

# 地盤工学における性能設計の基礎と実装 ～鉄道構造物等設計標準を例として～

## 1. 講座を始めるにあたって

赤木 寛 一 (あかき ひろかず)

早稲田大学理工学術院 教授

### 1.1 はじめに

構造物の性能設計，Performance Based Design の時代である。性能設計とは，構造物の要求性能を明らかにしたうえで，その目標性能を満たすように設計を行い，さらにその達成性能を照査する一連の技術的プロセスを指す。

では，なぜ性能設計の時代なのか？ その心は，構造物の建設とその後の長期にわたる維持管理を含めたマネジメントシステムである。構造物のマネジメントシステム構築に先立っては，まず全体計画を立てておく必要がある。全体計画では，どのような基本方針でマネジメントを実施していくかを定める。この基本方針を定めるにあたっては，構造物のサービスレベルや費用負担に関する利用者・納税者へのアカウントビリティ (accountability, 説明可能性, 説明責任) をどのように果たすかについて考え方を整理しておかねばならない。このために，マネジメントのための意思決定基準，優先事業評価基準，管理目標，予算目標を定めておく必要がある。このときの技術的バックボーンとなるものが，性能設計である。

ここまで述べてきた文章は，2010年1月に発行された筆者が執筆者の一人となった「地盤工学における性能設計」(丸善㈱)の序文である<sup>1)</sup>。それから10年が経過して，各種の社会資本の老朽化による社会的影響が顕著となった。このため，その維持管理の必要性が認識されて，アセットマネジメントの重要性が理解されるとともに，その基本となる性能設計の具体化と実装が進展してきている。道路分野，港湾分野では，性能設計にもとづく示方書類が既に整備されてきている<sup>2),3)</sup>。鉄道分野においても，性能設計手法に基づく鉄道構造物等設計標準が整備されてきており，筆者が改訂に関係したトンネル構造物分野においても開削トンネル，シールドトンネル，山岳トンネルにおける設計標準が順次送達，公開される予定である<sup>4)</sup>。

本講座は，鉄道構造物等設計標準の地盤分野の改訂に直接関係した鉄道総合技術研究所のメンバーを中心とする執筆者により，地盤工学における性能設計の基本的考え方とその内容を具体的に示して読者の理解を容易にするために，鉄道構造物を対象に実装された事例をもとに

表—1.1 本講座の構成と概要

章	タイトル	執筆者	掲載号
1	講座を始めるにあたって	赤木寛一	2019年10月号
2	地盤工学における性能設計の基礎	赤木寛一・阿部慶太・仲山貴司	10月号
3	鉄道構造物における性能設計の基礎	神田政幸	11・12月合併号
4	基礎・橋台における性能設計の実装	西岡英俊・佐名川太亮・中島進	11・12月合併号
5	土構造物・擁壁における性能設計の実装	中島進・松丸貴樹・西岡英俊	2020年1月号
6	トンネルにおける性能設計の実装	仲山貴司	2月号
7	路盤における性能設計の実装	桃谷尚嗣・伊藤孝記	3月号
8	講座を終えるにあたって	赤木寛一	3月号

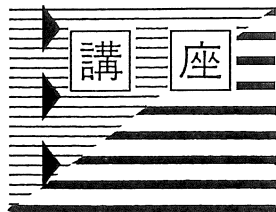
解説されたものである。

### 1.2 本講座の構成と内容

表—1.1は，本講座の構成と概要を示したものである。本講座は全8章から構成されている。1章では全体の構成を概説し，2章では地盤工学における性能設計の基本的考え方と背景を述べる。3章では，性能設計の実装例として本講座で取り上げる鉄道構造物の性能設計の基礎を述べる。4章以降では，鉄道構造物に関する性能設計の具体的な実装例を各論として述べている。具体的には，基礎・橋台，土構造物・擁壁，トンネル，路盤を対象とした実装例を示している。8章は，本講座のまとめであり，鉄道構造物のみならず一般的な地盤構造物の性能設計の将来展望を述べる予定である。

#### 参考文献

- 1) 赤木寛一・大友敬三・田村昌仁・小宮一仁：地盤工学における性能設計，丸善㈱，2010。
- 2) 例えば日本道路協会：道路橋示方書・同解説，2017年など。
- 3) 例えば日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2018年など。
- 4) 例えば国土交通省，鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説，2013年など。



# 地盤工学における性能設計の基礎と実装

～鉄道構造物等設計標準を例として～

## 2. 地盤工学における性能設計の基礎

赤木 寛一 (あかき ひろかず)

早稲田大学理工学術院 教授

阿部 慶太 (あべ けいた)

(公財)鉄道総合技術研究所 主任研究員

仲山 貴司 (なかやま たかし)

