

性能設計における構成モデルの役割と課題

The Expectation and Anxiety to Constitutive Models in the Performance-based Design

一 井 康 二 (いちい こうじ)

独立行政法人港湾空港技術研究所 主任研究官

吉 澤 睦 博 (よしざわ むつひろ)

㈱竹中工務店技術研究所 研究主任

1. はじめに

設計に際して要求性能のみを規定し、性能の有無を照査する方法は設計者の判断に委ねる性能規定型の設計基準体系が導入されつつある。このとき、性能の有無を合理的に判断できるためには、要求性能が明示的、定量的に記述されている必要があり、破壊確率または許容変形量などの形式で規定されることが望ましい。

例えば、性能規定の例としては次のようなものがある。

- ・「耐用期間中の破壊確率を*%以下にする。」
- ・「耐用期間中の変形量期待値を* cm 以下にする。」

一方、主として耐震設計上の観点を中心に、構造物の要求性能レベルと照査に用いる荷重レベルの関係を明確にした設計法も性能設計の一部として各種基準に導入されつつある。このときの性能表示は例えば次のようになる。

- ・「レベル1の地震動に対し所期の性能を失わない。」
- ・「レベル2の地震動に対し人命の安全を確保する。」

前者の形式の性能設計（性能照査型設計）と後者の形式の性能設計（性能明示型設計）は分けて議論すべきとの意見もある（例えば1）。

本稿では、上記の点に留意しながら、性能設計の枠組みにおいて構成モデルの果たすべき役割と課題について委員会での議論をふまえて概観する。

2. 性能設計の困難性と構成モデルの役割

本城²⁾は、地盤構造物の性能設計の不可能性（困難性）として三つの例を挙げ、それぞれについて論議している。

① 構造物の限界状態、特に変形に関する限界状態を直接に予測する設計計算モデルがないので、性能設計は不可能だという意見がある。確かにこれは好ましい状態ではないが、「適合みなし規定」と呼ばれる照査方法による対処も性能設計では考えられている。すなわち、「限界状態をまったく再現しない計算方法などで構造物の性能を照査する」ものであり、「これらの照査の有効性は経験により保証される」とする。

② 地盤構造物の設計法（計算モデル）は予測精度が低く、不確実性が非常に大きいという指摘もあるが、これは外力と抵抗力の間隔をどの程度に設定するかという問題に最終的に帰着するので、性能設計が不可能だという根拠にはならない。

③ N 値に代表される非常に荒っぽい地盤調査の上

に立脚した設計体系では、地盤のパラメーターに関する情報の不確実性があまりにも大きいという指摘もある。これも、②と同様に、不確実性の問題であり、外力と抵抗力の間隔をどの程度に設定するかという問題に帰着するため、性能設計が不可能だという根拠にはならない。

この観点から導かれる構成モデルの役割とは、①の困難性を解決するため「変形等に関する限界状態を直接に予測する設計計算モデル」を提供し、②の困難性に対処するため、「設計計算モデルの精度を向上する」ことである。一般の構成モデルは有限要素法（FEM）あるいは差分法などと併用することにより①の目的を達し、設計計算モデルの表現力を向上することで②の目的を達成している。また、③の困難性を考慮すると、「地盤のパラメーターの不確実性」に対しても対処できるものが望ましいが、この点については、構成モデルの提案や改良ではなく、特定の構成モデルに対し、 N 値等の荒っぽい地盤調査結果から簡易的にパラメーターを設定する手法を提案するという形式がとられていることが多い（例えば3）、4）。

3. 構成モデルの特性と性能設計の実務

構成モデルには、①多くの種類がありすべてのモデルを個々の技術者が理解することは困難、②日夜精力的に研究が続けられて進化を続けている、③モデルを実際に利用するには FEM 等へ組み込む必要がある、といった特性がある。これらの特性が性能設計の実務になじむかどうかを議論しておきたい。

