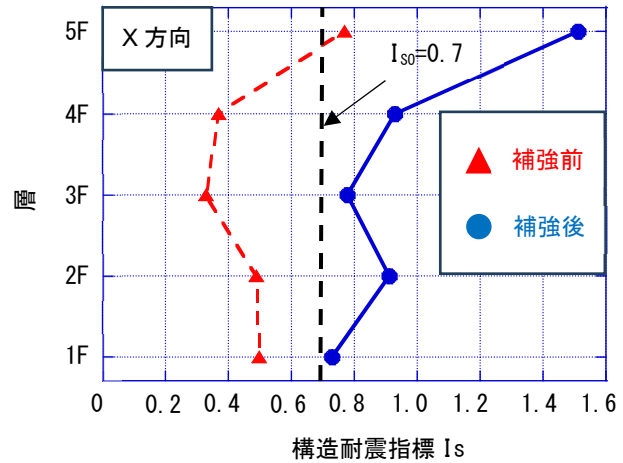


図-9 耐震診断結果(X方向)

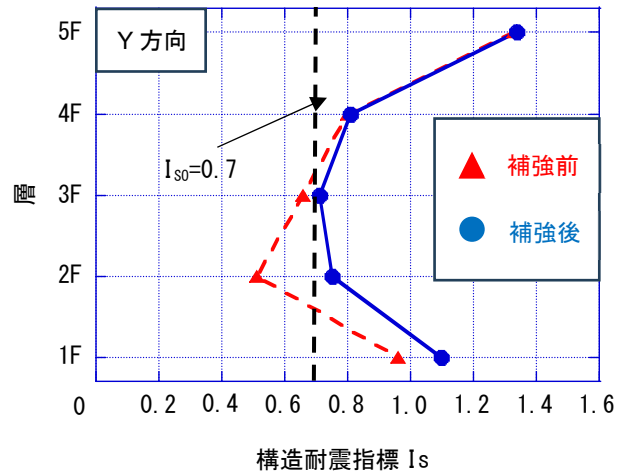


図-10 耐震診断結果(Y方向)

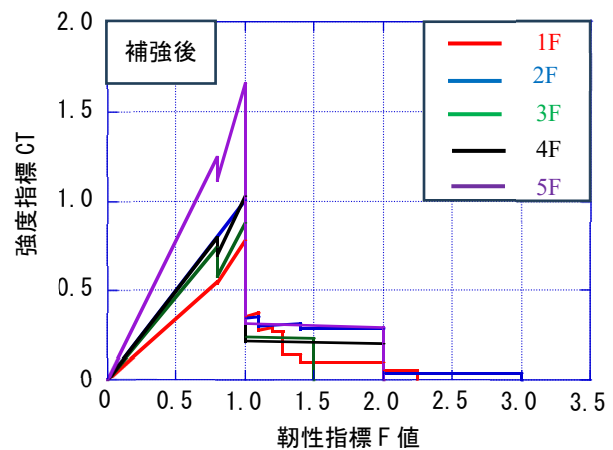


図-11 補強前後CT-F関係(X方向)

強度指標 CT は 1 階では 1.4 倍，2 階では 1.8 倍，3 階から 5 階では 1.9 倍，補強前に比べると大きくなっている。補強によって建築物全体の強度が上がったことがわかる。靱性指標においても 3 階，4 階では補強前では 0.8 で最大強度に達していたのに対し補強後では 1.0 で最大強度に達しており靱性に関しても向上した。

5. 立体フレーム解析

5.1 解析モデルの構築

立体フレーム解析を行うため，汎用解析ソフト「SNAP Ver8.0.0.6(株)構造システム」を使用し，補強前後のモデルを作成した。補強後の解析用立体フレームモデルを図-12 に示す。質量は各節点に集約し，杭基礎は基礎梁でつないだ柱脚下部でピン支持とした。既存躯体の柱と梁は図-13 に示す複合ばねモデルに置換した。接合部に加えて，袖壁，垂壁，腰壁を考慮して面位置までの剛域を設定している。曲げばねには武田モデル，せん断ばねにはトリリニアの原点指向型モデルを復元力特性として採用し，軸ばねは弾性とした。梁間方向の耐震壁は剛梁と 3 本柱から成るモデルに置換した。補強部材については，補強ブレースは既存躯体と剛梁で接続し両端ピンのトラス材に置換し，復元力特性をバイリニア型モデルとした軸ばねを有するモデルとした。各バネの履歴特性は文献 2) に記載されている。バットレスは耐震壁と剛床でモデル化し補強前のモデルに反映した。曲げばねとせん断ばねで，ひび割れ強度の超過でひび割れの発生を，曲げ降伏強度の超過で塑性ヒンジの発生を，せん断終局強度の超過でせん断破壊の発生を部材ごとに判断する。対象建物の大きな特徴である 3 階から R 階にある吹抜のモデル化については，全面にわたる剛床を仮定できないため，図-14 に示すように複数の剛床を設定することでモデル化した。剛床をつなぐ部分については，スラブの水平剛性と同等の剛性を持った断面の水平ブレースに置換することで，分離した剛床面の挙動を許容した。

