委員会報告　被災構造物の補修補強後の耐力変形性状研究委員会

白井　伸明[*1]・中村　光[*2]・衣笠　秀行[*3]・北山　和宏[*4]・小林　薫[*5]

要旨：本研究委員会は，FS 課題の委員会として，被災構造物の補修・補強後の耐力変形性状に関し，２～３年目の委員会活動の必要性と方向性を明確にするための活動を１年間行った。委員会では，補修・補強後の耐力変形性状のみならず，「復旧（修復）性能を明確にした耐震設計法」を構築することを目的とし，①供用期間中の構造物の性能変化を含む耐震設計法の枠組みの検討，②被災した構造物の性能劣化程度の評価法の検討，③補修・補強後の構造物の性能の検討，を行い「復旧（修復）性能を明確にした耐震設計法」構築のための可能性と必要な研究項目を明確にした。

キーワード：補修・補強後，復旧性能，残存性能，損傷度，経済性

1. はじめに

被災構造物の補修補強後の耐力変形性状研究委員会は，平成 16 年度に FS（Feasibility Study）課題として発足した。FS 課題の制度は平成 13 年度に JCI 研究委員会に新設されたものであり，本研究委員会は，FS 課題による２例目の委員会となる。FS 課題による研究委員会は，最初の１年間の調査研究により２～３年目の委員会活動の必要性と方向性を明確にし，その１年目の活動報告をもとに JCI 研究委員会が２～３年目への継続の可否を判断する。本研究委員会は，１６年度は２～３年目の委員会活動の必要性と方向性を明確にするための１年目の調査研究活動を行った。

本稿では，被災構造物の補修・補強後の耐力変形性状を体系的に考えるために１年間議論した内容と，２年目以降の委員会活動の予定内容を報告する。

2. 委員会活動の概要

2.1 委員会の趣旨

兵庫県南部地震によるコンクリート構造物の大被害を受けて，これまでの設計体系に対する見直しが行われ，大地震に対しては降伏以降のエネルギー吸収を事前に考慮した靭性設計が明確に取り入れられるようになるとともに，性能評価型（照査型）設計への移行も併せて実施されようとしている。性能評価型設計においては，「使用性」「修復性（復旧性）」「安全性」という要求性能を明確に定義し，それに対応した「使用限界状態」「修復限界状態」「安全限界状態」の各種限界状態を目標の水準に設定し，想定外乱に対し構造物の応答が設定した性能を満たすことを確認する必要がある。注目すべき点は，日常の使用に関わる使用性のほかに，地震などに対して財産の保全を図る「修復性（復旧性）」も基本性能として加わったことである。

補修・補強に関する研究や委員会は既に多くあるが，本研究委員会では，**表－１**に示す委員により，補修・補強後の耐力変形性状のみならず，「復旧（修復）性能を明確にした耐震設計法」を構築することを目的として検討を行った。す

*1 日本大学 理工学部 建築学科教授　工博　(正会員)
*2 名古屋大学 大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻教授　博（工）(正会員)
*3 東京理科大学 理工学部 建築学科助教授　工博　(正会員)
*4 東京都立大学 大学院　工学研究科 建築学専攻助教授　工博　(正会員)
*5 東日本旅客鉄道株式会社 研究開発センター フロンティアサービス研究所　工博　(正会員)

表－１　委員会構成

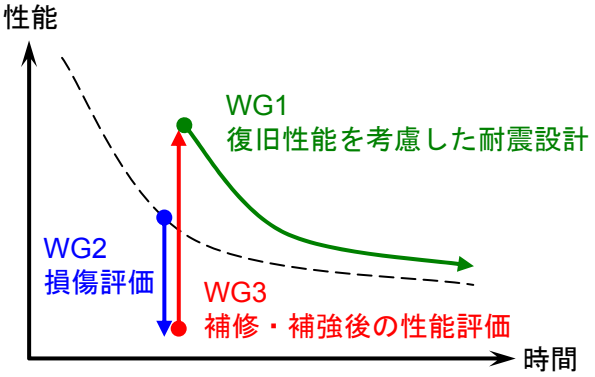
委員長：白井 伸明（日本大学）
副委員長：中村光（名古屋大学）
幹事：北山和宏（東京都立大学），衣笠秀行（東京理科大学），小林薫（東日本旅客鉄道）
委員：伊藤 睦（中部大学），岡野素之（大林組），河野進（京都大学），斉藤成彦（山梨大学），鈴木計夫（福井工業大学），宗栄一（ショーボンド建設），滝本和志（清水建設），田才晃（横浜国立大学），田嶋和樹（日本大学），牧剛史（埼玉大学），向井智久（建築研究所）

