

## 委員会報告 性能指向型耐震補強研究委員会

菅野俊介\*1・福山洋\*2・前田匡樹\*3・幸左賢二\*4・勅使川原正臣\*5・中村晋\*6・北嶋圭二\*7・築嶋大輔\*8

**要旨:** 大地震時の「倒壊防止」に加えて、「機能性」、「復旧性」、「使用性」などの高度な性能を付与させる耐震補強（「性能指向型耐震補強」と定義する）が近年増加している。また、こうした要求性能に応えるため、新しい材料・部材・架構が開発され、新しい補強概念（免震・制震による応答制御、損傷制御など）も導入されている。この様な状況に鑑み、本委員会は性能指向型耐震補強の研究、設計および実施例について広く調査し、技術の現状と課題を明らかにした。

**キーワード:** 性能指向型耐震補強, 研究, 設計, 実施例, 復旧性, 建築構造物, 土木構造物

### 1. はじめに

近年、コンクリート構造物において、従来の大地震時の倒壊防止に加えて、機能性、復旧性、使用性などの高度な性能を付与させる耐震補強が行われるようになってきた。また、こうした要求性能に応えるため、新しい材料・部材・架構が開発され、新しい補強概念（免震・制振による応答制御、損傷制御など）も導入されている。一方、耐震補強は、既存構造物の現況に応じたさまざまな制約条件の下で実施する必要があるため、制約条件を克服するための新工法が開発されてきた。狭い空間での施工を可能とする技術や構造物を使いながらの補強を可能とする技術などが例として挙げられる。

このような状況に鑑み、本研究委員会は性能指向型耐震補強の研究、設計および実施例について広く調査し、技術の現状と課題を明らかにすると共に、耐震補強技術の発展・普及を図るために必要な技術資料をまとめることとした。そのため、機能性、復旧性、使用性などの高度な性能を付与させる耐震補強に加えて、上記のような制約条件を克服する補強工法についても広い意味での「性能指向型補強」と位置づけ、これらの技術動向について広く調査を行うこととした。なお、2000年に修了した「耐震補強の評価に関する研究委員会」<sup>6)</sup>（「前委員会」と略

記）から10年が経過したことから、特にその後に開発された技術の特徴や動向に着目してまとめることとした。

表-1.1に本委員会の委員構成を示す。

表-1.1 委員構成

<b>委員長</b>	菅野俊介 (広島大学名誉教授)
<b>副委員長</b>	関松太郎 ((財)建築防災協会) 大内 一 (大阪市立大学大学院)
<b>幹事長</b>	福山 洋 ((独)建築研究所)
<b>幹 事</b>	前田匡樹 (研究WG主査:東北大学) 幸左賢二 (研究WG主査:九州工業大学) 勅使川原正臣 (設計WG主査:名古屋大学) 中村晋 (設計WG主査:日本大学) 北嶋圭二 (実施例WG主査:青木あすなろ建設(株)) 築嶋大輔 (実施例WG主査:東日本旅客鉄道(株))
<b>委 員</b>	五十嵐晃 (研究WG:京都大学) 滝本和志 (研究WG:清水建設(株)) 塚越英夫 (研究WG:清水建設(株)) 佐野剛志 (研究WG:(株)大林組) 益尾潔 (研究WG:(財)日本建築総合試験所) 岡本大 (設計WG:(財)鉄道総合技術研究所) 薄井稔弘 (設計WG:(独)土木研究所) 山野辺慎一 (設計WG:鹿島建設(株)) 楠浩一 (設計WG:横浜国立大学) 川村満 (設計WG:日本設計(JSCA)) 渡邊茂雄 (設計WG:鹿島建設(株)) 渡辺典男 (実施例WG:大成建設(株)) 塩畑英俊 (実施例WG:(株)高速道路総合技術研究所) 新名勉 (実施例WG:阪神高速道路(株)) 浅野美次 (実施例WG:日建ハウジングシステム(株)) 藤村勝 (実施例WG:(株)竹中工務店) 渡辺一弘 (実施例WG:(独)都市再生機構)
<b>事務局</b>	大野一昭 (2010年3月)

\*1 広島大学名誉教授 工博 (正会員)

\*3 東北大学大学院 工博 (正会員)

\*5 名古屋大学大学院 工博 (正会員)

\*7 青木あすなろ建設(株) 工博 (正会員)

\*2 (独)建築研究所 工博 (正会員)

\*4 九州工業大学 工博 (正会員)

\*6 日本大学 工博 (正会員)

\*8 東日本旅客鉄道(株) (正会員)

## 2. 性能指向型耐震補強における要求項目

### 2.1 はじめに

報告書では、「倒壊防止」よりも高い目標性能の内「復旧性」が注目されるに至った地震被害例を2.2で紹介している。また、耐震性能以外の要求を「耐震補強工事において解決すべき制約条件」と捉え、本委員会で扱うべき「制約条件」を2.3節で整理し、これらを踏まえた「性能指向型耐震補強」の定義を2.4で示している。

### 2.2 目標性能としての復旧性

#### (1) 建築物の地震被害と復旧

1995年兵庫県南部地震の被災建物の中には、倒壊を免れたものの、構造躯体の損傷が激しく、修復費用が膨大になったことから、取り壊されたものが少なくないことを述べ、損傷制御や復旧性の観点を持つことの重要性が示されたとしている。

