

### 3.2.4 耐震補強した構造物の性能評価 ～建築構造物の場合～

#### (1) はじめに

既存 RC 建物の耐震補強を行うときの基本的な概念を図-3.2.4.1 に示す。すなわち、既存建物の水平耐力を増加させる補強（強度抵抗型）、靱性を増加させる補強（靱性抵抗型）およびこの両者を混ぜ合わせた混合抵抗型の補強である。これらは RC 耐震壁や袖壁の増設、RC 柱の増し打ち・巻き立て（炭素繊維シート含む）、鉄骨ブレースの増設、RC フレームの増設、耐震スリットなどの在来工法によって実現できる。このほかにエネルギー吸収装置を組み込むことによる制振補強、建物に入力される地震動自体を減退させる免震補強も最近ではよく行われる。

いずれの方法を採用するにせよ大切なことは、既存建物の物理性状に適合した補強方法を採用することである。例えば比較的壁の多い建物に対してスリットを切る補強をしても実際には役に立たないどころか、逆に建物の強度を引き下げてしまい補強の体をなさない。スリット設置はその隣接部材の変形性能を増加させるが、強度は逆に低下する、というものだからである。

上述のような考え方で耐震補強された建物の性能評価についての考え方や研究例を以下に説明する。

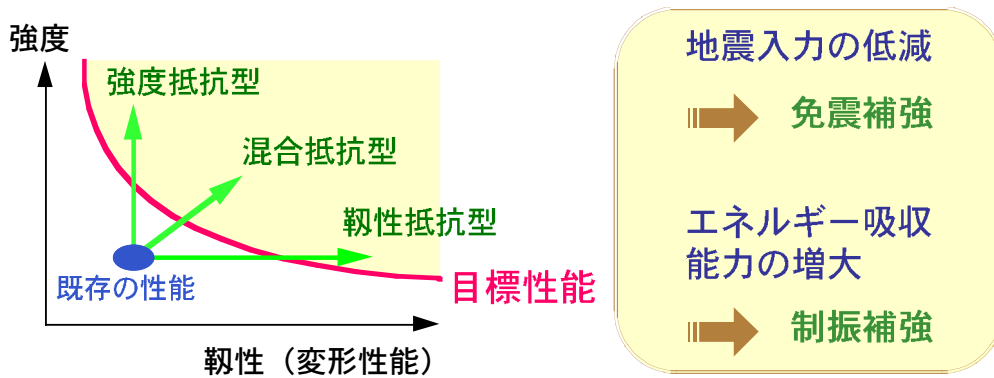


図-3.2.4.1 耐震補強の基本的な考え方

#### (2) 在来工法で補強された建物の耐震性能評価

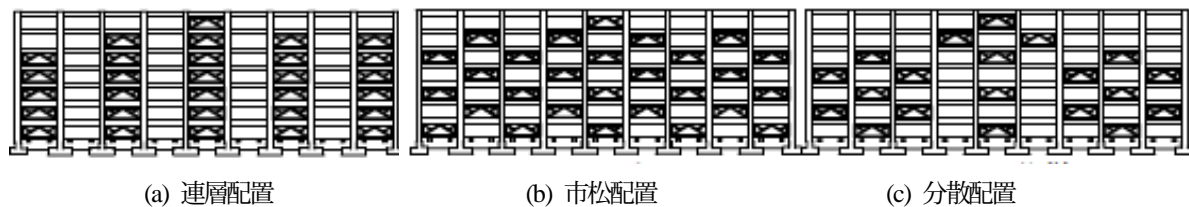
在来工法によって補強された RC 建物は基本的には日本建築防災協会の「既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計指針・同解説（2001 年改訂版）」[1]によって補強後の耐震性能を評価できる。ただしこれはあくまでも個別の補強部材の性能評価に基づいてアセンブルされた結果であり、補強建物が3方向地震動を受けたときの動的挙動を精確に評価するものではない。個別の補強建物の耐震性能評価を行う場合[2]を除くと、在来工法によって補強された建物全体の地震時挙動を骨組解析などで検討した研究はあまり多くはない[3～5]。

