

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.955

March 2017

修正フェレニウス法を用いた円弧すべり照査の
レベル1信頼性設計法に関する基礎的研究

川俣秀樹・竹信正寛・宮田正史

A Basic Study of the Level 1 Reliability-based Design Method
of Circular Slip Failure Verification by Modified Fellenius' Method

Hideki KAWAMATA, Masahiro TAKENOBU, Masafumi MIYATA

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

修正フェレニウス法を用いた円弧すべり照査の レベル1信頼性設計法に関する基礎的研究

川俣秀樹*・竹信正寛**・宮田正史***

要 旨

「港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成19年）」では、修正フェレニウス法を用いた港湾構造物の円弧すべり照査について、レベル1信頼性設計法（部分係数法）が導入された。これは材料係数アプローチを用いた部分係数法によるものであり、地盤のせん断強度や単位体積重量など個別の設計因子の特性値に対して部分係数を乗じ、性能照査を行う設計法である。

現在、各設計因子の特性値をそのまま性能照査式に代入して求めた荷重項および抵抗項に対して部分係数を乗じる、荷重抵抗係数アプローチを用いた設計法に関する検討が進められており、円弧すべり照査においても、その検討の必要性が既往研究により示されている。

本研究の目的は、修正フェレニウス法を用いたレベル1信頼性設計法の円弧すべり照査に対して、荷重抵抗係数アプローチによる新たな部分係数を用いた設計法を提案することである。

具体的には、円弧すべりに関する設計法の変遷と運用実績をレビューし、現存する港湾構造物の円弧すべりの安全性と同程度の安全性を目標安全性水準として設定した。また、円弧すべりが設計断面決定において支配的である全国の設計事例を収集し、本研究の検討断面とした。そして、検討断面の有する安全性を数値的に評価するために参考とする目標安全性水準を求め、それに対応する破壊確率 P_f を、モンテカルロ・シミュレーション（MCS）を用いて計算し、目標破壊確率 P_{Tf} を設定した。次に、MCSを用いた信頼性解析を行い、目標破壊確率を満たす部分係数（荷重係数 γ_S 、抵抗係数 γ_R 、モデル化誤差に関する部分係数 $\gamma_{\Delta M}$ ）を求めた。最後に、提案設計法を適用できる基礎地盤構成の条件とともに、部分係数の使い分けについて取りまとめた。

キーワード：円弧すべり，修正フェレニウス法，部分係数法，信頼性解析，モンテカルロ・シミュレーション，モデル化誤差

* 港湾研究部 港湾施設研究室 交流研究員（パシフィックコンサルタンツ株式会社）
** 港湾研究部 主任研究官
*** 港湾研究部 港湾施設研究室 室長

A Basic Study of the Level 1 Reliability-based Design Method of Circular Slip Failure Verification by Modified Fellenius' Method

Hideki KAWAMATA*
Masahiro TAKENOBU**
Masafumi MIYATA***

Synopsis

The Level 1 reliability-based design method (partial factor design method) was introduced as a performance verification method for circular slip failure stability of port facilities, according to the Japanese design standard for port facilities in the “Technical Standards and Commentaries for Port and Harbor Facilities in Japan (2007).” The purpose of this study is to suggest a new design method for the Level 1 reliability-based design method on the Load and Resistance Factor Approach, instead of the Material Factor Approach, for the next circular slip failure verification method, and to readjust the target safety level for circular slip failure of port facilities in a permanent design situation.

First, we set the safety level equally with the stability of existing port facilities, by a review of design calculation documents of public port facilities.

Next, using Monte Carlo Simulation (MCS) for calculation of failure probability analysis, target failure probability P_{FT} is set to 1.08×10^{-2} .

Finally, we calculated the target failure probability as the result of reliability analysis using MCS, and we suggested a partial factor set based on Load and Resistance Factor Approach, load factor γ_S , resistance factor γ_R , and modeling error factor $\gamma_{\Delta M}$ with applicable condition of foundation ground.

Key Words : Circular slip failure, Modified Fellenius' method, Partial factor design method, Level 1 reliability design method, Monte Carlo simulation, Model error.

* Exchanging Researcher, Port Facilities Division, Port and Harbor Department, NILIM
(PACIFIC CONSULTANTS Co., Ltd.)

** Senior Researcher, Port and Harbor Department, NILIM

*** Head, Port Facilities Division, Port and Harbor Department, NILIM

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5019 Fax : +81-46-842-9265 e-mail: ysk.nil-kikaku@ml.mlit.go.jp

目 次

1. 序論	1
1.1 研究の目的・概要	1
1.2 研究のフロー	1
2. 目標安全性水準の検討	1
2.1 目標安全性水準設定の考え方	1
2.2 設計事例の収集	2
2.3 目標安全率の検討（目標安全性水準①）	3
2.4 目標破壊確率の検討（目標安全性水準②）	7
3. 部分係数の検討	12
3.1 検討方法とフロー	12
3.2 部分係数の計算結果	13
3.3 提案設計法の適用性	14
4. 結論	16
謝辞	17
参考文献	18
付録A 検討断面諸元	19
付録B 現行設計法の部分係数表	39
付録C 最小すべり円弧の位置・形状の検討	42
付録D モンテカルロ・シミュレーション結果図（目標安全率 $F_{SF}=1.25$ 断面の破壊確率計算）	47
付録E モンテカルロ・シミュレーション結果図（目標破壊確率 $P_{FJ}=1.08 \times 10^{-2}$ を満たす部分係数の計算）	61
付録F 目標安全率 $F_{SF}=1.23, 1.21$ とした場合の計算	75
付録G モデル化誤差をまとめた場合の部分係数	79
付録H 部分係数計算結果一覧	80

