Japan Concrete Institute

委員会報告 「耐震補強の評価に関する研究委員会報告」

菅野 俊介[*1]、石橋 忠良[*2]、大内 一[*3]、
勝俣 英雄[*4]、佐藤 勉[*5]、中埜 良昭[*6]、運上 茂樹[*7]

＜委員構成＞

委員長	菅野 俊介	広島大学工学部		幸左 賢二	九州工業大学工学部
副委員長	石橋 忠良	東日本旅客鉄道（株）		坂田 英一	（株）間組技術研究所
幹 事	大内 一	（株）大林組技術研究所		佐藤 昌志	北海道開発局（99.4～）
	運上 茂樹	建設省土木研究所		塩原 等	東京大学大学院工学系研究科
	勝俣 英雄	（株）大林組技術研究所		下村 匠	長岡技術科学大学工学部
	佐藤 勉	（財）鉄道総合技術研究所		滝本 和志	清水建設（株）技術研究所
	中埜 良昭	東京大学生産技術研究所		中村 晋	日本大学工学部
委 員	浅野 美次	（株）日建設計東京本社		中野 克彦	東京理科大学工学部（99.4～）
	井ヶ瀬良則	日本道路公団試験研究所		福島 順一	大成建設（株）設計本部
	岡野 素之	（株）大林組技術研究所（2000.3～）		福山 洋	建設省建築研究所
				前田 匡樹	東北大学大学院工学研究科（99.4～）
	岡本 大	（財）鉄道総合技術研究所		益尾 潔	（財）日本建築総合試験所
	加藤 大介	新潟大学工学部（99.4～）		宮内 靖昌	（株）竹中工務店技術研究所
	北嶋 圭二	（株）青木建設研究所		渡辺 一弘	都市基盤整備公団

1．はじめに

構造体系が仕様規定型から性能規定型に移行するのに伴い、既存構造物の耐震補強の分野でも目標とする性能を明確に示した設計が求められる。こうした性能設計において構造物の耐震性能評価は最重要課題となるが、耐震補強を対象にそのためのモデル化や評価手法に関わる研究が十分に行われているとは言い難い。

このような背景から、種々の工法により補強されたコンクリート部材や架構の耐震性能を、耐震補強効果の観点から評価するためのモデル化や手法について検討し、土木構造物・建築構造物に共通して適用できる評価方法を探ることを目標に本委員会の活動を進めてきた。

2 年間にわたる活動の前半は、土木・建築でこの課題に対する共通の認識を得るべく、全体会議を通して議論を進め、後半は４つの WG（WG1:巻き立て補強、WG2:全体系補強、WG3:新工法、WG4:補強目標）を設置し、各 WG にて詳細検討を進めた。以下に WG 毎に活動の概要を報告する。

2．WG1（巻立て補強）の活動概要

＜委員構成＞
勝俣 英雄（主査）、佐藤 勉（主査）、井ヶ瀬良則、岡本 大、幸左 賢二、坂田 英一、佐藤 昌志、中野 克彦、福山 洋、前田 匡樹、渡辺 一弘

2.1 概要

耐震補強工法として一般に適用されている巻立て工法については，各種機関等において部材実験が広く行われている．今後，性能設計への流れを考慮し，ＷＧ１では巻立て補強後の耐震性能の評価方法について検討した。検討の方

＊ 1 広島大学教授 工学部第四類建設工学講座 工博（正会員）
＊ 2 東日本旅客鉄道（株）建設工事部構造技術センター 担当部長 工博（正会員）
＊ 3 （株）大林組技術研究所土木第四研究室 室長 工博（正会員）
＊ 4 （株）大林組技術研究所構造第一研究室 主任研究員（正会員）
＊ 5 （財）鉄道総合技術研究所技術開発事業本部 主幹技師 工博（正会員）
＊ 6 東京大学助教授 生産技術研究所 工博（正会員）
＊ 7 建設省土木研究所耐震技術研究センター耐震研究室 室長 工博（正会員）

NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

法は，既往の文献等から実験データベースを作成し，部材の耐力，変形性能の評価方法，変形と損傷との関連に着目して検討を行った。なお，データベースは建築学会で作成されたフォーマットを利用させていただいた。

また，建築や土木分野における巻立て補強に関する既往の評価手法について，モデル部材を設定したベンチマークテストによる補強効果の比較を行った。

なお，ここで対象とした巻立て補強は，ＲＣ巻立て補強，鋼板巻立て補強，新素材巻立て補強で，主として，せん断耐力の向上および変形性能の向上を目的とした巻立て補強である．また，橋脚等における段落とし部の補強や基部補強についても，検討を行った。

2．2 骨格曲線のモデル化と部材の損傷レベル

データベースの作成にあたっては，巻立て補強による骨格曲線のモデル化を図１に示すようなＣ点，Ｙ点，Ｍ点，Ｎ点を定義し，実験データを整理した。骨格曲線は，モーメントＭと部材角θの関係で表現し，軸力によるＰ—Δ効果を補正した。巻立て補強による補強効果の評価指標としては，主としてＮ点における終局部材角θn と変形性能に影響を及ぼす各種パラメータ（曲げせん断耐力比等）との相関やθn の評価手法の考察を行った。

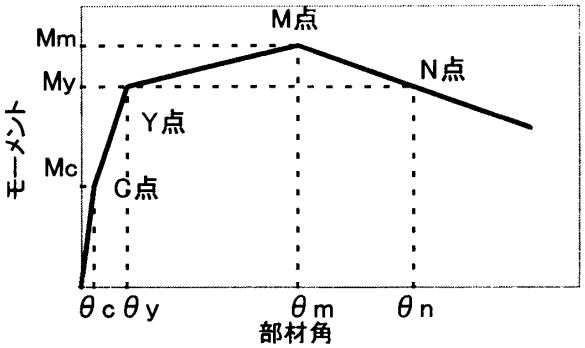
また，部材の変形と損傷レベルの関係について，載荷段階に応じて以下のように考え方を整理し，骨格曲線の折れ点との関係を検討した。

ＯＣ間：無損傷

ＣＹ間：材端コンクリートにひび割れ，仕上げモルタルにひび割れ。

ＹＭ間：ＲＣ巻立て工法の場合は，ひび割れ幅の拡大，かぶりの部分的な剥落。鋼板巻立て，シート巻立ての場合は，鋼板やシートとコンクリート肌別れ。

ＭＮ 間：軸方向鉄筋の座屈，帯鉄筋の変形。鋼板巻立て，シート巻立ての場合は，鋼板やシートの膨らみ，シートの局部破断など。



Ｃ点：曲げひび割れ発生点

Ｙ点：軸方向鉄筋降伏点

Ｍ点：最大荷重点

Ｎ点：Mm の 80%に低下した点

図１　部材の骨格曲線のモデル化

2．3 ベンチマークテストによる各工法の補強効果

建築柱，道路橋脚および鉄道高架橋柱を補強対象として，各機関で適用されている設計式による巻立て補強効果の試算を行った。ある目標性能を確保するために必要な補強量をＲＣ巻立て，鋼板巻立ておよび新素材巻立ての各工法それぞれについて比較できるようにまとめた。

一例として，鉄道高架橋柱における鋼板巻立てと炭素繊維巻立て補強の比較例を図２，３に示す．補強対象は 0.8m 矩形断面，柱高さ 6m，せん断スパン 3.0m，軸方向鉄筋 SD295A－D32（20 本），せん断補強筋 SR235－φ9（基部 150mm 間隔），既存部材のコンクリート強度 24N/mm^2，載荷軸力 2352kN の例である。

