

# 地盤構造物の性能設計

## Performance Based Design of Geotechnical Structures

本 城 勇 介 (ほんじょう ゆうすけ)

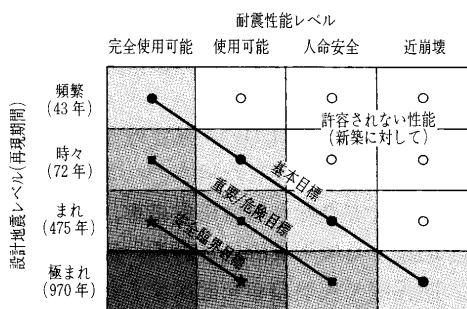
岐阜大学教授 工学部土木工学科

この小論では、「性能設計」に関する次の二つの問いについて考えてみた。すなわち「性能設計とは何か」、そして「地盤構造物に性能設計は可能か」というものである。最後に、我が国の性能設計におけるコンセプトと用語の調和の必要を訴えた。

### 1. 性能設計とは何か

物事をその outcomes (内容としての結果) で評価しようと言う performance evaluation (性能評価) の考え方は、企業経営、行政評価、教育評価など多くの分野で共通に見られる考え方である。性能設計は、このような考え方の、構造物設計への適用であるといえる。

この考え方の裏には「競争原理の導入による効率的な社会の追求」という考え方がある。情報公開の行き届いた自由な社会における、公平な競争の実現による効率的な社会の追求である。情報公開、規制緩和、自己責任、説明性 (accountability)、透明性 (transparency)、リスク管理等の近年頻繁に耳にするキーワードは、すべてこのような社会システムの実現にびたりと当てはまる位置を持っている。



図一 Vision2000の性能マトリックス

Nordic 5 Leave	New Zealand	Australia	UK	Canada
Goal	Objectives	Objectives	Goals	Objectives
Functional Requirements	Functional Requirements	Functional Requirement.	Functional Requirements	Functional Requirement.
Operational Requirements	Performance Requirements	Perform. Requirement.   Deem to Satisfy		Mandatory Requirement.
Verification Methods	Verification Methods		Performance Technical Sol.	Acceptable Solutions
Acceptable Solutions	Acceptable Methods		Alternative Approaches	Supporting Documents (Guidance)

図二 世界のいろいろな建築構造物設計コードにおける要求性能表示の階層性

### 1.1 性能明示型設計と性能照査型設計

福井 (2001)<sup>1)</sup>は、現在議論されている「性能設計」の概念は、次の二つに分けて議論すべきだとしている。

- ① 性能明示型設計：構造物の機能を確保するために要求する性能のレベルと、その照査に用いる荷重のレベルの関係を明確にした設計法。
- ② 性能照査型設計：構造物の機能が確保されていることを、要求性能をブレイクダウンした仕様ではなく、要求性能そのものを提示し、これを照査することを規定した設計法。

この指摘は適切であって、そもそも現在「性能設計」と称されているものには、上記二つの概念が混在していることは、その発展の経緯からも明らかなのである。

すなわち、①は米国のカリフォルニア構造技術者協会 (SEAOC, 1995) の Vision2000の要求性能マトリックス (図一) の提案に源を発した考え方である。この提案は、ノースリッジ、ロマプリータの両地震被害の経験の中で、建築物の所有者と構造技術者の構造物の耐震性能に関する理解が、まったく異なっていたという反省を踏まえたものであり、両者の対話の手段として考え出されたものである (地盤工学会, 2000)<sup>2)</sup>。したがって専門家でない人にいかに分かりやすく建築物の構造に関する性能を説明し、設計時に適切なメニューを選択してもらうかという問題意識がその根底にある。

一方②は図二に示すように、設計基準の中でどこまでを強制基準とし、どこに自由度を認めるかという議論の中から発達してきた考え方である。現在の主流の考え方は、構造物の性能についてのみ規定し、その照査の方法については自由度を認めるというものである。これはスカンジナビア諸国の統一的な構造物設計コードとして

開発された設計コードに端を発していると言われ、現在 Nordic 5 Level System として知られている。その後世界の多くの建築設計コードが、この考え方に従った。

②の考え方はしたがって「公共の福祉を守るための行政の規制のレベル」と、「経済効率を高めるための、公平で自由な競争原理の導入」という二つの、場合によっては相反する概念の調整という側面を持つ。周知の WTO/TBT 協定の、「仕様に基づく規定ではなく、性能に基づく規定」とも密接に関係する考え方であり、特に行政の

## 総 説

立場で性能設計を考えると重要である。

①と②、二つの概念を融合した性能設計コードも既に存在する。ICC 建築物性能コード (ICC, 2000) がこれであって、簡単に言うと②における3段階の階層的な構造物の要求性能の表示を取り入れ、かつ最下層の要求性能の記述に①の性能マトリックスを採用している。①を採用する理由は、この方法が構造物の要求性能を表示するときに説明性が高いと考えるからである。著者らが提案している「地盤コード21」も、この考え方を取り入れている (本城, 2000)<sup>3)</sup>。