1. 序論

1.1 研究の目的・概要

「港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成19年）」¹⁾（以下、現行基準・同解説という）では、修正フェレニウス法を用いた港湾構造物の円弧すべり照査について、レベル1信頼性設計法（部分係数法）が導入された（以下、現行設計法という）。現行設計法による部分係数法は、材料係数アプローチに基づく部分係数法であり、地盤のせん断強度や単位体積重量など多くの設計因子の特性値に先に部分係数を乗じて、性能照査を行う方法である²⁾。現在、設計法全般に関する検討が進められており、部分係数法についても、国土交通省港湾局「港湾技術基準の改訂方針」³⁾にて、荷重抵抗係数アプローチによる部分係数法への移行の方向性が示されている。円弧すべり照査についても、これに基づき設計法の検討が必要であると考えられる。

川俣ら⁴⁾は、現行設計法である部分係数法と、現行設計法より前の設計法である安全率法（以下、旧設計法という）を用いて、仮想断面の安定性照査および照査を満足する最小断面の探索を行うことにより、現行設計法と旧設計法の安全性の差異の程度を示した。その結果、現行設計法によって最小となる断面諸元を決定した場合、旧設計法の適用実績に照らすと危険な断面を許容する可能性が示され、材料係数法アプローチによる部分係数法から荷重抵抗係数アプローチによる部分係数法への移行など、新たな設計法を提案することの必要性を示した。

これらを踏まえて、本研究では、現行設計法によるレベル1信頼性設計法の円弧すべり照査法（修正フェレニウス法）に関する検討を行い、荷重抵抗係数アプローチに基づく新たな部分係数を提案する（以下、提案設計法という）。具体的には、実設計事例等から円弧すべり照査において目標とする安全性水準を再設定し、それに対応した部分係数を設定する。

1.2 研究のフロー

本研究のフローを図-1.1に示す。まず、第2章の2.1節において、提案設計法における目標安全性水準の再設定に対する基本的な考え方を整理する。次に2.2節において、本研究の円弧すべり計算およびモンテカルロ・シミュレーション（以下、MCSという）による信頼性解析に用いる検討断面として、現行設計法および旧設計法によって設計された施設の中から、基礎地盤の円弧すべり照査が、設計断面決定において支配的である事例を収集し、それらを本研究の検討断面とする。その後2.3節において、検

討断面を対象として、現行設計法および旧設計法によって耐力作用比 R_d/S_d および安全率 F_S を求め、目標安全率 F_{ST} （目標安全性水準①）を設定する。次に2.4節において、MCSを用いた破壊確率計算により、目標安全率 F_{ST} を満たす断面の破壊確率 P_f を求め、目標破壊確率 P_{fT} （目標安全性水準②）を設定する。

最後に第3章において、目標破壊確率 P_{fT} を満たす部分係数を、MCSを用いた信頼性解析によって求め、提案設計法として取りまとめる。

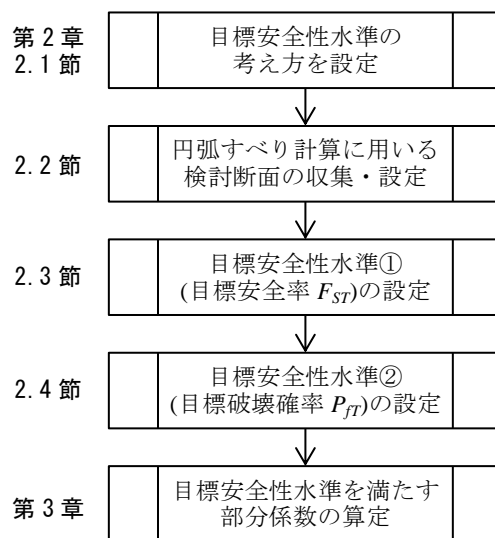


図-1.1 本研究のフロー

2. 目標安全性水準の検討

第2章では、部分係数を求めるための信頼性解析において目標安全性水準とする目標破壊確率 P_{fT} を設定する。そのために、目標安全性水準の設定の考え方、検討断面の設定、目標安全率 F_{ST} の設定、目標破壊確率 P_{fT} の設定の順に検討していく。

2.1 目標安全性水準設定の考え方

(1)旧設計法，現行設計法の目標安全性水準

旧設計法では、考える施設の破壊モード（滑動，転倒，支持力，等）について、耐力と作用の比である安全率を求め、満たすべき許容安全率を設定することで、目標安全性水準としていた。この時、設計時に求める安全率と目標安全性水準である許容安全率はともに“安全率”という同一の指標であるため、施設の性能照査結果が目標安全性水準からどれほど乖離しているかが明確であった。

一方、現行設計法の修正フェレニウス法による円弧すべり照査における目標安全性水準は、施設破壊時の施設復旧費用と迂回費用を合わせた期待総費用最小化（ライ

フサイクルコスト最小化ではない)を実現させる目標破壊確率 P_{JT} として設定された^{5,6)}。また現行設計法は、特性値に部分係数を乗じた設計値により求めた耐力作用比を用いて照査している。そのため、現行設計法と旧設計法では目標とする安全性水準の考え方、およびその指標が異なる。

(2)安全性水準の運用実績

全国港湾施設の設計、性能照査の実績を見ると、現行設計法において部分係数が設定されている構造形式については、部分係数を用いて耐力作用比 $R_d/S_d \geq 1.0$ であることが照査されている。また、部分係数が設定されていない構造形式については構造解析係数 $\gamma_a=1.3$ を用いて耐力作用比 $R/(\gamma_a \cdot S) \geq 1.0$ であることが照査されている。

旧設計法(安全率法)については、修正フェレニウス法によって求められる安全率が、一律1.3以上であることが標準とされて来た。ただし、全国港湾の運用実績として、粘性土主体の地盤では1.3以上、粘性土と砂質土の互層では1.2以上、砂質土主体の地盤では1.1以上というような許容安全率の設定がなされた例が数多くある。

(3)安全性水準に関する技術者からの意見

現行設計法に関する技術者からの主要な意見として、旧設計法において安定性の問題がなかった断面について、現行設計法で照査すると著しく安定性が不足する結果になることがあるという意見が挙げられている⁷⁾。