文献[2]では個別建物の耐震改修方法や地震応答解析による性能評価が豊富に紹介されている。

加藤・北山ら[3]は3階建て RC 学校建物を対象として、連層鉄骨ブレースが浮き上がり回転破壊するときの地震時挙動を立体骨組弾塑性解析によって検討した。連層鉄骨ブレースに直交する梁の抑え込み効果を定量的に確認した。また基礎が固定されて連層鉄骨ブレースの脚部が全体曲げ降伏する場合に、鉄骨縦枠の引張り抵抗によって鉄骨ブレースを含む RC 部分骨組の全体曲げ耐力が略算値よりも 24%増大することを指摘した。二方向水平力が作用する地震応答解析では、直交梁が降伏して連層鉄骨ブレースの浮き上がりに対する拘束効果が一定となったため、1層の応答変形が一方方向加力時の 2.4 倍に増大した。

小室・広沢[5]は鉄骨ブレースの配置が耐震補強された建物に与える影響を解析によって検討した。鉄骨ブレースの連層配置では上層部の保有水平耐力の増加は困難だが、市松配置や分散配置（図-3.2.4.2 参照）ではブレース

スの枚数に比例した保有水平耐力の増大が得られ、各階の剛性を確保しやすいので地震時の応答変形を抑制できる。ただし市松配置や分散配置では鉄骨ブレースに作用する水平力が RC 梁の軸力として伝達されることが必要であり、補強設計時にはこの点を考慮する必要がある。

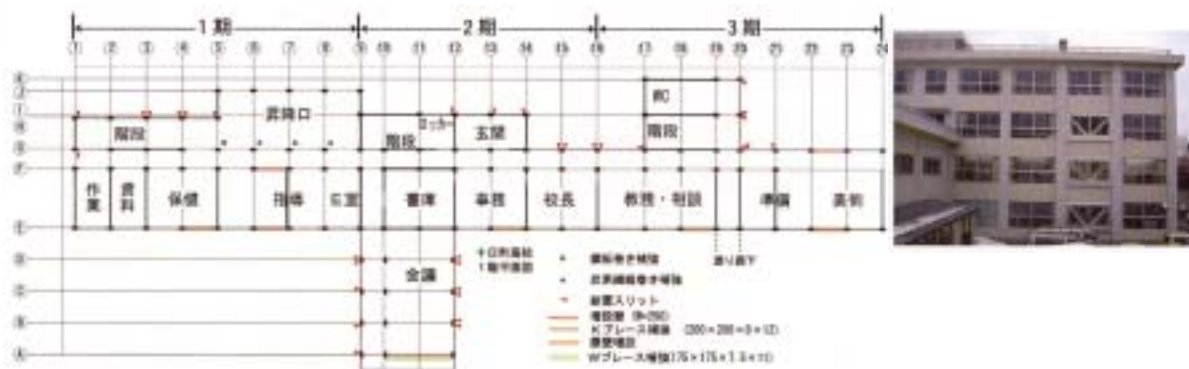


図一3.2.4.2 鉄骨ブレースの配置方法 (小室・広沢)

### (3) 実際に耐震補強された建物の被災事例

実際に耐震補強された建物が比較的大きな地震動の洗礼を受けた事例は少なく（筆者が知るのは 2003 年 5 月三陸南地震[6]、2004 年新潟県中越地震のふたつ）、そのような建物の補強効果について検討した研究はほとんどない[7]。

本多・加藤[7]の研究は耐震補強済みの RC 学校建物の補強効果を実際の被災状況と照らして検討した貴重なものである。耐震補強工事の進行中に新潟県中越地震（震度 6 弱）に遭遇して軽微と小破の被害を受けた学校建物 2 棟について耐震診断を行い、耐震性能と被害との関係を検討した。小破した校舎では、鉄骨ブレースや RC 袖壁で補強した構面は無被害だったものの、廊下側の補強を施さなかった壁柱・壁梁構面の壁柱がせん断破壊した。もうひとつの校舎（鉄骨ブレース、耐震スリットおよび RC 柱の炭素繊維シート巻きで耐震補強、[図一3.2.4.3](#) 参照）では第二種構造要素の極脆性柱が補強されずに残っていたため構造耐震指標（Is 値）は小さかった（2階で 0.44）にもかかわらず、被害は軽微なひび割れ程度であった。この要因として、建物の応答変形が第二種構造要素である極脆性柱の変形性能を超えなかった可能性を指摘している。