なわち，これまでの大地震，特に兵庫県南部地震とその被害性状などを教訓として，設計仮定値を上回る強い地震動に対しても，構造物の大変形塑性域の繰り返し耐力劣化性状を充分把握して，修復を考慮した，経済的かつ安全な構造物の提供およびその設計法を確立することである。

「復旧性能を明確にした耐震設計法」を構築するために必要となる検討事項として，（１）損傷評価，（２）復旧性評価，（３）補修・補強方法，（４）補修・補強後の性能評価，（５）損傷度とコスト評価，などを取り上げた。これらはいずれも大きな課題であるため，本研究委員会では，次年度以降の活動の方向を明確にするための，個別の課題に関する議論とこれらを包括した設計法に関する議論，ならびに補修・補強に関する情報収集および整理する活動を主に行った。

2.2 委員会の活動内容

図－1 は，横軸に時間，縦軸にコンクリート構造物の様々な性能をとり，経時劣化を生じるコンクリート構造物の性能変化を示したものである。ある時間に地震作用により構造物が被災し，被災体の補修・補強後の耐力変形性状を体系的に考える場合，単に補修・補強後の性能のみを評価するだけでは不十分と考えられる。例えば，



図－1　WG の位置づけ

構造物がそのライフスパンの中で，材料の過度の経時劣化や地震作用等により性能が著しく低下した場合，適切な補修・補強を行うことで構造物の性能を回復させる必要がでてくる。この際，構造物にどの程度の性能低下が生じたのかを正確に把握すること（**損傷の評価**），適切な補修・補強を施し，それによって補修・補強後の構造物が所定の性能を回復しているかを判断すること（**補修・補強後の性能評価**），および構造物の残りの供用期間と性能回復に必要な費用とを勘案し，経済的に無理のない補修・補強が行えるかどうかを確認すること（**復旧性能の評価**）が重要となる。そこで，本研究委員会では，主として地震作用による構造物の性能低下を対象とし，**図－1** の矢印で示した項目に対応させて，①供用期間中の構造物の性能変化を含む耐震設計法の枠組みを検討する「復旧性を考慮した耐震設計 WG」，②被災した構造物の性能劣化程度の評価法を検討する「損傷評価 WG」，③補修・補強後の構造物の性能を検討する「補修・補強後性能評価 WG」，の３つの WG を設けて検討を行った。

次章以降では，各 WG の検討概要について簡単に報告する。

3. 損傷評価

3.1 損傷評価を行う目的と必要性

構造物が地震などの外乱により受ける被害程度を「損傷」として捉えることは，設計法が性

能設計法へ向かう過程で，各種限界状態の設定とともに議論されてきた。さらに，部材変位あるいは部材塑性率を用いた評価から，ひずみや曲率を用いたよりミクロな情報や材料レベルでの損傷状態と結び付けた評価への転換も一部図られてきている。しかし，実際には理論的関連付けはほとんどなされていない場合が多く，工学的判断や確率統計的処理を用いるのが実情である。現状では，「損傷」の定義すら明確ではなく，損傷を単に材料レベルで捉えることもあるし，断面・部材・層あるいは構造物全体として捉えることもある。

表－２　損傷に関する物理量

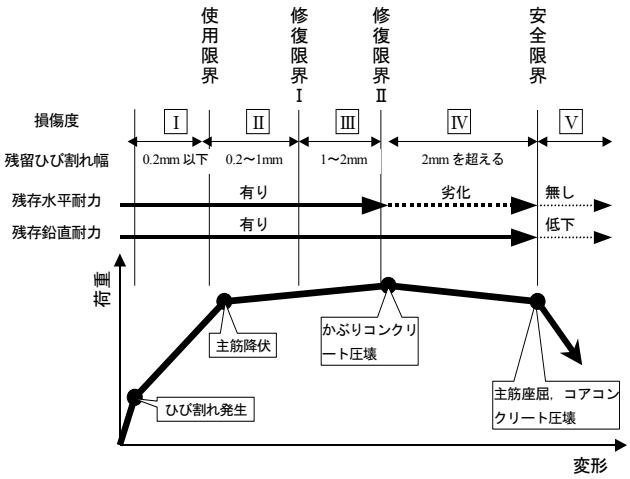
	損傷に関する物理量	情報の利用
材料	ひび割れ(曲げひび割れ，せん断ひび割れ)	耐久性評価 補修計画
	コンクリートの圧壊	部材の終局状態
	主鉄筋の降伏	損傷の開始
	主鉄筋の座屈・破断	部材の終局状態，復旧性
	せん断補強筋の降伏	せん断耐力の低下
	残存剛性(剛性低下)	
部材	曲げ降伏(塑性ヒンジ)	
	せん断破壊	部材の崩壊
	荷重－変位関係(部材角，断面力)	損傷状態の段階的な表現
	塑性率（靭性率）	
構造物	荷重－変位関係	構造物の性能
	最大応答変位	
	残留変形	復旧性能