(公財)鉄道総合技術研究所 主任研究員

### 2.1 はじめに

構造物に要求する性能を定めて、その実現を図ることが性能設計である。性能設計に対比するものとして仕様設計がある。性能設計の目標は、「常時に構造物の機能や使用性に支障が生じない」、「大地震動時に構造物が崩壊しない」などとして表現されることが多いが、仕様設計では寸法・形状・配置そのものが設計目標となる。

仕様規定には、法令や技術基準で明確に規定されているものもある。寸法等の仕様は設計段階だけでなく施工段階の確認も容易であり、検査の信頼性や確実性を高められる利点もあるが、一方で設計施工の自由度が乏しく、新技術の開発・促進を阻害するおそれがある。構造物の用途などによっても異なるが、例えば基礎の仕様規定には、基礎形式・形状、鉄筋のかぶり厚さや配筋などがある。採用できる工法や施工方法、使用材料について制限がある場合も少なくない。これらの規定も広義の仕様規定である。

図-2.1は、性能設計のコンセプトを示したものである<sup>1)~4)</sup>。性能設計の目的は、構造物の種類・用途に応じて、発注者の意向や技術基準に基づき設計者が目標性能を定め、合理的で自由度の高い設計施工を実現することにある。国際調和や新技術の開発促進、規制緩和なども背景にある。性能に基づく仕様、仕様に基づく性能もあるので両者は相反するものではないが、仕様規定のもとでは作用や供用期間などが想定と異なった場合、性能評価が困難となる。

しかし、性能設計を実現しようとするれば、様々な作用

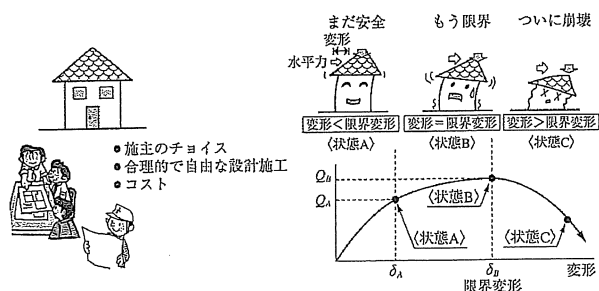


図-2.1 性能設計のコンセプト<sup>1)~4)</sup>

(荷重・外乱・環境など)に対する構造物の挙動や影響を正確に予測することが必要であり、作用と併せて構造部材の耐力・変形性能・耐久性も的確に評価しなければならない。計算法や解析法によっても評価は違いうる。このため、それぞれのばらつきや変化、さらには計算法などの特徴や適用範囲なども把握し、目標性能の達成度を高めることが必要である。基礎地盤の性能評価に際しては、設計だけではなく、地盤調査や施工及び品質管理の各段階で信頼性を高めることも重要である。ばらつきや変化が大きい地盤が対象であるため、調査や施工にも性能に基づく検討が必要である。また、信頼性を高めるためには、統計確率的手法が有効であることから、破壊確率や信頼性指標などを適切に設定する限界状態設計法も提案されはじめており、一部で実務に供されている。

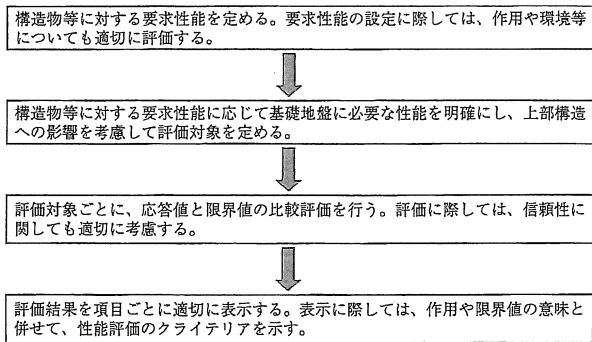
本講座では、鉄道構造物等設計標準を例として、地盤工学に関連する構造物毎の性能設計の実装例を紹介していく。本稿は、これに先立ち、地盤工学全般における性能設計の基本的な考え方を述べる。

### 2.2 性能設計の基本的考え方と背景

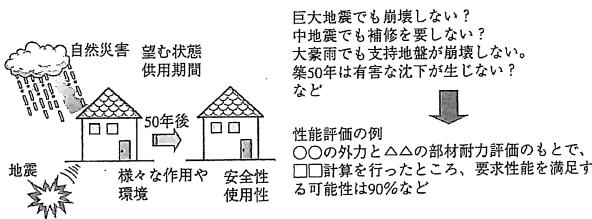
地盤工学の対象は、橋脚等の土木構造物の基礎、超高層ビルから木造住宅までの建築物の基礎、トンネルなどの地下構造体、工作物としての擁壁や盛土のような土構造物など、広範囲である。基礎構造や地下構造体そのものについては、構成する部材種別ごとの設計計算法に基づく検討が必要であるが、地盤の支持性能や基礎と地盤との荷重伝達機構及び相互作用については、地盤工学の観点からの検討が重要である。また、地中部分に関しては、品質に及ぼす地中施工の影響や地盤に起因する部材の耐久性についても考慮しなければならない。