最近の我が国の主な基礎構造物設計コードの動向を見ると、道路橋示方書は平成13年の改定としては②を重視していると述べられている (福井, 2001)<sup>1)</sup>。一方鉄道構造物等設計標準では②の考え方はほとんど見当たらず、①を重視しているように見える (奥村・棚村, 2001)<sup>1)</sup>。建築基準法、港湾の施設の技術上の基準では、①と②の融合が試みられていると思われる (二木, 2001; 山本・菊池, 2001)<sup>1)</sup>。

## 1.2 性能設計と限界状態設計法

性能設計に平行して、限界状態設計法について語られることが多い。この関係を説明しておきたい。

限界状態設計法は、性能設計よりはるかに長い歴史を持つ。従来特に上部構造物の設計は、許容応力度設計法で行われてきた。この設計法では、弾性体力学をベースとして、材料の実際の破壊強度よりかなり低い応力レベルで、構造物の安全性について照査を行う設計法であった (図-3)。これに対して、特に材料が破壊するような応力レベルで、実際に構造物や部材の破壊をシミュレートできるような力学 (塑性力学) が発達し、これを取込む形で終局状態設計法が提案された (図-3)。終局状態設計法では、構造物の破壊を直接考えるので、その発展の初期段階から、外力や材料特性の不確実性を考慮することが行われ、これが確率論に基礎を置いた信頼性設計法として発達した。これらを総合しているのが限界状態設計法であり、したがってそこでは終局状態設計法と信頼設計法が融合している。

1998年に改定された ISO2394「構造物の信頼性に関

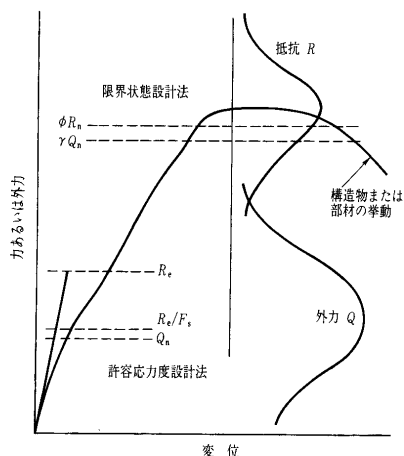


図-3 許容応力度設計法と限界状態設計法の概念図

する一般原則」は、構造物の設計コードの書き方に関する国際的に合意された一般原則を示した文書である。ISO2394は、構造物の設計コードには限界状態設計法を採用することを定めており、これが今日多くの設計コードが、この設計法に移行しようとしている一因である。

構造物に対する種々の要求を明示し、この状態を直接に照査するというのが限界状態設計法の特徴であるから、この設計法は性能設計ときわめて相性が良い。「性能設計を実現する現段階におけるもっともふさわしい設計法は、限界状態設計法である」と言われるゆえんである。

次章では、「性能設計を実現する設計法は、限界状態設計法である」という立場から、両者を同一のものとして議論する。

## 2. 地盤構造物に性能設計は可能か

「 $N$ 値をベースとした現在の基礎構造物の設計法では、性能設計は無理だ」、「土構造物の変形予測のレベルから言って、性能設計などとんでもない…」等の言葉を最近よく耳にする。この節では、この問題を考えてみたい。

### 2.1 設計とは何か

図-4は、地盤構造物の設計を構成する要素を説明したものである。設計では、荷重、地盤パラメーター (各土層の力学特性、土層構成、地下水の状態等) を決定し、計算モデルにより照査を行って構造物の諸元等を決定する。このときそれぞれの要素は不確実性を持つので、これを考慮して、その上で適切な安全性の余裕を導入する必要がある。この一つの表現が部分係数である。

安全性余裕の導入には、各要素の不確実性の程度の把握と同時に、社会的な安全性のレベルに関する要求を見極めた意思決定が必要である。これが構造物の設計という行為は、不確実性下の意思決定であると言われるゆえんであり、これは従来からの許容応力度法による設計であれ、限界状態設計法を用いた設計であれ基本的に同じである。

図-5に、外力や抵抗力の不確実性が異なる場合の、同様の安全性余裕を確保した場合の、安全率の違いを示した。この場合安全性余裕は破壊確率、すなわち外力が抵抗力を超過する確率で評価される。図から一目瞭然のように、同程度の破壊確率を確保するためには、不確実性の大きい場合は小さい場合に比べて、外力と抵抗力の平均値の間隔を離す (すなわち安全率を大きく取る) 必