表－２に，損傷に関する構造的な物理量を整理した一例を示す。表では，損傷をスケールによって，構造物レベルでの損傷「構造物レベル」，構造物の各構成部材における局所的な損傷「部材レベル」，部材内に生じる材料の損傷「材料レベル」と３つのレベルに分類して定義している。ただし，これら材料レベルから建物全体までのそれぞれの損傷度の相互関係を定量的に評価することはほとんど行われておらず，地盤や杭・基礎との連成評価についても，簡易なバネで評価することが一般的であり，より精度の高い評価手法の確立が望まれている。

3.2 損傷評価の現状と到達点

日本建築学会では「鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針・同解説（案）」1)を 2004 年１月に刊行した。そこでは，建物全体の性能評価は，柱，梁，耐震壁および柱・梁接合部といった各部材の耐震性能を評価してそれらを統合することによってはじめて可能になるので，種々の部材について限界状態に対応する変形角を評価する方法を明示した。

さらに，上記指針案では，部材の性能と限界状態との関係を**図－２**に示すように提案している。また建物全体の限界状態を決定する方法として，各損傷度ごとの部材の割合から層の限界状態を定める方法も例示されている。



図－２　曲げ降伏先行型の部材について，復元力特性と限界状態（損傷度）の関係の概念（AIJ 性能評価指針案 p. 75）

一方，土木分野では兵庫県南部地震の経験から，地震に対する構造物の要求性能と損傷度の組み合わせを想定した設計に移行してきた。例えば，鉄道分野における耐震設計コードである鉄道標準（耐震設計）2)では，構造物の耐震性能は，部材の損傷レベル，支承部の損傷レベル，基礎の安定および部材の損傷レベルによって表し，それぞれの損傷レベルを耐震性能に応じて

定めている。例えば，ラーメン高架橋の損傷レベルの制限値の目安としては**表－３**のように与えられている。なおここでの耐震性能と部材の損傷の定義を**表－４**に示す。また損傷状況は，**図－２**と同様に荷重変位関係上に特異点を設け，変位の範囲を４段階に分けて関連づけている。

表－３　ラーメン高架橋の損傷部位と損傷レベルの制限値

構造物		耐震性能Ⅰ	耐震性能Ⅱ	耐震性能Ⅲ
部材の損傷レベル	上層梁･地中梁	1	2	3
	その他の梁	1	3	4
	柱	1	3	3
基礎の安定レベル		1	2	3

表－４　耐震性能と損傷レベルの定義

耐震性能Ⅰ	地震後にも補修せずに機能を保持でき，かつ過大な変位を生じない
耐震性能Ⅱ	地震後の補修を必要とするが，早急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
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り替えが必要な損傷

3.3 損傷評価のアプリケーションとしての利用方法

損傷評価のアプリケーションとしての利用法については，以下のような項目が考えられ，各項目を意識し明確にするための損傷評価の検討を行う必要があると思われる。

① 部材や構造物の限界状態を判断するための指標になること。主筋やせん断補強筋のひずみ状況，座屈の有無，最大応答時のひび割れ幅や残留ひび割れ幅，かぶりコンクリートの剥落，コア・コンクリートの圧縮ひずみや圧壊状況，などの物理量が具体的な損傷の指標となり得る。

② 損傷制御型設計法の開発につながること。損傷を定量的に評価できなければ，損傷を直接制御することは不可能である。

③ 損傷後の構造物が保持している（残存）耐震性能を判断するための基本資料になること。実際に地震被害を受けた部材が保持する耐震性能を把握するためには，実験や解析によってこれらの物理的事象と残存耐震性能との関係を対応付けることが大切である。