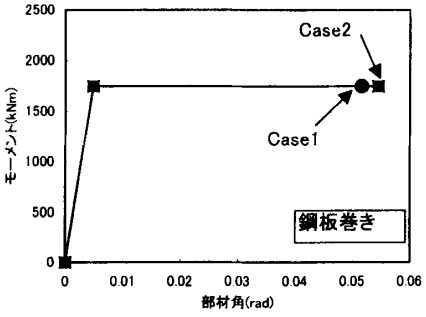


図２　鋼板巻立て補強の骨格曲線

NII-Electronic Library Service

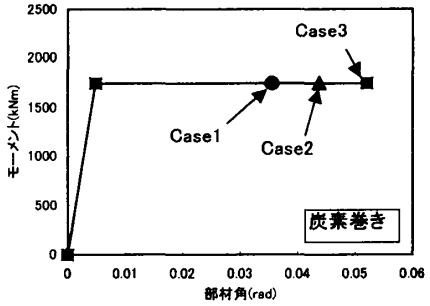


図３　炭素繊維シート巻立補強の骨格曲線

鋼板巻立て補強は，補強鋼板を CASE1 (SS400, 4.5mm 厚さ), CASE2 (SS400, 6.0mm 厚さ)とし，炭素繊維シート巻立て補強は，引張強度 3000N/mm^2，目付量 300g/m^2 のシートで，巻き数を CASE1 (4 層), CASE2 (6 層), CASE3 (8 層)とした場合，鉄道における評価式を用いて補強量と変形性能の関係を示したものである。

3. WG２（全体系補強）の活動概要

＜委員構成＞
中埜　良昭　(主査)、浅野　美次、運上　茂樹、
岡野　素之、北嶋　圭二、坂田　英一、中村　晋、
宮内　靖昌、渡辺　一弘

ＷＧ２では、架構の耐震補強工法と補強効果の評価方法，および応答制御型耐震補強工法と補強効果の評価方法，について検討した。

3. 1 架構の耐震補強

架構の耐震補強では単に補強した柱や壁などの単独部材の性能向上のみならず，それらを含む架構全体の耐震性能を総合的に向上させることが基本かつ重要であるとの観点から，その補強架構全体の性能評価を，主として従来から比較的適用事例の多い鉄筋コンクリート造壁や鉄骨枠付きブレースにより補強された建築物，ＲＣや鋼板巻き等により柱補強されたラーメン高架橋や地下鉄施設を対象に，1995 年兵庫県南部地震以降の耐震補強事例・設計事例を中心に最近の動向をとりまとめた。

まず建築物では，近年の耐震補強事例における補強工法の採用事例の分析により，鉄筋コンクリート造壁の増設による補強事例が主流ではあるものの，特に兵庫県南部地震以降，鉄骨枠付きブレースの採用事例も極めて増加の傾向にあること，補強対象建築物としては学校を中心とした公共建築物が主であることなどを示した。

また，補強対象建築物の高さ方向における強度バランスの改善に関する補強前後の比較検討事例，過去に地震で被災後，耐力のアンバランスを残した改修により継続使用していた建物が再度被災した事例，弾性剛性に基づく剛性偏心は小さいものの耐力偏心が無視できない架構を対象としたねじれ地震応答解析事例，などを紹介し，補強設計時には，平面上や立面上における強度のバランスを適切に確保することが重要であることを指摘している。

さらに，補強架構の性能評価として，兵庫県南部地震以降の事例を含む既往の実験的研究事例を分析し，架構耐力のみならず，最大耐力時における変形レベルや限界部材角について，同一補強工法間のみならず異種工法間での相互比較を試みている．また近年研究が進められている改良型補強工法の例として，出入り口用開口付き鉄骨ブレース，プレキャスト壁増設補強，外付けフレーム補強などについて，架構全体としての耐震性能を確保する上で設計・施工時に留意すべき点を指摘している。

