

## 委員会報告 「コンクリート構造系の安全性評価研究委員会報告」

鈴木基行<sup>\*1</sup>・林 静雄<sup>\*2</sup>・宮本文穂<sup>\*3</sup>・北山和宏<sup>\*4</sup>・松島 学<sup>\*5</sup>

**要旨：**本報告は、コンクリート構造物全体系の安全性を合理的に評価するための重要な問題点について検討結果をとりまとめたものである。すなわち、橋梁については、靱性評価、高さの異なる高架橋・連続高架橋・ラーメン高架橋の非線形動的解析、橋梁構造システムの耐震安全性評価、地震被害分析などについてまとめた。建築物についてはモデル化に起因する問題や耐震性能評価手法、既存建物の耐震診断の精度などについてまとめた。さらに、信頼性理論を用いた安全性評価法についても検討しとりまとめた。

**キーワード：**コンクリート構造系、橋梁、建築物、モデル化、安全性、信頼性理論

### 1. はじめに

1995年1月に発生した阪神・淡路大震災では多くのコンクリート構造物が甚大な被害を受けた。その被害からの教訓の一つとして、コンクリート構造物の設計においては、構造物の各部位、部材毎の安全性検証だけではなく、構造物全体の挙動を考慮した設計体系に改めなければならないことが挙げられた。

本研究委員会では、このような状況を踏まえ、橋梁や建物などのコンクリート構造物を対象に、全体挙動に及ぼす各種因子およびそのモデル化の問題、部材の損傷の評価とそれらが全体挙動（損傷）に及ぼす影響、耐震補強と全体挙動との関係、信頼性理論に基づいた構造系の安全性評価法および構造系を考慮した設計概念などコンクリート構造系の安全性評価法に関する調査研究を2年間にわたり行ってきた。

以下に示す4つのWGを設置し、各WGでの検討および全体会議をとおして活動を行った。

WG 1：全体系の設計概念の検討

WG 2：橋梁などの土木構造物の全体系安全

性評価法の検討

WG 3：建物などの建築構造物の全体系安全性評価法の検討

WG 4：信頼性理論に基づく構造物の安全性評価法の検討

以下には、主としてWG 2～WG 4および全体会議での検討結果の報告を行う。

### 2. 橋梁などの土木構造物の全体系安全性評価法の検討

#### 2.1 概要

兵庫県南部地震の発生から4年が経過し、多くの研究機関から膨大な数の被害報告や被害原因などに関する論文あるいは報告書が出版されている。これらの成果は各種示方書などに反映され、耐震診断、耐震補強あるいは耐震設計に適用されているが、土木分野で特に被害の著しかった橋梁構造に対しては、橋梁構造全体系を対象とした耐震安全性の検討が必要なことが指摘されている。

コンクリート系橋梁構造物で全体構造系に対

\*1 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 工博（正会員）

\*2 東京工業大学教授 建築物理研究センター 工博（正会員）

\*3 山口大学教授 工学部知能情報システム工学科 工博（正会員）

\*4 東京都立大学助教授 大学院工学研究科建築学専攻 工博（正会員）

\*5 東電設計（株）技術開発本部コンクリート材料チーム 工博（正会員）

する検討は、主として鉄道橋および道路橋などの鉄筋コンクリートラーメン連続橋脚を対象とするものがほとんどで、非線形動的解析が可能な汎用プログラムを利用して構造のメカニズムに至る過程および地震時保有耐力を解析的に算出するものが多い。この場合の基本となる非線形地震応答解析および地震安全性評価は、本来、上部構造、下部構造、基礎構造、地盤を一体化させた3次元モデルで行うのが理想的であるが、現状では技術的、経済的に困難な場合が多く、現状では解明したい目標に応じた部分モデルに依存せざるを得ない現状にある。

橋梁構造全体系の観点に立った種々の検討方法が確立すると、想定以上の地震力が作用した場合でも、橋梁全体系としての終局状態に至る損傷・破壊メカニズムに対応した安全性評価あるいは機能損失予測が可能となり、種々の防止対策を効果的・経済的に講じることが可能となってくる。