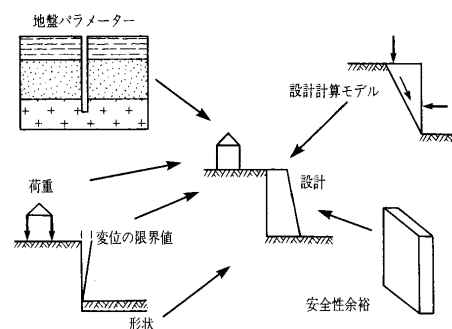
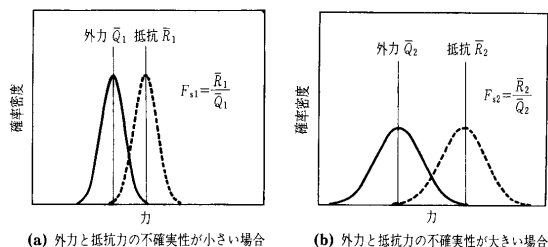


図-4 地盤構造物の設計にかかわる諸要素



図一 5 不確実性がおのおの異なる2組の外力と抵抗力に対して同じ安全性余裕をとった場合の安全率の違い

要がある。

## 2.2 性能設計は可能か

地盤構造物の性能設計は不可能だと主張される場合、それは次のいずれかを意味するのではないだろうか。

- ① 地盤構造物の設計法は、ほとんどの場合構造物の限界状態、特に変形に関する限界状態を直接に予測する設計法がないので、性能設計は不可能だ。
- 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ので、性能設計は不可能だ。
- ③  $N$ 値に代表される非常に荒っぽい地盤調査の上に構築された、現行の設計基準レベルの設計法では、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く、性能設計は不可能だ。

①は設計計算モデルの不在を、②は設計計算モデルの精度を、③は設計計算モデルへの入力値の不確実性を問題にしている。

まず①は直接限界状態を照査する設計計算モデルの不在を指摘している。もちろんこれは好ましい状態ではないが、このような場合にこれにどのように対処すべきかということも、性能設計では考えられている。これがいわゆる「適合見做し規定」と呼ばれる照査方法であり、「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。

性能設計では、その照査が構造物のどのような性能を照査するのかが重視される（説明性）。したがって適合見做し規定を用いる場合も、それが構造物のどのような性能を照査するのかは、明記される必要がある。

②と③についていえば、これらは不確実性の程度が大きいということを言っているのであるから、図一5で示したようにどの程度外力と抵抗力の平均値の間隔を開けるかという問題に最終的に帰着するので、性能設計の不可能を主張する理由にはならない。不確実性の大きい設計法は、より不経済な設計法となる場合が多いと言える。

限界状態設計法を導入すると、設計を構成する個々の要素（図一4）の不確実性の定量化が要求される。これは難しい場合も多い。しかし、この作業により設計全体

のバランスを把握することができ、このことにより研究や技術開発の方向が示唆されることも期待される。設計という作業の説明性を増すという点でも、資するべきところは大きい。

不確実性の把握が直接困難な要素を含む場合の限界状態設計法の適用方法も、開発されている。現在存在する構造物は、社会が許容する安全性余裕のもとに設計されていると仮定し、これよりそのレベルを逆算しようとする方法である。コード・キャリブレーションと言われる。

地盤構造物の性能設計、すなわち限界状態設計法の適用の課題は、他の分野（鋼やコンクリート構造物）と比較して異なるものではない。地盤がサイト特有の材料である点から、その調査の質および量をどのように決定するかということは、確かに地盤設計に独特の問題である。しかしこれも基本的には各設計要素の含む不確実性の程度とのバランスの中で解を求められる問題である。

## 3. む す び

設計法が切り替わるとき、すなわち許容応力度設計法が、限界状態設計法に切り替わるようなときは、設計コードがいろいろな意味でレベルアップできるチャンスである。Eurocodesは、欧州の統一基準の作成と言う課題を、1970年代には一段高度な設計法であった限界状態設計法を導入することにより成し遂げようとしている。

性能設計の導入も、このような設計コード全体のレベルアップの機会である。特にWTO/TBT協定やISOの影響で、我が国の主要な設計コードが書き換えられようとしている現在、このチャンスである。このレベルアップの一つの重要な課題に、我が国全体の設計コードの調和が挙げられる。しかし現在この国で起こっていることは、相変わらず、個々の行政単位別のこの問題への対応である。性能設計についても、多くの用語がそれぞれの機関で勝手に定義され、ニュアンスの異なるコンセプトが氾濫し、混乱している。用語やコンセプトの整理だけでも行われなければ、日本の設計コードの混在状態は解消されず、日本のすぐれた設計技術を海外に分かりやすく発信する機会は失われ、長期的にはEurocodesをもってこの分野の制覇を考えている欧州勢には立ち向かうすべもなくなるのではないかと危惧する。

## 参 考 文 献

- 1) 基礎工「特集 基礎構造の性能設計」, Vol. 29, No. 8, pp. 1~84, 2001.
- 2) 地盤工学会：我が国の基礎設計の現状と将来のあり方に関する研究委員会・設計法と地盤調査法の国際整合性報告書, 第45回地盤工学シンポジウム資料, 2000.
- 3) 本城勇介：包括基礎構造物設計コード「地盤コード21 Ver. 1」の提案, 土と基礎, Vol. 48, No. 9, pp. 16~19, 2000.

(原稿受理 2001.10.31)