#### (2) 道路の地震被害と復旧

①兵庫県南部地震直後、著しく低下した阪神高速道路の利用交通量が震災前のレベルに戻るのに1年8ヶ月を要したこと、②復旧に関わる直接費用だけでなく利用不可による社会的損失が膨大であること、③社会的損失は復旧期間に比例して増大すること、が報告されている。

#### (3) 鉄道の地震被害と復旧

①兵庫県南部地震直後の鉄道不通区間の約半分は2日後に復旧したが、大阪～神戸間を中心にJR東海道線や山陽新幹線、民間鉄道の全面開通にはさらに数ヶ月を要したこと、②被災による減収に比べて復旧費用の方がはるかに大きいこと、③社会的損失費用は復旧期間と共に膨大な額に達すること、などが報告された。

### 2.3 耐震補強において解決すべき制約条件

2000年に終了した「前委員会」は、補強された部材や構造物の耐震性能を補強効果の観点から評価するためのモデル化や手法を検討し、土木・建築に共通して適用できる評価方法などを提案した。報告書<sup>6)</sup>の最終章では、①1995年兵庫県南部地震の経験から従来よりも高い耐震性能が要求される事例が出てきた、②既存構造物の現況に応じたさまざまな制約条件の下で耐震

補強を実施する必要がある、との観点から新しい工法を整理するために行ったアンケート調査について述べている。そこに述べられた新工法開発の目的を整理すると、解決すべき制約条件が表-2.1のようにまとめられる。

本委員会では、「前委員会」以降約10年間の技術の総括を行うとしたが、耐震補強において解決すべき制約条件がこの間に変化したわけではなく、むしろ同じ目的の下でより詳細で高度な技術開発が進められてきたので、10年前の情報と比較しながら技術動向を整理し、そこから新たな課題抽出を行う必要があるとしている。

表-2.1 耐震補強において解決すべき制約条件<sup>6)</sup>

	制約条件
建築 構造物	短工期、低コスト、騒音・振動・粉塵の低減、補強材の軽量化、作業スペースの減少、移転・引っ越し不要、意匠性、その他
土木 構造物	短工期、低コスト、騒音・振動・粉塵の低減、補強材の軽量化、水中施工、維持管理性向上、施工空間の制限、移動・移転不要、火・水等の使用制約、意匠性、その他

### 2.4 「性能指向型耐震補強」の定義

前述の背景と経緯とから、「性能指向型耐震補強」を「社会からのさまざまな要求を充足し得る耐震補強」と定義し、要求を以下の2項目に大別して検討することとした。①目標耐震性能の確保(=要求項目のうち耐震性能に関するもの:2.1節関連)、②制約条件の克服(=要求項目のうち耐震性能以外に関するもの:2.2節関連)。

報告書の第3章以降にこの定義に基づく各WGの検討結果が示されている。

#### 参考文献

- 1) 日本建築学会:2005年福岡県西方沖地震災害調査報告, 2005.9
- 2) 内閣府中央防災会議:事業継続ガイドライン第一版, 2005.8
- 3) 阪神高速道路公団:大震災を乗り越えて—震災復旧工事誌, 1997年9月
- 4) 国土交通省道路局,都市・地域整備局:費用便益分析マニュアル, 2003年8月
- 5) 運輸省鉄道局監修 阪神・淡路大震災鉄道復興記録編纂委員会編:よみがえる鉄路, 1996年3月
- 6) 日本コンクリート工学協会:耐震補強の評価に関する研究委員会報告書, 1990

### 3. 性能指向型耐震補強の研究

#### 3.1 はじめに

本章では、性能指向型耐震補強の研究の現状を、建築、土木それぞれの分野の①構造物の耐震性能評価に関する研究、② 制約条件下における新しい耐震補強工法の研究、③ その他の研究、について調査した。

#### 3.2 建築分野の研究

##### (1) 建築構造物全体の性能評価に関する研究

RC 造建築物の耐震性能評価は、従来、大地震による倒壊を防止し人命の安全性を確保するための終局安全性の評価を中心に行われてきたが、近年、継続使用性や修復性の重要性も広く認識されるようになり、耐震診断基準や性能評価法にも取り入れられるようになった。ここでは、建築防災協会の被災度区分判定基準<sup>[1]</sup>、建築学会の耐震性能評価指針<sup>[2]</sup>、ASCE/SEI41-06<sup>[3]</sup>を取り上げ、概要を紹介した。いずれも既存建築物、新築建築物を主対象とするが、性能評価法として耐震補強建物にも適用可能である。

耐震性能評価指針<sup>[2]</sup>では、使用限界、修復限界、安全限界の3つの限界状態（修復限界は2段階）を規定し（表 3-1）、各限界状態に構造物が達する地震動（限界地震動）と基準地震動の比から保有耐震性能を評価する（図 3-2）。

制振による耐震補強の場合、架構強度  $C$ 、靱性指標  $F$  は補強前後で変化しないので、耐震診断法の  $I_s$  値では、補強効果が評価できない。これに対して、制振装置によるエネルギー吸収能力が増加する分だけ、保有耐震性能基本指標  $E_0=C \times F$  を割り増すことで、補強効果を  $I_s$  値として評価する方法<sup>[4]</sup>が提案されている（図 3-2）。