④ 構造物の利用者や施主に対して，構造物の持つ耐震性能のグレードを図表などのかたちで分かりやすく説明すること。

⑤ 復旧性を考慮した設計法につながること。

⑥ 構造物のライフ・サイクル・コストの算定につながること。ライフ・サイクル・コストの算定には耐久性の経時劣化を考慮することのほかに，確率によってその発生が評価される大地震や極大地震によって被る被害状況を予測し，その状態から補修や補強によって新築時以上の耐震性能を賦与するのに要する費用を計上することが要求される。

4. 被災構造物の補修・補強後の性能評価

4.1 力学的性能評価に関する過去の研究活動

図－３は，過去 30 年間（1975 年～2004 年）の建築学会大会学術講演梗概集において，RC 構造物の補修・補強に関する論文数の年度別推移を調査した結果である。図中には，建設投資の年度別推移および過去 30 年間に起こった大地震の名称を併記している。論文数の推移を見ると，補修・補強研究のピークが過去 30 年の間に２回存在していることが確認できる。１度目のピークは 1984 年であり，新耐震設計法の試行や２つの大地震（宮城県沖地震，日本海中部地震）が契機となって RC 構造物の補修･補強に関心が集まったものと考えられる。この時期には，①増設壁による補強，②鉄骨ブレースによる補強に関する研究が代表的である。一方，2 度目のピー

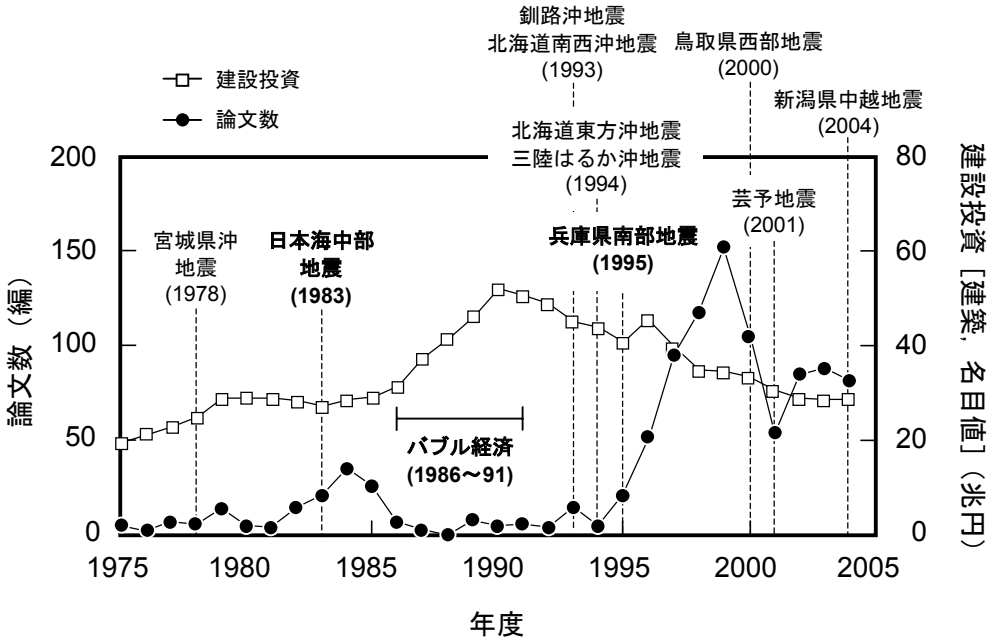
クは 1999 年であり，1995 年に発生した兵庫県南部地震以後，1999 年まで急激に論文数が増大している。この時期には主に，①繊維シートによる補強，②鋼板による補強に関する研究が数多く行なわれており，部材の靭性能の向上に大きな関心が集まっている。また，③エネルギー吸収部材を用いた制震補強に関する研究も盛んである。