土木構造物では，まず上部構造物として道路橋や鉄道橋などのＲＣ造ラーメン架構を対象に，これらで採用事例の多い部材の靭性抵抗型補強工法について概説している．ついで，宮城県沖地震以降実施されたＲＣ２層ラーメン架構を対象とした構造実験による挙動把握，全体系解析による地震被害分析を通じて得られた補強２層ラーメン高架橋の性能評価事例，兵庫県南部地震以降精力的に実施されてきた実大柱部材のポストピーク挙動および比較的大型の１層ラーメン架構模型における柱部材の補強効果に着目した研究事例などを中心に，主として柱部材の補強が全体架構系に及ぼす効果に関する検討結果

NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

や今後の課題を考察している。

また地下鉄施設ではその中柱を対象とした靭性抵抗型補強や中柱崩壊後の床板落下防止を目的とした補強が実施されており，それらの工法を概説するとともに，全体系の補強効果に関する耐震解析手法の概要や，中柱を炭素繊維巻き立て補強した実構造物を対象にその補強前後の全体系の挙動解析結果を紹介している。

3．2応答制御型補強

ここでは構造物に地震動が作用した際に生じる加速度や変位などの応答を，何らかの機構・装置により意図的に低減させることを主眼とした免震工法と制震工法に着目し，それぞれの工法の適用事例や性能評価手法について検討している。

建築物では，まず免震工法として，基礎免震，地下免震，中間層免震を，制震工法として，履歴ダンパー，摩擦ダンパー，粘性ダンパー，オイルダンパーを，それぞれ代表的な事例として選定し，これらを用いた耐震補強事例を紹介するとともに，それぞれの建物の既存耐震性能，目標性能と補強概要，補強後の耐震性能評価，施工方法，などについて紹介している．

次に，主として制震補強工法を中心に，従来の耐震補強工法との相違点と補強設計における基本的な考え方を解説し，さらに，制震補強による補強効果の評価方法について，これまで一般に用いられることの多かった動的地震応答解析による架構の性能照査に代表される動的評価に加え，近年研究が進められている静的評価手法の例，すなわち，従来の耐震診断手法との整合を図ったIs値換算手法，エネルギースペクトル法，等価線形化方法，応答スペクトル法，などについても，それぞれの背景，位置づけや基礎データも交え，具体的に解説している。

一方，土木構造物では，新設構造物を中心とした一般橋梁における免震工法および長大橋における制震工法の採用が見られるものの，これらの工法を利用した耐震補強事例はまだ少ないのが現状である．ここではこれらの工法を用いた耐震補強設計の基本的な考え方（概念），解析における架構の応答評価手法とそのクライテリアなどについて，道路橋を対象に実施された免震補強工法による補強効果の確認検討事例や，鉄道高架橋を対象として提案されている制震補強工法規準の紹介など，最近の研究・検討事例を紹介している。

4．WG３（新工法）の活動概要

＜委員構成＞
運上　茂樹（主査），岡本　大、下村　匠、
滝本　和志、中村　晋、中野　克彦、
福島　順一、益尾　潔、宮内　靖昌

WG３では、新しい工法により補強されたコンクリート構造物の耐震性能と評価方法に関する検討を行った。WGでは、以下に示すように、主として新工法の観点の整理分類を行うとともに、こうした観点に合致する合計50工法の新しい耐震補強工法を対象にアンケート調査を行い、新工法の特徴をまとめるとともに、補強効果の検討データや実験データの有無に関する整理を行った。

4．1新工法の観点の整理分類

何が新しい工法か、あるいは、何を解決するための新しい工法であるかの観点として、1)工法自体は従来工法であるが部分的に新しい技術を活用するなど従来工法の発展型の新工法、2)施工条件の制約などを解決するための新しい工夫が活用された新工法、3)新しい材料や新しい構造など従来工法にはない抜本的な新しい工法、の大きく３つに分類し整理した。これらの概要を示すと以下の通りとなる。

