

構造物と不確定性

Uncertainty of Structural Systems

やま だ よし かず
山 田 善 一*

1. はじめに

不確実性やあいまいさ、地盤との関係などについて論説を書くようにとの依頼を受けたとき、この方面の専門的研究を特に行って来たともいえない筆者にとって、期待に沿うものが書けるかどうかとまどったが、この際普段考えていることを述べ、ご批判をいただく絶好の機会であると思ひあえて筆をとることとした。筆者は、土木の分野の中で構造工学、構造動力学、耐震工学などに主として携わっており、また1957年イリノイ大学で行ったILLIACを使った仕事以来、電子計算機とのかかわりも比較的深く、有限要素法を使った解析や、最適設計法など計算機を中心とした研究も行ってきたが、不確定性や、確率論、また最近さかんに研究が行われているファジィ集合論による研究は、筆者の仕事との関係においてふれて来たにすぎない。したがって本文中に誤りや、学界の定説とあわないところが含まれているものと考えており、ご叱正、ご批判いただければ幸いである。

以下各節の標題のもとで述べるが、なるべく各節は独立したものとしたいので、それぞれの節だけをよんでいただいても差支えないようにつとめた。

なおここで構造物としては土を含めて広い意味で考えている。

2. 各種構造物の設計

建築物、橋梁、ダム、海洋構造物、船舶、航空機、原子力施設など多くの種類の構造物がある。これらの構造物の設計、製作、建設、運営、管理には、それぞれ特質があり、またこれらの構造物の安全性を支配する要因も多種、多様である。これらの要因の定量的評論には、工学的立場から、あらかじめ予測可能なものもあるが、多くのものは何らかの不確定な要素があり、不確定性の種類にも多くのものが含まれている。構造物の特質と、それに伴う不確定性に応じて、それぞれの構造物には独特の設計思想と方法がある¹⁾。

土木構造物以外の構造物として航空機の場合を見ると、民間機の場合でも十分なペイロードのもとで必要な性能をあげなければならない。このため設計には他の構造物にな

いきびしい条件が課せられる。安全性についても、限界に近い状態に対する設計が要求される。実機に対する破壊試験や疲労試験が最も貴重な保証であり、また2回にわたる世界大戦での何十万機という軍用機での実績や、テストパイロットが命を賭して行った試験飛行での成果が現在の航空機発達の基礎となっている。このような意味では最も経験を重視して設計されている構造物の一つといえよう。有限要素法をはじめとする最近の解析法の進歩は、実績の上に保証をさらに高めている。航空機の寿命は、20年程度といわれ、経済性を重視した最近の機種は、経験と解析方法の進歩により安全性は向上したものの、寿命はむしろ短くなっているといわれる。1970年から就航しているB747も離着陸回数の多い機体は、交代されている。航空機はその寿命の間に各種の不確定の外的条件、荷重をうける。晴天乱流や、ダウンバーストのようにまだ十分解明されていない外的条件も少なくない。

土木構造物の特徴は、主として地上、地中に建設され地盤との関係が極めて深いこと、極端に長い寿命が求められ、その間に発生する不確定な条件も多いことなどがあげられよう。土木構造物は、構造本体（上部構造）と基礎（下部構造）などを含めて全体として一つの構造物を構成するので、これを分けて考えることは好ましいことではないが、便宜上上部構造、下部構造に分けて見てみたい。

上部構造は、構造物自身のもつ不確定性は下部構造より一般的に少ない。構造力学、構造動力学などによる構造解析の精度も、土木構造物に比べて高いと考えられている。しかし、複雑な構造部分に対する解析は、有限要素法が実用化されるまでは十分行われてはいなかった。上部構造に対する設計規準の多くは新しい解析法を考えていないので、新しい解析法を使って精度の高い解析を行っても、従来の規準をそのまま適用したのでは、従来の設計より不経済なものとなるという矛盾も指摘されている。これらの点を改善することにより、新しい解析法が上部構造物の設計上の精度の向上をはかることになる。

下部構造の設計は、上部構造に比べ不明な点が多く、経験によるところが多い。Terzaghi (テルツァーギ) と Peck (ペック) はその本の中で²⁾、

"In foundation and earthwork engineering, more than in any other field in civil engineering, success depends

*京都大学教授 工学部

論 説

on practical experience. The design of ordinary soil-supported or soil-supporting structures is necessarily based on simple empirical rules, but these rules can only be used by the engineer who has a background of experience."

