

補強土壁の限界状態設計法 —信頼性による性能評価と諸外国の動向—

宮田喜壽* 中根 淳**

1. はじめに

補強材の配置によって土塊の安定性を高めた土留め構造物を補強土壁という。帯状鋼材や格子状・面状の高分子材料（ジオシンセティックス）、アンカープレート付き鉄筋などが補強材として用いられる。わが国でも1990年以降適用数が多くなり、現在ではかなり一般化した技術となっている（参照：図-1¹⁾）。

補強土壁の設計法として、図-2に示すような破壊モードを想定し、構造物の安定性を安全率で照査する方法が広く用いられてきた。近年、諸外国においては、そのような安全率を用いる設計法から限界状態設計法に移行している。その流れを表-1に示す。限界状態設計法を補強土壁の設計法にはじめて導入したのは英国である。1998年にISO2394で構造物の信頼性に関する一般原則が定められた以降、香港、北欧、北米と相次いで限界状態設計法が提示されるに至っている。

限界状態設計法の特徴は、一連の照査で確率論的に性能を評価する信頼性の手法を用いることと、設計の照査を安定性や使用性のように細分化して行う点にある。ISOなどの国際規格と整合性をとる必要性が高まっている今日、このような国際的な技術動向は無視できない。そこで、本文では、

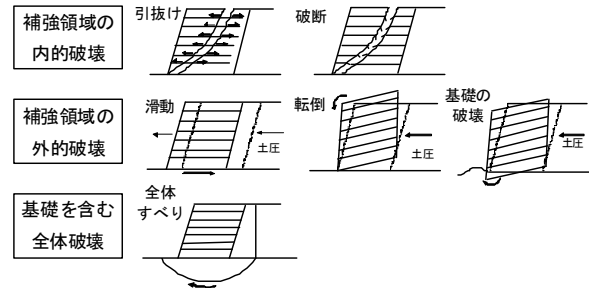


図-2 補強土壁の設計で仮定される破壊モード

表-1 補強土壁の限界状態設計法に関する国際的動向

年	国・地域	設計法
1995	英国	BS 8006 “Code of practice for strengthened / reinforced soils and other fills”
1998	共通	ISO 2394 “General principles on reliability for structures”
2002	香港	Geoguide 6 “Guide to Reinforced Fill Structure and Slope Design”
2003	北欧	Geotechnical Society “Nordic Handbook Reinforced Soils and Fills”
2007	北米	AASHTO “LRFD Bridge Design Specifications, 4th Edition”
2009	英国	BS8006 改訂案公開

補強土壁の限界状態設計法に関する動向とその内容として、限界状態設計法の概要と、表-1に示した4つの設計法の概要を説明する。

2. 限界状態設計法

2.1 安全率を用いた設計法

設計には以下の不確実性があるとされている²⁾。

- (1)物理的不確実性 (2)モデルの不確実性
- (3)統計的不確実性 (4)ヒューマンエラー

これらの不確実性の説明を図-3に示す。現行の設計法で用いられている安全率は、上記の4つの不確実性をカバーすることはもちろん、設計法が対象とする構造物の要求性能、そして経済性など様々な内容を考慮して定められている。したがって、設計技術者はその指標を使った設計を行うことで、種々の要因を間接に考慮したことになる。現行の安全率はまさしく魔法の数字といえよう。