本章では、まず、構造全体系を対象とした耐震安全性評価研究の現状を概観するとともに、現行設計法における構造全体系を対象とした耐震安全性評価を道路橋および鉄道橋それぞれについて整理する。

次いで、道路高架橋を対象とする橋梁構造全体系としての耐震安全性確保の必要性の観点から、3径間連続橋とそれに隣接する単純桁橋を対象として支承特性および桁間衝突を考慮した非線形動的解析を実施することによって、支承損傷や桁間衝突が橋梁構造全体系の損傷形態にどのような影響を及ぼすかを明らかにするとともに、これらに対する耐震安全性評価手法の確立を試みている。また、橋脚高さが異なる場合の、主にせん断破壊モードに対する耐震安全性評価手法の検討を試みる。

さらに、高架橋などの橋梁構造全体を上述の各種部位、部材によって構成される一連のシステムと考え、損傷、破壊の進展を確率論的に捉える試みとともに耐震対策をバランス良く実行可能な手法の提案を試みている。

また、被災RC橋脚に関する詳細な損傷分析を改めて行うことにより、せん断耐力、じん性率確保などの性能照査の考え方を基本とする将来の耐震診断法、耐震設計の方向を提案した。

最後に、鉄道ラーメン高架橋を対象とした最新の耐震安全性評価手法の考え方を紹介するとともに具体的な検討例を示すことによって今後の耐震安全性評価の方向性を示した

## 2.2 構造全体系に対する耐震安全性評価の研究の現状

従来、橋梁をはじめとする土木構造物やビルなどの建築構造物は、本来たくさんの部材で構成されているにも係わらず、全体構造系としてではなく、それぞれの部材ごとに耐震安全性の評価がされる場合が多かった。これは、今までの設計法が主として、部材ごとの応力照査を行う許容応力度設計法に基づいていることが原因と考えられる。従って、土木分野での構造物全体系に対して耐震安全性を評価した研究は、端緒についたばかりで系統的な研究例は少ないのが現状である。

ここでは、全体構造系を対象とした研究事例を、以下の2つに大別した。

- 1)全体系をシステムとして捉え、システム工学的な手法を用いて全体系の解析を行うもの。
- 2)全体系を多質点多自由度系でモデル化し、非線形のFEMなどで全体系の解析を行うもの。

さらにこの内、2)を以下のように分類してそれぞれの研究概要をまとめた。

- ①地盤との動的相互作用を考慮に入れた多点入力系の橋梁構造物の地震応答解析、
- ②支承条件の違いが橋梁全体系に及ぼす影響を検討したもの、
- ③落橋防止装置や桁脚連結ケーブルの効果を検討したもの、
- ④橋脚高さが異なる場合や地盤の不整の影響について検討したもの、
- ⑤モデル化の違いについて検討したもの、
- ⑥ラーメン高架橋およびラーメン橋脚に関する

もの。

## 2.3 現行設計法における構造全体系の耐震安全性評価

道路構造物を代表する道路橋および鉄道コンクリート構造物の設計は、それぞれ「道路橋示方書」および「設計標準」に基づいて行われている。これら両者は今回の「阪神・淡路大震災」を契機に大きく改訂された。

ここでは、それぞれの設計基準中の耐震設計規定の主要な変遷と考慮すべき地震荷重をまとめ、特に、改訂後の構造全体系の耐震安全性に関する配慮および今後の課題について種々の検討を行っている。すなわち、耐震設計において重要となる点は、地震動による入力エネルギーをどの部位、部材で、どの様な経路で吸収、消散させるかということである。通常のコンクリート構造物については、その耐用期間中に数回発生するような中小地震に対して構造物の応答が弾性範囲内に留まるようにし、構造物の耐用期間中に発生する確率は低いが非常に強い地震に対しては、それをプレート境界型と内陸直下型に大別し、それぞれ塑性変形を許し最終的に人命を損なうことの無いように構造全体系の崩壊を防ぐという考え方を採用している。

そのため、道路橋示方書では、エネルギー一定則に基づく地震時保有水平耐力法で想定する構造全体系としての非線形部材が設定されているが、地震時の挙動が非常に複雑な場合には構造全体系を考慮した動的解析による照査が推奨されている。なお、上部構造の落橋を防止する装置として各構成要素の役割を明確にした「落橋防止システム」が設けられる。