１）従来工法からの発展型の新工法

例えば、巻立て工法であっても、定着や接合部に新しい工夫が施された新工法や、要求性能、損傷の進展までを考慮した評価方法などの新しい評価方法を有する新工法が該当する。

NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

2）施工条件の制約下における新工法

施工条件に関しては、以下のような制約下での新しい工法が該当する。

□急速施工（例：工費節減、工事占用時間・迷惑度の低減）

□居ながら施工（例：工事占用空間・迷惑度の低減）

□施工空間（例：実行上当該部材の補強が不可能な場合：構造下に住居・店舗のある場合、実質的に手が届かないボックスカルバートの側壁など）

□騒音(例：アンカーを使わない接着工法，コンクリートチッピングを不要とする接着工法)

□環境（例：コンクリートチッピングを不要とする工法）

□火、水等の使用可能性（例：電子機器近くでの工事のため、水を含むコンクリートを使わず、樹脂接着剤等を使用する工法。また、火気厳禁の場所で溶接が不可能な場合の工法）

□水中施工（例：ドライアップを不要とする工法・工費節減）

□維持管理性・耐久性（例：水中、地中等、長期耐久性を必要とする工法）

3）従来工法にない抜本的な新工法

例えば、従来使用されていない高強度材料や高弾性材料等の高性能材料や、高施工性材料などの新しい材料を活用した工法や、耐震補強工法自体が構造的に新しい工法が該当する。

4．2新しい耐震補強工法のアンケート調査

WGの中で新工法に関する資料を収集し、新工法に関する議論を進めた結果として、新しい工法については各分野の専門家により開発が行われており、その詳細を具体的に把握するためには、開発者にその特徴や検討データ、実験ータの有無等についての調査が必要と考え、新しい耐震補強工法の詳細を含む情報を整理するためにアンケートを実施した。

主として建築物に用いられている新工法に関しては，合計38工法についてアンケート調査を実施した。建築物では、「居ながら施工」という観点が非常に重要な要素となっており、これを解決することを目的とした高強度繊維材の張り付け工法、耐震壁工法、外付けブレース工法などの新工法を対象に、各工法の特徴、性能の検証データ等を整理した。

また、土木構造物に用いられている新工法に関しては、合計12工法についてアンケート調査を実施した。土木構造物に関しては主として橋梁に対する耐震補強工法を中心に整理を行った。施工性の向上、水中施工法、プレキャスト構造の活用、溶接を不要とする工法などの新工法を対象に、各工法の特徴、性能の検証データ等を整理した。

5．WG４（目標性能）の活動概要

＜委員構成＞
石橋　忠良　（主査）、井ヶ瀬良則、北嶋　圭二、幸左　賢二、塩原　等、下村　匠、菅野　俊介

WG４は鉄筋コンクリート構造物の耐震補強の現状と耐震補強における目標性能について調査した。土木分野、建築分野および米国の例に分けて、調査結果をまとめる。

5.1建築分野における耐震補強と目標性能

建築分野では，①強度抵抗型補強，②靭性抵抗型補強および③応答制御型補強，の３つのタイプの補強が行われている。従来型の補強①ではＲＣや鉄板の耐震壁や鉄骨ブレースが用いられ，②では鉄板や連続繊維を柱に巻きつける方法が用いられている。③は免震や制震機構を設けて地震による応答（せん断力，変形）を減らす方法で、最近用いられるようになった。

補強における目標性能は耐震診断基準，耐震改修促進法，官庁営繕の耐震診断基準にそれぞれ示されている。総プロの成果として提案された建築構造性能評価体系では，基本構造性能として，安全性（人命の保護）、修復製（財産の保

NII-Electronic Library Service

護)，使用性（機能性，居住性の確保）を考え，構造骨組、建築部材，設備機器，什器および地盤の観点から限界状態を定めている。目標性能評価項目と限界状態の考え方を表１に示す。

