委員会報告　コンクリート構造物の構造実験評価に関する研究委員会活動

倉本　洋[*1]・宮内 靖昌[*2]・南　宏一[*3]

要旨：本研究委員会では，構造設計の性能規定化に伴い，今後より一層重要度を増す耐震に関する静的構造実験および動的構造実験の手法を整理し，どのように実験を行い，その結果をどのように評価し，如何に構造設計に反映させるかを調査するとともに，標準的な加力・計測方法を検討した。また，データベース等によって複数の研究機関・研究者が実験結果を供用するために必要な最低限の情報は何かを明確にし，これらの成果を報告書にまとめた。

キーワード：コンクリート構造実験，静的実験，仮動的実験，振動台実験，性能評価

１．はじめに

コンクリート構造物に対する構造実験は，構造設計に資する基礎資料の蓄積や想定荷重・外乱に対する構造性能および崩壊メカニズムの把握等を目的として，国内外を問わず大学，官公庁，企業等の各研究機関において毎年数多く行われてきている。その一方で，近年，部材，骨組および構造物全体といった実験対象や静的実験，仮動的実験および動的実験といった実験手法の多様化に伴い，実験目的，実験方法，測定項目および評価項目等も多様化してきており，第三者による構造実験結果の評価や相互比較を困難なものとしている場合も少なくない。このような状況を鑑み，コンクリート工学協会では会誌・コンクリート工学の 2001 年 9 月号で「コンクリート構造の実験」を特集し[1]，土木・建築分野のコンクリート構造実験に関する最新の情報を紹介すると共に，実験目的の設定法，実験手法，実験結果のまとめ方等の一例を示した。

本研究委員会「コンクリート構造物の構造実験の手法および評価法に関する研究委員会」は上記の会誌特集号に啓発され，時代の趨勢である構造設計の性能規定化に伴い今後より重要度を増すであろう構造実験の手法を整理し，どのように実験を行い，その結果を如何に構造設計に反映させるか，また，データベース等によって複数の研究機関・研究者が実験結果を供用するために必要な最低限の情報は何か等を明確にするための研究資料の整備を目的として発足したものである。

なお，本委員会では「耐震」に関する静的および動的構造実験を対象とし，活動目的として以下の 6 項目を選定した。

1) コンクリート系構造部材および架構に対する実験手法および実験結果の評価手法に関する現状調査。
2) 試験体のモデル化と縮尺率，加力装置および加力・計測方法等が実験結果におよぼす影響の検討。
3) 実験結果の評価手法が，部材および架構の性能評価におよぼす影響の検討。
4) 標準的な構造実験の方法および実験結果に基づく性能評価法の検討。
5) 初心者に対する構造実験の入門書的な資料の作成。
6) 実験結果のデータベース化における留意点の抽出。

本委員会の活動期間は 2002 年 4 月から 2004 年 3 月までの 2 年間であり，静的実験手法を検討する WG-S（主査：滝本，宮内），動的実験手

*1　豊橋技術科学大学　工学部建設工学系　助教授　工博　（正会員）
*2　竹中工務店　技術研究所　主任研究員　工博　（正会員）
*3　福山大学　工学部建築学科　教授　工博　（正会員）

表－１　委員構成

委員長	南　宏一	福山大学			
幹　事	岡野　素之	大林組	滝本　和志	清水建設
	倉本　洋	豊橋技術科学大学	宮内　靖昌	竹中工務店
委　員	井上　晋	大阪工業大学	杉本　訓祥	大林組
	内田　裕市	岐阜大学	高橋　良和	京都大学
	岡安　隆史	鹿島建設	寺井　雅和	福山大学
	加藤　敦	防災科学技術研究所	西田　秀明	土木研究所
	加藤　博人	建築研究所	野口　博	千葉大学
	金久保利之	筑波大学	福山　洋	建築研究所
	小林　薫	東日本旅客鉄道	星隈　順一	国土交通省
	真田　靖士	東京大学	益尾　潔	日本建築総合試験所
	島　弘	高知工科大学	宮川　義範	電力中央研究所
	庄司　学	筑波大学		
事務局	井上　和久	日本コンクリート工学協会		（50 音順）

法を検討する WG-D（主査：岡野，倉本）および実験結果に基づく性能評価手法を検討する WG-E（主査：岡野，倉本）の 3 つの WG を設置した。**表－１**に委員構成を示す。

