

10. 耐震設計

井 合 進

京都大学教授 防災研究所

1. はじめに

地震時には、地盤や構造物の力学的特性に応じて、地盤・構造物系に揺れや残留変形が発生する。この現象は、地盤・構造物の動的相互作用や地盤・構造物系の非線形挙動が支配する複雑なものである。地盤の液状化の影響も著しい。1960年代より開始された強震観測により記録された地震動の最大加速度は、1968年十勝沖地震では0.25 g であったものが、1995年兵庫県南部地震では0.5~0.8 g 、観測網が一段と充実した2000年以降では1 g を越える観測記録が続出し、2008年岩手・宮城内陸地震では4 g に達している。内部摩擦角が例えば35度の乾燥砂からなる水平成層地盤が抵抗できる限界の最大加速度は0.7 g ($= \tan 35^\circ g$)である。地盤工学の関連技術者は、このような新たな観測データを前に、どのような形で、地盤・構造物系の地震時挙動の評価に取り組んできたのであろうか。

設計においては、このような地盤工学的な挙動評価の面とともに、対象とする施設の目的、機能に相応しい性能目標 (performance objective) の設定という重要な面がある。しかし、地盤工学を専門とする設計技術者にとって、性能目標は自明 (ないしは、基準類に規定された限界状態を受け入れるもの) とされ、施設の目的、機能にまで立ち返って設計に取り組む機会は少なかった。近年になり、性能設計の導入が本格化するにつれ、コストダウン一辺倒ではなく性能を重視した設計に向けた新たな模索がなされている。その内容とは、どのようなものであろうか。

本稿では、耐震設計に関するこれら2点 (すなわち、地震時挙動評価と性能目標) を中心として、その動向と今後の方向性についてとりまとめた。本稿は、以下に紹介するISOの内容にも代表されるとおり、土木・建築の垣根を越えた内容を意図したが、結果として、土木のみの内容に過ぎない、とのご批判はあろうかと思われる。浅学非才の筆者故、お許しを乞うとともに、土木・建築の垣根を取り去ることが筆者の本意であることをお汲み取りいただければ幸いである。

2. 耐震設計の新たな枠組み

地盤基礎構造物の耐震設計に関する現状や地盤地震工学における研究動向などを踏まえ、2002~2005年の3年間にわたり、世界13カ国の代表的な地盤地震工学の専門家が集まり、議論を積み重ねた。その結果、性能設

計を主体とする新たな枠組みの時代の到来を念頭に、地盤基礎構造物の設計に用いる地震作用を定めるために遵守する一連の指針を定めたISO (国際標準) が、我が国のリーダーシップのもとに、2005年に策定された¹⁾。ここに、「地震作用」とは、従来の基準類で用いている「地震荷重」の概念を一般化したもので、地盤の変位や液状化による影響などを含む。この国際標準では、最先端の技術動向や将来の方向性を踏まえつつ、現在の設計実務も包含されるように配慮がなされており、以下に示すとおり、耐震設計の歩みと今後を議論する上で基本となる新たな枠組みが用意され、「はじめに」で述べた2課題についても、変形や被害程度を設計段階からあらかじめ考慮した枠組みとすることにより対処している。

2.1 設計の原則

本国際標準では、設計の原則として、性能設計の体系を明示的に採用している。すなわち、地盤基礎構造物の設計では、まず、その目的と機能を明確にする。大まかな分類として、商用利用、公共利用、防災利用、などがある。

次に、耐震設計のための性能目標を、地震時あるいは地震後の機能に基づいて、以下のとおり設定する。

—地震時および地震後の使用性：構造物は許容変形内、社会・産業活動への影響軽微、機能維持もしくは経済的復旧可能

—地震時および地震後の安全性：人的被害、資産被害の最小化、社会的重要施設の機能維持、構造物は非崩壊

これらの性能目標に基づいて、基準地震動を以下のとおり設定する。

—地震使用性照査地震動：対象構造物の設計期間内に発生する確率がある程度の地震動

—安全性照査地震動：発生する確率は低いが非常に強い地震動

これらの性能目標および基準地震動を基に、構造物の地震応答を表現する工学的パラメータを用いて性能規定を設定する。この際、施設の重要度、解析手法を考慮する。性能規定に基づく一つの方法として、限界状態設計法を示している。

2.2 地震動の設定

地震動などの基本変数の評価においては、多くの基準類で採用されている地盤種別の設計スペクトルの提示などを経験的解析と位置づけ、これと平行して、地点固有解析 (site-specific analysis) による設定方法を明示している。また、ライフライン施設のような空間的広がりを持つ構造物系を念頭に、地震動の空間的変動に関する記述がなされている。

2.3 解析法種別

地盤基礎構造物の解析法には種々のものがあるが、これを、等価静的/動的解析の区分および簡易・詳細解析の区分の組合せにより、4種類に大別している。ここに、簡易/詳細法の分類は以下のとおりである。