5.2 固有値解析

補強前後モデルについて固有値解析を実施した。表-5 に立体フレーム解析による固有値解析の結果と常時微動計測によって得られた 1 次固有周期の結果を比較したものを示す。補強後の X 方向の固有値は 0.261s であり，補強前の 0.336s より小さくなっており，補強により剛性が増大していることがわかる。実測によって得られた固有周期と解析モデルの固有値解析によって得られた数値がおおむね一致していることから固有周期の観点からはモデルの妥当性を確認することができた。

5.3 静的増分解析

耐震補強が比較的多く施されている X 方向について静的増分解析を実施する。各階層せん断力の比率は， A_i 分

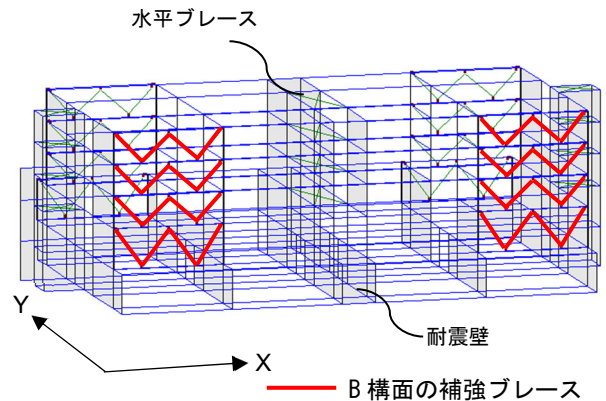


図-12 補強後フレームモデル

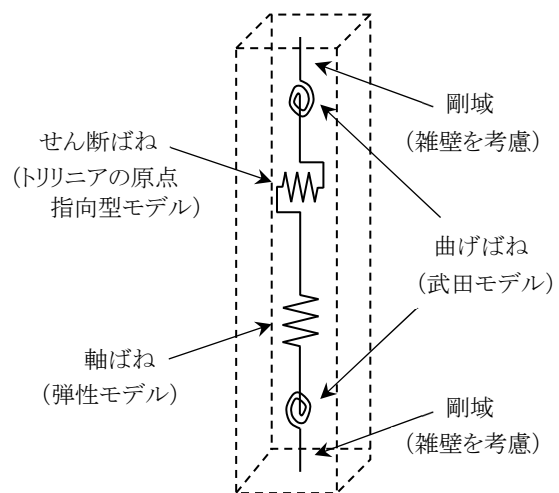


図-13 柱と梁のばねモデル

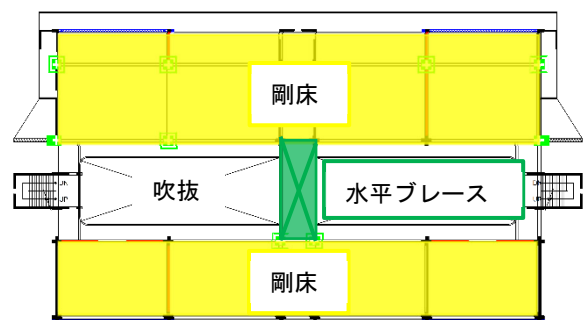


図-14 吹き抜け階の剛床と水平ブレースの設定

表-5 固有周期の比較

1 次固有周期(X 方向)		
固有値解析		常時微動計測
補強前	補強後	補強後
0.336s	0.261s	0.262s

布を用いる。ある層の層間変形角が $1/200\text{rad}$ となるステップを目標とし荷重増分を行い、 $1/200\text{rad}$ に達した時点で解析終了とする。また、今回の解析では柱のせん断破壊による耐力低下を考慮していない。図-15 に補強前の静的増分解析で得られた層せん断係数-層間変形角関係を、図-16 に補強後の結果を示す。また、はじめて鉛直部材のせん断破壊が生じた点を▲で示し、同ステップにおける他の階の応答点を点線で表す。鉛直部材のせん断破壊が発生した際のベースシア係数は、補強前が 0.25 程度、補強後が 0.50 程度で、耐力が 2 倍上昇しており、ブレースやバットレス等の補強による耐力の向上が確認された。また、せん断破壊が最初に生じる鉛直部材は補強前が 3 階 G 構面の柱であるのに対し、補強後は 3 階 C 構面の耐震壁であった。