##### (2) 制約条件下の新しい補強工法

建築構造物を対象とした新しい耐震補強工法として、①強度型補強工法、② 靱性型補強工法、③制振・免震による補強、について最近の研究・開発された工法や技術をまとめた。居ながら施工、作業スペースや騒音・振動の制限などの制約条件に対して、新しい耐震補強工法が開発されている。鉄骨ブレースや RC 壁を増設する強度

型補強工法では、接合部あと施工アンカーを減らす接着工法や、建物外部のみで工事可能な外付け型補強工法が多くみられた。靱性型補強の新工法としては、補強材を連続繊維とした工法、鋼板巻きで継手を無溶接とする工法、ポリマーセメントモルタルとする工法などが見られた。

さらに、制約条件に対する各工法・技術の適用性を整理し表 3-2～3-4 に示した。

##### (3) その他の研究

近年の地震被害調査のうち 2003 年 5 月宮城県沖の地震を経験した RC 造耐震補強建築物の地震時挙動に関する調査事例を報告した。枠付き鉄骨ブレースや RC 造耐震壁、柱の鋼板巻きなどの

表 3-1 性能評価指針の限界状態

評価項目	限界状態	損傷度	挙動
使用性 機能維持	使用限界	損傷度 I	降伏しない 残留ひび割れ $\leq 0.2\text{mm}$
修復性 小修復	修復限界 I	損傷度 II	かぶり圧壊しない 残留ひび割れ $\leq 1.0\text{mm}$
修復性 修復可能	修復限界 II	損傷度 III	コア圧壊しない 残留ひび割れ $\leq 2.0\text{mm}$
安全性 人命保護	安全限界	損傷度 IV	耐力低下しない 軸力保持

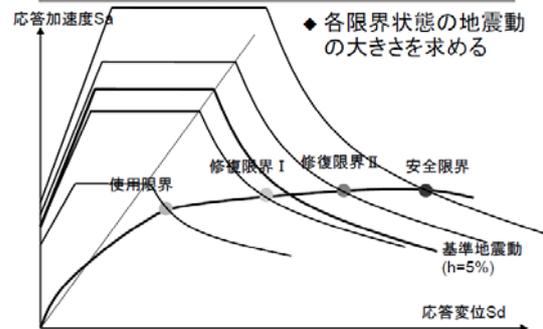


図 3-1 基準地震動と限界地震動

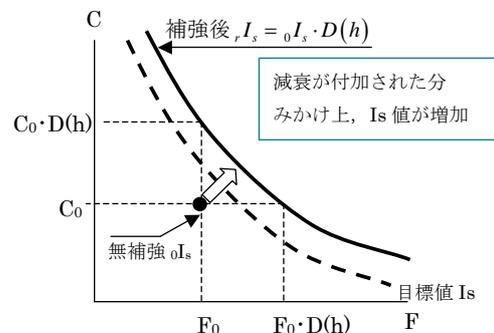


図 3-2 制振による  $I_s$  値換算の概念<sup>[4]</sup>

補強工法で耐震改修された 3 棟の RC 造学校校舎で、いずれも大きな被害はなく補強部材が効果を発揮していることが確認された。

### 3.3 土木分野の研究

建築分野と同様に実施した、土木分野における制約条件下での新しい耐震補強工法の分類について説明する。表 3-5 には土木研究センターなどで建設技術審査を受けた補強工法や設計・施工指針が刊行されている補強工法に対して、適用可能な制約条件、特徴、優位性などの区分を示す。主な制約条件としては、補強対象の橋梁が水中にある場合や施工場所が狭隘で重機が使用できず人力施工しなければならない場合などが挙げられる。本文では、これら各工法に対して実施された実験の概要を示すとともに、明らかになった補強効果を詳細に示している。

表 3-6 には各工法の制約条件ごとに対する評価を示す。表 3-5 と同様に橋梁・橋脚の耐震補

強工法を選択する制約条件では橋脚の断面の寸法や形状に関する制約と、現場溶接の不要、工期短縮、水中での施工性などの施工条件の緩和に区分することができる。ここで、◎、○はその制約条件下での適用性が良いものを示すが、新しい技術が特定の制約条件を改善するために開発されたものであることが分かる。

#### 参考文献

- [1] 日本建築防災協会：震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針，2001
- [2] 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐震性能評価指針(案)・同解説，2004
- [3] ASCE, "Seismic Rehabilitation of Existing Buildings", ASCE Standard ASCE/SEI41-06, 2007
- [4] 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，pp.189-195，2002.9.