4.2 補修･補強後の部材性能を検討した研究事例

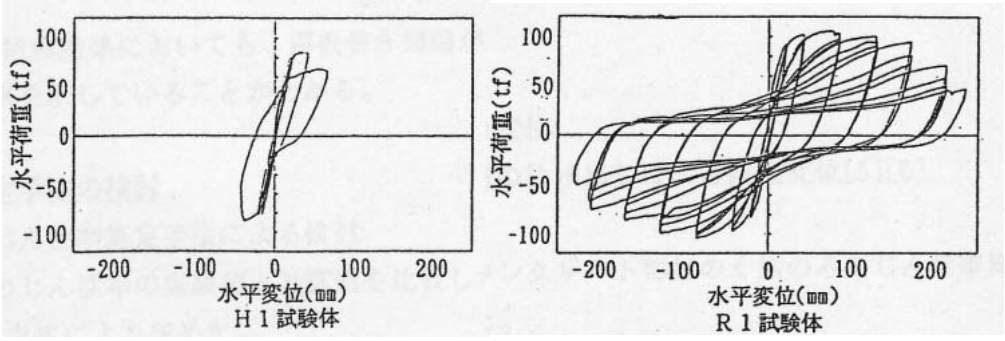
補修・補強後の部材性能を検討した研究は，ほとんどが実験的な研究である。例えば，土木分野では柱の正負交番載荷実験が中心となっており，その他に，柱の振動台実験やはりの曲げ実験が行われている。しかしながら，部材性能に関しては，部材耐力の回復性を中心に検討がなされており，荷重－変位関係に代表される力学挙動の詳細まで踏み込んだ検討は十分に行われてはいない。実験結果の一例として，せん断破壊した試験体を鋼板巻き補強して再度載荷した実験の補修･補強前後の履歴曲線の比較例 3)を**図－4**に示す。せん断破壊が防止され，変形性能が大きく向上している。各々の研究事例では，損傷程度や補修･補強方法が異なるため定量的な言及は難しいが，従来得られた知見を全体的に見ると，補修・補強後の初期剛性および等価粘性減衰定数は，補修・補強前に比べて下がる傾向が，荷重およびエネルギー吸収性能は上がる傾向が見られる。なお，適切な補修・補強方法によってせん断破壊を防止することは可能であるが，補修・補強断面の増加やエポキシ樹脂による引張抵抗の増大により，補修・補強部分の損傷が抑えられることで，補修・補強後の損傷位置が柱基部から上部に移行する結果も報告されている。また復旧後の部材特性の変化は，構造系の耐荷特性も変化することになる。したがって，補修・補強においては，構造系全体の耐震性能のバランスを崩さないよう考慮する必要がある。

4.3 今後の検討事項

補修・補強後の構造物の性能を評価するためには，補修・補強方法に応じて，その力学挙動



図－３　RC 構造物の補修・補強に関する研究論文数の年度別推移



図－４　履歴曲線の比較

を的確に表現できる指標が必要である。補修・補強後における力学的性能評価の指標としては，例えば，①剛性，②耐力（破壊モード），③変形性能（じん性率，塑性率，部材角，断面曲率），④損傷レベル，⑤エネルギー吸収性能，⑥等価粘性減衰定数，等が挙げられる。補修・補強後の部材特性としては，部材の初期剛性や水平耐力などの耐荷特性も変化することになる。また，断面修復をする際，修復後の断面寸法を大きくした場合，最大耐力が大きくなったことにより，部材の破壊モードがせん断破壊型に移行する場合もある。損傷状態によっては，補修・補強後の荷重－変位の履歴ループ形状が損傷前よりも痩せる場合もあり，履歴吸収エネルギーに影響を与え，その結果履歴減衰が損傷前に比べて低下し，応答特性も変化する場合もある。また，損傷前よりも耐荷性能が向上する補修・補強となる場合も，損傷の影響や補強工法に応じた荷重－変位挙動を的確に表現できる力学モデルが必要となる。

以上のように，復旧性を指標した性能照査型設計をより高度に発展させるためには，復旧後の構造物に対して，的確に性能評価可能となる手法の構築が必要となる。この手法構築のためには，補修・補強工法に応じて地震で被災した構造物の補修・補強後の部材挙動を精度よく表現可能な力学モデル，および復旧後における性能評価指標を明確に定義する必要がある。

5. 経済性を考慮した復旧性能評価

5.1 経済性を考慮した復旧性能評価の必要性

近年、建築物において、各層梁端に降伏ヒンジを計画した全体降伏機構に基づく設計法が実施させるようになってきている。兵庫県南部地震では同機構のＲＣ建築物に、安全性の確保は十分であったが復旧費用が非現実的になるという理由で、取り壊された例があった。一方、土木構造物は、社会の流通機能を担っており、機能停止は社会的な復旧活動や経済活動に重大な影響を与える。損傷の回復を速やかに行い、機能停止による損失を最小にすることが震災直後の最重要目標となった。

