

構造物の耐震設計

亀田 弘 行*

1. はじめに

先人の努力によって世界をリードしつつ発展してきたわが国の耐震工学の成果は、構造物の設計法にも十分に生かされてきた。とくにこの十数年間におけるこの分野の発達はずざましく、強震記録の集積、電子計算機の普及、各種の大型・精密な実験・計測法の開発と理論面の深化が相乗効果を生んで、かつて地震国では不可能とされていた長大・超高構造物が続々と出現しつつあるのが現状といえよう。

しかし一方では、われわれの知識は、地震時の構造物や地盤の挙動をすべて説明するにはまだまだとぼしく、大地震のたびに、それまでの経験と技術を裏切るような被害を受けているのである。1964年の新潟地震における砂地盤の大規模な液状化、1968年十勝沖地震における低・中層鉄筋コンクリート建物の破壊などはその例であり、それらがさらに耐震工学の発達を促してきた歴史をみると、耐震設計を示方書レベルの処理に終わらせず、常に力学的・物理的現象を追求する細心、緻密な洞察力の重要性が痛感される。

複雑で多くの側面を持つ耐震工学と耐震設計法について、限られた紙数で総合的な検討を行なうことは筆者の能力の及ぶところではないが、本文では、日ごろ取扱っている地震応答解析の分野を中心として、耐震設計の新しい傾向と今後の見通しについて考えることとしたい。

2. 動的耐震設計

1950年代の後半、構造物の地震応答解析が盛んに行なわれるようになった。はじめは単純な1自由度系の応答に限られていたが、しだいに複雑な構造物が対象とされるようになり、現在では非線形領域での応答解析も一般化している。これまでに蓄積された応答解析結果は質量ともに膨大なものであり、もっぱら静的震度法にのみ頼っていた時代に比較すると、構造物の地震時の挙動はきわめて明確に把握されるようになった。最近、応答解析用の汎用プログラムが各方面で開発されたことも助

けとなって、長大土木構造物や超高層建築などの設計に際しては、地震応答解析により、動的効果の照査を行なうことが多くなっている。

このような経過を経て、地震時における構造物の動的挙動を設計計算の過程に取り入れようとする、動的耐震設計の構想が日程に上がってきた。その基本理念はすでに関東地震後に芽ばえており、基礎研究ではいくつかの先駆的な試みがあったが、それが現実の設計法として登場するためには、上記のような技術の発達とデータの集積が必要であったといえる。

かくして動的耐震設計法は、今後の耐震設計が進むべき方向の一つの典型と考えられるが、これで耐震設計の問題が片づいたのでは決してなく、むしろ、設計理念が高度化し、研究手段が精密になるとともに、それまで見過ごされていた問題点が次々と認識されるようになって、難問山積というのが現状である。以下、それらのいくつかについて、最近の成果と問題点を概観することとしよう。

3. 耐震設計の諸要素

(1) 地震および地震動

地震動の波形がきわめて不規則で再現性のないものであること、その強度や周期特性が地盤条件によって複雑に変化すること、地震の発生そのものが現段階では非予測性のものであることなど、外力としての地震動の不規則性は、耐震設計上の困難な問題の一つである。強震記録が少なかった時代には、1940年のEl Centro加速度記録などが、応答解析のための標準的な地震動として用いられることが多く、その傾向は現在もなお続いているようであるが、それらは、あくまで特定の強震記録であり、耐震設計の対象となる種々の地震・地盤・構造物に関して普遍性を持つものではない。わが国ではSMAC強震観測網の整備とともに強震記録が集積されつつあったが、1968年十勝沖地震では、本格的な強震記録を広い地域で同時に収録することに成功し、それらの結果を基礎として、地盤種別による強震地動の分類も、しだいに可能になりつつある。

一方、地震動波形の不規則さに注目し、振幅および周

* 正会員 京都大学助教授 工学部交通土木工学教室

期特性に地震規模や地盤条件を反映した確率過程によって地震動を模擬する試みが盛んである¹⁾。現在は研究段階のものが多いが、強震記録が豊富になり、その確率統計的性質の決定を明確に行なうようになれば、地震動の不規則性をも考慮して建造物の応答を推定しうること、強震記録の欠如している地域での将来の地震動を推定しうる可能性を持つことなどから、今後の研究によって、この方法は、設計面でも有用な手法になるものと期待される。

地震発生の予測は現状では困難な課題であり、今後の地震学の発達にまつ面が多いが、この10年余の固体地球科学における、いわゆる new global tectonics の劇的な展開^{2),3)}が、地震の発生機構の解明を一つの柱としてなし遂げられつつあることから、耐震工学を学ぶわれわれも、この方面の今後の成果には十分注目する必要がある。

