

鉄筋コンクリート構造物の損傷調査の方法について

大井 孝 和

Inspections and Non-destructive Tests to Evaluate Structural Safety Remaining Deteriorated Reinforced Concrete Structures

Takakazu Ooi

1. 序

現在、建築物の構造計算において常用され、建築基準法にも規定されている設計用安全率の考え方は、竣工直後の構造物の状態を対象とするものであって、長い年月のうちに次第に損傷を受け、耐力を減じていく構造物について、その時々に残存する安全余裕を示しうるものではない。

しかし、竣工後長い年月を経て、多くの損傷を受けた構造物の安全性は、それを使用する人達にとって、きわめて重要な関心事であり、そのような場合の構造安全性の保証または判定を、専門家に対して求める要望がしばしば発せられる。

鉄筋コンクリート構造物の損傷調査は、そのような要望に答えて何らかの判断を示そうとするときに、我々が持っている数少ない方法のひとつであって、これによっても、もし調査の結果に綿密な考察を加えるならば、過去において作用した荷重に対するその構造物の強さを、相対的な尺度でかなり詳しく知ることができるので、その推論の延長線上に立って、損傷を受けた建築物の構造安全性を論じることが可能であると考えられる。

筆者の所属する建築工学科では、昭和52年夏に、名古屋市にあるN球場より建物調査の依頼を受け、愛知工業大学受託研究取扱規定に従って作業を進めたのち、同年の秋にその報告書をまとめている。

本論文では、その報告書において筆者が分担した項目、すなわち、非破壊的な試験および外観による調査の結果から、調査建物の構造安全性を推論する部分において、判断を導くうえで基礎となり、調査報告書の背景をなしているいくつかの考察を取り上げてみたい。

2. 長い年月を経た建築物の構造安全性

まずはじめに、与えられた問題の輪郭を幾分でも明確にするのがよいであろう。

ここでは一応、地震や火災などはっきりした原因によって、大きな損傷を受けた直後の建築物に対する調査には触れないことにしよう。そのような調査の第一の目的は、その建築物に実際に作用した地震力の大きさや火熱の強さなどの究明であり、ここで取扱う損傷調査の目的とは多少異なっているからである。

損傷調査の対象となる建築物は、鉄筋コンクリート構造の場合、竣工後短くても30年、通常は50年以上を経過したもので、その期間を通じて、多種多様また大小さまざまな損傷を受けている。

鉄筋コンクリート構造体が損傷を受ければ、設計時に前もってその影響を考慮されたものでない限り、構造安全性に何らかの影響をもたらすことは間違いない。しかしながら、調査対象となる建物の多くは、調査の時点で多少の支障はあっても現実に使用されており、構造体の崩壊などという明らかな危険を指摘しなければならない例は稀れで、ほとんどの場合は適正な水準と比較したときのその構造物の安全余裕の低下が問題にされることになる。

建築物の構造安全性とは、その本来の意味を求めるならば、将来に向けて設定された任意のある期間中に、その建築物に作用するであろうあらゆる種類の荷重の大きさと、それに対してその構造物が保有しているであろう構造強度（耐力）というふたつの量を比較して定義されるものである。

しかし、これらふたつの量はいずれも多くの要素によって確率的に支配される変量成分を含んでしか表現できないものであり、また構造体の破壊の定義、内に居住する人間の安全についての定義の困難さなども加わって、その直接的な取扱いは決して容易ではない。

それ故、建築物が保有すべき構造安全性の適正な水準などというものは、そう簡単に定め得るものではないが、我国には以前から“関東大震災級の地震に対し、建築物

は終局的な崩壊に至らず、屋内にいる人々が安全な場所まで脱出できること”というひとつの標準があり、構造安全性の適正な水準を与えるものとして社会通念をなしている。

この標準をもとにして定められた我国の構造設計法の基本方針は、多少の変遷を経つつも、かつての市街地建築物法から現在の建築基準法へと受けつがれ、既に半世紀を経過した。その間に建設された建築物は、関東大震災級の大地震に遭遇したのもも遭遇しなかったものも含めて、各時代の利用者によってその安全性が評価されてきたのであるから、これは法規の規定そのものが、それぞれの時代によって検討され、支持されてきたのと同じであると考えることができる。