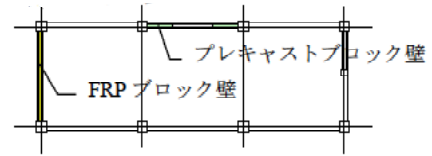
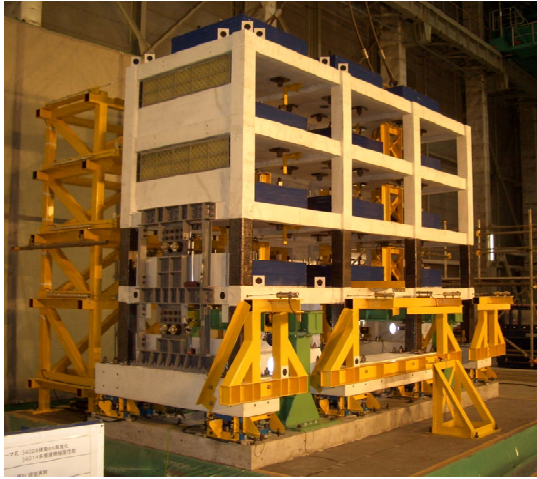


図一3.2.4.3 軽微な被害だった耐震補強建物の1階平面とブレース補強 (本多・加藤)

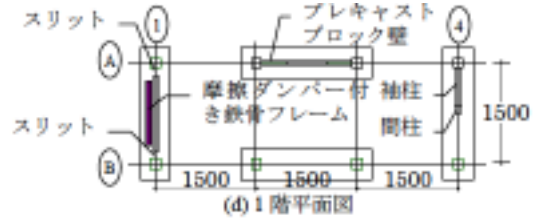
### (4) 制振・免震装置などによって補強された骨組の地震時挙動

在来工法あるいは新規開発の水平力抵抗要素や制振デバイスによって耐震補強された骨組の地震時挙動を実験によって検討した研究は幾つか行われている[8~12]。

勝俣・白井ら[8]は被災した RC 4階建て立体建物（1/4 スケール、1 スパン×3 スパン）を制振間柱、FRP ブロックによる耐震壁の開口閉塞および RC 柱の炭素繊維シート巻き立てによって耐震補強して振動台で加振するという動的実験を行った（[図一3.2.4.4](#)）。そこでは補強建物の地震時挙動が報告されており興味深い。



(e) 3階平面図



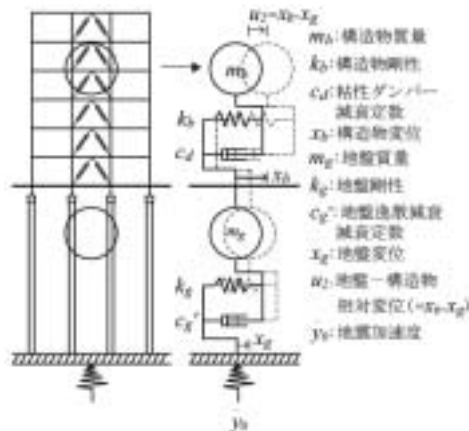
(d) 1階平面図

図—3.2.4.4 耐震補強された RC 縮小立体建物の振動台実験 (勝俣・白井ら)

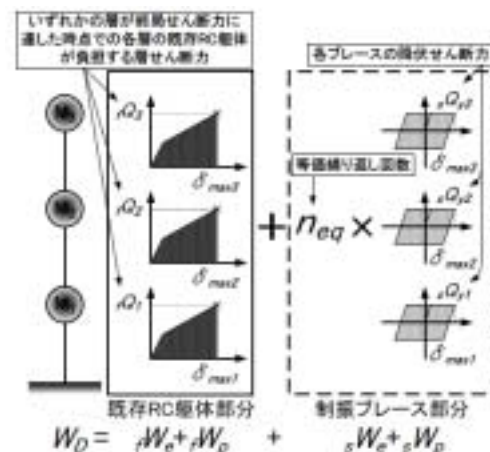
これに対して制振デバイスや免震によって補強された建物の耐震性能評価は、骨組全体あるいは質点系に縮約されたモデルの非線形地震応答解析によって為されるのが通常である[13~22]。制振デバイスを非線形バネとダッシュポットとに置き換えることは比較的容易であるため、その力学特性と既存 RC 部材のそれとを組み合わせることで骨組解析などを行うことによって制振補強の効果をパラメトリックに検討するという研究が多く行われている。