２．委員会報告書の概要

本委員会の報告書は 7 章から構成されている。2 章では土木･建築分野で行われている構造実験の一般的な目的を示した。3 章では静的構造実験に関して，試験体の寸法効果，加力方法，加力履歴，計測方法等の問題を検討すると共に，要素実験，部材実験，骨組実験，実構造物実験および地中構造物実験の例を紹介している。4 章は動的構造実験に関するものであり，まず，動的実験特有の問題である試験体の縮小に伴う相似則に関する考え方が示され，続いて仮動的実験および振動台実験における固有の問題について解説すると共に，それぞれの実験例を紹介している。5 章では，実験結果に基づく性能評価の手法を検討しており，線材，橋梁部材，耐震壁，架構および地中構造物等の各種主要構造部材・架構の性能評価項目を示した。また，6 章では，米国の NEES（Network for Earthquake Engineering Simulation）計画の紹介も交えて，構造実験から得られた情報を如何にして解析に有効活用していくかについて検討している。

以下の 2.1 節から 2.3 節で報告書 3 章から 5 章までの概要を紹介する。

2.1　静的構造実験の手法

(1)　試験体のスケール

実験室で行う構造実験は，実大規模の試験体を用いて行うのが理想であるが（写真－１），現実には各研究機関が保有する加力装置の能力により，自ずと試験体の大きさに限界が生じ，通常，縮小モデルの試験体を用いて行うことになる。これは如何ともしがたい点であるが，研究者は試験体の縮尺率により異なる実験結果が生

写真－１　大型試験体を用いた実験 [2]

じる場合があることを理解しておく必要がある。

一般的に，曲げ破壊の場合には強度の寸法効果は顕著に現れないが，塑性変形性能には現れることがある。その一因として，太径の軸方向鉄筋を用いると塑性ヒンジが長くなり，それに応じて終局変位が大きくなることが考えられる。縮小モデル試験体の設計においては，鉄筋の規格により制限されるが，鉄筋径についてもできる限り縮小率に応じた適切なものを選定することが重要である。なお，せん断強度には明確な寸法効果が確認されており，各国の設計コードでは寸法に関する係数が取り入れられている。

報告書では寸法効果に関する実験例および試験体設計上の留意点などについて示されている。

(2)　加力方法

加力計画の立案では，まず，油圧ジャッキなどの加力装置，ポンプなどの荷重制御装置および支承などの支持装置など使用する装置の選定から始まる。そして，試験体と加力装置との接触面の状態あるいは接続方法の検討，柱実験では軸力をどのように導入するかなどの検討が必要になる。報告書ではこれらの各種装置の紹介および加力計画における留意点が示されている。また，最近各研究機関で導入されつつあるインバーターモータ駆動による加力制御方法の構成および機構などについても紹介されている。

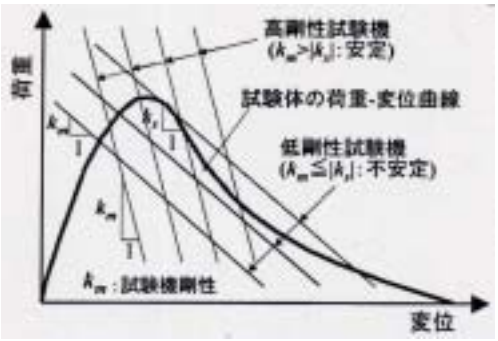
加力計画において，研究者が改めて認識していなければならない点に載荷装置の剛性がある。試験体の変形が想定どおり制御されている場合には，載荷装置の剛性が実験結果におよぼす影響はない。しかしながら，試験体の変形を適切に制御できないこともあり，このとき，載荷装置の剛性が実験結果に影響をおよぼす可能性が生じる。すなわち，最大耐力後の領域において，試験体剛性は負となる。試験機剛性が試験体剛性より小さければ，載荷装置のシステム全体としての剛性は負となり不安定破壊が起こる。これに対して，試験機剛性が試験体剛性より十分に大きければ，システム全体としての剛性は正を維持するので安定であり，最大耐力以降の計測が行うことが可能になる。**図－１**は試験体の荷重―変位曲線と試験機剛性の違いによる安定条件を模式的に示したものである[3]。なお，図中の試験機剛性を表わす直線群は試験機のストロークに依存して異なった位置をとることを意味している。