従って、法規に定められた安全率の規定、すなわち設計用荷重と材料の許容応力度の規定を遵守して設計された建築物が、現実の荷重に対して保有している安全余裕をもって、ひとまず構造安全性の適正な水準と考えることにしても不都合は生じない。

ところで、このような現行の安全率の考え方には、最初に指摘したように、鉄筋コンクリート構造物が竣工後の長い年月のうちに次第に損傷を受け、構造強度を減じていくことに対する考慮が含まれていない。

鉄筋コンクリート構造物に対し、保有すべき安全性の標準は主として地震荷重によって与えられるとしても、構造物に作用する荷重には実にさまざまなものがあり、鉄筋コンクリート構造物が受ける損傷のうちには、設計の際に充分考慮できなかつたような（広義の）荷重が原因となるものも多い。そのような多くの損傷はまた、当然地震荷重に対する構造物の強度を低下させるものである。

一方、構造物が損傷を受けて耐力の低下が明らかに認められ、100年に1回しか起らないとされているような地震に対しては構造安全性を保証できなくなったとしても、数年に1回あるいは10年に1回ほどの頻度で発生する地震に対しては耐えることができる場合が少なくないであろう。

そこで、鉄筋コンクリート構造物には実際上避けられないところのこの耐力低下を、果して我々は許容しうるのかどうか、また許容するならばその限界はどこまでなのかというのがひとつの問題点であることがわかる。

3. 損傷調査の方法

損傷調査によって建築物の構造安全性を判断する過程に存在するもうひとつの大きな問題点は、対象とする建築物の構造強度を直接に測定できないという、調査方法

自体に課せられた制約である。

もし構造物の強度をひとつの荷重形式について実測すれば、当然それによって構造物は破壊してしまい、調査の意味がなくなるわけであるから、調査方法は常に、非破壊的なもの、調査の前後で建物の状態をあまり変化させないものに限られる。

従って、損傷調査によって得られるのは、建築物の構造強度に関する間接的な情報であり、損傷調査の成否は、間接的な情報からどのようにして正確な推論を導くかという点にかかっているといてもよい。また、いくつかの調査方法を組合せて、収集できる情報の量を増し、推論の精度を高めることが是非とも必要となる。

次に、損傷調査のためのいろいろな方法を分類列举し、順次考察を加えよう。

(1) 資料調査

作業の内容は、設計図書、工事記録、被災経歴またはその地方で発生した地震と水害などの記録、補修記録、使用状態の変遷、建物使用上の障害や苦情などの情報収集である。

そのうちで設計図書が最も重要な資料であることはいうまでもなく、もし設計図と構造計算書が完全な形で残されていれば、かつての設計を現在の設計規準に照らして検討したり、リミットアナリシスの手法によって構造物の終局強度を推定するなど、調査内容を格段に詳しくすることができる。

しかしながら、調査依頼の段階では設計図書の所在を見失われていることが極めて多く、また竣工年代の古い建築物では、現在の水準と比較すればかなり不備な資料しか無かつたのが普通であるから、そのような場合には、新たに建築物を実測して図面を作成したり、竣工年月の記録から当時の設計思想や技術水準、法令の内容などを調べたりする。

被災経歴以下の各項は、実際に生じている損傷の原因を知り、損傷の重大さを評価するうえできわめて有用なものである。

補修記録とは、竣工以後に行なわれた補修の契約資料や工事記録などを指し、補修の種類と規模、位置と時期の分布などを調べるのであるが、鉄筋コンクリート構造体それ自身は補強や補修がなされにくいので、どちらかといえば補修は構造体の損傷を覆いかくす効果のほうが大きい。