吉川・倉本ら[16]は制振デバイスを有する RC 建物の地震応答評価に関する研究を行った。限界耐力計算による応答値評価を試み、地震応答解析による最大応答変形に対して RC 4 層建物では安全側の評価となるが、RC12 層建物では高次モードの影響によって危険側の評価となることを指摘した。

本村・塩原ら[18]は粘性ダンパーによる地震応答の減衰効果に及ぼす構造物と地盤の相互作用の影響を調べた。基礎固定の一質点系モデルと、地盤と構造物との相互作用を考慮した二質点系モデル (図—3.2.4.5) とを用いて自由振動解析および地震応答解析を行って、地盤-構造物相互作用が粘性ダンパーの地震応答減衰効果に及ぼす影響を検討した。構造物の固有周期、地盤の固有周期および構造物と地盤の質量比によって粘性ダンパーによる効果が増減することを指摘した。



図—3.2.4.5 地盤-建物連成モデル (本村・塩原)



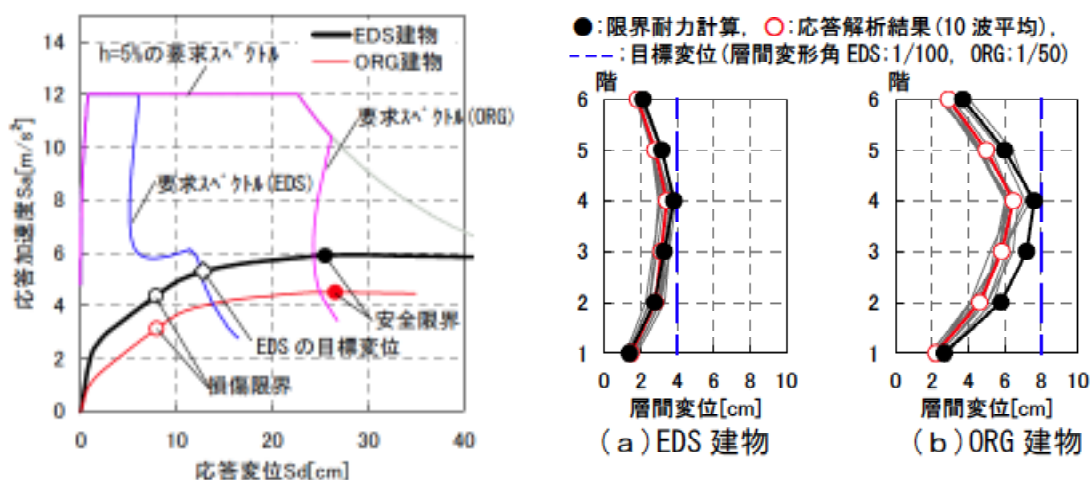
図—3.2.4.6 建物が吸収する全エネルギー量  $W_D$  の概念図 (落合・北村ら)



西川・前田ら[19]はピロティ構造のように、上部が剛強な RC 建物の1階に粘弾性ダンパーを取り付けて耐震補強したときの地震応答性状を一質点系モデルによって検討した。変形制御の点では在来の鉄骨ブレース補強のほうが良い結果を示した。鉄骨ブレースと同等の変形制御性能を付与するためにはダンパーの量を増やして支持部材（鉄骨ブレース）の剛性を増大することが必要であった。ダンパー補強建物ではブレース補強と較べて中小地震時の応答加速度上昇を抑制できた。