したがって、現行の安全率は容易に変更できない。厳密に言えば、構造形式が類似しているからといって、旧来の安全率を新しい構造形式にその

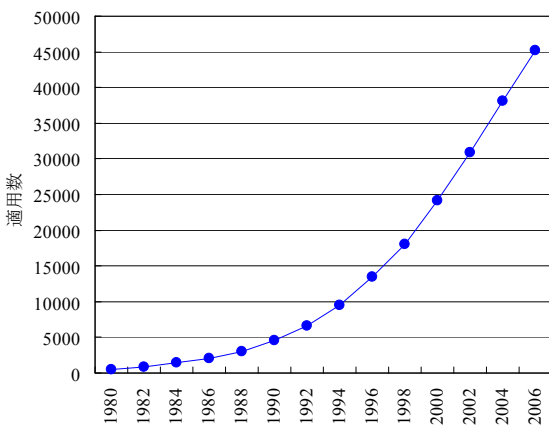


図-1 補強土壁の普及（落合¹⁾より）

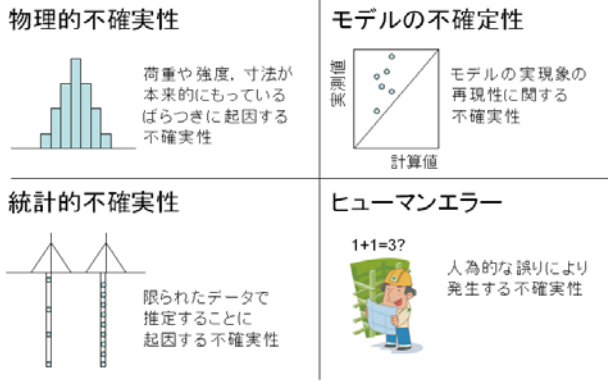


図-3 設計における各種不確実性

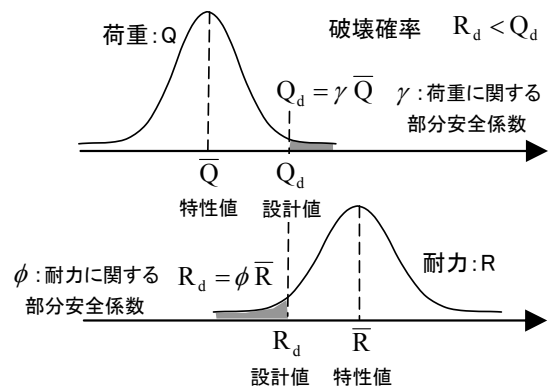


図-4 限界状態設計法の基本的な考え

表-2 限界状態設計法の発展の流れ (本城³⁾より)

年代	信頼性設計技術の発展	地盤工学における設計技術の発展
～1900	1826 : Navier / 許容応力度設計法(ASD)	
1900～ 1940	1926 : Mayer / 材料のばらつきの確率論的評価 1929 : Khotsialov / コンクリート強度の確率論的評価	1926 : Krey / 斜面に関する安全率 1.5, 支持力に関する安全率 2～3 を提案
1940～ 1960	1951 : Baldin / 限界状態設計法 ソ連や東欧で理論研究がさかんに。 その流れは米国, 西欧にも広がる。	1943 : Terzaghi / 安定問題と変形問題の区別 1948 : Taylor / c と phi に異なる材料安全率を提案 1953 : Hansen / 部分安全係数を用いた基礎設計
1960～ 1970	1964 : Freudenthal ら / 古典信頼性理論を集大成 1969 : Ang-Amin / 拡張信頼性理論	1965 : デンマーク / 部分係数に基づく設計基準
1970～	1973 : Detlevsen / 信頼性指標の不変性の考察 1974 : Hasfer-Lind / 安全性指標	1978 : 北欧 / 建築基礎の限界状態設計コード

まま適用することは難しい。構造物の重要度や調査・試験結果の質や量に応じて設計レベルを変化させることができる設計体系が待望される中、旧来の設計法を母船として限界状態設計法への移行が進められている。

2.2 限界状態設計法の基本概念

限界状態設計法の基本概念について図-4を用いて説明する。構造物に作用する荷重・耐力は、不確実性やばらつきの影響によって確定論的に評価することは難しい。限界状態設計法では、荷重・耐力を確率論的に扱い、破壊の危険性が許容値以下になるように設計する。破壊の危険性は設計荷重 Q_d が設計耐力 R_d を上回る確率：破壊確率として定義され、各設計値はそれぞれの特性値 \bar{Q} 、 \bar{R} (多くの場合は期待値) に部分安全係数をかけて評価される。各種部分安全係数は設計モデルの不確実性、荷重・耐力のばらつきの程度、構造物の目標信頼性の関数で表される。したがって、限界状態設計法は、個々の照査でどの部分でどの程度の余裕度をみているかについての説明性に優れている。また、不確実性やばらつきを技術上の努力で小さくすれば、それを設計に反映させやす

いという特徴を有している。

限界状態設計法のもうひとつの特徴は、設計の照査項目を、安定性や使用性のよう細分化していることである。構造形式が高度化し、要求性能が多岐に渡ると、設計の自由度が大きくなる。そのような場合、照査項目を細分化すると、より合理的な設計断面の採用が可能になる。建築分野ではこの考えで大きな成果が得られている⁴⁾。

信頼性設計技術と地盤工学分野の設計技術の発展を対比させたものを表-2に示す⁵⁾。複雑な力学挙動を示す地盤に関する設計技術は、信頼性設計法とは独自なかたちで高度化がなされた。その後、信頼性理論の基本的な部分が1980年くらいまでに完成し、信頼性設計の実務への適用性を可能にする要素技術の高度化と、説明性の高い設計を求める社会の変化によって、地盤工学分野でも表-1に示したような限界状態設計法への移行が進められている。最近では、安定性と使用性に加え、修復性や環境負荷特性など新しい限界状態を設計に取り組もうという動きも盛んになっている⁵⁾。