補修についての記録が残されている場合でも、補修前の損傷の状態まで記録してある例はほとんど皆無であるから、実際には次項の外観調査において補修箇所を見抜き、補修以前の状態や補修の理由を推理することになる。

(2) 外観調査

第1表 外観調査における損傷の分類法

発生場所	構造部材の種類	損傷の形態
架構における部材の位置、その部材の端部か中央部か、および屋内側と屋外側の区分	柱、梁、柱梁接合部、耐力壁、非耐力壁（腰壁、袖壁、パラペット）、屋根、床（天井）、ひさし、階段。	きれつの場合； 方向により、鉛直、水平、斜め、ランダム、(あるいは部材軸の方向に対する角度、平行か直角かなど)。 コンクリート剝離の場合； 仕上げ層だけか、かぶりコンクリート層までか、方向性があるか、腐蝕した鉄筋が露出しているか。

第2表 損傷の等級区分の目安

等級	きれつ ¹⁾		剝離(I) ²⁾	剝離(II) ³⁾
	きれつ長さ	最大開口巾	剝落面積	剝落面積
1	1 m未満、かつ部材寸法を超えない。	1 mm未満	400cm ² 未満	100cm ² 未満
2	同上	1 mm以上 2 mm未満	400cm ² 以上 1,000cm ² 未満	100cm ² 以上 400cm ² 未満
3	1 m以上であるが、部材寸法を超えない。	2 mm以上 3 mm未満	1,000cm ² 以上	400cm ² 以上 1,000cm ² 未満
4	部材寸法を超えるもの	3 mm以上	なし ⁴⁾	1,000cm ² 以上

- 1) 仕上げ層がモルタルの場合を標準とする。長さと同開口巾のどちらか一方が制限を超えたとき次の等級へ進む。ひとつのきれつがいくつもの部材を貫通している場合およびきれつ間隔に意味があると考えられる場合は、それらを特記する。
- 2) 仕上げ層の剝落が主である場合。
- 3) かぶりコンクリートが剝落し、腐蝕した鉄筋が露出している場合。
- 4) コンクリートに圧壊の徴候がみられる場合は、剝落面積にかかわらず、特記する。

ここで述べる外観調査の方法は、これまでに筆者が行なった鉄筋コンクリート構造物の損傷調査において、次第にひとつの形式にまとまったものであって、それらの調査報告書の主要な部分をなしたものである。

外観調査、すなわち外観による鉄筋コンクリート部分の損傷調査とは、鉄筋コンクリート構造体の仕上げ層の表面に現われたさまざまな形態のきれつ、仕上げ層あるいはコンクリート表層の剝落、コンクリート被覆の剝落によって露出した鉄筋の腐蝕など、外観に現われた損傷の全数を記録するものである。

損傷の観測は主として肉眼によって行ない、縮尺 $\frac{1}{50}$ 程度の平面図および立面図上にスケッチする。損傷場所に近付けない場合は双眼鏡を使用し、またスケッチのかわりに写真に撮影しておくこともある。

同時に、損傷にはひとつづつ番号を付して、発生場所、損傷の分類、損傷の大きさ、特記事項などをノートに記録する。

損傷の発生場所および形状による分類の方法を第1表に、また損傷の大きさを等級分けするときに用いた基準を第2表に示す。

損傷を全数記録するといっても、仕上げ層の毛状きれつなどは記録しない。それでも肉眼で認められる損傷の数が、一棟の建物で千個を越すことは珍らしくない。

このように大変な作業を行なっても、外観による損傷の調査には常にいくらかの不確かさがつきまとう。不確かさをもたらす原因は、仕上げ層や造作などで構造部材が隠されて調査できない部分が必ず存在すること、それから仕上げ層にみられる損傷が構造体コンクリートの損傷をどの程度正直に表わしているか完全にはわからないことにある。このため、外観調査による損傷の記録には、統計的にサンプリングされたデータと似かよった取扱以上の注意が必要となる。