一方、鉄道コンクリート構造物に対する設計標準では、ラーメン高架橋の設計において性能評価型の規定体系を目指すものとなっており、基本的設計手順として断面諸元を仮定した構造物に対して設計想定地震による動的解析（非線形スペクトル法あるいは時刻歴法）を行い、その構造物の挙動が所定の性能を満たすことを確認するものである。

## 2.4 道路高架橋の耐震安全性評価

橋梁は本来、上部構造、下部構造、基礎構造、地盤等の一連の系としてその耐震性能評価がなされる必要がある。ここでは、橋梁構造全体系としての耐震安全性確保の必要性の観点から、3径間連続橋および3径間連続ラーメン橋を対象にして独自に種々の検討を行った。

3径間連続橋とそれに隣接する単純桁橋をモデル化した耐震安全性評価では、支承特性および桁間衝突を考慮した非線形動的解析を実施することによって、可動および固定支承の損傷や桁間衝突などが橋梁構造全体系の損傷形態にどのような影響を及ぼすかを明らかにするとともに、これらに対して各種耐震対策を施すことによってどの様に耐震安全性が向上するかの評価手法の検討を試みている。

一方、3径間連続ラーメン橋をモデル化した耐震安全性評価では、高橋脚、不等高橋脚といった特徴に着目して中空断面橋脚の脚高比を変化させた場合に対して震度法による静的耐震設計を行い、これに非線形動的解析を適用して橋軸方向の耐震安全性を検討し、せん断破壊モードに対する照査が重要となることなどを明らかにしている。

高架橋などの耐震安全性評価は、本来、上部構造、下部構造、基礎構造、地盤を一体化させた3次元モデルで行うのが理想的であるが、現状では技術的、経済的に困難な場合が多いため、ここでは、橋梁構造全体系を上部工、支承、落橋防止装置および下部工などの各部位、部材によって構成される構造システムとして捉え、地震力が作用した際、各部位、部材がお互いに影響を与え合い損傷が進んでいく損傷メカニズムを状態遷移確率行列あるいは損傷確率マトリックスによってモデル化することを試みた。この状態遷移確率行列あるいは損傷確率マトリックスによる検討結果は、橋梁構造に想定以上の地震力が作用した場合においても橋梁各部の機能損失をある程度予測することが可能となるのみならず、耐震対策工法の選定、対策の優先順位

の設定、付帯費用を考慮した最適設計等の様々な面において応用が可能であると思われる。

また、被災 RC 橋脚に関する詳細な損傷分析を改めて行うことにより、巨大地震時にも構造物を比較的小さい損傷に留めるための対策として、①せん断破壊を生じさせないようにせん断耐力を曲げ耐力より十分大きくすること、②損傷度の大きくなり易いせん断および曲げせん断損傷を生じさせないために十分なせん断耐力を確保すること、③曲げ損傷を軽減するため十分なじん性率を確保することなどが必要となることを明らかにし、将来の耐震検討、耐震設計の方向を提案した。

## 2.5 鉄道ラーメン高架橋の耐震安全性評価

在来線、新幹線などで多用されている、1層あるいは2層ラーメン高架橋全体の耐震安全性が各年代でどのように推移してきたのかを、設計応答換算弾性水平震度  $K_d$  と保有換算弾性水平震度  $K_e$  の比較により明らかにした。その結果、設計応答換算弾性水平震度  $K_d$  は「設計標準」の改訂に伴って大きくなってきており、古い年代に建設された高架橋では保有換算弾性水平震度  $K_e$  の十分でないものも見られることより耐震安全性に余裕がない構造物もあることが明らかとなった。

以上のような結果に基づいて、JR 東海道本線「住吉－灘間」および JR 山陽新幹線「新大阪－姫路間」のラーメン高架橋全体系における今回の阪神・淡路大震災での被災状況を分析することによって耐震安全性評価を試みた。すなわち、柱部材の耐力比をパラメータとする解析による損傷度・損傷形態の判定は、ほぼ実際に見られたそれと一致しており、せん断破壊に対して十分な余裕を持たせることで部材にじん性を持たせ構造物の全体崩壊を防ぐという新しい設計標準の考え方は、ラーメン高架橋全体系の耐震安全性確保という観点から妥当であることが明らかである。