(4)性能照査式の計算精度

また、性能照査式自体の精度について、大竹ら⁸⁾は、国内の社会基盤施設設計に関する主要な設計基準の設計計算法のモデル化誤差(設計計算モデルの精度)を包括的に整理し、*bias*(計測値に対する計算値の偏り)と変動係数を指標とした取りまとめを行っている。その中で、Wu et al.⁹⁾、Matsuo et al.¹⁰⁾、Wu¹¹⁾のデータ、知見より、斜面安定解析(円弧すべり計算)は他の設計計算法と比較して極めて小さいモデル化誤差であることを示している。ここで示されている設計計算モデルは、港湾構造物の設計法においては特性値を用いた旧設計法に該当するため、旧設計法による性能照査は、既往の研究により十分妥当性が示されていると言える。

(5)安全性水準の設計法間比較検討

川俣ら⁴⁾の検討では、現行設計法で設計された仮想断面の安全率が重力式岸壁で1.1~1.3、混成堤で1.0~1.3と従来の運用実績と比較して、同程度か、より小さい範囲に

広くばらついており、旧設計法と比較して、過小な設計となる場合があることを確認している。また、現行設計法と旧設計法では求められる最小すべり円弧の位置・形状が異なり(例示されたケースでは、現行設計法による最小すべり円弧において、岸壁の沖側に広く、また地中深く広がった)、単位長あたりの起動モーメント、抵抗モーメントの分布も、現行設計法と旧設計法で異なる傾向にあることを確認している。

(6)提案設計法の目標安全性水準の設定方法

以上のような状況を踏まえ、本研究では、特性値を用いた円弧すべり照査によって求められる安全率を基本とした目標安全性水準を再設定する。ただし、旧設計法の許容安全率 $F_S \geq 1.3$ を踏襲するのではなく、現行設計法および旧設計法による設計事例の中で、円弧すべり照査が設計断面決定において支配的な設計断面(2.2節にて設定)の安全率を俯瞰し、永続状態における目標安全性水準の値(①, ②)を設定する。

はじめに、破壊確率 P_f を評価するうえで参考とする目標安全率 F_{ST} (目標安全性水準①)を求める(2.3節)。次に、MCSを用いた信頼性解析によって部分係数を求めるための、目標安全率 F_{ST} に対応する目標破壊確率 P_{JT} (目標安全性水準②)を求める(2.4節)。

2.2 設計事例の収集

(1)収集の目的

基礎地盤の円弧すべりは、永続状態に対してのみ照査を行うため、変動状態(地震時等)と異なり、「設計・施工した港湾構造物が沈下・傾斜することなく安定している」ことが、照査の妥当性を示していると考えられる(施工後の圧密沈下を除く)。そのため、旧設計法および現行設計法で設計された施設が持つ安全性を数値化し、提案設計法の性能照査で担保すべき安全性の最低ライン(図-2.1)、つまりは目標安全性水準とすることを考える。

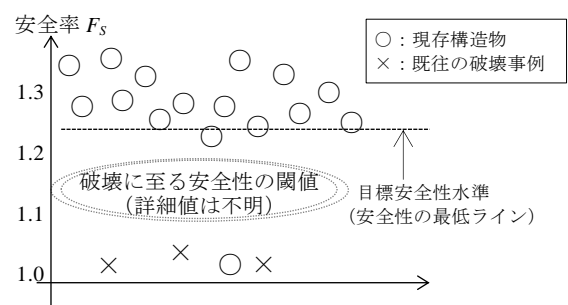


図-2.1 収集事例による目標安全性水準設定のイメージ

表-2.1 検討断面の選定条件

項目	選定条件	条件の設定理由
基礎地盤構成	サンドコンパクションパイル (SCP) 工法や、深層混合処理工法 (CDM) による地盤改良がなされていない。ただし、ペーパードレーン工法等、それ自体には抵抗力を期待しない、基礎地盤の土質を変更しないものは許容する。	当該地盤改良がなされている断面は、現行設計法において照査式が異なるためである (SCP の場合)。また、想定するすべり円弧形状と大きく異なるためである (CDM の場合)。
断面形状	設計図面の奥行き方向に一様でない堤頭部、隅角部は除外する。	断面的なすべり問題を扱うため、ある程度の奥行き方向距離で一定の断面形状を有している必要がある。
性能照査	①性能照査結果が満たすべき閾値 (耐力作用比, 安全率等) を小さい値で満たしている。また、円弧すべり照査結果が断面形状決定に支配的である。	永続状態での円弧すべり破壊の閾値にできるだけ近い設計事例を収集する必要がある。
	②安全率法で照査している場合、1.3 より小さい値を照査の許容安全率としている。	①と同じ
	③設計事例の照査結果を本研究にて再現できる。結果が大きく異なる場合は除外する。	詳細な計算条件が設計資料に記載されていない場合がある。

工学的には安全性の閾値に対して安全側、危険側の両方から検討を行うべきと考えられるが、危険側を表す破壊事例 (図-2.1×印) の記録が少ないため、本研究は安全側からのみ検討を行っていく。今後危険側 (破壊事例、破壊実験等) が十分に集まれば、より精緻な検討が可能となり、設計法の改良に資すると考えられる。

ここでは、目標安全性水準設定、および円弧すべりの信頼性解析に用いる検討断面の設定を目的とする。具体的には、全国港湾施設の設計事例を多数収集した中で円弧すべり照査が設計断面決定において支配的である断面をできるだけ多く収集する。

(2) 収集方法

平成11年以降に現行設計法および旧設計法により全国で設計された、約1100の港湾施設の設計に関する資料を対象とする。後述する条件に適合する断面を抽出収集するが、主な条件は「新設・改良設計の断面決定において、円弧すべり照査が支配的であるもの (円弧すべりの安全率 F_s 、あるいは耐力作用比 R_d/S_d が小さい値で照査を満足している)」である。その他詳細な選定条件は表-2.1に示す。これら条件に適合する設計事例を本研究の検討断面とする。

(3) 収集結果

収集の結果、円弧すべり照査を実施している設計資料の中から14事例が選定条件に適合したため、これらを本研究の検討断面とする。各検討断面の構造形式や基礎地盤構成、その他諸元の概要を以下に示す。