基礎地盤の性能評価に際しては、経年変化や地盤環境の影響を適切に評価しなければならない。地盤環境についての影響因子には、地下水位、化学的性質、温度、湿度、生物・バクテリアなども含まれる。

基礎地盤の性能評価の流れと性能評価の考え方を図-2.2、図-2.3に示す。要求性能は、荷重外力や外乱及び環境に応じて設定することが必要となるが、想定する基礎地盤の状態に関しては、基礎が破壊した状態、基礎の



図一2.2 性能基礎・地盤の性能評価の流れ<sup>4)</sup>



図一2.3 要求性能と性能評価<sup>4)</sup>

損傷や沈下・変化さらには劣化が想定した範囲に到達した状態などがある。

性能評価は、各部の応力度や変形量などの工学量を評価指標として検討することになる。具体的には想定した作用・環境のもとで生じる応力度や変形量などの応答値を応力解析等により求め、この値が限界値以下になることの確認が該当する。この限界値は、許容応力度法の許容応力度に相当する。

性能設計法自体は、特定の設計法を指すわけではないが、このあと2.4で述べるように、想定した作用のもとでの目標性能の達成度を定量的に判定できる限界状態設計法が基本的な性能設計法と考えられている。

### 2.3 地盤工学における設計

地盤工学における設計の基本は、種々の作用によって生じる基礎部材や地盤の応答値を計算し、あらかじめ設定された限界値と比較することにある。例えば、基礎にかかわる限界値には、①地盤や杭の支持力、②基礎あるいは構造体の沈下量や不同沈下・傾斜に関する変形量、③基礎部材等（杭体や改良体を含む）の耐力・変形性能に大別できる。このほか、土圧・水圧、斜面・擁壁の安定計算にかかわるものがある。

地盤沈下や基礎の沈下・傾斜などの沈下変形挙動は、荷重・外力、土の弾塑性の性質、せん断強度、圧密現象、液状化現象などに支配される。基礎部材の耐力の限界値は、材料及び施工条件が地上部分と同様の場合、上部構造の構造部材の限界値をそのまま採用することもあるが、地中施工や腐食等に及ぼす地盤環境の影響を考慮することが必要である。限界値の低減、上限値の設定、腐食部の評価などにより、地上の構造部材より控えめな評価をする場合が少なくない。

表一2.1 限界状態と基本的要求性能<sup>5)</sup>

限界状態	基本的要求性能
安全性	想定した作用に対して構造物内外の人命の安全性等を確保する
使用性	想定した作用に対して構造物の機能を適切に確保する
修復性	必要な場合には、想定した作用に対して適用可能な技術でかつ妥当な経費及び期間の範囲で修復を行うことで継続的な使用を可能とする

## 2.4 性能設計法

性能設計の考え方は、構造物の種類を問わず共通であるが、要求性能の詳細や検証方法は用途によって異なる。ここでは、2002年10月に国土交通省がまとめた「土木・建築にかかわる設計の基本<sup>5)</sup>」の考え方を中心に基本事項を述べる。これは、構造物全般を対象とし、今後の技術基準の策定、改訂の基本的方向を示すものであるが、耐震設計に焦点を当てており、地震以外についての記述は少ない。

### 2.4.1 限界状態と基本的要求性能

表一2.1に要求性能を示す。限界状態は、安全性、使用性、修復性等に限定し、検証法は信頼性設計を基本としている。限界状態は、それを超えて構造物が設計要求を満たすことができない状態である。なお、表一2.1では、疲労、耐久性、火災の影響も考慮して限界状態を考慮することとしている。

構造物の用途や技術基準類により具体的な定義は多少異なるが、それぞれの状態を基礎・地盤にあてはめると、概ね次のように考えることができる。

#### (1) 終局限界状態

終局限界状態とは、想定される作用による破壊や大変形等に対して、構造物の安定性が損なわれず、内外の人命に対する安全性等を確保しうる限界の状態である。想定作用は技術基準類や設計思想によっても異なるが、極めて稀に生ずる事象が対象となる。