表 3-2 強度型補強の制約条件に対する適用性

補強要素 接合形式		ブレース		壁			接合形式						
		S		C			アンカー	接着・ アンカー 併用	部分 アンカー	接着	PC 鋼棒 圧着		
		H形鋼	鋼管	PCa	RC	ブロック						PCa	
制約条件						一般	特殊						
構造性能	構造耐力	○	○	○	◎	○	○	○	◎	○	○	○	◎
施工性	施工中の 建物使用性	○	○	○	△	○	○	○	△	○	○	◎	○
	騒音・振動 粉塵・臭気 対策	○	○	○	△	○	○	○	△	○	○	◎	○
	工期を含む 施工条件	○	◎	◎	△	◎	◎	◎	△	○	○	◎	○
意匠性	美観	○	◎	○	-	-	◎	○	-	-	-	-	-

(注記)

※1：鋼管ブレースは、座屈止め材を設置しなくてもよいので、美観上優れている。

※2：特殊ブロックは、形状、材料の特性を活かし、美観上優れている。

表 3-3 靱性型補強の制約条件に対する適用性

制約条件		材料					在来工法	
		CFRP	CFRP 成型板	AFRP	ポリエチレン テープ	鋼板 溶接なし	鋼板 溶接あり	RC 巻き立て
構造性能	構造耐力	○	○	○	△	◎	◎	○
施工性	施工中の 建物使用性	◎	◎	◎	◎	◎	○	△
	作業 スペース	◎	◎	◎	◎	◎	○	○
	補強材の 軽量化	◎	○	◎	◎	△	△	○
	騒音・振動 粉塵対策	○	◎	○	○	◎	△	○
	火気・ノイズ	○	○	○	○	○	×	○
費用	工事費用	○	△	○	○	△	○	◎
工期	短工期	◎	◎	◎	◎	◎	○	○

表 3-4 免震・制振改修工法の制約条件に対する適用性

制約条件	工法分類	免震改修工法		制振改修工法		【評価基準】
		基礎下 免震	中間階 免震	内付け 制振	外付け 制振	
構造性能	応答低減性能	◎	○	△	△	◎○：非常に高い △：高い
	既存架構の補強の必要性	◎	○※1	△※2	△※2	◎：必要 ○△：検討を要する
	耐火被覆の必要性	◎	△	◎※3	◎※3	◎：不要 △：必要
	隣地境界とのクリアランスの必要性	△※4	○※5	◎	△※6	◎：不要 ○：検討を要する △：必要
	施工中の地震力に対する配慮	○	○	◎	◎	◎：ほとんど不要 ○：検討を要する
施工性	施工用敷地の必要性	△※7	○	◎	△※8	◎：不要 ○：部分的に必要 △：必要
	施工中の建物使用性への影響	◎	○	△	◎	◎：影響無し ○：部分的に影響する △：影響する
	音・振動・粉塵等の対策	◎	○	△	○	◎：ほとんど必要なし ○：若干必要 △：必要
使用性	改修後の使用性	◎	○	△	◎	◎：改修前と同じ ○：部分的に低下する △：低下する
費用	工事費用	△	○	◎	○	◎：安い ○：どちらともいえない △：高い
	一時移転などの費用	◎	△	△	◎	◎：不要 △：必要
工期	改修工期	△※9	△	○	◎	◎：短い ○：比較的短い △：長い
意匠性	美観への影響	◎	○	◎	△	◎：ほとんど影響しない ○：部分的に影響する △：影響する

※1：免震層より下の既存架構で補強が必要になることがある。  
 ※2：既存架構に付加制振力を処理できる強度がない場合や変形能が不足している場合には補強が必要になる。  
 ※3：地震と火災が同時に発生することはないと制振ダンパーの耐火被覆を不要とすることが多い。  
 ※4：免震ピットを構築するためにクリアランスが必要である。  
 ※5：免震層に大きな変形が生じても、隣地境界線を越えないように計画する必要がある。  
 ※6：外付け架構の大きさだけクリアランスが必要になる。  
 ※7：基礎下に重機を搬入するための敷地が建物周囲に必要となる。  
 ※8：外付け架構と基礎を構築するために敷地が必要となる。  
 ※9：工期が長くなるが一時移転が不要なため、制約は比較的小さい。

表 3-5 土木分野の制約条件下の新しい補強工法

番号	技術名称	制約条件、特徴、優位性他	補強目的
1	PCa パネルを用いた橋脚の水中補強工法 (PRISM 工法)	耐久性向上、現場溶接不要、水中施工 (仮締切り不要)	せん断、曲げ、じん性、段落し
2	P C M吹付け工法	工期短縮、品質均一化、巻立て厚低減	せん断、曲げ、じん性、段落し
3	かみ合わせ継ぎ手による鋼板巻立て工法	水中施工 (仮締切り不要)、現場溶接不要	せん断、曲げ、じん性
4	波形分割鋼板巻立て補強工法	人力施工 (狭隘部施工)、現場溶接不要、工期短縮	せん断、じん性
5	A & P 耐震補強工法	人力施工、現場溶接不要、工期短縮	せん断、じん性
6	C F アンカー	支障物・狭隘部施工、現場溶接不要、工期短縮	せん断、じん性
7	S R F 工法	人力施工 (狭隘部施工)、現場溶接不要、工期短縮	せん断、じん性、段落し
8	一面耐震補強工法	支障物・狭隘部施工、現場溶接不要、一面から施工可	せん断、じん性
9	R B (リブバー) 耐震補強工法	人力施工 (狭隘部施工)	じん性

表 3-6 橋梁橋脚の補強・改修工法の制約条件に対する評価

		コンクリート巻立		鋼板巻立		新素材巻立			耐震補強	耐震補強	免震・制震
		PCa パネル	PCM 吹付	かみ合 わせ 継手	波型 分割 鋼板	P&A	CF アン カー	SRF 工法			
橋脚寸 法・形状 条件	断面増加制限		△		○			◎	○	○	◎
	狭隘部				○		○	○	◎	◎	
	一面のみ施工可								◎		
施工条件	現場溶接不要	○		○	○			○	○		
	工期短縮		○		○			○	○		
	水中施工	○		○							