14の断面を構造形式別に見ると、ケーソン式の混成堤が4件、消波ブロック被覆堤が2件、緩傾斜捨石堤が1件、消波ブロック被覆重力式護岸が1件、コンクリート擁壁を伴った緩傾斜捨石護岸が2件 (同一施設の異なる工区)、

ケーソン式岸壁が3件、矢板式の栈橋土留が1件である。

基礎地盤構成別に見ると、表層に砂質土地盤、下層に粘性土地盤があり、その上に捨石マウンドや本体工を設置した構造が7件と多く、粘性土地盤上に捨石マウンド・本体工を設置した構造が4件、ほとんど、あるいはすべてが砂質土である地盤上に捨石マウンド・本体工を設置した構造が3件であった。

また、現行設計法で設計されたものが11件、旧設計法で設計されたものが3件であった。これら各断面の概要を表-2.2に、詳細については付録Aに取りまとめる。

2.3 目標安全率の検討 (目標安全性水準①)

(1) 検討の目的

本節では、検討断面の持つ安全性を統一した指標で評価するため、各検討断面に対して修正フェレニウス法を用いた照査を行い、円弧すべりの安全率 F_s を求める。全検討断面の安全率 F_s を俯瞰し、目標安全率 F_{ST} (目標安全性水準①) を設定する。

ここでは、特性値によって求めた起動モーメントと抵抗モーメントは R 、 S 、部分係数を乗じた設計用値によって求めた起動モーメントと抵抗モーメントを R_d 、 S_d と表記する。また、旧設計法である安全率法と、現行設計法である部分係数法のいずれにおいても起動モーメントと抵抗モーメントの比を照査のパラメータとして求めるが、安全率法により求めた値、部分係数法により求めた値をそれぞれ“安全率 F_s ”、“耐力作用比 R_d/S_d ”と表記する。

表-2.2 本研究の検討断面

施設	構造形式	照査方法	すべり円弧上の地盤構成 (層厚[m])
A 防波堤	混成堤	部分係数法	捨石マウント (5.0) + 砂質土表層 (3.5) + 粘土下層
B 防波堤	混成堤	部分係数法	捨石マウント (1.6) + 置換石 (4.4) + 粘土層下層
C 防波堤	混成堤	部分係数法	捨石マウント (4.8) + 砂質土表層 (1.5) + 粘土下層
D 防波堤	混成堤	部分係数法	捨石マウント (3.5) + 砂質土表層 (8.4) + 粘土下層
E 防波堤	消波工被覆堤	安全率法	捨石マウント (7.0) + 砂質土表層 (9.0) + 粘土下層
F 防波堤	消波工被覆堤	部分係数法	捨石マウント (4.9) + 粘土表層
G 防波堤	緩傾斜捨石堤	安全率法 ※ $\gamma_a=1.3$	本体捨石 (3.7) + 粘土表層 ※部分係数がない構造形式のため、実質的な安全率法
H 護岸	緩傾斜護岸	部分係数法	埋土 (砂) (5.8) + 砂質土表層 (2.5) + 粘土下層
I 護岸	緩傾斜護岸	部分係数法	埋土 (砂) (5.7) + 砂質土表層 (3.2) + 粘土下層
J 護岸	重力式護岸	安全率法	埋土 (砂) (7.0) + 捨石マウント (9.0) + 粘土表層
K 岸壁	重力式岸壁	部分係数法	埋土 (砂) (1.7) + 裏込石 (11.9) + 砂質土表層 (3.0)
L 岸壁	重力式岸壁	部分係数法	埋土 (砂) (1.7) + 裏込石 (11.9) + 砂質土表層 (3.0)
M 岸壁	重力式岸壁	部分係数法	裏込石 (13.6) + 捨石マウント (2.1) + 粘土表層 + 砂質土下層
N 岸壁	栈橋土留部 (矢板式)	部分係数法	砂質土表層 + 粘土下層

(2) 検討方法

① 検討のフロー

目標安全率を設定する検討のフローを図-2.2に示す。2.2節で設定した検討断面について、安全率 F_S および耐力作用比 R_d/S_d を求める。これは設計資料の再現性確認も兼ねている。

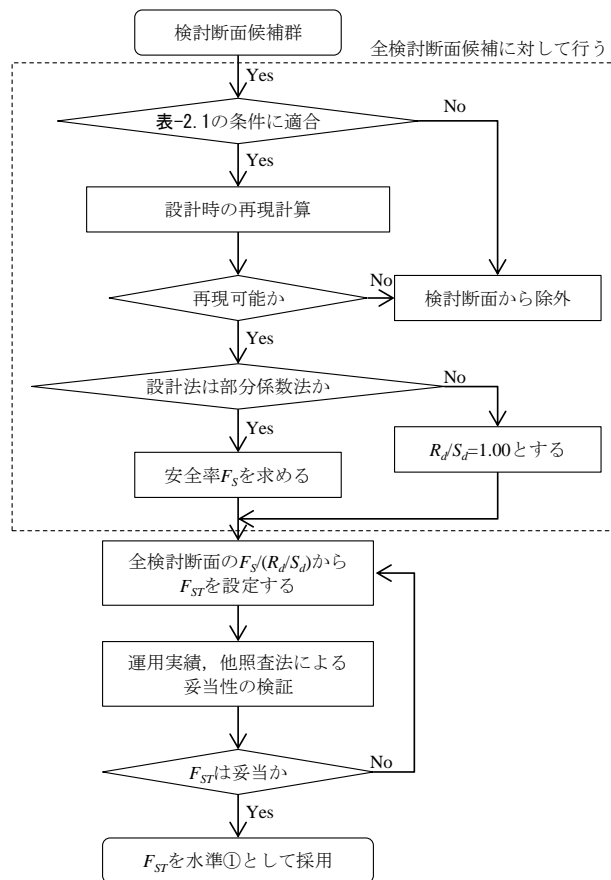


図-2.2 目標安全率 F_{ST} の設定フロー

目標安全率設定の判断材料として、ここではふたつの値を求める。ひとつは、安全率法で照査した安全率 F_S である。もう一方は、安全率 F_S を、部分係数法の耐力作用比 R_d/S_d で割った値、 $F_S/(R_d/S_d)$ である。前者は各検討断面のそれぞれ異なる耐力作用比(断面により1.01や1.04など)に対応しているのに対し、後者は耐力作用比 $R_d/S_d=1.00$ ちょうどに対応する安全率を便宜的に用いている。設計資料の性能照査方法が安全率法である場合には $R_d/S_d=1.00$ とする。