(3) 変形調査

変形の測定にはトランシットやレベルのような測量機械を使用することが多い。

測定の対象は主として建築物に生じた不同沈下や横倒れあるいは捩れ変形であるが、時には梁、床、ひさしなどの撓みを測定することもある。

変形調査の問題点は、竣工時の建築物の水平線と鉛直線を示す目印が残されていないことで、そのために測定の日印として、例えば柱型に付けられた何かの特徴、梁と柱の稜の交点、窓枠の端点などから適当なものを選ばねばならない。

そのような測定によって得られたデータは、ひと並びの柱列毎に、それぞれ高次曲線で近似し、有意な次数までとって沈下曲線と横倒れ曲線を求めるのが最もよい。その曲線に対するデータの誤差分散は、測定精度と最初の施工精度を知り、竣工以後の変形量を確認する目安となる。

変形調査の結果は、それ自体で構造物の損傷の程度を示すものであるが、また構造部材に生じた局所的な損傷

の原因について有力な示唆を与えることがある。その意味で前項の外観調査とこの変形調査とは互に補い合う効果が大きい。

(4) コンクリート強度の非破壊試験

コンクリート強度の非破壊的な試験方法としては、超音波音速法、シュミットハンマーテスト、切り出したコンクリートコアについて圧縮試験を行なう方法などがあるが、建築物の損傷調査に対してはシュミットハンマーテストが最も適していると考えられる。

シュミットハンマーテストは、その測定方法の特性上、結果にかなり大きなばらつきが混入するのを避けられないため、調査対象の建築物のあらゆる部位から、できるだけ多数のデータをサンプリングすることにより、測定結果の信頼性を高める必要がある。

構造体のコンクリート強度を測定する第一の目的は、いうまでもなく実測値が構造計算で仮定された強度以上

であることを検証することにある。その際、単に実測値の平均のみに注目することなく、実測値の分布を調べ、データがある限界値を下廻る割合についても考察することになる。

更にまた、このようなコンクリート強度推定値の分布が示すばらつきの大きさは、次のような理由により、鉄筋コンクリート構造物の損傷の程度を示すきわめて便利な指標とすることができる。

すなわち、損傷を受けず健全な状態にある構造物の場合、シュミットハンマーテストの測定結果は建物のどの部位についてもほぼ同様な値となり、データのばらつきは竣工当時の状態を保って比較的小きな値にとどまる。

これに対し、損傷を受け、劣化の進行した構造物についていえば、損傷・劣化はあらゆる部分で一様に進行するものではなく、比較的健全な状態で残っている部分と、外力の作用を激しく受けて損傷・劣化の進行した部分が生じている。

このような状態の構造物についてシュミットハンマーテストを行なった場合は、測定結果に大きなばらつきが見られるようになり、また測定データを適当なグループに分けてみると、各グループ毎の平均値やばらつきに大きな差が見られるようになる。

鉄筋コンクリート構造物の損傷・劣化の進行に対応するコンクリート強度推定値の分布のパターンを第1図に示そう。

シュミットハンマーテストで求めたコンクリート強度の推定値は、このような分布を調べることにより、構造物の損傷過程の進行程度を示すひとつの代用特性となしうるのである。