基礎・地盤の終局限界状態としては、基礎や地盤の破壊や大変形があたる（図一2.4）。

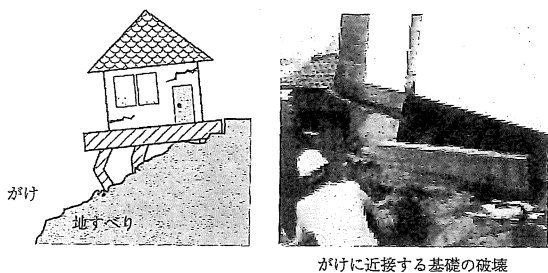
#### (2) 使用限界状態

使用限界状態とは、想定作用に対して、構造物などの使用性が確保される限界の状態である。

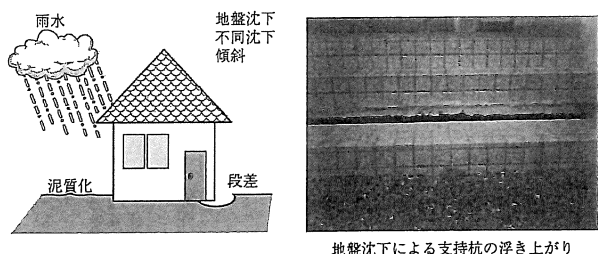
基礎・地盤の使用限界状態とは、基礎などの変形や振動が日常の機能・使用性や構造物内外の通行などに支障を生じさせる限界の状態である。具体的には、段差による歩行障害（図一2.5）のほか、構造物下の地盤面や基礎スラブなどに水が溜まることなどによる湿気や敷地内の排水不良による表層地盤の泥土化、敷地や周辺の状態や基礎形式などにも起因する地盤振動などもあげられる。

#### (3) 修復限界状態

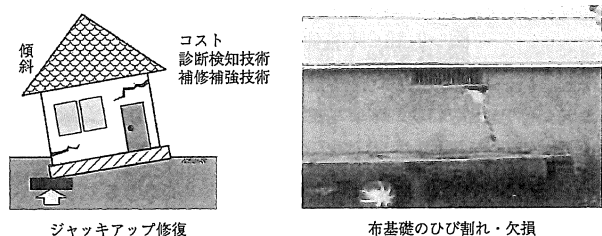
修復限界状態とは、想定作用による損傷に対して修復を行えば、継続使用が可能となる限界の状態であるが、技術面だけでなく経済的にも可能な範囲の修復が前提である。この状態は、使用限界状態と終局限界状態の中間



図一2.4 基礎・地盤の終局限界状態の例<sup>4)</sup>



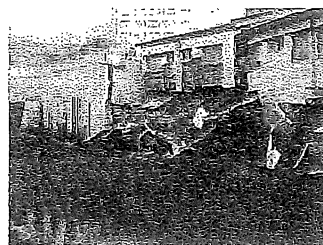
図一2.5 基礎・地盤の使用限界状態の例<sup>4)</sup>



図一2.6 基礎・地盤の修復限界状態の例<sup>4)</sup>



a) 津波の場合



b) 土砂災害の場合



c) 溶岩流の場合

図一2.7 自然災害の例<sup>4)</sup>

に存在し、機能回復と財産保全などの観点から評価することになる。

基礎・地盤の修復限界状態は、基礎・地盤をそのまま放置しておくことが適当でないと判断される限界の状態である(図一2.6)。

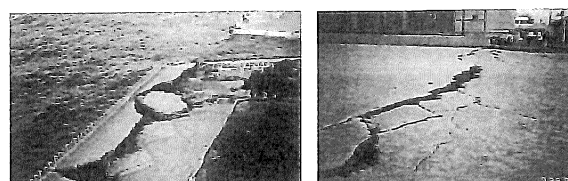
### 2.4.2 作用

#### (1) 構造物に影響を及ぼす作用

構造物は供用期間中に様々な作用を受ける。地震、水害、土砂災害などの自然災害が主な作用であるが、設計ではすべてに配慮しているわけではない。発生頻度や影響を考慮して、設計用の荷重・外力が設定されている。自然災害だけでなく、交通振動、工事振動、機械振動などの地盤振動により構造物の使用性や機能が脅かされることもある。

過去の自然災害例には、地震、水害、土砂災害のほか、火山活動、竜巻による被害もある(図一2.7)。地震の影響は、地上及び地下の慣性力のほか、地震時の地盤変形の影響も生じる(図一2.8)。種々の作用に対して安全性を確保する手段としては、個々に作用を設定し、構造計算で確認する方法もあるが、砂防ダムなどのように防災対策で作用を軽減・防止することが有効な場合もある。

表一2.2には、自然災害における国内外の犠牲者数を示す。東日本大震災による犠牲者は、主に地震と津波によるもので約16,000人とされている。近年の地震による



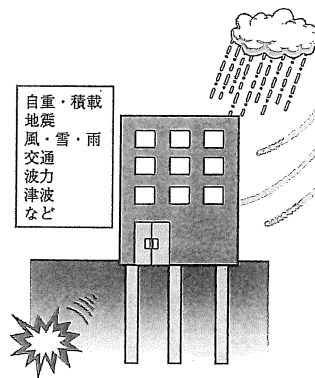
図一2.8 地震時の護岸近傍の側方流動と平坦地の地割れ<sup>4)</sup>