と述べている。経験が重要な要素となっている点は、さきに述べた航空機の場合と似た一面がある。土質試験法の進歩、地盤改良技術の開発、基礎構造の改良、開発とその設計法の検討、有限要素法などの新しい解析法の適用などにより、構造物自身のもつ不確実性の軽減や、解析方法の精度の向上により、より精度の高い設計法が可能となりつつあるが、まだ十分とはいえないのが現状であろう。土構造はまたその施工の段階から種々の不確実性に遭遇する。NATM³⁾などの新しい工法の採用や、Fuzzy 理論の適用⁴⁾がこの方面の解決に役立っている。

情報化社会を迎え、インテリジェントビルなどを中心として土木構造物の質に対する要求も高度なものになっている。また超高層構造物、超長大構造物、超深度地中構造物、超深度水中構造物など、今後開発される構造物には、従来と異なった不確実性が常に伴ってくる。不明による不確定性には、技術の発展により解決をはかるとともに、残った不確定性の処理方法にも新しい解決法を創造する必要がある。

3. 土木構造物の安全性に与える要因と不確実性

土木構造物の一生は以下に示す各種の不確定要因に支配されるが、さらになんか長期間の耐久性が要求される。不確定要因をとり入れた安全性の評価に関しては、多くの研究が行われて来た(例えば、5), 6))。

構造物の安全性に与える要因としては大きく分けて、(1) 外的条件、環境条件、(2) 構造物のもつ特性、(3) 解析法に分けることができよう。それぞれについて簡単に考察してみよう。

(1) 外的条件、環境条件としては、具体的に構造物に作用する荷重や、耐用期間中に構造物に外から加えられる種々の環境条件がある。中にはほとんど確定的に明確なものもあるが、不確定性の非常に高いものが多い。すでになんかの統計データがあり、現状では確率論的取扱いが可能なものもあるが、将来交通事情などの社会情勢の変化に伴い、変更を求められることもある。1986年メキシコ地震の例に見られるように、予期しないような外的条件が突然やってくる場合もある(5. 参照)。土構造物にあつては、施工時の外的条件や、環境条件にも不確定性の高いものが多い。確率論的に扱うことが困難であるか、または不可能な不確定性については、新しい解析手法が種々試みられている(4. 参照)。

(2) 構造物のもつ特性の不確定性については、鋼構造やコンクリート構造では、新しい解析手法と電子計算機の応

用などにより不確定な部分は次第に少なくなり、材料強度のばらつきや、溶接部分や異種材料の接合部分におこるような種々の欠陥がその主なものとなりつつある。土構造物は、上部構に比べ自然材料を対象としており、物性のばらつき、静的・動的強度、液状化の発生など不確定な点が多く、この点の解決のために多くの研究が行われている。個々の問題についての詳細はここでは触れないが、新しい試験法の開発、新しい解析法の応用、確率論やファジィ理論など不確定性に対する新しい理論などがその主なものである。土木構造物はまた、上部構造と下部構造が一体となって構造物を形成するので、上下部構造間の相互作用も重要な課題であり、不確定性が多く含まれている問題の一つである⁷⁾。1964年新潟地震で注目をあびた液状化現象などは、外的条件と構造物の条件とが関連して発生した現象であるが、新潟地震以前では発生するとはほとんど考えられていなかった不確定な現象といえよう。