(2) 構造系の動特性とモデル表示

地震応答解析を行なうためには、地盤を含めた構造物系をある理想化された力学モデルとして表現することが必要であるが、この作業をいかに行なうかは、その後の解析結果を左右する重要な問題である。特定の振動形のみが問題とされる場合には単純な1自由度系で十分な場合もあり、複雑な建造物の詳細な設計のためには、十分な自由度の振動系とする必要が生ずる。要は、建造物の持つ多種多様な力学特性の中から、耐震的に重要な要素を選択して、妥当なモデルを組み立てることが肝要である。

構造物のモデル化と関連して、最近の著しい傾向の一つに、構造物と基礎地盤の相互作用の研究の発達があげられる。これは、主として構造物と地盤の間の剛性の差や、地表面などの不連続面の存在によって生ずる種々の波動現象に注目するもので、地震時の挙動としては、波動エネルギーの逸散による構造物の振動減衰、表層地盤が構造物の固有周期に与える影響、表層の共振による構造物の応答の増加などが明らかにされつつある。これらの現象を抽出し、その定性的傾向を論ずるために、地盤を連続弾性体で表わし、波動理論を応用する方法が多く用いられる^{4),5)}。従来は周波数応答のみを求めたものが多かったが、最近ではさらに一歩進めて、単位衝撃応答を求め、非正常地震応答解析への応用をめざす研究も行なわれている⁶⁾。一方、波動論から解の求められる例が比較的単純な境界の弾性問題に限られる、という制約を避ける意味から有限要素法で地盤をモデル化し、構造物と地盤の連成系の動的解析を行なう試みが、この数年盛んになりつつある。有限要素モデルは、任意の境界条件を設定しうること、弾塑性問題も比較的容易に取扱えるこ

となど多くの利点を持つが、適用範囲が有限な空間に限られることが、地盤のモデルとしては、問題点の一つであろう。これらの方法から得られる成果は、今後の研究の進展のなかで、設計面に反映されるべきことはもちろん、現段階においても、構造物基礎の耐震性について、設計者の判断を助ける多くの示唆に富む結果を与えている。

(3) 応答解析結果の評価

構造物系の力学モデルと外力地震動が求められれば、原理的には、その地震応答を任意の形で求めうる。しかし、その解析結果をいかに整理し、評価するかは、明確な設計理念に基づいて判断すべき問題である。研究段階のものも含めると、その傾向は次のように大別できよう。

a) 応答計算から得られる変形量、断面力分布などを直接設計の資料として用いる方法：重要構造物の設計プロセスに採用されることが多く、地震応答解析の最も直接的な応用である。ただし、この場合にも、外力地震動の選択が問題であり、現状では特定の強震記録が用いられることが多いが、前記 3. (1) の意味で、この点の合理的な解決が今後の課題の一つであろう。

b) 多くの強震記録による応答解析結果を平均化することにより、特定の記録のみに頼ることを避けようとする方法：代表的な例が平均応答スペクトルで、わが国でも強震記録の集積とともに建設省土木研究所などで作成され、さらに最近では地盤種別による分類も試みられている⁷⁾。

c) 耐震設計が将来の地震時における構造物の安全性を問題とする以上、設定すべき地震動と構造物の応答に、不確定要素が入ることは避けられない。この問題の解明には、不規則振動論の応用が有効と考えられる。耐震設計上は、平均応答スペクトルのような応答の平均値のみでなく、そのばらつきが安全率との関連で重要であり、この分野の研究は、最大応答の確率分布⁸⁾ やランダム疲労破壊⁹⁾ などから、構造物の安全の確率(リライアビリティ)の算定をめざしつつある。

(4) 構造物の破壊基準

地震時における構造物の破壊のメカニズムは、構造様式によって異なり、またいかなる現象を破壊とみなすかという、設計上の基準によっても異なる。その一部を列挙すると、降伏破壊、塑性ヒンジ形成による崩壊、構造部材の曲げ破壊とせん断破壊、低サイクル疲労破壊、大変形による機能の障害、構造要素の配置の不均衡による破壊、地盤の支持力不足による破壊、基礎地盤の液状化とそれに伴う構造物の沈下・傾斜など、その内容は多種