性能設計の概念については既に整理したが、実際には何種類もの形態が考えられる。特に、「性能照査型設計」においてカギとなる、「性能照査」を「誰が」、「どの段階で」、「どれだけの責任で」行うように設計および受発注の制度を設定するかにより、構成モデルが性能設計の実務になじむかどうか、さらには性能設計が実務的に円滑に機能するかどうかが決まるといってもよい。

「性能照査」を行うにあたっては照査技術者が照査方法について精通しておく必要がある。したがって、ある特定の構成モデルが使われていた場合、照査技術者は構成モデルについても熟知していることが望ましい。しかし、「性能照査型設計」の理念に従えば、設計者が自由に（もちろん技術的な判断に基づいての話であるが）照査方法、さらに使用する構成モデルを決定することができる。すべての構成モデルに対し熟知した技術者をそろえることは容易ではないため、設計の結果を受け取る発

注者等は設計および照査の妥当性について判断ができないケースが増えてくると考えられる。

また、構成モデルが改良・進歩していくため、従来の構成モデルで設計が完了した案件について、新しい構成モデルで照査すると不具合が発見されることも考えられる。仕様が明記された基準であれば、個々の設計時における最新の基準を用いていけばよく、不具合発生時の責任の所在も整理が容易であるが、構成モデルの改良・変更については具体的な日時を指定することが困難であり、新旧のモデルが混在した設計や手戻りの発生、責任所在の不明確化などの問題が予想される。

設計計算に用いる構成モデルの選択は難しい。例えば、二つの異なる構成モデルがともに適用可能だとしても、多少は解析結果が異なることが普通である。さらに極端な場合には、同一の構成モデルでも FEM に組み込む際の細かい手順の違い、構成モデルのパラメーター設定の違い、解析に用いるメッシュ形状の違いにより結果が異なることがある。しかし、解析結果の違いは、多額の建設コストの違いとなる。また、性能照査が必要でありながら、既存のどの構成モデルも適用性が厳密には確認されていないようなケースも存在する。極大地震動までを照査の対象にした場合の「性能明示型設計」など、このようなケースが大半であろう。技術的に評価可能な限界を明らかにするなど、照査技術者の責任の範囲を明確にすることも重要である。

4. モデルの違いによる性能評価の変化（事例）

具体的に、構成モデルの違いによる性能評価結果の違いを見てみよう。二次元の有効応力解析プログラムである FLIP⁵⁾は港湾構造物を中心に実務で用いられている FEM プログラムである。構成モデルとしては、双曲線型のマルチスプリングモデルによって土の応力-ひずみ関係を表現し、有効応力経路を累積塑性せん断仕事に応じて制御する井合モデルを用いている。本プログラムの港湾構造物への適用性は1995年兵庫県南部地震における重力式岸壁の解析などを通じて確認されているが、FLIP 研究会（事務局：沿岸開発技術研究センター）によって、プログラム改良や各種構造物への適用性の検討が引き続き続けられている。

FLIPにおいて、液状化（および負のダイレイタンシー）の進行は累積塑性せん断仕事によって制御されているが、変相線を超えたところでのせん断仕事の寄与分は割り引いて考えている。このときの低減係数 R について、最近になって評価法が見直され、tmp3 法および tmp7 法が提案された⁶⁾。その効果を説明するために、実際に変形を生じる土要素の状態に近い試験として、軸変位非拘束条件での非排水ねじりせん断試験結果（土木研究所動土質研究室が実施）による液状化強度のキャリブレーション結果を図-1に示す。左列の従来法および右列の tmp3 法の両方について、 $K_0=1.0$ でのねじりせん断ひずみから求まる液状化強度によりパラメーターを設定し（上段）、同じ解析パラメーターで $K_0=0.7$ の条

件時の軸ひずみから求まる液状化強度を算定している（下段）。左下の図からわかるとおり、従来法では液状化強度が過小評価になる。一方、tmp3 法では右上の図のように若干の過大評価となっている。そして、従来法と tmp3 法の間の手法として tmp7 法が提案されている。