犠牲者は、阪神・淡路大震災で約6,500人と多いが、これを除くと地震災害と土砂災害の年平均の犠牲者はほぼ同程度である。ちなみに、事故等による死者は、交通事故で年約1万人、火災では年約2,000人である。

地震災害に関して、過去最大の死者数が出たとされるものは華県地震(1556年、中国陝西省)の約83万人であるが、20世紀以降でも10万人を超える地震も数回発生している。自然災害の統計<sup>6)</sup>によると、1977年から2001年までの25年間に、全世界でのべ約41億人以上が被災し、約125万人の生命が奪われている。近年の自然災害はサイクロン・ハリケーン・風水害によるものが多い。スマトラ沖地震に伴う津波(2004年)では、インドネシア、スリランカなどが被害を受け、犠牲者は約30万人以上に達している。また、ハリケーン・カトリナ(2005年)は、米国ルイジアナ州を中心に水害をもたらし、犠牲者は千人以上に達している。

表—2.2 自然災害等における犠牲者の数<sup>6)</sup>

対象	災害	犠牲者数(人)
国内	東日本大震災	約 16 000
	阪神・淡路大震災	約 6 500
	関東大震災	約 14 万
	土砂災害	約 3 500
	地震災害	約 12 500
	交通事故(参考)	年平均約 10 000
	火災事故(参考)	年平均約 2 000
海外	自然災害全般(地震除く)	約 125 万
巨大地震	華県地震	約 83 万
	唐山地震	約 24 万
	甘肅省地震	約 20 万
	メキシコ地震	約 11 万
津波	スマトラ沖地震	約 30 万



図—2.9 基礎構造物に対する作用<sup>4)</sup>

(2) 設計作用の考え方

設計で想定する基本的な荷重は、固定荷重、積載荷重、積雪荷重、風圧力、地震力である。場合によっては、地盤に起因した荷重、温度応力度その他の荷重を見込むこともある。土木構造物では、交通荷重や波力などを考慮することもある。例えば、基礎の設計に際しては、上記の作用を考慮して、基礎に作用する荷重・外力を設定することになる(図—2.9)。

また、地盤に起因する作用は、地盤環境の変化の影響を受けるので、現場の状況などに応じて、適切に考慮しなければならない。地下水位の季節変動・経年変化、敷地周辺の地形・周辺環境の化学的物質の変化、風化、化学的浸食・地温などによる地盤の強度・剛性低下などが考えられる。これらの影響については、作用として扱うこともあるが、地盤や部材の耐力等の検討に含めることもある。

2.4.3 応答値と限界値の比較

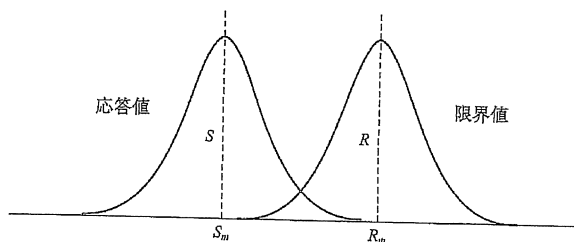
性能設計の基本は、評価項目ごとの限界値が、想定作用による応答値をほぼ上回らないことによって評価することである。限界状態に応じて設定する限界値と、想定作用で生じる応答値は、いずれもばらつきを有しており、図—2.10に示すような確率分布を考えることが多い。限界値  $R$  や応答値  $S$  の確率密度分布が明らかな場合は、次式で性能評価を行うことができる。

$$1 - P(S \leq R) \leq P_L \dots\dots\dots (2.1)$$

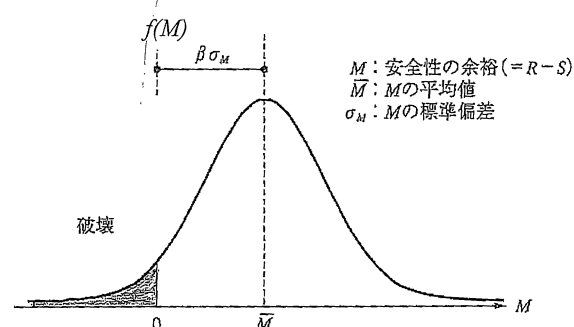
ここに、 $P(S \leq R)$  :  $S$  が  $R$  以下となる確率、 $P_L$  : 目標確率であり、図中の  $S_m$ 、 $R_m$  は  $S$  と  $R$  の平均値である。