## 4. 性能指向型耐震補強の設計

### 4.1 はじめに

耐震補強は、将来にわたり継続使用される既存構造物の信頼性を確保するライフサイクルマネージメントの一環として行われる行為と考えることができる。

ここでは、地震動レベルと構造物の状態の関係を表す「耐震グレード」、構造物の状態とその具体的な工学量との関係を表す「状態マトリックス」を合わせた「性能マトリックス」を4.2に示し、それに基づき構造物の耐震性能を評価する手法を4.3に、地震後の損傷復旧に係わるコストも考慮した耐震性能の評価手法を4.4に示す。

### 4.2 性能マトリックス

新設構造物の耐震設計では、地震動レベルを設定し、それに対して構造物が設定した状態内にあることを確認することが一般的である。ここでも、地震動レベルと構造物の状態の組み合わせで耐震グレードを「高度」、「中程度」、「一般」で表現する。地震動は、再現期間の長短によるレベル1（短期間）、レベル2（長期間）の2段階、さらに地震発振機構の特性（海洋性、内陸性）も考えた応答スペクトルで規定する。なお、動的解析による耐震性能の評価に用いる地震波はスペクトルに適合したものとする。

構造物の状態は、機能維持、限定機能維持、構造体維持、倒壊寸前、倒壊を設定し、各状態を具体的工学量で表現する。性能グレードと構造物の状態を表すマトリックスをここでは性能マトリックスとする。建築および土木構造物の性能マトリックスの例を表-4.1～表-4.4に示す。性能グレードの設定には対象構造物の耐用年限などを勘案し、安全性に関する評価であるレベル2地震動に対する条件を優先し、他性能要件を緩和するなどの対応も可能とする。

一方、耐震性能を構造物が設定した状態に達する時の地震動レベル（強さ）で表現する方法もある。地震動レベルは建築・土木で異なり、応答スペクトルの形状も違う。応答スペクトルでは、継続時間、位相特性は表現できないが、

耐震性能を地震動レベルであらわすと耐震性能を統一的に表現できる可能性がある。その評価法の可能性を4.3で記述する。

### 4.3 構造物の耐震性能評価法

構造物の耐震性能評価の原則は、想定した状態に達する地震動のレベルを求め、性能グレードで設定されている地震動レベルを上回ることを確認、もしくは性能グレードで設定されている地震動レベルで構造物が想定した状態内にとどまることを確認することである。

性能の確認方法は、動的応答解析が原則であるが、構造物の種類などによっては静的応答解析方法を用いることもできる。構造物のモデル化に際しては、補強部材と既存構造物の一体性、接合部のモデル化に留意する必要がある。また、既存構造物の現状を適切に評価するモデル化を行う必要がある。被災構造物を評価する場合には特に注意する必要がある。

### 4.4 復旧性能評価の現状

ここでは、復旧性能を考慮した費用算定法を調査し、経済性を考慮した土木構造物の復旧性能照査法に関する事例を既研究委員会報告書<sup>1)</sup>などを対象として調査した。

費用算定の調査では、被災構造物の復旧費と復旧時間に基づく設計法の枠組みや復旧費用・復旧時間の推定手法の一例<sup>2)</sup>（図-4.1）および地震リスクマネジメント技術に基づき、耐震補強／制震補強／免震補強等を施した既存構造物の

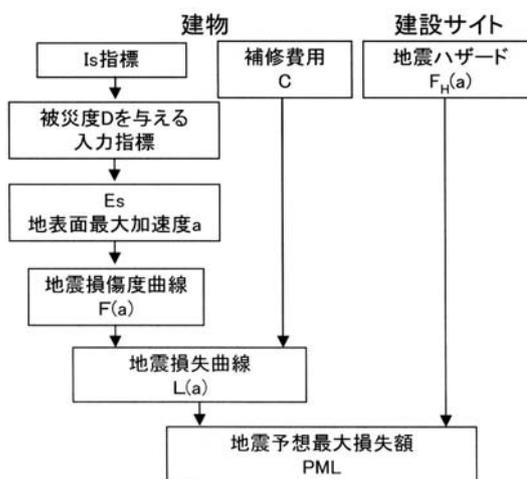


図-4.1 被災構造物の復旧費用の算定フロー<sup>2)</sup>

表-4.1 耐震性能グレード例(建築)

耐震性能	地震動レベル	レベル1地震動 稀に作用する地震動で 超過確率が50年で80% (震度V弱程度)	レベル2地震動 極めて稀に作用する地震動で 超過確率が50年で10% (震度VI弱~VI強程度)
	耐震性能 高度		(1)機能維持
耐震性能 中程度		(2)限定機能維持	(2)限定機能維持~(3)構造体維持
耐震性能 一般			(4)倒壊しない

表-4.2 耐震性能状態マトリックスの例(建築)