• 簡易法：全体系における地盤・構造物の相互作用を

部分系への作用として取扱うもの

- 詳細法：全体系における地盤・構造物の相互作用を
 一体解析するもの

また、解析法種別と評価可能な照査パラメータとの関連は、以下のとおりとしている。

- 1A) 簡易等価静的解析：閾値限界，弾性限界への余裕度。仮定した降伏形態に基づく変位の概略値
- 1B) 詳細等価静的解析：最大および残留応答値および概略降伏形態
- 2A) 簡易動的解析：仮定した降伏形態に基づく変位およびひずみの概略値
- 2B) 詳細動的解析：等価線形解析の場合には，最大応答値および最大応答形態。非線形解析の場合には，降伏形態およびその程度。

3. 地震時挙動の評価

地震時挙動の評価において中心的な役割を果たす解析法のうち，簡易法は，支持力，杭の横抵抗，土圧，斜面安定，などの静的極限平衡問題の精緻化，ニューマーク法や運動エネルギー保存則に基づく方法の応用など，地盤・構造物系の降伏形態をあらかじめ仮定し，これに基づいて地震時挙動を評価する方法が主体である。複雑な動的挙動の本質（ないしは側面）を簡易形に抽出する手法には無数の選択肢があり，今後も新たな手法の探求が続けられるものと思われる。また，近年になって，詳細法に属する有効応力解析によって地盤・構造物系のパラメータ解析を，地震動，地盤，構造物（盛土（堤防），重力式護岸，矢板式護岸など）の諸条件を網羅する形であらかじめ組織的に実施し，この結果を設計チャートの形でとりまとめた方法も開発され²⁾，延長70 kmにわたる長い海岸線に展開される防潮施設の性能照査など，従来の簡易法では実施が困難だった設計実務においても採用されるようになってきた。設計実務における利用面では簡易な方法であるが，地震動，地盤，構造物の諸条件に応じて，降伏形態が評価結果として得られる点で，詳細法の利点も備えている。

他方，詳細法は，土の力学的挙動（土粒子骨格と間隙水からなる連成系としての挙動と土粒子骨格の構成式）に関する研究の進展とともに歩み続け，動的解析を出発点とする分野では線形弾性体の動的解析からの進化，静的解析を出発点とする分野では圧密解析および極限平衡解析からの進化を遂げている。我が国では，1995年兵庫県南部地震を契機として，埋立地に展開されることが多い港湾施設や高い安全性を要求される原子力施設などを中心に，有効応力解析に基づく詳細法が広く設計実務で採用されるようになってきており，この点で，我が国が世界をリードしているといつてよいであろう。「はじめに」で述べた著しく大きな地震動における地震時挙動の評価の面でも，詳細法による解析においては，基本的にその枠組み内で問題の解決が可能である。詳細法は，今後も，解析精度の向上や適用範囲の拡大に向けて歩み続けることが予想される。

4. 性能の追求

先に示した新たな基本的枠組みにおいて，地震使用性照査地震動の定義として，対象構造物の設計期間内に発生する確率がある程度の地震動としているのは，国際メンバーにより長い時間をかけた議論の結果である。「確率がある程度」という表現により，特定の再現期間を設定する既往および現行の設計法を包含すると同時に，すべての再現期間の地震動の集合を考慮する性能設計への移行を可能としている。この方向の流れに沿って，ライフサイクルコストの最小化を基本とする手法の導入に関する種々の検討が始められている^{3)~5)}。

この方法は，設計期間において想定される被害の総計と初期コストを金額に換算することにより，被害の影響度合いを設計に反映しようとするもので，想定される被害の影響度合いが大きい施設では，より大きな初期コストの施設が，ライフサイクルコストが最小となる。被害は，直接被害（構造被害），間接被害（機能被害）の両者からなるが，施設が有する機能を多目的・多機能化することにより，コストダウン→倒壊からの脱却が図れる可能性がある点で，柔軟な枠組みを提供するものである。例えば，津波による浸水被害を防ぐための施設において，その目的に，水際線の環境面に関する機能を提供することにより，新たな要素を付加することにより，それを実現するためのコスト増は，より高度な性能を満たすために必要なコストとなる。性能目標についても，性能設計における設計対象を，はじめから無条件に「基礎構造物」に限定しなければ，まず，上部構造物を含む施設全体の目的，機能を明確化し，その上で，その施設の目的，機能に相応しい基礎の性能を規定することができる。この流れの先に，上部工と基礎構造物の一体解析による地震時挙動評価の必要性が見えてくる。性能設計は，このように柔軟で発展性のある枠組みを提供するものであり，地盤工学の専門分野にとどまることなく，広い範囲の技術者による今後のさらなる検討が期待される。

参考文献

- 1) International Organization for Standardization (ISO) (2005): ISO23469 Bases for design of structures — Seismic actions for designing geotechnical works.
- 2) 東島義郎ほか：沿岸構造物のチャート式耐震診断システムの開発，土木学会海洋開発論文集 第22巻，pp. 511～516，2006.
- 3) 澤田純男：土木構造物の耐震設計における新しいレベル1の考え方，土木学会，2003.
<http://www.jsce.or.jp/committee/eec2/taishin/index.html>.
- 4) Kramer SL, Mayfield RT, Anderson DG: Performance-based liquefaction hazard evaluation: implications for codes and standards, *8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, Paper No. 888, 2006.
- 5) Iai S, Tobita T, Tamari, Y: Seismic performance and design of port structures, *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV*, ASCE, Sacramento, 2008.

(原稿受理 2009.10.5)