(3) 解析法に伴う不確定性は、構造物のモデル化をはじめとして、理論的解析手法、模型実験の精度など、各種のものが含まれる。電子計算機の発達と、有限要素法を始めとする解析手法の発展、新しい実験解析法の開発などに伴い、解析法に伴う不確定性は次第に解決されつつある。しかし、構造物の実際の設計に当たっては、その設計法が、どのような解析手法のもとで行われるべきものであるかについて、技術者は十分な理解を持っていなければならない。この理解が不十分であると、前にも述べたように、解析手法の発展が、かえって不経済な構造物を生むことにもなりかねないのである。

4. 不確定性の種類と取扱い

不確定な現象は、いくつかの種類に分類できるであろう。従来不確定な現象を取り扱う手法として確率論的手法が用いられ、参考書も多く出版されている(例えば8), 9))。確率論は、しかしながら事象の不規則性(randomness)を取り扱う理論であり、多くのデータがあることがベースとなっている。不確定性の中には、確率論的ではない不明確な事象も多くあり、これらは不明りょう性・あいまい性(vagueness, fuzziness)などといわれている^{10), 11)}。しかしながら個々の事象が非確率的であっても、長期間にその事象のデータが積み重ねられることにより、確率的な取扱いが可能となる。例えば航空機事故のそれぞれは、パイロットミスなどを含めてランダムとはいえないとしても、長期間のデータから航空機事故の発生率は、マイル当たり、あるいは時間当たり幾らといった形で記述することが可能である。

あいまい性を取り扱う手法として、Zedeh(ゼデー)により考案されたファジィ集合による方法があり^{12), 13)}、液状化の発生の予測¹⁴⁾、各種の評価法^{15), 16)}、施工の制御⁴⁾、地下鉄の自動運転¹⁷⁾、構造物の安全性評価と設計¹¹⁾、構造

物の最適設計¹⁸⁾など各種の方面に応用されている。我が国でもすでに Fuzzy System Symposium として4回のシンポジウムが行われた¹⁹⁾。ファジィ理論の詳細については、参考書などにゆずる^{12), 13), 20)}。

不確実性に対し、不規則性・あいまい性、確率的・非確率的、確率論・ファジィ理論など、それぞれ対応した用語が用いられるが、これらの区別については不明確な点が多く、どちらに入れるべきかという点もはっきりしない場合もある。また確率論とファジィ理論とは、確率論は境界の明確な集合に対する理論であり、ファジィ理論は、かなり主観的要素（人間的要素、人間が判断に使っている規準）を含み、境界にあいまいさを残したファジィ集合に対する理論である。この問題にはこの理論を適用すべきであるということは現段階では必ずしもいえないが、従来の確率論だけで不確定な現象のすべてを取り扱うことにはかなり無理な点がある。

不規則な現象、あいまいな現象などとは別に、我々が、あるいは個人にとって全く予期しない現象が起こることがある。大地震は地震のたびごとに新しい被害現象を教えてくれるといわれているし（次節参照）、構造物の事故は落とし穴に落ちたような形で発生することが多い。意識的に行われたのではない人為的ミスや、場合によってはうっかりミスなどもこの中に入るかも知れない。これらは、それぞれカテゴリーとしては異なっているかも知れないが、あらかじめ分かっていることがらであり、不明性（blindness）とでもいうべきであろうか。不明性を解決する方法については、不明であり、これが解決できればもはや不明性とは言えない。これまでほとんど発生していない新しい形式の破壊の研究や、心理学的研究などが必要となろうが、ある意味では人間社会には、常に存在しうる現象といえるかも知れない。