報告書では一軸圧縮試験機の剛性が圧縮強度におよぼす実験例，加圧板・球座の影響，圧縮実験における試験体の安定条件および載荷装置を高剛性にする方法などについて示されている。

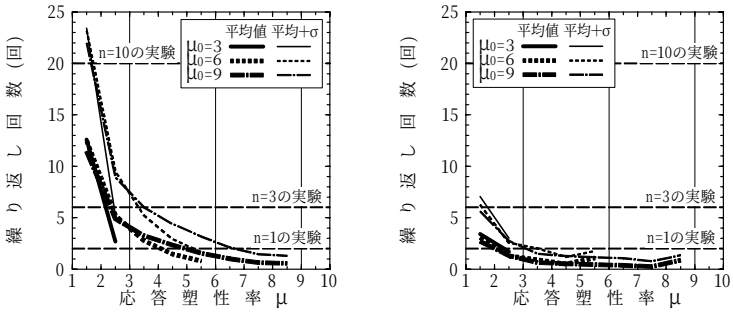
(3)　加力サイクル

静的実験において加力サイクルをどのように設定するかは研究者が経験的に判断し採用することが多い。しかしながら，荷重履歴や繰り返し回数を変えた橋脚および建築物の柱の実験によると，加力サイクルが水平耐力におよぼす影響はないが，水平力が低下しはじめる時の変位に大きな違いが生じ，載荷変位を細かく漸増させると，限界変位が小さくなることが指摘されている。報告書ではこれらの既往の研究成果を紹介している。

さらに，報告書では，橋脚に生じる現実的な



図－１　安定性確保のための試験機剛性[3]



(a)タイプⅠの地震動　　(b)タイプⅡの地震動

図－２　塑性応答の繰り返し回数[4]

塑性応答の繰り返し回数や累積塑性変形量，履歴吸収エネルギーに着目して整理された塑性応答解析の結果と正負交番載荷実験における載荷方法との比較について考察し，加力サイクルを提案した研究例を紹介している[4]。**図－２**は，最大応答変位が生じる前までの応答塑性率の度数分布を全ての解析ケースに対して求め，その平均値と標準偏差を示したものである。

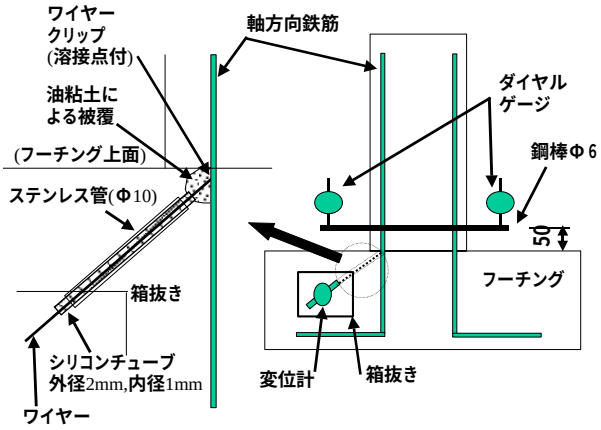
タイプⅠ（震源が海洋のプレート境界付近の地震）の地震動では，標準偏差の 1 倍のばらつきを考慮すると，1～2δ_yの応答が 23 回前後作用するが，それ以上の応答は少なくなっている。これは，繰り返し回数を 10 回とする正負交番載荷が，タイプⅠの地震動が作用した時の実際の挙動よりも非常に多い繰り返し回数を与えていることを示している。また，応答変位の増大に伴って，その繰り返し回数が徐々に少なくなっている点も特徴的であり，載荷変位の増大に伴って，徐々に繰り返し回数を減らす方が合理的であると言える。一方，タイプ II（内陸直下の地震）の地震動に対する繰り返し回数は，明らかにタイプⅠの地震動の場合よりも少なく，正負交番載荷実験において，3δ_y以上の載荷ステップの繰り返し回数は 1 回でも十分であることを示している。

(4)　計測方法

荷重を受けて試験体がどのように変状しているかを知るために，ひずみ計測，変位計測およびコンクリートのひび割れ観察が行われる。

ひずみ計測に用いられるひずみゲージは 1938 年にアメリカで考案され，わが国では 1962 年から製造が開始されている。報告書ではひずみゲージの構造，測定原理および使用上の注意点について述べている。