表-3 各限界状態設計法の対象

		英国	香港	北欧	北米	備考
補強形式	補強土壁	◎	◎	◎	◎	◎：金属補強材と高分子補強材両方 ○：金属補強材のみ ×：対象外
	補強盛土	◎	◎	◎	×	
	基礎の補強	◎	×	◎	×	
	自然斜面の補強	○	×	○	×	
盛土材	砂質土	○	○	○	○	○：適用可 ×：不可 -：記述無し
	粘性土	○	○	×	×	
	人工地盤材料	○	-	○	-	
壁面材	分割パネル	○	○	×	○	○：適用範囲 ×：範囲外
	一体パネル	○	○	×	○	
	巻き込み	○	○	○	○	
	鋼製型枠	×	○	○	○	
	セグメントブロック	×	○	○	○	

表-4 各限界状態設計法の安全性照査

考慮する破壊モード	英国	香港	北欧	北米	
滑動	○	○	○	○	
転倒	×	○	○	×	
支持力	○	○	○	○	
全体すべり	○	○	○	○	
複合破壊	×	○	○	×	

内的安定の照査法	英国	香港	北欧	北米	備考	
照査法	引抜け	◎	○	◎	●	◎：2種類の変形モードに対して照査 ○：単一の変形モードのみに対して照査 ●：鋼製補強材=2直線すべり、高分子補強材=直線
	破断	◎	○	◎	●	
解析法	すべり面 試行法	すべり面 試行法	すべり面 固定法	すべり面 固定法		
	すべり面 +2直線	すべり面 +2直線	直線	直線 or 2直線		

3. 補強土分野における限界状態設計法

3.1 諸外国の限界状態設計法

表-1に示した4つの限界状態設計法がどのようなものかを簡単にみることにしよう。各設計法の対象を表-3に示す。地盤補強技術は擁壁だけではなく、盛土、基礎地盤など多様な構造形式への応用が可能である。擁壁や盛土では、排水対策や地盤改良などを併用することで幅広い盛土材を用いることができる。諸外国では、それらをできるだけ包括しようという流れで設計法の整備がなされている。補強材は大きく鋼材と高分子材があるが、多くの設計法が両方を包括的に扱っている。現在、英国では適用範囲をさらに広げた設計法の改訂案が提案されている。ホームページで閲覧可能なので、一度アクセスしてみることをお勧めする (<http://drafts.bsigroup.com/>)。

設計で考慮される破壊モードや照査に用いる解析法の比較を表-4に示した。表中の用語が示す破壊モードについては図-1を参照されたい。設計法

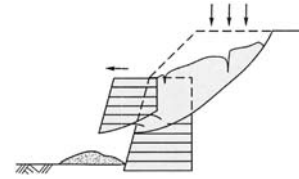


図-5 香港の設計で考慮する内的破壊と外的破壊の複合破壊モード

耐力係数アプローチ $R_d = \gamma R(X)$

材料係数アプローチ $R_d = R(X/F)$

R_d ：設計耐力
 X ：材料パラメータの特性値
 γ, F ：部分安全係数

図-6 設計耐力を評価するための2つのアプローチ

によって、照査する変形・破壊モードや解析の基本的な考え、仮定するすべり面の形状に違いが見られる。北米の設計法では、実大規模の補強土壁の実測結果をもとに、鋼製補強材と高分子補強材では異なる解析法を用いることになっている。

旧来の設計法では、図-1に示すように、補強領域の内的破壊と外的破壊を分けて検討することが一般的だった。香港と北欧の設計法では図-5に示すように、外的破壊と内的破壊の複合的な破壊まで考慮することになっている。

ISOの普及などで、国際整合性を有する設計法の確立が課題となっている。このような設計法の相違点についても今後検討する必要がある。

3.2 部分安全係数の比較

部分安全係数の設定法には図-6に示すように大きく2つの方法がある。米国では抵抗係数アプローチが、英国、北欧、香港で材料係数アプローチが採用されている。米国の設計法の部分安全係数を表-5に示す。抵抗係数アプローチの設計法では、この表に示す値を耐力の特性値にかけることになる。高分子材料の引張り強度の特性値は、製品基準強度にクリープ、耐薬品性、施工時の損傷などの影響を考慮して算定することを前提としている。高分子補強材の特性値は比較的低速のひずみ速度で評価される。そこで、地震時については補強材強度の特性値に1よりも大きな部分安全係数をかけることになっている。