5.4 地震応答解析

補強が施された対象建物の地震動による応答性状を把握するため、補強が多く施されている桁行方向について地震応答解析を実施する。数値積分には平均加速度法を用い、減衰は初期剛性比例型とし、1 次モードに対して 3% とする。なお、地震波は X 方向の 1 方向のみの入力とし、入力地震波は表-6 に示す著名地震波³⁾とする。図-17 に各地震動の減衰定数 5% における加速度応答スペクトルを示す。

図-18 に補強前後の各階の最大層間変形角の分布を示す。補強前について、JMA 神戸波の応答は大きく、1 階で $1/87\text{rad}$ 、2 階で $1/78\text{rad}$ 、3 階で $1/117\text{rad}$ と低層階で層間変形角が大きくなることが確認できた。2 階の層間変形角は、ELCENTRO 波では $1/147\text{rad}$ 、BCJL-2 波では $1/145\text{rad}$ となりほかの階より大きい。ELCENTRO 波や BCJ L-2 波より加速度応答スペクトルのピークが大きい JMA 大船渡波では、4 階の $1/561\text{rad}$ が最大であった。図-18 に示したように、地震波のスペクトルのピークが建物の固有周期より短周期側にあるためと考えられる。

補強後について、JMA 神戸波を除く 3 波では、大きな

層間変形角が発生することはなく補強の有効性を確認できる。JMA 神戸波でも、1 階で $1/310\text{rad}$ 、2 階で $1/246\text{rad}$ となり、補強前よりも最大層間変形角が抑えられた。しかしながら、JMA 神戸波の場合、4 階の $1/150\text{rad}$ は補強前の層間変形角を上回り、また、補強前後で分布形状が異なっていることが確認できる。

地震応答解析の結果から、補強による応答低減効果を確認するとともに、地震波の特性によっては、補強後も顕著な被害が生じる恐れがあることが判った。

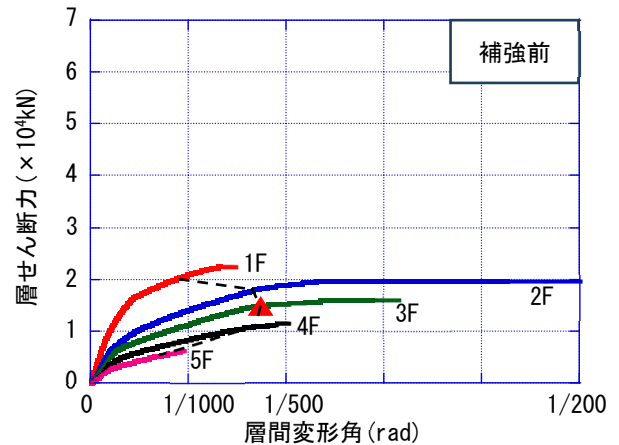


図-15 補強前の静的増分解析結果

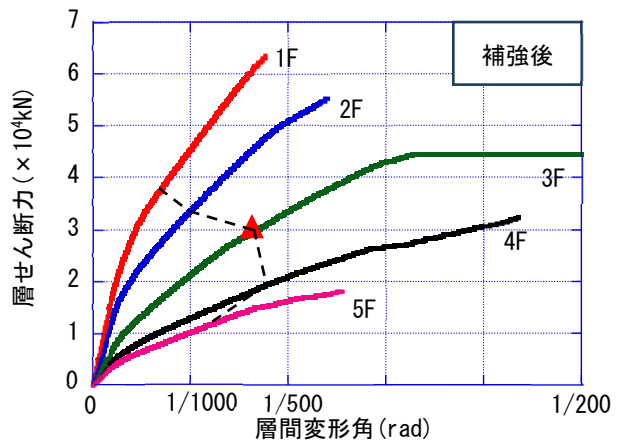


図-16 補強後の静的増分解析結果

表-6 入力地震動の一覧

地震名称 (観測年月日)	最大加速度 (Gal)	略称
EL CENTRO NS 波 (1940/05/18))	342	elc
JMA 神戸 NS 波 (1995/01/17)	818	kob
BCJ-L2 波 (模擬地震動)	356	bcj
JMA 大船渡 NS 波 (2003/05/26)	573	ohf