これら3手法により、日本海中部地震における被災および無被災の矢板式岸壁の解析が実施された⁷⁾。図-2に解析結果の一例を示す。構成モデルに改良を加えたことにより、結果に大きな違いが発生していることがわかる。

今回のケースは、tmp7 法および tmp3 法では被災と無被災の違いを示すことができ、構成モデルの改良が被害予測の解析精度を向上する方向に寄与していると FLIP 研究会では考えている。しかし、設計実務的には既存設計における解析結果との整合性等において整理が必要である。特に、矢板式以外の構造物に対しては今回の改良が必ずしも精度向上に寄与しているとは限らず、場合によっては、従来法で再現できた被災事例が再現できなくなる可能性もある。これらのことから、FLIP 研究会では引き続き検討が行われている。

構成モデルは室内土質試験結果を満たすために改良されることはもちろんであるが、実地盤での構造物の挙動予測を適切に行うために改良されるものである。実際に構成モデルは、従来のモデル化では予測出来なかった問題を解決するために発展してきた。この時、既存の構成モデルによる設計計算が必ずしも否定されるものではなく、問題によっては既存の構成モデルであっても十分に設計が可能な場合もある。構成モデルの改良は望ましいことであるが、実務的な配慮として、改良を加えた背景やその適用事例を記録・公開しておく必要がある。

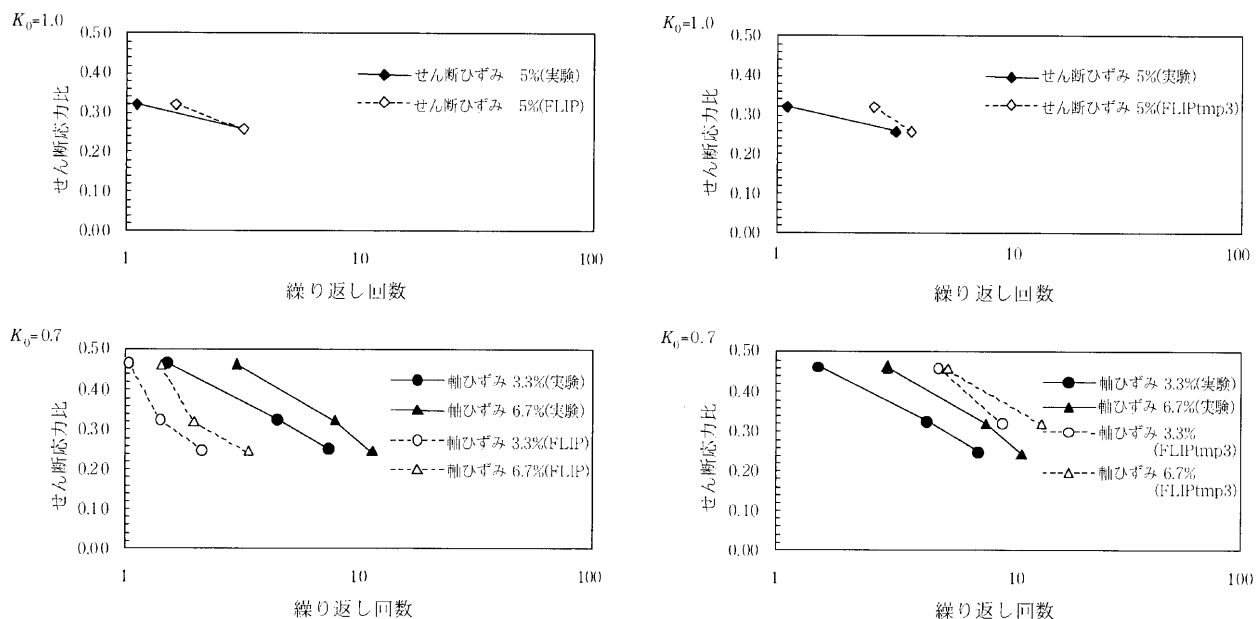
5. ま と め

性能設計において構成モデルに期待されている役割と課題について概観した。また、課題をより良く理解するために、構成モデルの改良・進化によって解析結果が変化する例について紹介した。