試験体のある点とある点の間の相対変位を計測するために，試験体に測定治具あるいは測定フレームが取り付けられ，これに変位計を取り付けて変位が計測される。その測定値を用いて，例えば，部材の曲率やせん断ひずみが求められる。実験では，計測する目的を明確にし，その



図－３　軸方向鉄筋の伸びだし計測事例［5］

ために何をどのように計測するかを十分に検討し，さらにきちんと計測されているかを常にチェックして実験を進める必要がある。

主要な測定項目の 1 つに軸方向鉄筋のフーチングなどからの伸びだし量がある。本委員会 WG-S において，この話題になると失敗談やノウハウの情報交換で議論が盛り上がった。報告書では，現時点でもっとも優れた計測方法であると WG-S で結論づけられた**図－３**に示す鉄筋伸びだし量の計測法について示されている[5]。

また，ひび割れ観察に関する最新のテクニックに，デジタルカメラを用いた画像処理技術がある。報告書ではクラックスケールによるひび割れ幅の計測と画像処理による計測の比較が紹介されている。

(5)　各種実験例

報告書では，静的構造実験を要素実験，部材実験，骨組実験および実構造物実験に分類し，具体的にどのような方法で実験が行われているか既往の文献を調査し，実験例を紹介している。要素実験としては，異形状棒材の定着実験，連続繊維シートの付着・定着実験について解説している。実構造物実験には，現地で載荷を行った実験（土木構造物 2 例，建築物 6 例）および実部材を切り出して実験室で載荷を行った実験（それぞれ 4 例，2 例）を紹介し，また，実施における留意点について述べている。

さらに，特殊な実験として，地中構造物の実験について報告している。

2.2　動的構造実験の手法

従来，動的実験は実施そのものに相当な技術力と予算を要するため，ごく一部の研究機関でしか実施されなかったが，最近ではアクチュエータやコンピュータのハード・ソフト両面の飛躍的進歩により微小な時間刻みで入力（変位・加速度）を制御する実験が可能となり，以前よりも容易に実施できるようになった。

動的実験が静的実験と大きく相違する点は，ニュートンの運動方程式を利用することにある。静的実験においては性能を荷重と変位の関係で表現し，地震波との関連付けは強度とエネルギー吸収だけであるのに対して，動的実験はこれに時間のディメンジョンが加わり，さらに減衰性能なども考慮される。

耐震を目的とした動的実験は，振動台実験と仮動的実験に大別される。振動台実験は，可動な台の上におもりを載せた試験体を固定し，台をアクチュエータで直接振動させる方法で，地震波を直接入力するなどして構造物の実際の挙動を再現できる優れた実験方法である。三次元に入力できる振動台も数多く稼動しており，地震波をより忠実に再現できる。またバリエーションとしては，せん断土層を用い地中コンクリート構造物を地震時土圧により破壊させる実験や，遠心力載荷装置中に振動台を載せて重力場を変え，模型と実物の相似則を合わせた実験が一部の研究機関で実施されている。しかしながら比較的小さな試験体となるため，材料の速度依存性や相似則の影響が出やすく，また一般的に装置が大掛かりになるため費用がかかる。

仮動的実験と呼ばれる方法は我が国独自の手法で，振動台実験，静的実験および動的解析の長所を併せ持っている。これは，載荷そのものは静的であるが，測定された応答（荷重，変位）を用いて，運動方程式を用いた解析により次変位ステップを逐次計算し，目標値を決定し載荷する手法である。小規模な設備で比較的大きな部材の実験が可能である。

報告書 4 章では，実験の実務者への有用な情報となることを目的として，地震を対象としたコンクリート構造物の動的実験に関し，その特徴，概念，実施方法や留意点について解説し，代表的な実験について実施例の概要をまとめている。