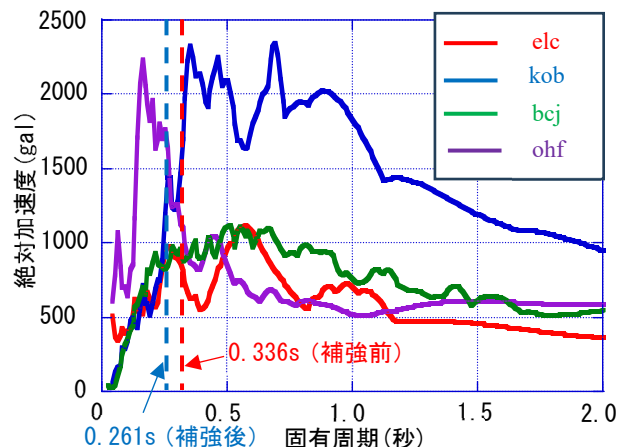


図-17 入力地震動の加速度応答スペクトル

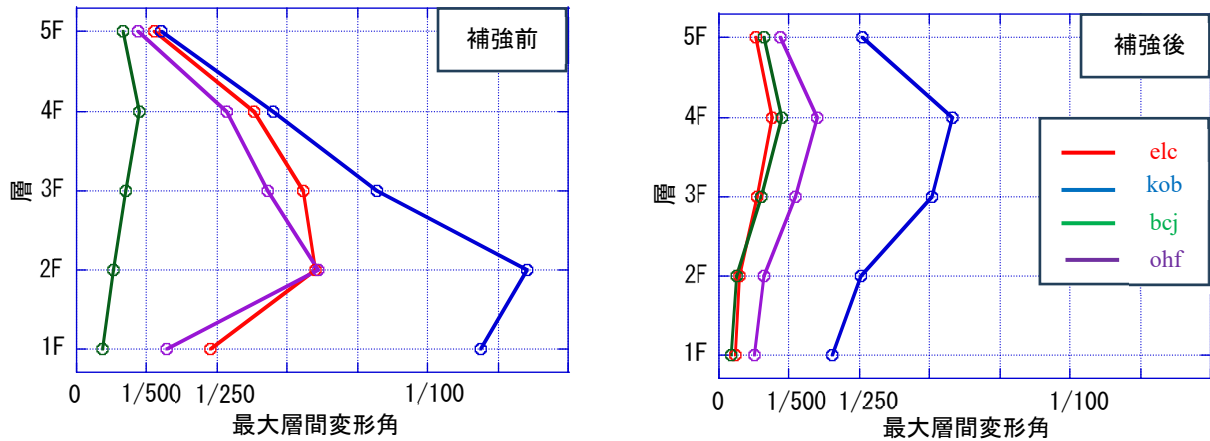


図-18 地震応答解析による最大層間変形角

6. まとめ

3階から5階にかけて大きな吹き抜けを有するRC造学校建築物を対象にして耐震補強の前後について耐震診断と立体フレーム解析を実施した。耐震診断において、補強前は、X方向の1階から4階で、Y方向の3,4階で「疑問あり」の判定となったが、補強によりX方向Y方向ともに全階で安全の判定となった。耐震診断の結果から採用された補強工法の有効性が確認された。立体フレーム解析において、増分解析では補強によってベースシア係数の増大が確認され、補強の有効性を確認できた。複数種類の入力地震波を用いた地震応答解析では、ほとんどのケースで補強による応答低減効果を確認した。ただし、入力地震波によっては補強前より応答が大きくなる階があった。補強後の剛性や耐力のバランスと入力地震波の特性に応じて、耐震補強後でも顕著な損傷が生じる可能

特性に応じて、耐震補強後でも顕著な損傷が生じる可能性がある。学校施設のような地震後の避難所など災害拠点の役割を担う建築物に関しては、耐震診断に加え詳細な解析を行うことを推奨する。

参考文献

- 1) (財)日本建築防災協会：2017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，2017年9月
- 2) 新井晴季，田中直樹，椋山健二：熊本地震を経験した耐震補強済みのRC学校建物の耐震性能，構造工学論文集，Vol.65B，pp.315-320，2019.3
- 3) 一般財団法人 日本建築センター：<https://www.bcj.or.jp/download/wave/>（2023年12月20日閲覧）