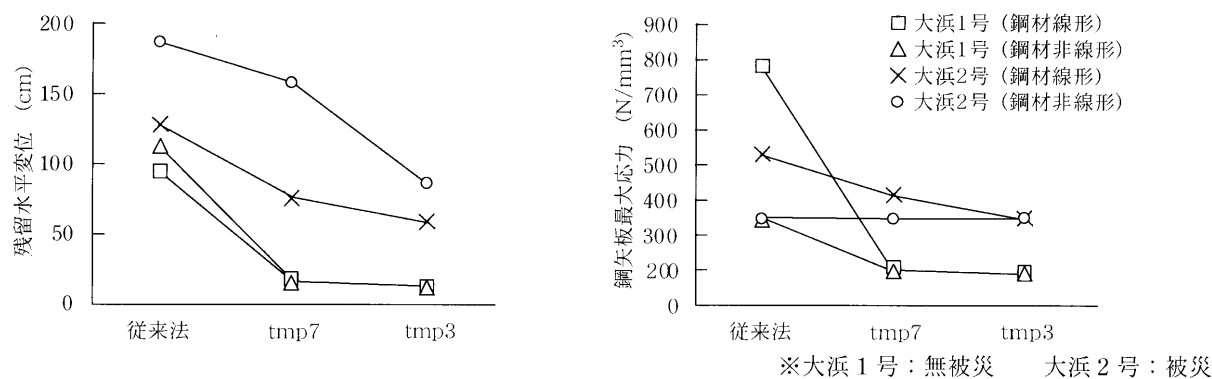
各種基準が国際標準に対応していく必要があるため、性能設計の導入が進むことは個々の技術者の賛否にかかわらず不可避であり、その中で構成モデルの果たすべき役割が増大していくことは論を待たない。本稿に述べたように、現在のシステムでは課題が山積していることも事実である。しかし、これらの課題は教育制度等の工夫などによりある程度は解決可能なことも確かである。例えば、「すべての構成モデルに対し熟知した技術者をそろえることは容易ではない」と述べたが、教育制度・実務者へのサポート制度を整備することで、設計実務上の困難・混乱が発生しないレベルにまで構成モデルに精通した技術者を業界全体で増加させることも不可能ではないだろう。

また、今後の構成モデルの研究開発・提案においても、数学的・物理的な整合性への配慮に加えて、性能設計体系への適用性の観点からの説明・整理が行われるならば、

論文



図一 構成モデルの変更による液状化強度の違い (左：従来法，右：改良法；白抜きが解析結果)



図二 矢板式岸壁の解析結果 (残留水平変位と鋼矢板最大応力)

研究成果をより早く，より円滑に設計実務へ適用できるのではないかと考える。この観点から，性能設計の導入が，構成モデルの開発・研究の場にもプラスに作用することを期待している。

参考文献

- 1) 福井次郎：道路橋基礎の性能設計，基礎工，Vol. 29, No. 8, pp. 17～20, 2001.
- 2) 本城勇介：地盤構造物の性能設計，土と基礎，Vol. 50, No. 1, pp. 1～3, 2002.
- 3) Iizuka, A., Ohta, H.: A determination procedure of input parameters in elasto-viscoplastic finite element analysis, Soils and Foundations, Vol. 27, No. 3, pp. 71～87, 1987.
- 4) 森田年一ほか：液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメタの簡易設定法，港湾技研資料，No. 869, 1997.
- 5) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, Report of Port and Harbour Research Institute, Vol. 29, No. 4, pp. 27～56, 1990.
- 6) 小堤治ほか：変相線を超えた応力空間における塑性せん断仕事の負のダイレタンシーへの寄与について，第46回地盤工学シンポジウム論文集，2001.
- 7) 塩崎禎郎ほか：二次元有効応力解析法の解析精度向上に関する検討，第39回地盤工学研究発表会，投稿中(2004).

(原稿受理 2004.4.26)