以上のような高架橋を主とした構造全体系に対する耐震設計に関する総合的な調査研究の結

果が今後の合理的な耐震設計法の確立に参考となれば幸いである。

## 3. 建物などの建築構造物の全体系安全性評価法の検討

### 3.1 建物のモデル化に起因する問題

鉄筋コンクリート (RC) 建物の耐震性能評価においては、柱・梁・耐震壁・スラブなどの要素からなる複雑な構造体を数学的な解析を可能にすべく単純なモデルに置き換えることが不可欠である。その際にこれらの構成部材のモデル化の方法はわれわれ評価者や設計者に委ねられている。しかしモデル化に当たっての仮定やモデルの適用範囲あるいはモデル自体の妥当性などによって、得られる解は大きく変化すると考えてよい。そこで建築構造物の全体挙動検討 WG では、まず始めに建物のモデル化に起因する諸問題を抽出し、現状の把握と問題点の整理とを行なった。ここで指摘した事項は本 WG の委員相互での共通認識であるので、以下にやや詳しく述べる。

#### 1) 耐震壁の剛性の評価

耐震壁をモデル化するときには解析の目的に応じて、ブレース・有限要素パネル・間柱などに置換して表現する。単独の耐震壁の力学特性は多くの研究によって明らかになっており、これらの置換モデルによって精度よい評価が可能である。しかし連層耐震壁や開口耐震壁、さらには耐震壁が水平 2 方向から接続する立体耐震壁などについては更に検討が必要である。耐震壁の剛性については、設計で想定する変形レベルに応じてせん断剛性を低下させる方法が取られてきた。しかし建物の地震時挙動には耐震壁の初期段階の剛性が大きく影響するため、弾性解析においては初期剛性程度を用いるのが一般的になっている。

#### 2) 二次壁の取り扱い

袖壁、垂れ壁、腰壁などの二次壁が建物の耐震性能に多大な影響を与えることは過去の地震被害例が示す通りである。二次壁の力学性状は

不明であるためスリットを設けて構造的には明解な柱・梁骨組とする方法がある。他方で、二次壁による剛性・耐力の増大を期待する考え方もあり、二次壁の力学挙動の精確な評価と設計者の構造計画とが肝要である。これとは別に、二次壁は建築計画上は重要であり居住性にも影響を与えるため、その扱いは慎重に為されるべきである。

### 3) ねじれ振動の考慮方法

一般の建物ではねじれ振動の影響を静的に考慮して耐震設計するのが普通である。このときの問題点として、動的ねじれを考慮すべきこと、ねじれ振動を層ごとに扱っているが実際には上下層にもその影響が伝わること、部材剛性は変形によって刻々と変化するがこのことは偏心率の算定に際しては考慮されていない、などを指摘した。

### 4) 梁軸力とスラブの影響

建物の骨組解析を行なう場合、剛床を仮定するために梁には軸力を生じないと考える。しかし現実にはひびわれの発生によって伸びようとする梁を周辺架構が拘束するために、梁には軸力が導入され、梁曲げ耐力を上昇させ得る。さらにスラブも梁曲げ耐力増大に寄与するため、地震時には設計時に想定した建物崩壊形と異なる可能性がある。通常の解析では梁曲げ降伏先行となるが実際の地震時には柱せん断破壊で崩壊した建物について、梁軸力の影響を考慮することによって崩壊形の変化を追跡できた解析例もある。

### 5) 柱・梁接合部のモデル化

今までは柱・梁接合部の地震被害がほとんど見られなかったことから、柱・梁接合部を剛として扱ってきた。しかし RC 建物の終局強度型設計を採用するならば、柱・梁接合部のせん断ひびわれ発生は避けられない。そこで建物の応答評価においては、柱・梁接合部の復元力特性のモデル化が重要となる。また柱芯と梁芯とがずれて貫入する偏心接合部の設計には注意が必要であるとの研究成果を紹介した。