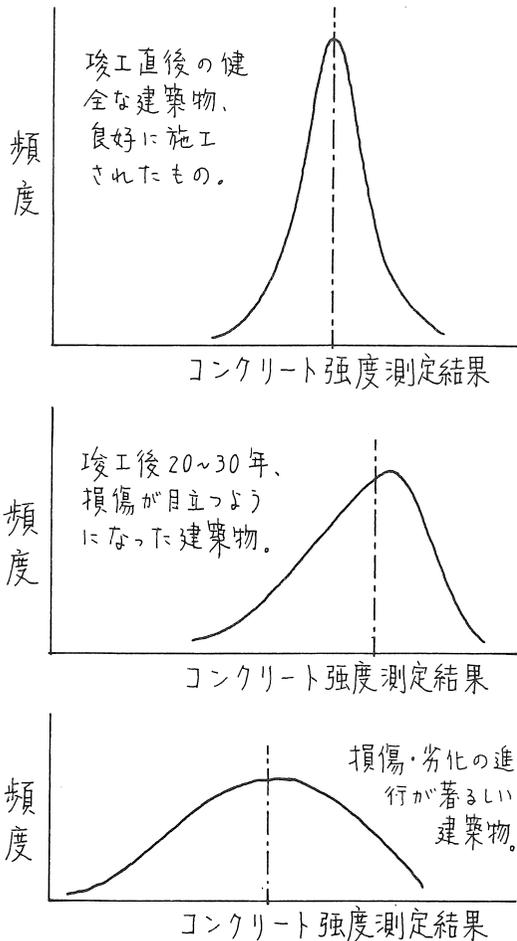
(5) コンクリートの中酸化試験

フェノールフタレーンのアルコール溶液を試薬とするコンクリートの中性化試験は、鉄筋の発錆に対する被覆コンクリートの保護能力を調べる目的で、損傷調査にはしばしば用いられる。実際、鉄筋コンクリート構造の法的な寿命（例えば税法上の償却年数）はコンクリートの中性化速度をもとにして定められたものである。

しかし、コンクリートの中性化それ自身と、コンクリート強度の低下あるいは建築物の構造強度の低下との間に直接的な相関が認められないので、ここではこれ以上の考察を行なわないことにする。

(6) 鉄筋に関する試験

非破壊的な調査方法を主とする場合には、コンクリートに被覆されている鉄筋は試験の対象となり難いが、腐蝕した鉄筋が露出していて、応急の補修が必要な場合に限り、補修の際に切り取った鉄筋について、その機械的性質や断面積の減少などを測定することができる。



第1図 損傷を受けた鉄筋コンクリート構造物におけるコンクリート強度分布の模形図

また、腐蝕した鉄筋の露出によって、主筋やせん断補強筋の配筋量、コンクリートのかぶり厚さなどが判明することは多い。

(7) 構造物の振動試験

構造物の常時微動測定による振動試験は、建築物の損傷調査に際しても、最近では盛んに併用されるようになった。

ここでも非破壊的な試験方法のひとつとして挙げたが、もともと常時微動測定による調査は、地盤と建築物の振動特性を調べ、その建築物が将来受けるかも知れない地震荷重の特性について予備的知識を得るのが主な目的であるから、上記のような他の調査方法とは多少性格を異にする。

それ故、その調査方法について、ここでは全く取り上げないことにしたい。

4. 損傷の評価と分類

前章に示したような調査方法によって得られる結果のうちには、

- ① 設計時の資料に対する、現在の設計規準および構造解析手法の適用等による再検討。
- ② 構造体に生じている変形の大きさ。
- ③ コンクリート強度の分布とその形態。
- ④ コンクリートの中性化深さ。

などのように、調査対象建築物の構造安全性を判断するに際し、それぞれ独自の判定基準を与えるものもあるが、それらの調査結果はまた、損傷の原因、あるいは損傷の原因となった荷重の形式と大きさについて多くの示唆を与えるものである。

そのため、これらの調査結果を総合してみると、外観調査による損傷の記録を主軸として、過去にその建築物が受けた荷重と、それによって生じた損傷の程度について、自然とひとつのイメージが形成されて行くことになる。

このイメージは調査技術者の判断の基礎をなすものであり、イメージ形成の過程こそが損傷調査の主要な作業であるといってもよい。また、調査結果から構造物の安全性低下を推定するための理論を構成する際には、常にこの点に焦点を当てなければならないであろう。

以下では筆者の方法におけるその考え方の筋道を示したい。

まず、調査建物に生じている損傷は、過去に受けた荷重歴に対して、その建物が示した応答の記録、また蓄積であるから、外観調査で記録された損傷が構造安全性に及ぼす影響の大きさは、その損傷を生じた原因、あるいは原因となった荷重について考察したのちに評価しなければならない。すなわち、単純な損傷規模の評価ではな