英国、香港、北欧の設計法の部分安全係数を表-6、7に示す。材料係数アプローチの設計法では、ここに示す値で材料パラメータを除き、それ

表-5 耐力係数アプローチでの部分安全係数 (北米)

			部分係数
外的安定	支持力		0.8
	全体すべり		0.8
内定安定	引張り強度 (金属ストリップ)	常時	0.75
		組合せ荷重・地震時	1.00
	引張り強度 (金属グリッド)	常時	0.65
		組合せ荷重・地震時	0.85
	引張り強度 (ジオシンセティックス)	常時	0.90
		組合せ荷重・地震時	1.20
引抜き抵抗	常時	0.90	
	組合せ荷重・地震時	1.20	

表-6 材料係数アプローチでの部分安全係数

		英国	香港	北欧
終局限界	内部摩擦角	1.0	1.2	1.1
	粘着力	1.6	---	1.3
	非排水強度	1.0	1.0	1.2
	単位体積重量	1.0	1.0	1.0
使用限界	内部摩擦角	1.0	1.0	1.0
	粘着力	1.0	---	1.0
	非排水強度	1.0	1.0	1.0
	単位体積重量	1.0	1.0	1.0

表-7 材料係数アプローチでの補強効果の評価

		英国	香港	北欧
破断		1.0	1.0	1.0
相互作用	すべり	1.3	1.2	1.0
	引抜け	1.3	1.2	1.0

を用いて耐力を評価する。英国の設計法では粘着力のみに対して部分係数を考慮するが、北欧の設計法では、粘着力のみならず内部摩擦角、基礎地盤の非排水強度に対しても部分係数を考慮する。3つの設計法とも補強材の破断に関する部分係数は1としており、安全の余裕度は補強材の製品基準強度から特性値を見積もる際の強度低減係数で見込むことになっている。土と補強材の相互作用に関する部分係数に関して、粘性土の使用を認める英国、香港の設計法では2~3割程度の安全の余裕度を部分係数で確保することになっている。

ここに比較した部分安全係数は、信頼性解析の結果より、設計結果が旧来の設計法と大きく変化しないことを重視して算定された値であることに注意する。国や地域によって、土質条件や荷重条件が異なり、設計でどのように安全性の余裕度を見込むかの考え方が異なる。したがって、ここに示した値の違いは旧来の設計思想の違いが反映されたものと理解して良い。今後はデータを蓄積しながら、信頼性解析結果をもとに各種係数の見直しが慎重に検討されると思われる。わが国においても、限界状態設計法への移行を見据えた設計手

法の開発と統計解析のためのデータベースの構築に関する更なる検討が必要と思われる。

4. まとめ

諸外国で補強土壁の設計法が限界状態設計法に移行している現状と、その設計法の概要を説明した。補強土壁を構築する技術には、補強材の種類や壁面形式の組合せで種々のものがある。諸外国ではそれらを統一的に扱うスタイルで設計法が整備されている。限界状態設計法に移行するには、部分安全係数の妥当性をどのように検証するのかなど課題は多い。継続的な検討が必要である。

謝 辞

第1著者は、日本学術振興会科学研究補助金(基礎研究B、21360229)による補助を受けた。

参考文献

- 1) 落合英俊：Earth reinforcement technique a role of new geotechnical solutions –Memory of IS Kyushu. Proceedings of the International Symposium on Earth Reinforcement, IS-Kyushu 2007, Fukuoka, Kyushu, Japan, A.A. Balkema, pp. 1-23, 2007.
- 2) 星谷 勝、石井 清：構造物の信頼性設計法、鹿島出版会、1986.
- 3) 本城勇介：「基礎構造物の限界状態設計法と性能設計」講習会資料、地盤工学会、2000.
- 4) 神田 順：若き建築構造技術者に向けて－限界状態設計法の挑戦、建築技術、2004.
- 5) 土木学会：環境負荷低減型土木構造物設計ガイドライン、2001.

宮田喜壽*



防衛大学校 准教授、
博士(工)、土木研究センター
ジオテクニカル補強土工法普及委員会
特別専門委員
Dr. Yoshihisa MIYATA

中根 淳**



財団法人土木研究センター
地盤・施工研究部 主任研究員
Atsushi NAKANE