## 3.2 建物の耐震性能評価の手法

つぎに RC 建物の耐震性能評価の手法の一部を取り上げるために、個々の部材の性能から建物全体の性能を把握するという視点と建物全体として性能を評価するという視点との二つを用意した。前者については経年劣化が部材の性能に与える影響、部材の曲げ降伏後の変形性能、軸力変動が柱のせん断強度に与える影響、および柱・梁接合部の損傷と建物全体の耐震性能との関係を概説するとともに、確率的な見方を用いて部材の破壊モードの信頼性および部材レベルで限界状態設計された建物の有する安全性に言及した。後者については損傷評価の指標として応答変形量を用いた場合の性能評価手法、および望ましいとされる梁降伏型の全体崩壊機構の実現確率について論じた。

## 3.3 既存建物の耐震診断の精度

兵庫県南部地震（1995）以来、既存 RC 建物の耐震診断とそれに基づく耐震補強とが積極的に推進されるようになった。社会で広く行なわれ始めた耐震診断は建物の耐震性能評価の一手法であり、その特徴と問題点を指摘することは今後の耐震性能評価の手法を考えるに当たって多くの示唆を提供してくれるであろう。また現行の耐震診断基準<sup>1</sup>の妥当性を検討するためには、これに基づく耐震診断指標値を実際の地震被害によって Calibration することが必要となる。そこでここでは兵庫県南部地震によって被害を受けた RC 学校建物を用いてその検討を行なった。耐震診断基準ではねじれ振動が卓越する建物については例外規定を設けてその耐震性能を評価するが、その方法の妥当性について具体的な建物を用いた検討例を紹介した。

## 3.4 耐震補強設計

既存建物では耐震診断結果に基づいて耐震補強されるのが通常であるが、その際には個々の建物に適した合理的な耐震補強設計が為されるべきである。例えばどんな腰壁でもスリットを入れさえすればよい、ということは決してない。ここではじめに耐震補強設計法の現状を紹介

し、続いて様々な耐震補強工法が有する特徴と欠点とを抽出した。さらに最新技術を用いた耐震補強法としての免震および制振についてその特徴と問題点とを指摘し、あわせてそれらを用いた具体事例の紹介を行なった。

#### 4. 信頼性理論に基づく構造物の安全性評価法の検討

##### 4.1 信頼性理論の基礎

電力施設、橋梁、ダム、海洋・港湾構造物、一般建築物などの土木・建築構造物は、自然環境下で建設され供用されるため、耐用期間中に、過酷な自然力に見舞われている。これらの事象は、工学他分野のめざましい発達にもかかわらず、必ずしも全ての現象を明確にとらえきれていないのが現状である。そのため、現行の設計では安全率の概念の導入することにより、これらの不確実性要因を定性的に処理し、構造物の設計が行われている。

一方、不確実性要因を数量的に把握できるならば、構造物の安全性を定量的に評価できるという想定に基づいて、構造物の作用荷重、構造物自体の不確実性要因、設計および施工中に生じる不確実性要因分析が行われ、このばらつきを定量的に考慮した信頼性設計法が鋭意研究されてきている<sup>2),3)</sup>。

そのために、設計ではこのような要因が不利に働いても、構造物の機能を危うくなることがほとんど起きないように、通常の状態では、十分に余裕を考慮して設計されている。しかし、このような余裕を多く取りすぎると不経済な設計となる。従って、設計では経済性と安全性の相反する問題のトレード・オフとなる。

これらの不確実性要因には、大きく分けて2つに取り扱うことが、事象を明瞭にできることが言われている。前者は地震荷重や構造物を構成する材料強度分布のような本来統計的な性質を有する不確実性要因があり、後者は荷重および構造のモデル化の過程で生じる不確実性要因、構造モデルと実構造物とのギャップ、ある