第3表 損傷の原因となる荷重形式

荷 重	発生する損傷	終局的な状態
① 地震荷重	柱、梁および柱梁接合部のナナメまたはX形きれつ、接合部に隣接する柱梁部分のタテ・ヨコきれつ、柱梁鉄筋定着部のタテ・ヨコまたはランダムきれつ、耐力壁・非耐力壁のナナメきれつ。	接合部直下の柱の破壊、接合部に近い柱梁コンクリートの局部的圧壊、耐力壁のナナメきれつが柱梁接合部を貫通（床版へ続く場合を含む）、柱・梁主筋定着部の大ききれつ、柱梁接合部の大ききれつ。
② 地盤変動	発生するきれつは①項とほぼ同じ。壁面に発生するナナメきれつの方がそろっている。また建物の振れ変形を伴うことが多いので、梁・壁のナナメきれつが天井・床版へ続いて、床版のナナメきれつを生ずることがある。	
③日射熱	最上階梁および柱のナナメきれつ。	ナナメきれつがその部材を貫通。
④火災	床版・梁のたわみ増大、柱の横倒れ、コンクリート強度の低下、補修された被覆コンクリートおよび仕上げ層の不具合。	他の項目の損傷を早め、助長する。
⑤雨水・凍害 化学的浸蝕	かぶりコンクリートまたは仕上げ層の剝落（特にひさし・柱）、主筋の方向に沿った大ききれつ、腐蝕した鉄筋の露出、コンクリート強度の低下（雨水が原因のときは上層ほど低下、凍害の場合は建物の北面・湿気の多い場所で低下が著しい）。	柱・梁主筋の断面減少、柱・梁せん断補強筋の切断、屋根・床版鉄筋の切断、柱・梁主筋定着部および柱梁接合部における主筋の露出。
⑥洪水・高潮	鉄筋の腐蝕、かぶりコンクリートの剝落、コンクリート強度の低下（1階以下）。	⑤項と同じ。
⑦コンクリートの乾燥収縮	壁・梁を貫通する鉛直方向のきれつ、屋根・床版を横断するきれつ。	⑤項の損傷を早め、助長する。

く、構造強度に対して重大な影響を与える損傷とそうでない損傷を弁別する必要があるわけである。

第3表は、損傷の原因を推論するための、荷重の種類とそれによって鉄筋コンクリート構造物の外観に現われる損傷の形態とを対応させたものである。このような対照表は一見現実の多様な建築物に対する適合性への証明を欠いているようであるが、鉄筋コンクリート構造部材に関する既応の膨大な実験研究によって支持され、実際の調査において便利で信頼できる指針を与えるものであった。

次に、それぞれの荷重形式による損傷が構造強度に与える影響を評価するためには、建物が損傷のない状態から、それぞれの荷重形式によって破壊に至るまでの、損傷発生と構造強度の変化の対応を知る必要がある。しかし、実在の建築物についてそのような全過程の観測をすることは不可能であるから、実際には、実験室で行なわれた鉄筋コンクリート構造部材の載荷試験結果などをもとにして、損傷の大きさを判断しなければならない。第3表に示した各損傷の終局状態とは、そのような目的のために設けた判別基準の一例である。

鉄筋コンクリート構造部材は、多くの載荷試験例で示されるように、ある限度以上の荷重を受けると、その次からの載荷に対して、次第に構造強度（耐力）が低下する。一方、その限度以下の荷重しか受けなかった場合には、荷重経歴が部材の終局的強度に及ぼす影響を実際上ほとんど無視してよい。

調査建物の構造部材が、その限度を越えるような荷重を受けたかどうかは、外観調査における損傷の観察により充分判断できるものと考えられる。

ところで、現在の許容応力度に基づく設計法では、鉄筋コンクリート構造の耐用期間中に、このような局部的破壊を生ずるはずがないのであるから、そのような損傷が見られる構造物については、構造安全性の低下を指摘しなければならない。