これらの計算結果を俯瞰し、構造形式や地盤構成を加味して目標安全率 F_{ST} (目標安全性水準①)を設定する。また、設定した F_{ST} について、全国港湾の円弧すべり照査の運用実績値や他の円弧すべり照査法である簡易ビショップ法、土田の方法¹²⁾によるチェックを行い、妥当性の検証を行う。

② 性能照査式

本研究で用いる円弧すべり照査式を示す。修正フェレニウス法は安全率計算、MCSによる破壊確率計算、部分係数の計算に用いる。簡易ビショップ法、土田の方法¹²⁾は目標安全率の妥当性検証に用いる。

1) 修正フェレニウス法

修正フェレニウス法による抵抗モーメント R 、起動モーメント S 、安全率 F_S 、耐力作用比 R_d/S_d の計算式をそれぞれ式(1)~(4)に示す。各設計パラメータの表す意味は表-2.3、図-2.3に示す。なお、部分係数法では、現行設計法の円弧すべりに関する部分係数(付録B)を用いて検討を行った。

$$R = \sum\{cl + (W' + q) \cos^2 \theta \tan \phi\} \sec \theta \quad (1)$$

$$S = \sum(W + q) \sin \theta + \frac{a}{r} \sum P_H \quad (2)$$

$$F_S = R/S \quad (3)$$

$$R_d/S_d = \frac{\sum\{c_d l + (W'_d + q_d) \cos^2 \theta \tan \phi_d\} \sec \theta}{\gamma_a \{\sum(W_d + q_d) \sin \theta + \frac{a}{r} P_{Hd}\}} \quad (4)$$

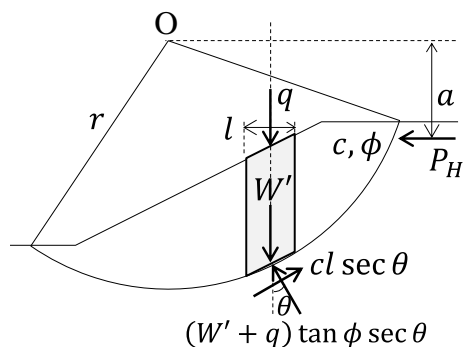


図-2.3 分割片に作用する力, 物理量

表-2.3 修正フェレニウス法の設計パラメータ

記号	
F_s	: 安全率
R_d/S_d	: 耐力作用比
γ_a	: 構造解析係数 (現行設計法において部分係数が提案されている構造形式の場合 1.0, 他は 1.3)
c, c_d	: 粘着力[kN/m ²] $c_d = \gamma_c \times c$
ϕ, ϕ_d	: せん断抵抗角[°] $\phi_d = \tan^{-1}(\gamma_{\tan \phi} \times \tan \phi)$
W', W'_d	: 単位長さ当たりの分割片の有効重量[kN/m] $W'_d = \gamma_{W'} \times W'$
W, W_d	: 単位長さ当たりの分割片の全重量[kN/m] $W_d = \gamma_W \times W$
θ	: 分割片底面が水平面となす角[°]
l	: 分割片の幅[m]
r	: 円弧すべりのすべり円の半径[m]
a	: P_H の作用位置の円弧すべりのすべり円中心からの腕の長さ[m]
q, q_d	: 分割片上部からの鉛直作用[kN/m] $q_d = \gamma_q \times q$
P_H, P_{Hd}	: 円弧すべりのすべり内の土塊への水平作用[kN/m] $P_{Hd} = \gamma_{P_H} \times P_H$

2) 簡易ビショッフ法

簡易ビショッフ法の照査式を式(5)に示す。照査パラメータ F_f が収束するまで繰り返し計算を行い、最終的な値(安全率) $F_f \geq 1.0$ により照査を行う。表-2.4には表2.3に示されていない設計パラメータを示す。

$$\gamma_{F_f} F_f = \frac{\sum \left\{ \frac{[c_d l + (W'_d + q_d) \cos^2 \theta \tan \phi_d] \sec \theta}{1 + \tan \theta \tan(\beta \theta)} \tan \phi_d / (\gamma_{F_f} F_f) \right\}}{\sum \{(W_d + q_d) \sin \theta + \frac{a}{r} P_{Hd}\}} \quad (5)$$

表-2.4 簡易ビショッフ法の設計パラメータ

記号	
γ_{F_f}	: 解析手法に関する部分係数 (安全率法の場合 $\gamma_{F_f}=1.0$)
F_f	: 照査パラメータ, 安全率

3) 土田の方法

土田の方法の照査式を式(6)~(8)に示す。詳細については後述する。照査パラメータ F_f が収束するまで繰り返し計算を行い、最終的な値(安全率) $F_f \geq 1.0$ により照査を行う。

$$\gamma_{F_f} F_f = \frac{\sum \left\{ \frac{[nc_d l + (W'_d + q_d) \cos^2 \theta \tan \phi_d] \sec \theta}{n + \{\tan \theta - \tan(\beta \theta)\} \tan \phi_d / (\gamma_{F_f} F_f)} \right\}}{\sum \{(W_d + q_d) \sin \theta + \frac{a}{r} P_{Hd}\}} \quad (6)$$

$$n = 1 + \tan \theta \tan(\beta \theta) \quad (7)$$

$$\beta = 1/3.5 \quad (8)$$

③ 使用プログラムと計算ケース

本研究では、市販ソフトウェアおよび本検討用に構築したプログラム(R言語¹³)により構築、以下、検討用プログラムという)を使用する。市販ソフトウェアは設計資料の再現性検証、簡易ビショッフ法、土田の方法を用いた妥当性検証に使用する。本検討用プログラムは、安全率計算、MCSを用いた信頼性解析(破壊確率計算、部分係数の計算)に使用する。設計資料の再現計算、目標安全率の検討計算、妥当性の検証計算でそれぞれ実施した計算ケース一覧を表-2.5に示す。