限界値と応答値の差  $M (=R-S)$  もばらつきを有しており、 $M$  が常に正であれば破壊を生じる可能性は皆無となるが、負となる可能性もある。破壊が生じる度合い(破壊確率)は、図—2.11の塗りつぶされた面積に相当する。

$R$  と  $S$  の確率分析が正規分布となる場合は、 $M$  も正規分布になると考えられるので、 $M$  の確率密度関数を  $f(M)$  とすると、破壊確率  $P_f$  は式(2.2)となる。



図—2.10 応答値と限界値の関係<sup>4)</sup>



図—2.11 破壊確率  $P_f$  と信頼性指標  $\beta$ <sup>4)</sup>

$$P_f = \int_{-\infty}^0 f(M) dM \dots\dots\dots (2.2)$$

ここに、 $P_f$  : 破壊確率、 $M$  : 限界値と応答値の差  
信頼性設計では、この設計で許容する破壊確率を設定して限界値と応答値の比較をすることが基本となる。ただし、破壊確率  $P_f$  に相当する指標として信頼性指標  $\beta$  を定義し、目標とする信頼性指標  $\beta$  を設定する考え方が一般的な評価法になっている(図—2.11)。

$\beta$  は、 $\bar{M}/\sigma_M$  で定義されるものである。破壊確率  $P_f$  は累積確率を表す標準確率分布関数  $\Phi$  を用いると式(2.3)で与えられる。

$$P_f = \Phi(-\bar{M}/\sigma_M) \dots\dots\dots (2.3)$$

ここに、 $\Phi$  : 標準確率分布関数、 $\sigma_M$  : 標準偏差、 $\bar{M}$  :  $M$  の平均値

標準正規確率分布関数  $\Phi$  は一般的な関数であり、表計算ソフトで簡単に求めることができる。なお、耐力と荷重の平均値を  $\bar{R}$ 、 $\bar{S}$  それぞれの標準偏差  $\sigma_R$ 、 $\sigma_S$  とすると、 $\beta$  は式(2.4)で表すことができる。

$$\beta = \frac{\bar{R} - \bar{S}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \dots\dots\dots (2.4)$$

許容破壊確率  $p_{fa}$  に対する信頼性指標  $\beta$  の値を目標信頼性指標  $\beta_T$  とみなすと、 $\beta \geq \beta_T$  となる評価は式(2.5)となる。

$$\beta = \frac{\bar{R} - S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \geq \beta_T \dots \dots \dots (2.5)$$

しかし、目標信頼性指標  $\beta_T$  の値は、理論的なものではなく許容破壊確率に対応するものにすぎず、耐力や作用の平均値、標準偏差、変動係数に関するデータの蓄積が必要である。

現時点までの実績や知見が集積されたデータや、これまでの経験実績に基づく許容応力度法による信頼性の対比などを通じて検討された結果については、近年の技術基準類にまとめられているところである。

なお、現時点で設計に実装されている応答値の算定と限界値の設定については、本稿以降の講座において詳細に述べられる。そのため、本稿では、現時点では研究の段階であるが、将来的には実用的な設計の場面でも有効なものになると考えられる、土の大変形を伴う挙動の応答値の算定方法を紹介する。

### 2.5 応答値の算定に関する研究事例

地盤工学に関連する構造物については、構造物の変形メカニズムを踏まえた応答値の計算が必要となる。

例えば、鉄道構造物等設計標準<sup>7)~9)</sup>では、土質調査法の精度や材料、応答値のばらつきも考慮しつつ、構造物の変形メカニズムに応じた、安全側の評価かつ実用上も容易に使用可能な簡易な解析モデルを示している。

盛土や切土等の土構造物については、盛土内及び支持地盤の安定性と地震時の土塊の残留変位を評価する必要があるため、円弧すべり法とニューマーク法を解析モデルとして用いている。擁壁についても土圧が支配的で一方向に変形が卓越することを踏まえニューマーク法を用いている。基礎や橋台については、桁や橋脚等の上部工の影響を考慮した変位量を求める必要があるため、構造物を一体で骨組み解析モデルによりモデル化し、実用上の利便性を踏まえ非線形応答スペクトル法を用いた地震時の応答変位計算を行っている。これらのモデルや解析方法は、模型実験等でそれらの適用性が検証され、信頼性や妥当性が検証されているものである。

ただし、地盤工学に関わる構造物は、特に巨大地震や異常豪雨等の大きな荷重が作用した際は、上記の解析モ

デルでは考慮することが困難な土の大変形を伴う挙動を示す可能性もある。性能設計における安全性や復旧性をより向上させるためには、構造物が土の大変形を伴いどのような被害を受けるか想定し、それらに対し地震や豪雨時に発生しうる随件事象が構造物に与える影響についても考慮することも今後は重要と考えられる。