大地震時における耐震目標として安全性、すなわち人命の保護がもっとも重要であることに議論の余地はない。しかしながら、建築構造物が単に住むためのものではなく経済活動の場として重要な役割を担っていることや、社会交通システムが高度化し土木構造物の機能停止による経済的損失が飛躍的に大きくなってきた昨今の状況を考えると、大地震時における耐震目標を安全性（人命保護）だけにとどめることが出来ないのは明白である。大地震が社会に及ぼす経済的なダメージを小さくし経済復旧を速やかに行うためには、構造物の耐震性を復旧性能の面から適切に評価する指標および方法を確立することが、今後ますます重要となることが考えられる。

復旧性能は安全性能の延長上で評価されがちである。このことは、安全性能と復旧性能はある相関関係にあり、安全性能を確保することによりある一定の復旧性能が確保されるとの考えに基づいている。しかしながら、構造システムの多様化や耐震設計法の高度化が進んでおり、安全性能を高めることが必ずしも高い復旧性能を与えることにならない、あるいは、安全性能を高めることがむしろ復旧性能を低下させるケースも想定できる[4]。構造物の耐震性能を考える上で、安全性だけでなく復旧性の面からの適切な性能評価が望まれる。

これまで復旧性能に関する研究は安全性能に比べてその重要性の割には多くない。これは復旧性が、構造物の経済性（構造物の価値や復旧コスト）に大きく影響を受け、これの議論なしには進められないものであるからである。経済性を考慮した復旧性能はどのように評価するべきか、また、それにより得られる復旧性能は安全性とどのような関係にあるかなどほとんど明らかにされていないのが現状である。

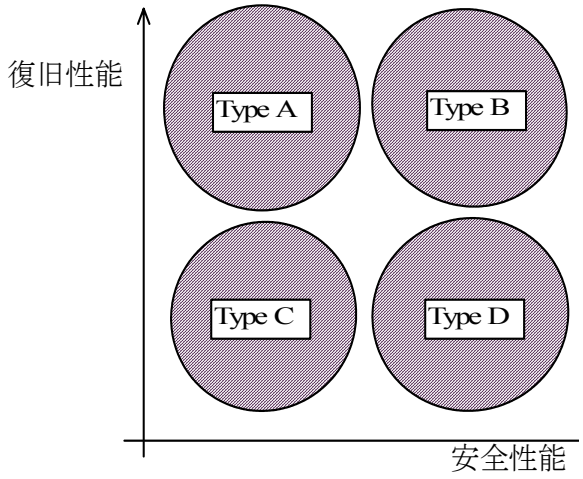
5.2 経済性を考慮した復旧性能評価の考え方

ここでは、復旧性能を「地震が発生し損傷が

生じた場合でも、経済的に無理なく補修が出来て、計画供用期間を全うできる性能」と定義し、次の形での復旧性指標の構築を試みる。

復旧性指標＝（復旧コスト＋機能停止損失）
／最大支出可能金　　(1)

分子はある想定した地震動によって引き起こされる復旧のためのコストや復旧期間中に生じる機能停止損失であり、地震による損傷を復旧するに必要な全費用を表している。一方、分母は復旧のために経済的な観点からその構造物に投入可能な資金であり、復旧後の構造物の資産価値や復旧後に構造物の生み出す価値に基づき決定される。すなわち、分子は復旧時のマイナス分、分母は復旧により得られるプラス分であり、この指標が１以上では復旧の経済的な意味は失われ、１より小さければ小さいほど復旧は経済的に容易であると言うことになる。すなわち、ある想定した地震動に対して、この指標が



図－５　復旧性能と安全性能

小さいほど、構造物の復旧性能は高いと判断することができる。

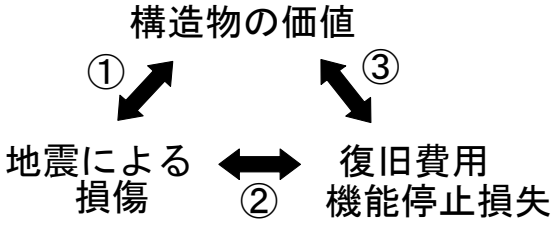
安全性能の良否が、地震時に受ける最大損傷度の大きさによって支配される傾向にあるのに対して、復旧性能の良否は最大損傷度の大きさだけでなく、損傷の量（損傷を受けた部材の数など）や損傷の生じている箇所の作業環境に大きく影響を受けることが予想される。安全性能と復旧性能は必ずしも正比例の関係にない可能性がある。従って、例えば、**図－５**のように、横軸に安全性能、縦軸に復旧性能を取り、構造物の性能をプロットした場合、全ての構造物がType B や Type C の領域に入る保証はない。Type D に分類されるような、安全性能は高いが復旧性能は低い構造物や、逆に Type A に分類されるような、安全性能は低いが復旧性能は確保されているものが存在することが考えられる。