(1)　動的実験特有の問題

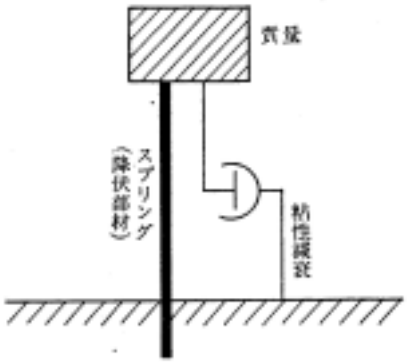
建築・土木構造物の振動台実験では，振動台の規模や容量，実験予算等の関係から，通常，縮小相似模型試験体が用いられる。しかしながら，縮小相似模型試験体を用いることによって，動的実験特有の問題が生じる。すなわち，振動台実験における相似模型は，単なる幾何学的相似模型を意味するのみならず，模型現象における長さ，時間，力，温度，電流等のすべての変数が対応する実物（原型）現象における各変数と相似関係になければならないことを意味している。鉄筋コンクリートの場合には，応力－ひずみ関係が非線形であり，模型材料の応力を原型と相似にすることが困難であるため，模型は原型と同一材料を用いて応力の相似率を１とすることが最も賢明とされている[6]。

報告書では，振動台実験で特に重要な「長さ」，「時間」および「力」の３つの次元について，応力の相似率を１とした場合の縮小試験体の相似則を示している。

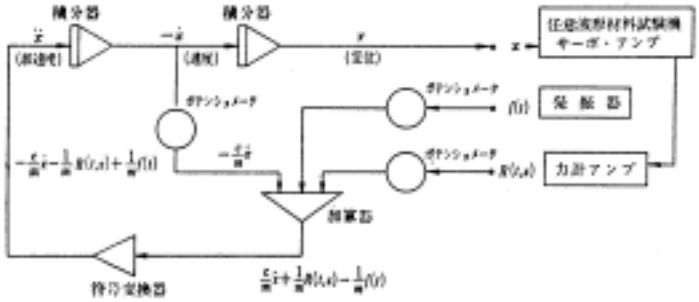
(2)　仮動的実験

仮動的実験は，コンピュータおよびセンサー技術の発達とそれをベースにした制御技術の向上によって始めて実用化された耐震実験手法であり，約 30 年ほど前に日本で研究開発が始められた実験技術である。以来，実験精度の向上や適用範囲を拡げるための研究開発が精力的に進められてきた結果，静的加力実験や振動台実験と並ぶ構造実験手法として広く普及するまでになってきている。

わが国における仮動的実験の開発に繋がる先駆的な研究としては，東京大学地震研究所の伯野らのグループによって実施されたアナログコンピュータとアクチュエータを用いた１自由度



図－４　１自由度系振動モデル[7]

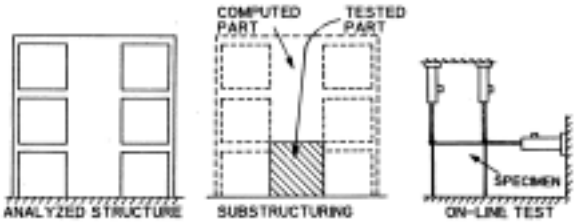


図－５　計算流れ図[7]

系構造物に対する地震応答実験[7]が挙げられる。実験対象は，**図－４**に示すような１自由度系構造物で，試験装置の制約から非常に小さな試験体（厚さ 5mm，長さ 60mm，幅 20mm）が用いられた。アナログ計算機を使った応答計算と加力試験の流れは**図－５**のように説明されている。

その後，ディジタルコンピュータとアクチュエータを組み合わせた計算機－試験機オンラインシステムの研究が，東京大学生産技術研究所の高梨・岡田らのグループによって行われ，数値積分手法や計算誤差，制御方法の検討，多自由度構造物への適用など，現在の仮動的実験の基礎となる研究開発が進められた[8]。建築研究所では，1980 年代初頭から実大規模試験体への適用も視野に入れた仮動的実験手法の開発が行われ，日米共同耐震実験研究[9]を始めとする多くの研究プロジェクトに使用されてきた。海外の動向としては，米国カリフォルニア大学バークレー校や，ミシガン大学などで日本とほとんど同じ時期に仮動的実験の研究開発が開始され[10], その後, 欧州連合の市民安全保護研究所（イタリア）でも仮動的実験を用いた耐震実験研究が盛んに行われるようになっている[11]。

仮動的実験の応用技術として，対象とする構造物（系）の中から力学的特性が不明確な領域（サブストラクチャー）を取り出し，その部分にのみ載荷を行い，残りの部分は比較的明確な力学的モデルに基づいて数値的に計算し，両者を組み合わせて地震応答を再現するサブストラ