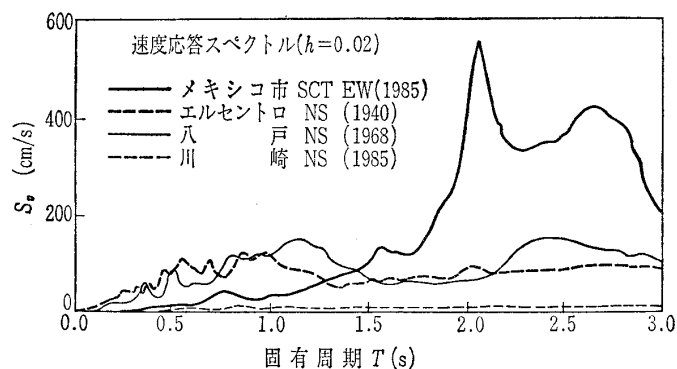
5. 地震工学と不確実性

地震は不確定要因の多い自然現象であり、地震による構造物の被害も各種各様である。地震波は、土木構造物の中でも最も不確実性の高い地盤を主体とした地球の中を伝播して来るものであり、不確実性の高い複雑な現象である。最近地震学と地震工学の専門家がそれぞれの立場から地震現象の解明にアプローチしている点は注目される。

地震と地震被害の不確実性に対する種々の研究は、極めて多く、広範にわたるのでここではとり上げない。

大地震は、往々にして我々がそれまでほとんどあるいは全く気づかなかった新しい点を教えてくれる。Housner（ハウスナー）はこの点から地震から学ぶことの重要性を指摘し、次のように述べている^{21), 22)}。

“Many of the most important aspects of destructive earthquakes cannot be studied in the laboratory. For example, it is not possible to model physically the



図一1 メキシコ市 SCT での地震応答スペクトルと他の地震記録スペクトルとの比較

earth's crust with its faults, strains, and generation of earthquakes; nor is it possible to test realistically such structures as buildings, bridges, and dams. Only during, and immediately after, an earthquake can these subjects be observed in action and studied. It is important therefore to think of the earthquake as a full-scale experiment, and preparations should be made to learn from an earthquake when it occurs.”

地震により教えられた最も顕著な現象としてあげられるものの一つは、1964年新潟地震による液状化現象であろう。このような現象はすでに知られていたともいわれるが、この地震被害が世界的関心をよびおこし、研究がここから始められた²³⁾。

1985年メキシコ地震は、これまで予期していなかったような地震動の一面を示してくれた。振動の問題での共振の恐しさはよく知られている。過去数十年にわたる強震観測の結果は、地震はある程度広い範囲の周波数を均等に近い状態で含んでおり、極端な共振は起こらないものとして来た。しかしながら、メキシコ市 SCT 地区でとられた記録は、周期一定の正弦波に近く、この周期と共振する構造物にとっては、ひとたまりもないものであった。この地震の特性を示すために、メキシコ市 SCT 地区でとられた記録の地震応答スペクトル S_a を図一1に示す。同図では、また1940 El Centro 地震記録、1968年八戸地震記録から求めた S_a も示して比較している。メキシコ地震動の特質がよく表されている。同図に1985年川崎として示したのは、メキシコ地震と同じ頃、東京で数十年ぶりに震度Vを示したという地震の川崎市、NKK 構内京浜ビルの近くで、筆者の研究室が行っているアレイ記録の一つから求めたものである。

メキシコ地震の例のように極端な共振を示す構造物に対しては、制振装置が有効である²⁴⁾。

6. む す び

構造物（土構造を含んだ）と不確実性について、異なっ

論 説

た面から見て来たが、内容について深く説明するまでには至らなかった。不確定性とその取扱いの手法については、まだ十分な理論的基盤ができ上がったとはいえない。今後このような問題について、さらに深く検討して、まとめ上げる必要がある。