表-2.5 計算ケース一覧

検討断面	設計資料の照査方法	再現計算		検討計算		検証計算	
		安	部	安	部	B	土
A 防波堤	部分係数法	○	○	○	○	○	○
B 防波堤	部分係数法	○	○	○	○	○	○
C 防波堤	部分係数法	○	○	○	○	○	○
D 防波堤	部分係数法	○	○	○	○	○	○
E 防波堤	安全率法	○	○	○	○	○	○
F 防波堤	部分係数法	○	○	○	○	○	○
G 防波堤	安全率法	○	○	○	○	○	○
H 護岸	部分係数法	○	○	○	○	○	○
I 護岸	部分係数法	○	○	○	○	○	○
J 護岸	安全率法	○	○	○	○	○	○
K 岸壁	部分係数法	○	○	○	○	○	○
L 岸壁	部分係数法	○	○	○	○	○	○
M 岸壁	部分係数法	○	○	○	○	○	○
N 岸壁	部分係数法	○	○	○	○	○	○
検討用プログラム(R)				○	○		
市販ソフトウェア		○	○			○	○

※ 安: 安全率法(旧設計法)
部: 部分係数法(現行設計法)
B: 簡易ビショッフ法
土: 土田の方法

④修正フェレニウス法による安全率の計算結果

修正フェレニウス法による安全率 F_S の計算結果を表-2.6に示す。全検討断面の平均値は $F_S=1.23$ である。G防波堤は純粋な粘性土地盤上の緩傾斜捨石堤、N岸壁は栈橋部の上載荷重に耐えうる設計であり、それぞれ1.30、1.35と大きめの安全率となっている。それらを除いた12断面のうち、最大値は $F_S=1.25$ である。F防波堤は $F_S=1.29$ で1.25を上回るものの、 $F_S/(R_d/S_d)=1.23$ で1.25を下回る。以上より、本検討で用いた検討断面と一般的な断面の差異の余裕分を考慮して、 $F_{ST}=1.25$ を目標安全率とする。なお、構造形式によって安全率値に若干の大小傾向が見られるものの、明確ではないため、構造形式による目標安全率の別個設定は行わないこととする。

表-2.6 修正フェレニウス法による安全率 F_S ，耐力作用比 R/S ， $F_S/(R_d/S_d)$ の計算結果

検討断面	照査方法	F_S	R/S	$F_S/(R_d/S_d)$
A 防波堤	部分係数法	1.19	1.00	1.19
B 防波堤	部分係数法	1.18	1.01	1.17
C 防波堤	部分係数法	1.19	1.05	1.13
D 防波堤	部分係数法	1.13	1.01	1.12
E 防波堤	安全率法	1.22	(1.00)	1.22
F 防波堤	部分係数法	1.29	1.05	1.23
G 防波堤	安全率法	1.30	(1.00)	1.30
H 護岸	部分係数法	1.25	1.02	1.22
I 護岸	部分係数法	1.25	1.03	1.22
J 護岸	安全率法	1.20	(1.00)	1.20
K 岸壁	部分係数法	1.23	1.03	1.20
L 岸壁	部分係数法	1.20	1.02	1.18
M 岸壁	部分係数法	1.22	1.00	1.22
N 岸壁	部分係数法	1.35	1.03	1.32
平均値		1.23	-	1.21

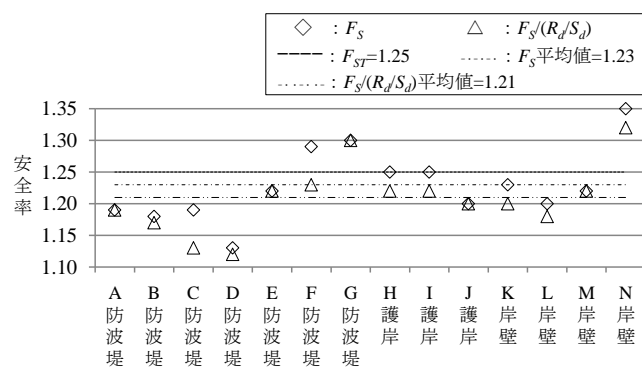


図-2.4 修正フェレニウス法による安全率 F_S ，耐力作用比 R_d/S_d ， $F_S/(R_d/S_d)$ の計算結果

(3) 目標安全率の妥当性の検証

① 既往安全性水準の運用実績

2.1節で述べたように、昭和42年版「港湾構造物設計基準」や昭和54年版から平成11年版¹⁴⁾までの「港湾の施設

の技術上の基準・同解説」では、修正フェレニウス法を用いた円弧すべり照査の許容安全率は1.3で設定されてきた。ただし、全国の港湾では過去の知見や地域特性に基づいて個別に許容安全率を設定している場合がある。例えば表-2.7のように、基礎地盤の地盤構成に応じて設定されており、この場合には、修正フェレニウス法による照査と併せて簡易ビショップ法による照査を行い、簡易ビショップ法の安全率1.3以上を確保するものとしている。別な例として、上部に砂層がある多層地盤に対して「修正フェレニウス法で1.1以上、かつ修正フェレニウス法とビショップ法の平均値で1.2以上（ただし、内部摩擦角 $\phi=30^\circ$ 以上の砂層はすべて $\phi=30^\circ$ に置き換える）」や、「修正フェレニウス法で1.0以上、かつ修正フェレニウス法とビショップ法の平均値で1.3以上」とした運用例もある。

そのため、本研究の検討断面が従来設計法にて設定されている修正フェレニウス法での安全率1.3を下回っていたとしても、簡易ビショップ法による安全率、あるいは修正フェレニウス法と簡易ビショップ法の安全率の平均値が1.3を上回れば、過去の実績と照らし合わせ、安全性に問題がないと考えられる。