多様である。これに対し、耐震設計法の主流は許容応力法が占めてきたが、1968年十勝沖地震における被害は、構造部材の変形能力の重要性、特定の部材に負担が集中しないよう慎重な部材配置の必要性などを教えている。こうした経験は、従来からも提唱されてきたように、構造物の破壊を多角的にとらえ、許容応力（耐荷力）以外に、許容じん性率（変形能力）・許容変位（構造部材の配置上の制約）などを耐震設計に導入する必要性を確認させるものと考えられるが、現実の設計に取入れるためには、具体的な構造材料・部材・構造系については、今後も多くの実験と破壊理論の展開が必要であろう。応答解析を骨子とした動的耐震設計への歩みも、この破壊基準の問題の解決なくしては完成し得ないといってよく、この分野での研究成果は、今後の耐震設計法の進歩の一つの重要な鍵を持つものといえよう。

4. 耐震設計の今後の方向

以上、動的耐震設計法の確立を目標とし、そのために解決すべき問題点と耐震工学の現状を、地震応答解析を中心に概観してきた。今後の耐震設計法の発達の道程は単純ではなく、得られた研究成果を逐次取り入れながら試行錯誤のすえに、しだいに完成の域に近づくであろうが、その姿は従来の画一的な震度法ではなく、厳密な応答解析を行なう重要構造物の設計と、静的震度法を適用しうる剛構造物の設計を両極とし、両者の間を埋める多

彩な手法を駆使するような、柔軟性に富む体系になるものと考えられる。事実、何でも応答解析という傾向のあった数年前と比較して、最近では、むしろ震度法を中心とし、採用すべき震度の大きさや分布に動的な影響を加味することによって、合理的で汎用性のある設計法を確立しようとする気運にあるようである。一見逆コースに見えるこの傾向も、前述のような多くの動的解析結果の蓄積に支えられているのであり、古典的震度法とは本質的に異なるものである。

参考文献

- 1) Jennings, P.C., G.W. Housner and N.C. Tsai : Simulated Earthquake Motions for Design Purposes, Proc. 4 WCEE, Vol. 1, A-1, pp. 145-160
- 2) 上田誠也・杉村 新：弧状列島，岩波書店，昭和45年4月。
- 3) 世界の変動帯，科学，41巻4号～42巻6号に連載，岩波書店，昭和46年4月～47年6月。
- 4) 田治見宏：深い基礎を有する構造物の地震応答について，日本地震工学シンポジウム（1966）講演集，pp. 255-260。
- 5) 土岐憲三：不均質地盤中にある構造物の地震応答，第3回日本地震工学シンポジウム（1970）講演集，pp. 73-80。
- 6) 後藤尚男・土岐憲三・秋吉 卓：不規則外力を受ける基礎構造物の非定常応答，京都大学防災研究所年報，13号B，昭和45年3月，pp. 579-592。
- 7) 栗林栄一・岩崎敏男・辻 勝成：地震応答スペクトルに及ぼす諸因子，第11回地震工学研究発表会講演概要，土木学会，昭和46年7月，pp. 71-74。
- 8) 亀田弘行：不規則地震動に対する構造物の最大応答の推定法について，土木学会論文報告集，201号，昭和47年5月，pp. 1-12。
- 9) 南井良一郎：建築構造物の耐震安全性について，京都大学防災研究所年報，13号A，昭和45年3月，pp. 5-22

土木技術者のための法律講座 ●土木学会誌編集委員会編●

定価 1000円 会員特価 900円（〒80円） B5・116 ページ上製 8ポ二段組

土木学会誌の第56巻1号より11号までを合本したもので、昭和46年度夏期講習会テキストに使用。土木技術者として必要な法律知識を平易に解説した書。

内容目次 1. 総論（建設省・佐藤和男） 2. 財政・会計制度（建設省・森口幸雄） 3. 建設業法・標準契約約款（建設省・西川龍三） 4. 公害対策基本法・騒音規制法・水質汚濁防止法・大気汚染防止法（建設省・西川龍三／経企庁・牛島一） 5. 労働基準法および関係法令（労働者・加来利一） 6. 市街地土木工事公衆災害防止対策要綱および火薬類取締法（建設省・西川龍三／通産省・都丸泰顕） 7. 道路交通関係法令（建設省・横沢伯達） 8. 河川・砂防・海岸・公有水面行政法規（建設省・岩本章雄） 9. 港湾関係法令（運輸省・浜崎哲史） 10. 都市計画法・水道法・下水道法（建設省・並木昭夫／厚生省・島崎敏昭／建設省・安藤茂） 11. 建築基準法・宅地造成等規制法（建設省・浪岡洋一／藤条邦裕／木村誠之）

申込先——〒160・東京都新宿区四谷1丁目 社団法人 土木学会刊行物係 振替東京 16828