構造物に求められる復旧性能・安全性能は、用途や社会的な役割、その重要性によって大きく異なってくる。都市を形成する一つ一つの構造物に適切な性能が与えられているのかどうかを把握することは地震に強い都市を実現する上で非常に重要である。

5.3 今後の検討事項

経済性を考慮した復旧性能評価を精度良く行うためには、また、その結果が説得力のあるものとなるためには、**図－６**に示す「構造物の価値」「地震による損傷」「復旧費用・機能停止損失」の相互の関係を明らかにする必要がある。すなわち、①損傷により構造物の価値の低下がどのように起こるのか、②復旧費用・機能停止損失は損傷によりどのように変化するのか、③復旧により構造物の価値はどのように上昇するのか、を明確にすることが経済性を考慮した復旧性能評価を行う上で必要不可欠である。

研究活動はまず、これら３つの項目に関する調査・情報収集を徹底的に行なうことから始め、これにもとに、式(1)の考え方に基づく経済性を考慮した復旧性能評価法の枠組みについて考えたい。



図－６　構造物の価値と損傷・復旧

6. 報告書および今後の活動方針

本研究委員会の成果を報告書として**表－５**の目次のようにとりまとめた[4]。また，委員会での議論内容は，詳細な議事録をホームページ（http://rc.arch.cst.nihon-u.ac.jp/TC/index.html）に公開しているので参照して頂きたい。

表－５　報告書目次

１．委員会の目的

1.1 委員会の趣旨

1.2 委員会の活動内容

２．損傷評価

2.1 損傷評価を行なう目的と必要性

2.2 損傷評価の現状と到達点

2.3 損傷評価の先にあるもの

2.4 ２～３年目の活動

付録　損傷評価に関する文献リスト

３．被災構造物の補修・補強後の性能評価

3.1 補修・補強後の力学的性能評価の必要性

3.2 補修・補強後の部材の力学的性能評価に関する既往の研究事例

3.3 補修・補強後の力学的性能評価に関する今後の検討事項

3.4 ２～３年目の活動

４．経済性を考慮した復旧性能評価

4.1 経済性を考慮した復旧性能評価の必要性

4.2 復旧コスト支配型構造物の復旧性能評価

4.3 機能停止損失支配型構造物の復旧性能評価

4.4 ２～３年目の活動

５．今後の活動方針

これらの成果に基づき，本研究委員会は，２～３年目への継続が認められ，以下の項目を対象とし，前述した検討の枠組み基づき，調査活動を行う予定としている。

(1) 復旧性を考慮した耐震設計法 (WG1)

①損傷による構造物の価値低下モデル構築

②損傷に対する復旧費用・機能停止損失算出モデル構築

③復旧による構造物の価値上昇モデル構築

④構造物の経済的価値評価に関する調査研究

⑤経済性を考慮した復旧性能評価法の枠組みづくり

(2) 損傷評価 (WG2)

①損傷評価のアプリケーションとしての利用法

②部材および構造物全体の限界状態の設定

③損傷制御型設計手法の開発

④被災した構造物の残存性能の予測と評価

⑤耐震補強した構造物の性能評価

(3) 補修・補強後の性能評価 (WG3)

①各種補修・補強工法における性能向上効果に寄与する力学的要因分析

②補修・補強後の構造物における性能評価指標の検討

③補修・補強後の構造物挙動に関する数値解析的検討

④補修・補強後構造物の性能評価手法の確立に向けた検討

参考文献

1）(社)日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針（案）・同解説，2004

2）鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物設計標準・同解説（耐震設計），平成 11 年 10 月

3）西川佳祐・渡辺忠朋・佐藤勉・谷村幸裕：鋼板巻き補強柱部材の変形性能，コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.2, pp.1505－1510, 1996.

4）日本コンクリート工学協会:被災構造物の補修補強後の耐力変形性状研究委員会報告書，2005 年 3 月