図－６　サブストラクチャ仮動的実験の概念[8]

クチャー仮動的実験法も開発されている[12,13]。サブストラクチャー仮動的実験の概念を**図－６**に示す[12]。また，近年の計算機の演算速度や精度の向上を背景として，リアルタイム載荷によって速度や加速度に構造物の挙動が大きく依存する問題についても仮動的実験により精度良く取り扱おうとする高速化動的実験[14]や実験システムを並列化し，かつこれをネットワークで結んで全体システムを制御するという並列仮動的実験[15]に関する研究も進められてきている。

報告書では，仮動的実験の概要の他，制御アルゴリズムの特徴，仮動的実験に適した数値積分法，実験計画上の留意点などについて解説している。

(3)　振動台実験

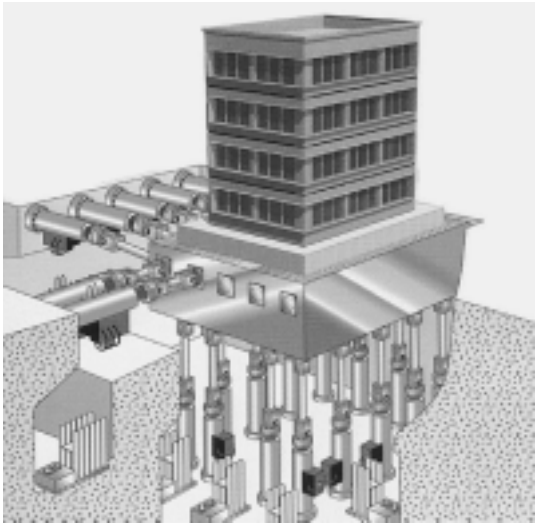
振動台実験の目的を大別すると，振動特性の解明，破壊の解明，設計製作の検証がある。例えば，全体フレーム構造等の複数の自由度を持つ構造に関する様々な振動特性の把握，最大耐力以後崩壊に至るまでの挙動の解明，設計製作された構造物の安全性検証等が挙げられよう。

また，振動台実験の実施，特に鉄筋コンクリ

ート構造の破壊実験実施において注意すべき点は，振動台実験では実験自体が比較的短時間で終了し，加振開始から終了まで加振を中断することができないため，振動台の特性を十分に考慮に入れ，実験計画を作成しなければならないことである。すなわち，実験計画者および実験実施者は試験体の特性以外にも，振動台自体に対する十分な知識が必要とされる。

現在一般に多く用いられている振動台は，電気油圧式加振機を用いた電気油圧式振動台と動電型加振機を用いた動電型振動台がある。電気油圧式振動台の特徴は，加振力が大きいことであり，比較的大型で低周波数域を対象とした実験に用いられることが多い。電動型振動台は加振力は小さいが，応答周波数が高く，小型で高周波数域を対象とした実験に用いられることが多い。報告書では RC 構造分野で多く用いられる電気油圧式振動台について記述されている。**図－7** に 2005 年に兵庫県三木市に竣工予定の「実大三次元震動台」の概念図を示す。

振動台実験における留意点としては，(1)システムの各固有振動数の把握，(2)振動台の励起回転振動に対する検討，(3)構造物の非線形性に伴う波形再現性の低下に対する検討，(4)加速度計と変位計等のセンサーに関する配慮，(5)振動台の局所応力に対する配慮，および(6)実務的な制約条件の把握，等が挙げられる。



図－7　実大三次元震動台イメージ

この他，報告書では，試験体の計画，加振計画，測定計画等に関する留意事項を記述すると共に，振動台実験の実施例が示されている。

2.3　実験結果に基づく性能評価の手法

報告書 3 章および 4 章では主に実験を実施するまでに関して，その目的から実験方法を記述し, 代表的な実験例を紹介しているが, 5 章では, 得られた実験結果をどのように評価するかに関して記述されている。

実験結果を評価する一連の作業における留意点を以下に要約する。

1) データの確定：測定された生のデータは，目的とするデータに対して実験上の誤差を含むことが多い。したがってデータ処理などを行ってこれらを取り除き，また取捨選択してデータとして何が真であるか，どこまで有効であるかを把握する。特に破壊に至る領域では，変位計などのセンサーが正常に（目的通り）機能していない場合があるので留意する必要がある。