評価項目 状態	応答最大層間変 形角 (R)	層の塑性率 ( $\mu$ )	床加速度 ( $cm/s^2$ )	復旧費用(初期費用に対す る%)
(1)機能維持	$R < 0.2\%$	$Q < Q_c$ (部材降伏が発生 しない)	$< 300(500)$	$\approx 0$
(2)限定機能維持	$0.2 \leq R < 0.5\%$	$\mu < \mu_u$	$< 500(1,000)$	
(3)構造体維持	$0.5\% \leq R < 1.5\%$	$\mu < \mu_u/1.5(2.0)$	-	
(4)倒壊しない	$1.5 \leq R < 2.5\%$	$\mu < \mu_u$	-	
(5)倒壊	$R > 2.5\%$	$\mu > \mu_u$	-	

$Q_c$  : 部材降伏時点の層せん断力,  $\mu_u$  : 層の限界塑性率

( ) 内は、目標レベル等により設定可能

表-4.3 耐震性能グレード例(道路橋, 鉄道橋)

耐震性能	地震動レベル	レベル1地震動	レベル2地震動	
			道路橋	鉄道橋
耐震性能(高度)		(1)機能維持	(2)限定機能維持	(2)限定機能維持~(3)構造体維持
耐震性能(一般)	耐震性能(中程度)	(1)機能維持	(3)構造体維持	(3)構造体維持~(4)倒壊寸前
	耐震性能(一般)			

表-4.4 状態マトリックス例(道路橋, 鉄道橋)

評価項目 状態	変形		力		復旧費用(初期費用 に対する%)
	道路橋	鉄道橋	道路橋	鉄道橋	
(1)機能維持	-	$\theta < \theta_y$	応力度 $<$ 許容 応力度	$M < M_y$ もしくは $V < V_y$	0
(2)限定機能維持	残留変位 $<$ 許 容残留変位 $\delta_{Ra}$	$\theta < \theta_n$	慣性力 $<$ 地震 時保有水平 耐力 $P_a$	-	
(3)構造体維持	-	$\theta < \theta_n$	慣性力 $<$ 地震 時保有水平 耐力 $P_a$	-	
(4)倒壊寸前	-	$\theta_n < \theta$	-	$M_y < M$ もしくは $V_y < V$	
(5)倒壊	-	-	-	-	

補強効果とライフサイクルコスト（LCC）評価を検証した研究事例<sup>3-8)</sup>を調査し、内容を紹介した。性能指向型耐震補強においても最小費用、最小時間で補強できる補強工法の耐震性能やLCCを評価する上では、これらの研究事例が参考になると考えられる。復旧費の算出に必要な地震損失額の評価式の例を式(4.1)に示す。ここで、地震損失額を $L(a)$ とすると、ある大きさの地表面最大加速度 $a$ に対する建物の地震損失額 $L(a)$ を示す曲線は、地震損傷度曲線 $F(a)$ と補修費用 $C$ を被災度ごとに乗じて被災度に関して総和を取れば良いとしている。

$$L(a) = (F_1(a) - F_2(a)) \cdot C_1 + (F_2(a) - F_3(a)) \cdot C_2 + F_3(a) \cdot C_3 \quad (4.1)$$

ここに、 $F_1(a)$ は小破以上の損傷確率、 $F_2(a)$ は中破以上の損傷確率、 $F_3(a)$ ：大破の損傷確率、 $C_1$ は小破以上の補修費用、 $C_2$ は中破以上の補修費用、 $C_3$ は大破の補修費用を表す。

また、現在の土木構造物の耐震設計では、構造物の復旧性を視野に入れたレベル1地震動と構造物の安全性を考えたレベル2地震動を設定し、各地震動に対して構造物に付与された性能を照査している。このうち、レベル1地震動は、構造物を弾性範囲（無損傷）に留めることにより復旧性の照査を行なっている。

一方、現在のレベル1地震動において無損傷に留めるという枠組みに変わる新たな復旧性照査法として、経済性を指標とした照査を行う方法が提案されている。これは、構造物の耐用期間内に発生する地震を全て考慮した上で、構造物の初期建設コストと地震被災コストの合計であるトータルコストが最小となるような構造物を設計するというものである。

しかしながら、実際にトータルコストを照査指標とした設計を行う場合、非常に煩雑かつ高度な知識、手順が要求される。ここでは、予め多数の条件を持った構造物に対して上記作業を実施することにより、トータルコストが最小となるような構造物の周期、降伏震度、靱性率の組み合わせを算定し、その結果を基に作成した

ノモグラムを用いて経済性を照査指標とした復旧性照査事例<sup>9)</sup>を紹介した。

#### 4.5 まとめ

既存構造物を将来にわたり継続使用することを目指すライフサイクルマネージメントや事業継続性計画の一環として行う耐震補強を性能指向型耐震補強の一つの要素と考えた耐震補強設計の枠組みを提案した。本枠組は、①想定する地震動と構造物の状態の組み合わせからなる性能マトリックスの提案、②地震動の設定方法、構造物の状態を評価する方法、もしくはその状態に至らしめる地震動を評価する方法、から構成される。さらに、③復旧コスト算定のための復旧性能評価の現状の調査も行った。

性能指向型耐震補強設計の実用化のためには、損傷の程度と復旧費用の算定、事業停止とコストの評価に関する事例の収集と分析が今後とも必要である。また、現行の基・規準類の規定を満足しない既存構造物の性能を適確に評価する方法のより一層の研究も必要である。