一方、通常の鉄筋コンクリート構造物は高次の不静定であるから、一個の部材において局部的な破壊が発生したとしても、それから建築物全体の終局的な破壊までの間には、まだかなりの安全余裕が存在する。

この安全余裕量は局部的な破壊個所が増すほど減少するものと考えられるから、建築物全体の破壊の危険性については、建築物の規模（部材総数、不静定次数など）に対する、そのような損傷個所の密度によって判断することになる。

5. 安全性判定法への理論的アプローチ

以上に述べたような構造安全性判定の方法は、数学的

には最適問題の一種であるところの判別関数法により、ほぼ定式化できると考えられる。

いま仮りに、構造安全性の低下量を具体的に評価する建築物について行なった損傷調査が数多くあって、それらの調査結果を測定値として利用できる状況にあるものとする。

構造安全性の低下量とは、先に述べたように、いくつかの荷重形式に対するその建築物の構造強度を、適正な水準と比較して定義されるものであるが、ここでは、関東大震災級の地震荷重に対して、その構造物が破壊するか否か（または危険か否か）の判断が示されるだけでもよい。

さて、損傷調査において観測された種々雑多な損傷は、ひとまず原因となった荷重形式毎に分類して評価しなければならない。

そのような損傷の分類が n 種類あるとして、各分類毎の損傷程度の評価を X_1, X_2, \dots, X_n で表わすことにしよう。

この $X_i, i=1, 2, \dots, n$ の値は、それぞれ特定の形態を持つ損傷の発生密度、それらの損傷の等級などにつき、その建築物が竣工以来経過した年数、あるいは作用した荷重経歴を勘案して評価する。

現在は第3表のような分類表をもとにして、経験的判断を援用しつつこの作業を行なっているが、将来は評価のための数式表示ができるかも知れない。いずれにしても、この段階の作業で重要なことは評価の基準を確立することであると思われる。

また、 X_i のうちには、コンクリート強度の分布や中性化深さあるいは変形調査の結果などから導かれた、建築物の損傷程度に対する独自の判定を加えてもよい。

ここで、これら n 個の変量 X_i によって、構造安全性の低下量を示す指標を作り、それを Z で表わす。すなわち、

$$Z = f(X_i), i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

関数 Z は判別関数と呼ばれ、線形であると仮定してよい場合は次式のようなになる。

$$Z = \sum_{i=1}^n a_i X_i \quad (2)$$

ここに、 a_i は損傷の荷重形式による分類に応じてかけられる重みの係数である。

既知の損傷調査結果をデータとして用いることにより、このような線形回帰モデルの重みの係数 a_i は、指標 X_i が構造安全性の低下に及ぼす影響を、最も効果的に判別するように決定できる。

次に、既知の損傷調査がなされた個々の建築物について、判別関数 Z の値を計算してみる。関数 Z の実現値を

z で表わすことにしよう。

安全とされた建築物群(A)とそうでない建築物群(B)についてそれぞれ実現する z をみると、互いに異なるふたつの分布を示すであろう。ふたつの分布から、それぞれの母集団に対して、確率密度関数 $P_A(z)$ および $P_B(z)$ を想定できるものとする。

さてここで、判別関数の実現値 z がとりうる範囲 R を、ある境界 D によって互いに重複しない領域 R_A と R_B に分割し、新たに損傷調査を行なった場合は、その観測値 z^* がいずれの領域に帰属するかによって、その建築物の安全性を判断することにする。

そうすると、建築物が危険(B)であるのに誤って安全(A)と判断される確率 $P(A|B)$ および安全であるのに誤って危険と判断される確率 $P(B|A)$ はそれぞれ次式のように表わされる。

$$P(A|B) = \int_{R_A} P_B(z) dz \quad (3)$$

$$P(B|A) = \int_{R_B} P_A(z) dz \quad (4)$$

工学的な意味からいえば、領域 R_A と R_B の境界 D は、これらふたつの確率が等しくなる点としてもよいのであろうが、一般には判断が誤りであった場合の損失額の期待値を比較して決定される。