これらに関する具体的な取り組みとして、表—2.3に粒子法や個別要素法等の土の大変形を考慮できる手法の概略的な特徴を示す。手法毎に大変形を扱う対象に対して得意不得意なものがあるが、それぞれの手法の特長を適切に生かし組み合わせることで、大変位時の挙動のみでなく、対象構造物に対する土砂や落石による衝撃力評価、土石流の挙動評価、土と水の相互作用の評価に向けた解析等の随件事象に関する解析にも拡張することが可能である。以下にこれらの取り組みに関するいくつかの事例を示す。

#### 2.5.1 構造物や土留め構造物の大変形解析モデルの構築

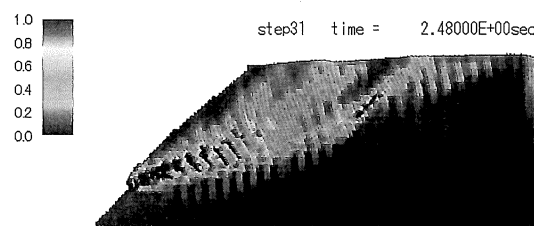
前述したように、土構造物や土留め構造物は特に大きな荷重が作用した場合に土の大変形を伴うことが多い。このような土の大変形を扱い可能な解析モデルの構築に向けた事例として、粒子法(MPM)を用いた盛土と橋台のモデル化を行った事例を図—2.12に示す。解析モデル全体を粒子のみでモデル化しているため、土の変形を際限なく扱うことができる。また、図—2.13は組積構造物に関してモデル化を行ったものである。組積構造物の場合は、土の大変形とともに壁の崩壊も伴うことが多いが、そのような挙動を扱う解析モデルとしても有効である。

#### 2.5.2 構造物に対する土砂による衝撃荷重の計算

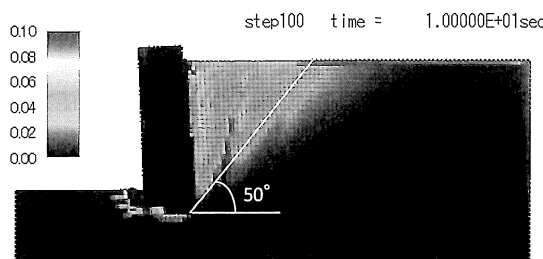
図—2.14は斜面からの崩落土砂が斜面下部の構造物に衝突する様子を粒子法により再現したものである。本手

表—2.3 粒子法、個別要素法の主な特徴

手法	得意な点	不得意な点
SPH MPS	粘性項を計算可能であり水の挙動を扱うのが可能	引張時に不安定化するため、特に粘着力が小さい土の大変形挙動を扱うのが困難
MPM	粘着力の大きさに拘わらず土の大変形挙動を扱うのが可能	粘性項を計算できないため、水の挙動を扱うのが困難
DEM DDA	岩塊の転動挙動、衝突挙動	土や水の挙動の取り扱いが困難



a) 土構造物の応答例



b) 土留め構造物の応答例

図—2.12 粒子法でモデル化した土と土留め構造物の応答例

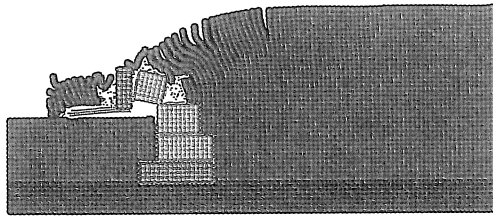
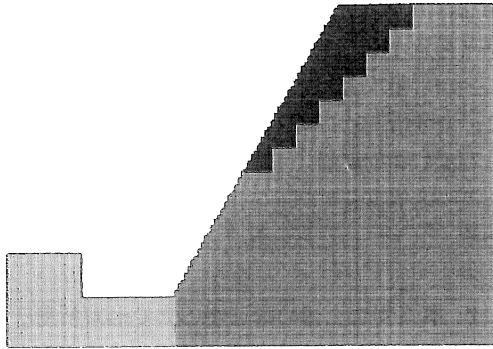
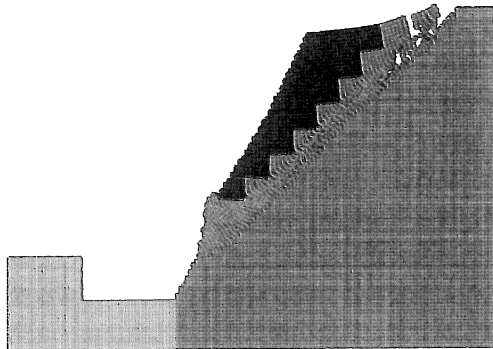