いは設計計算過程で生じる人的誤差等の現在の知識ではいまだに究明しきれない不確実性要因がある<sup>3)</sup>。

前者は統計量として取り扱うことができる客観的不確実性、後者は統計的に取り扱うことのできない量であり、技術者の知識、経験等の程度によって変わる不確実性要因なので主観的不確実性と言える。客観的不確実性のみを対象に構造物の安全性を検討するときには、明確な信頼性理論を提供することができる。しかしながら、実際の構造物の不確実性要因は、統計的な不確実性に加えて主観的な不確実性要因を合理的に考慮しなければならない。

##### 4.2 安全率法と信頼性設計

各作業段階での不確実性をカバーして、より良い決定を下し、それを実行する努力は現在まで継続的に実施されてきている。昭和61年に制定された土木学会コンクリート標準示方書（以降、示方書と略称する。）でも上記の各段階での不確実性をカバーする方法として許容応力度設計法と並列して限界状態設計法が提示されている。しかしながら、現状の実設計で限界状態設計法が実用化されているとは言いがたく、現在徐々に取り入れられようとしている段階である。許容応力度法は、各段階での種々の不確実性を設計のシステムに含める代わりに、設計のシステムの不確実性を材料の強度をある係数で低減して安全性をカバーする方法である。この方法は伝統的な経験に裏打ちされた極めて優れた方法であり、社会的に重要な構造物を設計する立場にいる技術者には、なかなかこの伝統的な手法から新しい設計法に移行できないのもうなずける。しかし、安全率法は構造物の安全性を定量的に表現できないと言う欠点を持っており、次のように考えられている<sup>2),4)</sup>。

いま、抵抗力をX、荷重をYとすると、安全率Fsの表現は式(1)のような形で表される。

$$F_s = X/Y \quad (1)$$

安全率法にとって重要なことは、設計のシステムの出力をFsでカバーするとき、どの程度

表-1 手法の比較

| 設計法   | 設計係数            | 安全性評価         | 設計評価              |
|-------|-----------------|---------------|-------------------|
| 現行設計法 | 確定値             | 応力度           | 許容応力度             |
| レベルⅠ  | 部分安全係数値にばらつきを考慮 | 各部分安全係数       | 重要度係数 $\gamma_i$  |
| レベルⅡ  | 平均値、分散で評価       | 安全性指標 $\beta$ | 許容安全性指標 $\beta_a$ |
| レベルⅢ  | 確率分布で評価         | 破壊確率 $P_f$    | 期待費用最小基準          |

の  $F_s$  値であれば工学的にだいたい満足することができる結果が得られるかが知られていることである。例えば、コンクリートの強度に対し、3.0 の安全率を取り、鉄筋に 1.5 の安全率を取れば、その結果が経験的に安全であるということがわかればよいもので、その値の絶対値の意味はない。言い換えると、安全率は安全性を定量的に表す尺度ではなく、この値以上であれば経験的に安全であることを保障するものである。

近年、社会の進歩に伴い、種々の施設や構造物の複雑、かつ大型化するにつれて、今までの許容応力度設計法による設計の中に安全性が評価できなくなっているものもあり、安全性の定量的な評価が望まれるようになった。そのため、信頼度の概念を用いて設計が行われ始めている。許容応力度設計法は、構造物の安全性を表現できる手法ではあるが、例え、抽象的に表現できたとしても、工学的な判断であり定量的とは言いがたい。この点、信頼性設計法は、経済的な側面からもある程度客観性を持った答を提示することが出来る設計手法である。つまり、これまでの半経験的に決められていた設計に比べ、信頼性設計の結果は社会的に幅広いコンセンサスが得やすいという利点がある。

#### 4.3 信頼性設計法（確率論的手法）による安全性の定義<sup>9)</sup>

信頼性設計法では、確率論を用いて安全性を式(2)で示される信頼度  $P_s$  で定義している。

$$P_s = \text{Prob.}(R > S|T) \quad (2)$$

ここで、 $P_s$  : 信頼度、 $R$  : 構造物の耐荷力、 $S$  : 荷重作用、 $T$  : 構造物の使用期間、 $\text{Prob.}(\cdot)$  :