表１性能評価項目と限界状態

基本構造性能	安全性（人命の保護）	修復製（財産の保護）	使用性（機能性，居住性の確保）
	安全限界 Safety Limit	修復限界 Repairable Limit	使用限界 Serviceability Limit
構造骨組	鉛直支持力を喪失しない	損傷が設定範囲に収まる	機能障害や感覚障害を生じない
建築部材	脱落・飛散しない	損傷が設定範囲に収まる	機能障害や感覚障害を生じない
設備機器	転倒・脱落・移動しない	損傷が設定範囲に収まる	機能障害や感覚障害を生じない
什器	転倒・脱落・移動しない	損傷が設定範囲に収まる	機能障害や感覚障害を生じない
地盤	崩壊や大規模変状が生じない	損傷が設定範囲に収まる	機能障害や感覚障害を生じない

5.2 土木分野における耐震補強と目標性能

土木分野では道路や鉄道での事例を調査した。道路橋での耐震補強では，靭性補強と強度補強を併用することが主流となっているのに対して，鉄道橋では靭性補強が中心に行われている。

入力地震動に関しては，道路・鉄道ともに，L1 地震動(設計耐用期間内に数回程度発生する地震動)，L2 地震動（設計耐用期間内に発生する確率は低いが非常に強い地震動）を定めている。それらの地震動を受けた場合の目標性能と部材の損傷性能の分類を鉄道橋における例を示すと以下の通りとなる。

・構造物の耐震性能
耐震性能Ⅰ：地震後にも補修せずに機能維持でき，かつ過大な変位を生じない
耐震性能Ⅱ：地震後に補修を必要とするが，早期に機能が回復できる。
耐震性能Ⅲ：地震によって構造物全体系が崩壊しない。
・部材の損傷
損傷レベル１：無損傷
損傷レベル２：場合によっては補修が必要な損傷
損傷レベル３：補修が必要な損傷
損傷レベル４：補修が必要で，場合によっては部材の取替えが必要な損傷
・基礎の安定
安定レベル１：無損傷(作用荷重が降伏支持力以下)
安定レベル２：場合によっては補修が必要な損傷
安定レベル３：補修が必要で場合によっては構造物の矯正が必要な損傷

5.3 米国の耐震改修指針と目標性能

米国連邦政府緊急局 FEMA が出版した耐震改修指針(FEMA 273)は、性能設計法を取り入れている。同指針では、建物の目標性能を明確に示すこととし、想定地震後に建物があるべき姿として、４つの目標レベル（無被害、継続使用可能、人命保護、非倒壊）を設定している。一方、地震危険度(Hazard Level)は地震の頻度に応じて４つのレベルに分けられ、想定地震レベルと建物の満たすべき性能とが図３のようにマトリックス表示される。

訳注：筆者		Building Performance Level 建物の性能レベル			
		Operational Performance Level 無被害レベル	Immediate Occupancy Performance Level 継続使用可能レベル	Life Safety Performance Level 人命保護レベル	Collapse Prevention Performance Level 非倒壊レベル
Earthquake Hazard Level 地震危険度レベル	超過確率 50%/50年	a	b	c	d
	超過確率 20%/50年	e	f	g	h
	Basic Safety Earthquake 1:BSE-1 (10%/50年)	i	j	k	l
	Basic Safety Earthquake 2:BSE-2 (2%/50年)	m	n	o	p

k＋p＝BSO(Basic Safety Objective)：基本安全性目標
k＋p＋(any of a, e, i, m)＝Enhanced Objectives：高度補強目標
b, f, j or n＝Enhanced Objectives：高度補強目標
k alone or p alone＝Limited Objectives：限定補強目標
c, g, d, h＝Limited Objectives：限定補強目標

図３　耐震改修指針 FEMA273 における目標性能

６．その他の活動

本委員会の成果を報告する終了報告会(2000年６月)と同時に，米国の実務者，研究者を招いて耐震補強に関わるシンポジウム・ワークショップを開催すべく企画した(担当　菅野，大内)。

NII-Electronic Library Service