本文をまとめるに当たり、京都大学講師 古田均氏からファジィ理論に関する資料等について協力を得た。感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 小西一郎編：各種構造物の設計とその思想—橋梁，建築，船舶，海洋構造物，航空機，原子力機器等の各種構造物はどのように設計されるか—，日本鋼構造協会，1987.
- 2) Terzaghi, K., Peck, R.B.: Soilmechanics in Engineering Practice, J. Wiley, N.Y., 1967.
- 3) 谷本親伯：NATM-1，森北出版，1983.
- 4) 桑原 洋・原田光男・背野康英・竹内幹雄：ファジィ理論のシールド掘進制御への適用，土木学会論文集，第391号／VI-8，1988.3.
- 5) 土木学会編：構造物の安全性・信頼性，土木学会構造工学委員会，構造物安全性研究小委員会（委員長 小西一郎），1976.
- 6) 土木学会編：構造物のライフタイムリスクの評価，構造工学シリーズ2（構造物安全性小委員会編，委員長 白石成人），1988.
- 7) 日本鋼構造協会編：構造関連問題の現状と展望，1986.
- 8) Schuëller, G.I.: Einführung in die Sicherheit und Zuverlässigkeit von Tragwerken, Wilhelm Ernst & Sohn, 1981. (邦訳あり，小西ほか：構造物の安全性と信頼性，丸善，1984)
- 9) Ang, A. H.-S., Tang, W.H.: Probability Concepts in Engineering Planning and Design, I, II, John Wiley, I. 1975, II. 1984. (邦訳あり，伊藤ほか：土木建築のための確率統計の基礎，丸善，1977，土木建築のための確率統計の応用，丸善，1988)
- 10) Mullarkey, P.W., Fenves, S.T.: Fuzzy Logic in a Geotechnical Knowledge-Based System, Proc. of Workshop on Civil Engineering Application of Fuzzy Sets, pp. 126~169, N.S.F., 1985.
- 11) 劉 健新・伊藤 栄：構造物の安全性に影響する非確率的な不確定要因に関する考察，橋梁と基礎，23-1，pp.39~46，1989.1.
- 12) 白石成人・古田 均：ファジィ集合論の構造工学への応用，土木学会誌，1984.4.
- 13) Zadeh, L.A.: Fuzzy Sets, Information and Control, Vol. 8, pp.338~353, 1965.
- 14) Chameau, J.L.A., Altescheffl, A., Michael, H.L. and Yao, J.T.P.: Potential Application of Fuzzy Sets in Civil Engineering, Int. J. Man-Machine Studies, 19, pp. 9~18, 1983.
- 15) 大野 研・近藤 武：ファジィ集合理論による透水試験結果の評価，土と基盤，Vol.36, No.9, pp.31~33, 1988.
- 16) 佐藤忠信・寺田倫康：ファジィ理論に基づく斜面崩壊資料の整理と崩壊予測法，京都大学防災研究所年報，28，1985.
- 17) Yasunobu, S., Miyamoto, S.: Automatic Train Operation System by Predictive Fuzzy Control, Industrial Applications of Fuzzy Control (ed. Sugeno, M.), Elsevier, 1985.
- 18) 土木学会編：構造システムの最適化—理論と応用—，構造工学シリーズ1，（構造物最適性小委員会編，委員長 山田善一），1988.
- 19) ファジィシステムシンポジウム講演論文集，第1回・京都・1985，第2回・東京・1986，第3回・大阪・1987，第4回・東京・1988，国際ファジィシステム学会日本支部.
- 20) 水本雅晴：ファジィ理論とその応用，サイエンス社，1988.
- 21) Housner, G.W.: Learning from Earthquakes—The Great Experiment, 久保慶三郎先生退官記念国際地震工学シンポジウム講演集，1983.
- 22) Earthquake Engineering Research—1982, National Research Council, National Academic Press, 1982.
- 23) 土質工学会編：地盤の液化化，1984.
- 24) Quiun, D., Iemura, H. and Yamada, Y.: Effects of Tuned Mass Dampers to Local Site Dependent Earthquake Ground Motions, 土木学会第19回地震工学研究発表会講演概要，1987.

(原稿受理 1989.2.20)