落合・北村ら[21]は履歴減衰型制振ブレースで耐震補強したせん断破壊型既存 RC 建物のエネルギー応答性状に注目して平面骨組解析を実施した。いずれかの柱がせん断破壊するまでを検討の対象とし、その他の部材では曲げ降伏や繰り返し履歴によるエネルギー消費は生じないと仮定した。制振ブレースの消費するエネルギー量は正負の最大変位振幅での1サイクルによって吸収されるエネルギー量と等価繰り返し載荷回数との積によって推定できた（図—3.2.4.6 参照）。制振ブレースの負担せん断力の増大とともに等価繰り返し載荷回数は小さくなる傾向があったが、その下限値はおおむね2となることを示した。

上田・北嶋ら[22]は制震化された RC 造建物の耐震性能評価の手法について検討した。制振補強された建物の耐震性能評価を行うためには地震応答解析による建物の応答値を用いるのが通常であるが、煩雑かつ多大の労力を要する。そこで制振補強建物の地震応答値を簡易に評価する手法として限界耐力計算を用いたところ、それによる応答推定値は骨組解析による応答値のほぼ上限となり、各層の応答変形分布もよく対応することを示した（図—3.2.4.7 参照）。さらに限界耐力計算による応答推定値を用いて、制振補強建物の地震リスク評価および耐震等級評価が可能であることを示した。



(a) 応答値の推定 (b) 限界耐力計算と骨組解析による地震応答の結果

注： EDS 建物—制振補強した建物、 ORG 建物—補強前の現状建物

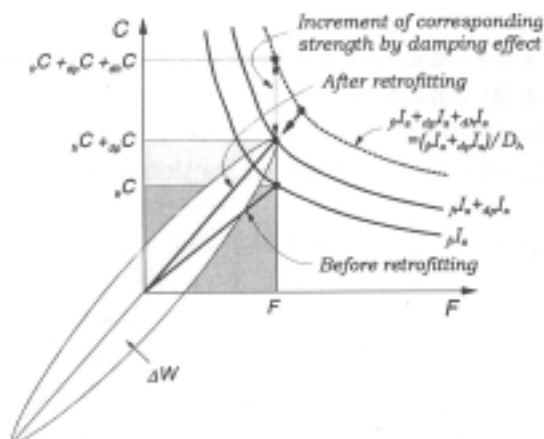
図—3.2.4.7 制振補強された建物の地震応答の推定（上田・北嶋ら）

#### (5) 制振補強された建物の性能を簡易に評価する方法

エネルギー吸収装置を組み込んで制振補強された建物の耐震性能を日本建築防災協会の耐震診断基準を援用することによって評価する方法も提案されている[23,24]が、限られた検討事例に基づいているため、在来工法による耐震補強と同等の信頼度を持つ耐震性能評価を可能にするためには、さらなる研究が望まれる。

倉本・飯場ら[24]は、補強前と後とで建物の変形能力（靱性指標  $F$ ）が変化しないという条件の下で、 $I_s$  指標は補強前の強度指標と補強デバイスによる強度指標および補強デバイスによる減衰効果を用いて算出できる、とした（図—3.2.4.8 参照）。振動台実験結果を用いていくつかの仮定の下で推定された補強骨組試験体の  $I_s$  値は、こ