#### 参考文献

- 1) 被災構造物の復旧性能評価研究委員会、「被災構造物の復旧性能評価研究委員会」報告書、(社)日本コンクリート工学協会、2007.8
- 2) 諏訪仁、野畑有秀、関松太郎、他：建物の地震リスク評価法の開発—予想最大損失額(PML)評価ソフトの開発、大林組技術研究所報、No.63、pp61-66、2001
- 3) 田原 一徳 他：地震リスク・マネジメント技術を活用した地震対策の効果検証（その3. 制震ブレース等による既存庁舎の改修）、日本建築学会大会梗概集(近畿)、pp.55-56、2005.9
- 4) 安野 郷 他：地震リスク・マネジメント技術を活用した地震対策の効果検証（その7. 粘弾性ダンパーによる共同住宅の改修）、日本建築学会大会梗概集(近畿)、pp.63-64、2005.9
- 5) 吉井 靖典 他：地震リスク・マネジメント技術を活用した地震対策の効果検証（その8. 免震オフィスビルの地震リスク低減効果）、日本建築学会大会梗概集(近畿)、pp.65-66、2005.9
- 6) 泉田 伸二 他：地震リスク・マネジメント技術を活用した地震対策の効果検証（その9. 鉄骨ブレースによる事務所ビルの耐震補強）、日本建築学会大会梗概集(近畿)、2005.9
- 7) 泉田 伸二 他：地震リスク・マネジメント技術を活用した地震対策の効果検証（その10. 免震による事務宿泊施設の改修）、日本建築学会大会梗概集(近畿)、pp.69-70、2005.9
- 8) 谷垣 正治 他：地震リスク・マネジメント技術を活用した地震対策の効果検証（その11. 病院建築における制震改修・免震改修の効果）、日本建築学会大会梗概集、pp.71-72、2005.9
- 9) 坂井、室野、澤田：経済性を考慮した復旧性照査法に関する提案、第13回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁構造等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、2010.2

## 5. 性能指向型耐震補強の実施例

### 5.1 はじめに

本章では、新しい耐震補強技術が実施に反映された耐震補強工事の中から、建築分野の実施例 12 件（庁舎、百貨店、集合住宅、学校、野球場など）および土木分野の実施例 10 件（道路橋、鉄道橋、空港設備など）の計 22 件について、「耐震性能指向型補強」と「制約条件解決型補強」の 2 つに分類し（図-5.1）紹介した。

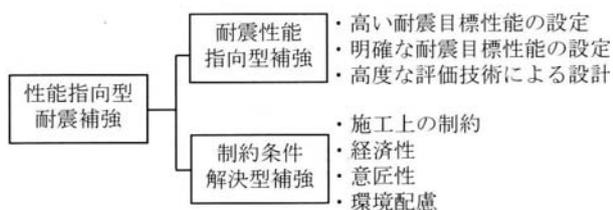


図-5.1 補強実施例の分類

### 5.2 建築分野の実施例

建築物の用途は極めて多岐にわたるため、建築物に求められる性能も極めて幅広い。人が居住する一般建築物を対象とすると、建築物に必要な性能は図-5.2 のようにまとめられる。

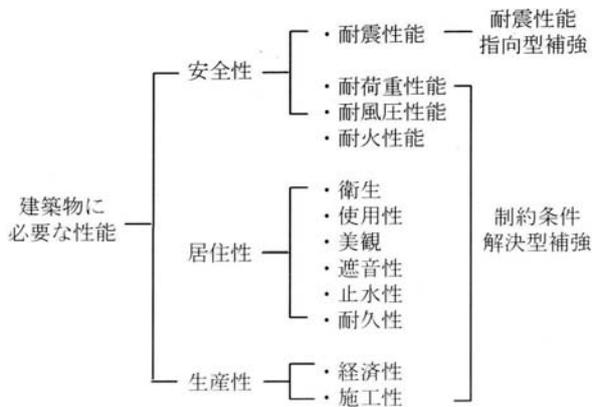


図-5.2 建築物に必要な性能と耐震補強

建築分野の実施例では、耐震性能の改善を主目的とした事例を「耐震性能指向型補強実施例」（5 件：表-5.1）とし、居住性や生産性など耐震性能以外の性能も重視した事例を「制約条件解決型補強実施例」（7 件：表-5.2）と分類し紹介した。

### 5.3 土木分野の実施例

1995 年の阪神淡路大震災を契機に新設構造物の耐震設計に対する示方書や指針類が改定され、既設構造物の耐震補強に対しても、これらの指針類の設計思想や設計手法が適用されている。初期の耐震補強は、比較的単純な振動モードを示す桁橋等の橋脚を対象に、鋼板、鉄筋コンクリートや繊維シート等を巻き立てる工法が実施されてきた。一方、最近の耐震補強では、斜張橋やトラス橋等、複雑な振動モードの橋の補強が実施されるようになり、桁橋やラーメン高架橋の耐震補強であっても、更なる工期短縮・低コストを追求した工法や、騒音・粉塵低減、支障移転不要等、より厳しい施工条件に適応した工法が実用化されている。