表-2.7 円弧すべりの許容安全率の運用例

条件	修正フェレニウス法	ビショップ法
円弧の大部分が砂層を切る	1.1以上	1.3以上
砂層と粘性土層の互層	1.2以上	1.3以上
円弧の大部分が粘性土層を切る	1.3以上	

② 既往水準との比較

本研究の検討断面の基礎地盤構成は、そのほとんどが表-2.7「修正フェレニウス法」の互層（安全率1.2以上）、砂層（安全率1.1以上）に該当している。そのため、過去の実績と照らし合わせれば、目標安全率 $F_{ST}=1.25$ という値は、決して低い値ではないと考えられる。

③ 簡易ビショップ法，土田の方法による検証

土田¹²⁾は、水平に近い砂質土地盤において荷重が鉛直に作用するような事例に対して、簡易ビショップ法による照査では安全率，耐力作用比が過大に与えられる問題や、基礎地盤がすべて砂質土または厚い砂質土の表層と粘性土層の下層の組み合わせの地盤に対して、修正フェレニウス法では安全率を過小に評価する問題に対応するため、新たな円弧すべり解析法を提案している。土田の方法は、浅い基礎の支持力公式において、塑性理論から求めた解析解（Prandtl解）と同等の支持力係数を求めることができるよう係数を定めており、円弧すべり破壊

事例の再現計算や小林¹⁵⁾の弾塑性有限要素解析による安全率と近い結果を出すことから、砂質土が多い地盤において安全率や支持力を精度よく求めることのできる方法として提案されている。また、求められる安全率の値は、修正フェレニウス法と簡易ビショップ法のほぼ中間の値を取る。

表-2.7の例では簡易ビショップ法で安全率1.3以上を確保することが修正フェレニウス法での許容安全率を低く設定する条件であるが、土田の方法でも安全率1.3以上を確保できれば、修正フェレニウス法で設定した目標安全率 $F_{ST}=1.25$ の妥当性をより確かに示すことができると考えられる。

表-2.8、図-2.5に、修正フェレニウス法、簡易ビショップ法、土田の方法で照査した安全率の値と、修正フェレニウス法と簡易ビショップ法の安全率の平均値をそれぞれ示す。先に述べた各照査式の特徴により、安全率の値は「修正フェレニウス法<修正フェレニウス法と簡易ビショップ法の平均値<土田の方法<簡易ビショップ法」となっている。修正フェレニウス法と簡易ビショップの平均値では1断面（J護岸）を除いて、土田の方法は全ての検討断面について、安全率1.3以上を満たしている。

以上の「②既往水準との比較」から、本研究の検討断面は過去運用されてきた安全性を持つ施設と同等か、それ以上の安全性を有していると考えられる。また、これらの検討断面から設定した「修正フェレニウス法で求めた目標安全率 $F_{ST}=1.25$ 」に対する「③簡易ビショップ法、土田の方法による検証」における計算でも過去実績以上の安全性が確認できたことから、目標安全率の設定は妥当であると考えられる。

ただし、以上取りまとめた過去の運用実績および本研究の検討断面は砂質土地盤または互層地盤という条件があるため、本研究で設定される提案設計法についても、同様の適用条件が必要であると考えられる。

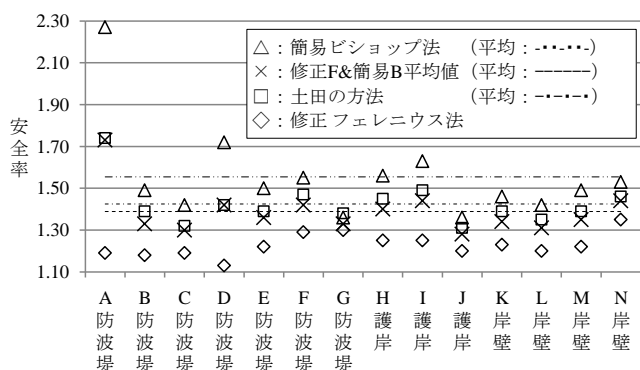


図-2.5 簡易ビショップ法、土田の方法による安全率

2.4 目標破壊確率の検討（目標安全性水準②）

(1) 検討の目的とフロー

本節では、目標破壊確率 P_{JT} （目標安全性水準②）の設定方法について検討した後、2.3節で設定した目標安全率 $F_{ST}=1.25$ に対応する破壊確率 P_f を求め、MCSを用いた信頼性解析によって部分係数を求めるための目標破壊確率 P_{JT} を設定する。本節の検討フローを図-2.6に示す。

表-2.8 簡易ビショップ法、土田の方法による安全率

検討断面	修正 F	簡易 B	F・B 平均値	土田
A 防波堤	1.19	2.27	1.73	1.74
B 防波堤	1.18	1.49	1.33	1.39
C 防波堤	1.19	1.42	1.30	1.32
D 防波堤	1.13	1.72	1.42	1.42
E 防波堤	1.22	1.50	1.36	1.39
F 防波堤	1.29	1.55	1.42	1.47
G 防波堤	1.30	1.36	1.33	1.38
H 護岸	1.25	1.56	1.40	1.45
I 護岸	1.25	1.63	1.44	1.49
J 護岸	1.20	1.36	1.28	1.31
K 岸壁	1.23	1.46	1.34	1.39
L 岸壁	1.20	1.42	1.31	1.35
M 岸壁	1.22	1.49	1.35	1.39
N 岸壁	1.35	1.53	1.44	1.46
平均値	1.23	1.55	1.39	1.43

※修正 F： 修正フェレニウス法の安全率
 簡易 B： 簡易ビショップ法の安全率
 F・B 平均値： 修正フェレニウス法と簡易ビショップ法の安全率の平均値
 土田： 土田の方法