2) 各イベントの評価：載荷開始から終了に至るまでに，試験体にはさまざまなイベントが発生する。これらを逐一確認する必要がある。一般には荷重と変位の関係，荷重とひずみの関係，あるいは特定の変位とひずみの関係，ひび割れ状況などを用いて，それぞれのイベントを吟味し，定性的に何が起きているかを確認する。

3) 指標による評価：評価式などの指標を用いて，各イベント発生時の定量的評価を加える。このとき，それぞれの評価指標の前提を十分把握しておくことが重要である。例えば，せん断破壊ならば，破壊形態（引張，圧縮など）により評価式が異なるため破壊形態に沿った耐力式を用いるなど，各イベントの発生状況に合致する評価指標を用いることが重要である。

報告書では，上記事項について，線材，橋梁部材，耐震壁，架構および地中構造物等の部材種類毎に，建築，土木の各分野における評価手法について解説している。

３．おわりに

本研究委員会では，コンクリート構造物の耐震性能に関する静的および動的構造実験の手法および実験結果に基づく性能評価法について調査・検討を行った。各委員の活発な活動により広範囲な調査・検討の結果がまとめられ，有益な成果が得られたと考える。これから実験を行う多くの研究者に本委員会の活動成果をまとめた報告書が活用されれば幸いである。

参考文献

[1] コンクリート工学協会：コンクリート構造の実験，コンクリート工学，2001.9

[2] 建設省土木研究所他：鉄筋コンクリート橋脚の耐震性に及ぼす寸法効果の影響に関する共同研究報告書，共同研究報告書第 234 号，1999.10

[3] 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物のポストピーク挙動評価と設計への応用，pp.22-23，2003

[4] 星隈順一，運上茂樹：鉄筋コンクリート橋脚の地震時非線形応答の繰り返し特性，第 24 回地震工学研究発表会，pp.993-996，1997.7

[5] 石橋忠良，小林 薫，海原卓也：大変形領域の交番荷重を受けるＲＣ橋脚のフーチングからの鉄筋抜出し量算定法に関する研究，土木学会論文集，No.648/V-47，pp.43-54，2000.5

[6] 隈澤文俊：超小型立体模型による鉄筋コンクリート造建物の振動破壊性状に関する研究，東京大学学位請求論文，1995.11

[7] 伯野元彦，四俵正俊，原 司：計算機により制御されたはりの動的破壊実験，土木学会論文報告集，第 171 号，pp.1-9，1969.11

[8] 高梨晃一, 宇田川邦明, 関松太郎, 岡田恒男, 田中尚：電算機－試験機オンラインシステムによる構造物の非線形地震応答解析（その１：システムの内容），日本建築学会論文報告集，第 229 号，pp.77-83，1975.3

[9] 岡本 伸，中田慎介，芳村 学，上之薗隆志：鉄筋コンクリート造実大７層建物の耐震実験研究，コンクリート工学，Vol.20，No.6，pp.28-38，1982.6

[10] Takanashi, K. and Nakashima, M.：Japanese Activities on On-Line Testing, J. of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.113, No.7, pp.1014-1032, 1987

[11] Donea, J., Magonette, G., Negro, P., Pegon, P., Pinto, A., and Verzeletti, G.：Pseudodynamic Capabilities of the ELSA Laboratory for Earthquake Testing of Large Structures, Earthquake Spectra, Vol.12, No.1, pp.163-180, 1996

[12] Takanashi, K. and Nakashima, M.: Japanese Activities on On-Line Testing, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 113, No. 7, pp. 1014-1032, 1987

[13] Kuramoto, H. and Kabeyasawa, T.: Sub-Structure Pseudo Dynamic Testing on 6-Story Reinforced Concrete Frame with Soft First Story, Proceedings of 2nd US-Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering Methodology for Reinforced Concrete Building Structures, Sapporo, pp. 1-12, 2000.9

[14] Nakashima, M., and Masaoka, N.: Real-time on-line test for MDOF systems, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.28, pp.393-420, 1999

[15] 渡邊英一，杉浦邦征，永田和寿，鈴鹿良和：並列仮動的実験システムの構築とその検証，第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集，Vol.2, pp.2205-2210, 1998