$\text{Prob.}(\cdot)$  : 条件付き確率である。

使用期間中に構造物が破壊する確率（破壊確率） $P_f$  は、式(3)のように表せる。

$$P_f = 1 - P_s = \text{Prob.}(S > R|T) \quad (3)$$

ここで、安全性  $M$  を  $R$  と  $S$  の差、式(4)で定義できる。

$$\begin{aligned} M = R - S > 0 & \text{ 安全} \\ < 0 & \text{ 破壊} \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)は性能関数と呼ばれ、一般には複数の確率変数を含む関数となっている。

構造物の破壊確率  $P_f$  は式(5)で表せ、 $M$  が 0.0 以下となる面積で与えられる。

$$P_f = \text{Prob.}(M < 0|T) = \int_{-\infty}^0 f_M(m) dm \quad (5)$$

以上のように、信頼性設計法で安全性を定義するためには、安全性を表現する性能関数(performance function)の定義が必要である。また、その関数は設計対象や内容等によって適宜選択されるものである。

具体的には、信頼性設計法は表-1に示す3つのレベルがある。信頼性手法の広義の定義は、レベルⅠ、Ⅱ、Ⅲの全てを網羅するが、狭義の定義ではレベルⅢを意味する<sup>9)</sup>。この3つの方法に概要を以降に説明する。

レベルⅢは、設計代替案の破壊確率を算定し、許容破壊確率を正しく求めようとするものである。従って、入力される確率変数の統計的性質、言い換えると、平均値、標準偏差、分布形状などが既知である必要がある。さらに、破壊モードに関係する不確定要因の統計的性質も既知である必要がある。一般に、性能関数と呼ばれる関数に、入力される確率変数の統計的性

質を利用して、直接破壊確率を求め、期待費用最小等の評価関数を用いて最適設計を行う。

レベルIIは、破壊モードに関する性能関数  $Z$  の平均値  $\mu$  と標準偏差  $\sigma$  より得られる安全性指標  $\beta = \mu / \sigma$  を求めることにより対象物の安全性を評価する。安全性指標  $\beta$  は、破壊確率  $P_f$  と密接な相関があり、 $\beta$  の最適な値を決めておき、その値になるように設計する方法である。この方法は、種々の確率変数の平均値と標準偏差がわかっているならば、計算ができるためにレベルIIIの計算より検討が比較的楽であるが、入力分布形状を考慮できないという欠点を持っている。

レベルIは、性能関数に含まれる種々の確率変数を用いて計算するのに対し、公称値として材料強度や荷重の特性値あるいは平均値を与えて、その値に対する部分安全係数を定め、破壊モードに対する信頼度を評価するものである。この方法は、構造物の構造要素を基本としており、かならずしも破壊モードの破壊確率を定量的に評価したものではない。

レベルIII、IIの方法は、破壊確率あるいは安全性指標を的確に決めれば、信頼性解析を設計での安全性照査に用いることができる。レベルIの方法は、安全性照査方法の一つではあるが、正確には信頼性解析法ではなく、レベルII、IIIを用いて、限界状態設計法あるいは荷重強度係数設計法に落とし込んだ手法であり、準確率的な方法である。

一般に、限界状態設計法と言われているもの

は、レベルIの設計法を言い、信頼性理論に基づきレベルII、IIIを用いて部分安全係数を合理的に正しく設定することができるならば、レベルIの設計法は有効である。

## 5. あとがき

以上の検討の他、コンクリート構造物全体系を考慮した場合、必要となる限界状態あるいは性能とは何か、その性能評価法はどうあるべきか などの問題についても検討した。また、RCラーメン高架橋を対象に同一設計条件に対し、各種設計法に基づき断面を試設計し、設計法の相違についても検討した。詳細については報告書を参照されたし。

### 参考文献：

- 1) 日本建築防災協会：改定版 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説、1990
- 2) 松尾稔：地盤工学-信頼性設計の理論と実際、技報堂出版、1985.
- 3) 構造物のライフタイムリスク、土木学会構造工学委員会、1988.12.
- 4) 構造システムの最適化-理論と応用-、土木学会、1988.9.
- 5) 鈴木誠：地盤物性値の空間分布特性の確率論的記述と地盤工学における信頼性設計の基礎的研究、名古屋工業大学学位論文、1990.4.
- 6) 星谷勝、石井清：構造物の信頼性設計法、鹿島出版会、1986