以上を踏まえて、ここでは、2000 年以降の土木分野の耐震補強実施例の中で、特に耐震性能向上に着目した事例を「耐震性能指向型補強実施例」（4 件：表-5.3）に、工期短縮や施工空間の制限等の制約条件の解決に力点を置いた事例を「制約条件解決型補強実施例」（6 件：表-5.4）と分類して紹介した。

表-5.1 耐震性能指向型補強の実施例（建築分野）

No.	実施例	構造規模	補強工法	耐震性能
(1)	中間層免震構造を採用した庁舎の補強	SRC 造 F16・B2	1 階を免震層とする中間層免震	上部構造：短期許容応力度以下 免震層：変形 48cm 以下
(2)	鋼材系ブレースダンパーを用いた百貨店の補強	SRC 造 F8・B2	鋼材系ブレースダンパーを用いた制震補強	層間変形角 1/200 以下
(3)	極低降伏点鋼ブレースを用いた百貨店の補強	SRC 造 F8・B3	極低降伏点鋼ブレースを用いた耐震補強	構造耐震指標(Is) ≥ 0.60 Ise ≥ 0.75
(4)	外付け制震架構を用いた共同住宅の補強	SRC・RC 造 F9	鋼製弾塑性ダンパーを用いた制震補強	層間変形角 1/100 以下
(5)	トグル制震ブレースを用いた集合住宅の補強	SRC・RC 造 F11	トグルブレースを用いた制震補強	層間変形角 1/125 以下

表-5.2 制約条件解決型補強の実施例（建築分野）

No.	実施例	構造規模	補強工法	制約条件
(1)	上部増築を実現のための中間層免震構造化による既存庁舎の補強	SRC・S造 F8	中間層免震による増築補強	・使いながらの施工 ・上増築
(2)	免震構造化による集合住宅の補強	SRC造 F7・B1	柱頭免震	・居住性、外観の保存 ・下部地下鉄軌道の安全性確保
(3)	外付け制震ブレースを用いた集合住宅の補強	RC造 F5	外付けブレースによる制震補強	・居ながら補強 ・騒音、振動の低減
(4)	外付けフレームを用いた庁舎の補強	RC造 F5・B1	外付けフレームによる耐震補強	・居ながら補強 ・騒音、振動の低減
(5)	築80年の歴史を考慮した阪神甲子園球場の補強	RC造 F3	耐震壁の増設、外付けフレーム等による耐震補強	・段階的補強 ・劣化への対応
(6)	外観デザインに配慮した小学校校舎の補強	RC造 F4	外付けブレースによる耐震補強	・短工期 ・施工時における建物利用者の安全確保
(7)	環境・デザインに配慮した統合ファザードによる大学校舎の補強	RC造 F5・B1	座屈拘束ブレースを用いた耐震補強	・外観デザイン ・エネルギー負荷の低減

表-5.3 耐震性能指向型補強の実施例（土木分野）

	タイトル	構造物	補強対象	補強工法	特徴
1	免震支承を用いた北陸自動車道PC箱桁橋における補強	道路橋	橋脚	・RC巻立て工法 ・免震化+炭素繊維シート巻立て工法	新潟県中越沖地震で被災した橋梁の耐震補強
2	鉄道高架橋重層化における基礎スラブ工法を適用した既設高架橋杭の補強	鉄道橋	杭基礎	基礎スラブ工法	水平抵抗のみを期待した増し杭を基礎スラブで一体化することで、既存杭の補強を行う耐震補強工法
3	コンクリート製制震装置を用いた西湘バイパス高架橋における補強	道路橋	橋梁全体	コンクリート製ダンパー（ECCダンパー）	ダンパーにより橋梁全体の地震時における振動エネルギー吸収能を向上
4	制震装置を用いた本州四国連絡高速道路高架橋の補強	道路橋	①橋梁全体 ②上部工 ③下部工 ④変位制限構造 ⑤落橋防止構造	①制震装置 ②炭素繊維シート ③RC巻立て工法 ④コンクリートブロック ⑤縁端拡幅工、段差防止工	橋梁全体ならびに、各部材について耐震性能を向上

表-5.4 制約条件解決型補強の実施例（土木分野）

	タイトル	構造物	補強対象	補強工法	工期短縮	施工空間の制限	維持管理性向上	軽量化	火・水等の使用制限	騒音・振動・粉塵低減	支障移転不要	意匠性
1	幹線道路の中央分離帯内に位置する橋梁の補強	鉄道橋	橋脚	ストラット工法	○	○					○	
2	在来線並行部における山陽新幹線RCラーメン高架橋柱の外部スパイラル鋼線巻き立て工法による補強	鉄道橋	橋脚	外部スパイラル鋼線巻き立て工法	○	○						
3	鉄道駅部高架橋RC橋柱の耐震補強	鉄道橋	橋脚	輪切り鋼板を用いたかみ合わせ鋼板巻き立て工法	○			○	○	○		
4	建物一体構造の都市高速道路RC橋脚の補強	道路橋	橋脚	AC耐震補強工法		○		○		○	○	
5	意匠性に配慮した鉄道高架橋のアーチ型耐震補強	鉄道橋	高架橋梁	アーチサポート工法	○							○
6	後施工プレート定着型せん断補強鉄筋を用いたコンクリート構造物の補強	空港施設	ボックスカルバート	後施工プレート定着型せん断補強鉄筋	○	○	○	○		○	○	