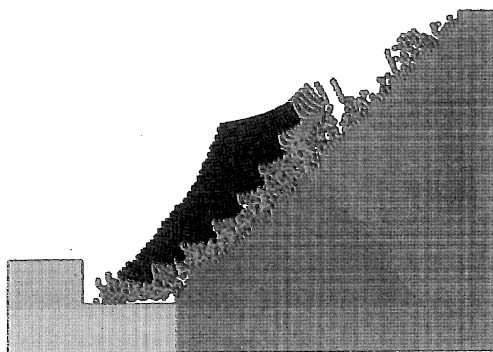
図-2.13 組積構造の解析事例



a) 崩壊開始 0.5 秒後



b) 崩壊開始 1.0 秒後

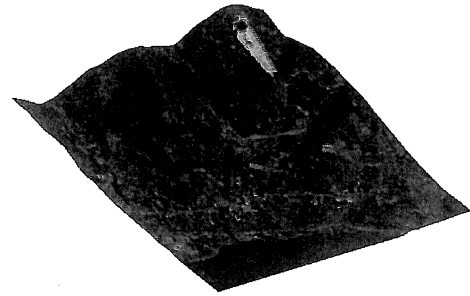


c) 崩壊開始 5.0 秒後 (崩壊後)

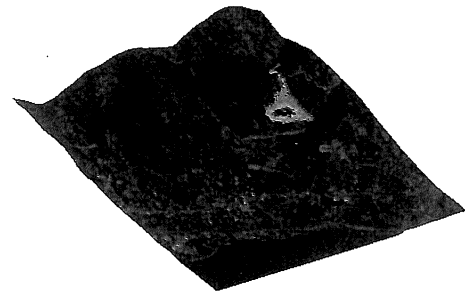
図-2.14 土砂による衝突挙動解析の事例

法によれば衝撃荷重を定量的に求めることも可能であり、崩壊から衝突までの一連の挙動を一つの解析手法で扱うことができる。なお、落石の衝突荷重については個別要素法による事例が多くみられる。

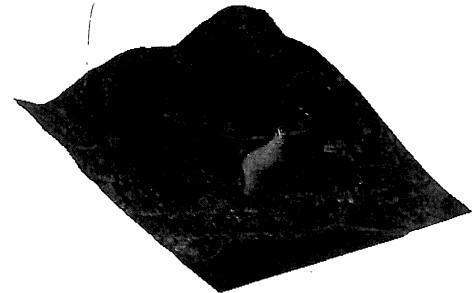
図-2.15は粒子法により土石流の挙動を解析したものであり、被害低減に向けては土石流の堆積量の想定や堰堤の設置等の対策が有効であると考えられる。例えば、この図に示すように堰堤の設置が土石流の挙動に及ぼす影響を想定すること等が考えられる。



a) 崩壊前



b) 堰堤捕捉時



c) 土砂堆積後

図-2.15 堰堤の効果を含んだ土石流の挙動解析の事例

以上の事例の他に、土と水の相互作用の評価に向けた解析モデルとして、土の解析が得意な手法 (MPM や DEM 等) と水の解析が得意な手法 (MPS や SPH 等) を組み合わせた解析モデルの構築に関する取り組みもある。

ここで述べたような解析手法の特徴を活かした土の大変形及び随件事象を考慮可能な解析モデルの構築に関する取り組みは未だ研究段階ではあるが、解析手法の適用性を明確にでき、パラメトリックスタディ等を通じた検討により、解析結果をノモグラムのような簡易なもので表現することなどができるようになれば、将来的には実用的な設計の場面でも有効なものになると考えられる。

## 2.6 おわりに

第2章では、本講座の導入として、地盤工学における性能設計の基本的考え方を解説した。本稿が、今後連載される地盤工学に関連する鉄道構造物の性能設計の基礎と実装を読者各位が理解するための一助となれば幸いで

ある。

#### 参 考 文 献

- 1) 建築研究所：建設省総合技術開発プロジェクト「新建築構造体系の開発」，構造分科会最終報告書，2000.
- 2) 建設省大臣官房技術調査室監修：建築構造における性能指向型設計法のコンセプト，技報堂出版，2000.
- 3) 建築研究所：建設省総合技術開発プロジェクト「新建築構造体系の開発」，基礎 WG 最終報告書，2000.
- 4) 赤木寛一・大友敬三・田村昌仁・小宮一仁：地盤工学における性能設計，丸善㈱，2010.
- 5) 国土交通省技術調査室：土木・建築にかかわる設計の基本，2002.
- 6) ルーバン・カトリック大学，  
入手先 <<http://www.cred.be/>> (参照 2019.05.28)
- 7) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 (土構造物)，丸善㈱，2007.
- 8) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 (土留め構造物)，丸善㈱，2012.
- 9) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 (基礎構造物)，丸善㈱，2012.