の提案法によって算定されたIs 値とほぼ一致したことから、提案法の予測精度が良好であると判断した。



図—3.2.4.8 制振補強された建物の構造耐震指標の評価法概念（倉本・飯場ら）

#### 参考文献

- [1] 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改修設計指針・同解説（2001年改訂版）、2001年10月
- [2] 日本建築構造技術者協会編：構造レトロフィット 特殊耐震・免震・制振改修の事例、建築技術、2001年6月
- [3] 加藤弘行、北山和宏、李康寧：連層鉄骨ブレースの浮き上がりを生じる鉄筋コンクリート建物の立体弾塑性解析、コンクリート工学年次論文集、Vol.24-3、2002年6月、pp.1201-1206.
- [4] 永作智也、北山和宏、李康寧：連層鉄骨ブレースで耐震補強された RC 建物の三方向地震応答解析～連層鉄骨ブレースが基礎浮き上がり破壊あるいは全体曲げ破壊する場合～、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-2 構造 IV、2006年9月、pp.649-650.
- [5] 小室達也、広沢雅也：既存 RC 系中高層集合住宅の耐震補強における補強部材の連層配置や市松配置等の配置による影響の検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.24-3、2002年6月、pp.1237-1242.
- [6] 北山和宏、前田匡樹：平成15年5月26日宮城県沖の地震による文教施設の被害調査報告、文教施設協会、季刊文教施設、2003年夏号、pp.97-104.
- [7] 本多良政、加藤大介：2004年新潟県中越地震における耐震補強した RC 造建物の補強の効果、日本建築学会構造工学論文集B、2006年3月、pp.313-319.
- [8] 勝俣英雄、白井和貴、増田安彦、壁谷澤寿海：耐震補修・補強を施した鉄筋コンクリート造壁フレーム模型の振動台実験、コンクリート工学年次論文集、Vol.28-2、2006年7月、pp.391-396.
- [9] 木村将土、北嶋圭二、中西三和、安達洋：制震補強された既存校舎の実大耐震実験、コンクリート工学年次論文集、Vol.22-3、2000年6月、pp.1675-1680.
- [10] 佐藤照祥、北山和宏、岸田慎司、加藤弘行：鉄骨ブレースで補強された RC 骨組の耐力と変形性能に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.26-2、2004年7月、pp.1339-1344.
- [11] 松田拓己、渡邊史夫、河野進、高尾和弘：自己圧着ブレースで補強した RC 造架構が全体曲げ崩壊型となる場合の耐震性能、コンクリート工学年次論文集、Vol.28-2、2006年7月、pp.1087-1092.
- [12] 神谷隆、山本泰稔、伴幸雄ほか：鋼板内蔵型外付け補強工法による既存低強度コンクリート造架構の補強実験（その2～5）、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 IV、2005年9月、pp.573-578.

- [13] 江藤啓二、菊池健児、吉村浩二：鋼管横補強 RC 短柱を用いた補強要素を有する RC 建物の地震応答、コンクリート工学年次論文集、Vol.22-3、2000年6月、pp.1591-1596.
- [14] 田口孝、田才晃：制震装置としての RC 造二次壁を用いた建物モデルの地震応答性状、コンクリート工学年次論文集、Vol.24-2、2002年6月、pp.1051-1056.
- [15] 毛利邦寛、菊池健児、吉村浩二、宮川和明：制震ブレースを組み込んだ RC 造建物の地震応答、コンクリート工学年次論文集、Vol.24-2、2002年6月、pp.1063-1068.
- [16] 吉川直子、倉本洋、松本和行、中坂亮：制振デバイスを有する RC 造建築物の地震応答評価に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.25-2、2003年7月、pp.1315-1320.
- [17] 竹中啓之、和泉信之、高橋孝二、飯塚信一：複数の制振デバイスを組み込んだ RC 造骨組の耐震性能に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.25-2、2003年7月、pp.1369-1374.
- [18] 本村一成、蒲田光昭、塩原等：粘性ダンパーによる地震応答の減衰効果に及ぼす構造物と地盤の相互作用の影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.25-2、2003年7月、pp.1405-1410.
- [19] 西川和明、康在完、前田匡樹：粘弾性ダンパーを用いて耐震補強した既存 RC 造建物の地震応答、コンクリート工学年次論文集、Vol.26-2、2004年7月、pp.1273-1278.
- [20] 大村哲矢、林静雄：制震間柱を有する鉄筋コンクリート造高層建物の耐震性能に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.26-2、2004年7月、pp.1093-1098.
- [21] 落合徹、藤井賢志、北村春幸：履歴型制振ブレースを設置した既存低層 RC 造建物のエネルギー応答性状、コンクリート工学年次論文集、Vol.28-2、2006年7月、pp.1201-1206.
- [22] 上田英明、横内基、北嶋圭二：制震化された RC 造建物の耐震性能評価法に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.28-2、2006年7月、pp.889-894.
- [23] 松本優、北嶋圭二、中西三和、安達洋：摩擦ダンパーを用いた既存鉄筋コンクリート造建物の耐震補強設計に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.21-1、1999年6月、pp.391-396.
- [24] 倉本洋、飯場正紀、和田章：制振補強を施した既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断法、日本建築学会構造系論文集、第559号、2002年9月、pp.189-195.

[担当 北山和宏]