それぞれの判断が誤りであったときの損失額を $C(A|B)$, $C(B|A)$ で表わすことにしよう。そうすると、ある境界 D が設定された場合、その設定に対する期待損失額の総計 S を次のように定義することができる。

$$S = C(A|B) \int_{R_A} P_B(z) dz + C(B|A) \int_{R_B} P_A(z) dz \quad (5)$$

以上のように、ここで述べた損傷調査による構造安全性判定の方法は、判別関数法によって、上式の期待損失額の総計 S を最小にするような境界 D を設定する問題に帰着されることがわかる。

もし安全性の判定を、建築物の撤去か継続使用かの判断と同等とみなしてよいならば、損失額の意味付けが多少具体的になって、例えば $C(A|B)$ は (建築物が破壊したときの全損失額) \times (継続使用期間中の破壊の確率) が主要なものとなるであろう。

6. 結び

ここに述べた鉄筋コンクリート構造物の損傷調査の方法は、外観調査、変形調査、コンクリート強度の非破壊試験など、幾種類もの試験・調査を組合せて構成され、構造体に生じた損傷の種類、形態、特徴、損傷程度などを分析することにより、まず、損傷の原因となった荷重の種類と大きさを調べ、次に、損傷はその荷重経歴に対する構造物の応答であるという観点から、構造物の強さ

を、過去の荷重経歴に対する相対的な尺度でとらえ、そこから、構造物が保有すべき適正な水準と比較したときの、安全余裕の減少量を推論するものである。

観測された損傷が構造強度に及ぼす影響を評価し、構造安全性を数量的に表現して取扱うためには、判別関数法によるアプローチが比較的容易かつ有効であると考えられるが、このような試みには先例がなく、その目的に利用しうる調査資料がきわめて乏しいために、数値解析の作業を実施するには至らない。

従って、現在の段階では、損傷調査の結論は経験と比較の手法に頼った定性的表現に傾かざるを得ないが、与えられた問題は建築物の構造安全性に関する基本的概念と直面するものであり、調査のたび毎に構造安全性の意味について考える機会が与えられ、その調査対象によってひとつの具体例が示されるのであるから、このような損傷調査の意義はきわめて深いものであるといわねばならない。

参考文献

- (1) 愛知工業大学建築工学科「N球場建物調査報告書」1977. 11, (非公開)
- (2) 筆者の方法による調査の主なものは、大阪府教育委員会宛日本建築総合試験所調査報告書「大阪府立高等学校校舎耐力度調査・昭和44, 45, 46, 47, 48年度」(非公開),
- (3) 坂静雄, 大井孝和: 外観による鉄筋コンクリート構造物の損傷度調査について, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 1972. 6,
- (4) 日本セメント技術協会コンクリートパンフレット第41号: 鉄筋コンクリート建築の耐力診断,
- (5) 日本建築学会設計計画パンフレット9: 建物の耐久設計・2,
- (6) ACI Committee 201: Guide for Making a Condition Survey of Concrete in Service, J. of the ACI, 1968. 11,
- (7) 建設省営繕局: 国有建築物等特別実態調査実施要綱, 1960,
- (8) 建設大臣官房官庁営繕部: 官庁建物実態調査実施要領, 1971,
- (9) 日本建築学会建築経済委員会: 建物の維持保全に関する研究報告, 1954,
- (10) 伊藤孝一: 多変量解析の理論, 培風館, 新統計シリーズ5, 塩谷実, 浅野長一郎共著: 多変量解析論, 共立出版, 情報科学講座A・5・3, など,
- (11) 日本規格協会信頼性数理分科会編: 安全性工学入門, 日本規格協会,