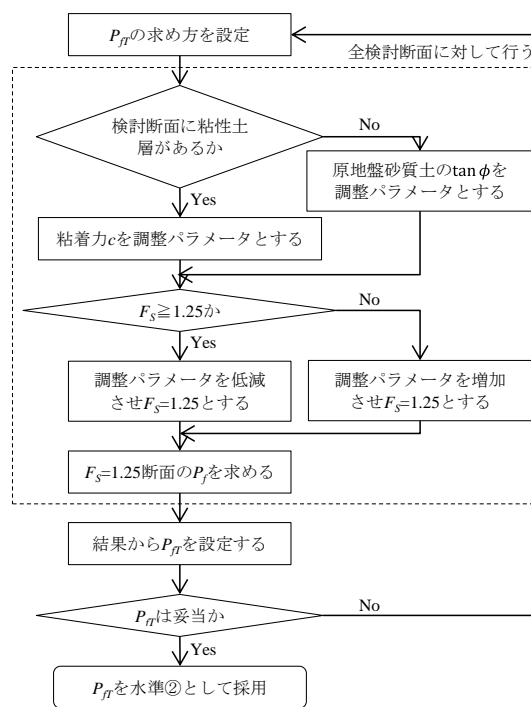


図-2.6 目標破壊確率 P_{JT} の設定フロー

(2) 目標安全率を満たす計算断面の作成

MCSを行うための、目標安全率 $F_{ST}=1.25$ を満たす断面データを表-2.2に示す14事例の検討断面をもとに作成する。最小すべり円弧の安全率が目標安全率 F_{ST} を満たすには、以下に挙げられるような断面諸元、各土層の寸法や物性値を調整する必要がある。

- ・ 構造物、土層の寸法（堤体幅・高さ、土層の厚さ、等）
- ・ 構造物、土層の単位体積重量 γ
- ・ 構造物、土層上に作用する上載荷重 q
- ・ 海水面高および残留水位面高
- ・ 施工した土層（石材、置換砂層等）の内部摩擦角 ϕ
- ・ 原地盤粘性土の粘着力 c
- ・ 原地盤砂質土の内部摩擦角 ϕ

これらのうち、いずれの項目を調整しても、現存構造物とは異なる“仮想断面”であるが、設計事例ごとにばらつきの大きい物性値を選び、そのばらつきの範囲内で調整することで、できる限り現実に有り得る条件で検討できると考えられる。例えば、構造物の寸法は厳密に出来形管理されるものであり、人工的に設置した石材や置換砂層の内部摩擦角 ϕ は一般的な設計用値が設定されている。一方、原地盤強度（粘性土の粘着力 c 、砂質土の内部摩擦角 ϕ ）は設計事例ごとに値が大きく異なり、物理試験結果も他の項目と比較してばらつきが大きい。そのため、本検討では“結果的に最小すべり円弧の安全率が $F_S=1.25$ になるような原地盤強度の試験結果であった場合”を想定するものとして、原地盤強度を調整パラメータとして採用する。

なお本研究では、粘性土地盤を対象として構築された修正フェレニウス法を検討対象としていること、砂質土の内部摩擦角 ϕ と比較して粘性土の粘着力 c の方がばらつきの程度が大きい場合が多いことなどから、原地盤粘性土の粘着力 c を優先して調整する。粘着力 c のみの調整では目標安全率を満たす断面を作成できない場合、あるいは断面に粘性土層が存在しない場合に限り、原地盤砂質土の内部摩擦角 ϕ を調整する。地盤強度の調整は、複数の異なる地盤強度（ c または $\tan \phi$ ）に対して一律の倍率を乗じて目標安全率の断面を作成した（図-2.8）。その結果、地盤強度に乗じた倍率は0.93~1.15倍であり、これは設計事例ごとに異なる、一般的な地盤強度の変動の範囲内であると考えられるため、以降の検討に用いても良いと判断した。

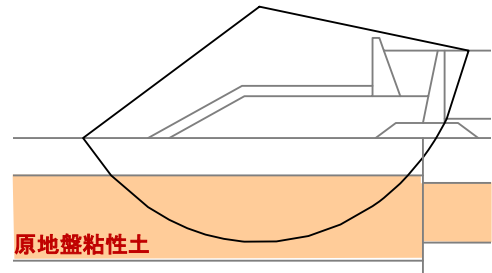
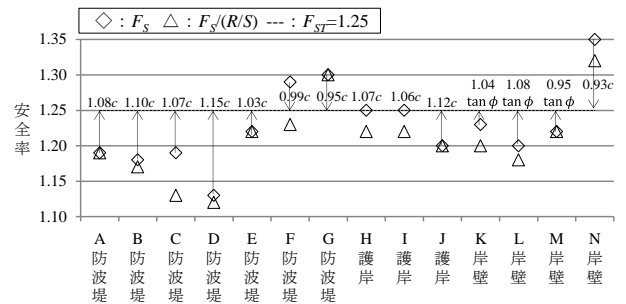


図-2.7 地盤強度を調整対象とする原地盤粘性土層



※図中に調整したパラメータおよびその倍率を示す。

図-2.8 目標安全率 F_{ST} への調整

(2) モンテカルロ・シミュレーション (MCS)

ここでは、検討断面の破壊確率や部分係数を求めるための信頼性解析手法として用いるMCSについて述べる。

① 最小すべり円弧の位置・形状

はじめに特性値（安全率 $F_S=1.25$ に調整した断面の物性値）を用いた最小すべり円弧探索計算で、シミュレーションを行うすべり円弧の位置・形状を決定する。確率変数である各物性値は、それぞれ設定した平均値と変動係数によって定まる確率分布に基づいた乱数を代入する。

本来、各試行で異なる物性値が代入された断面モデルで円弧すべり計算を行えば、各試行で位置・形状が異なる最小すべり円弧となる可能性がある。ただし、最小すべり円弧探索を数百万回行うには計算所要時間が膨大であるため、特性値によるすべり円弧に固定し、すべり円弧上のその他物性値を乱数とする。なお、特性値による円弧と各平均値による円弧の位置・形状の差異については別途確認計算を行い、双方の円弧に大きな差異はないことを確認している。各断面の円弧すべり面などの計算結果の詳細については付録Cに示す。

② 物性値（確率変数）

各物性値の特性値および平均値は、各検討断面の設計資料のデータおよび現行設計法の標準値を基に設定した。変動係数は現行基準・同解説¹⁾および竹信ら²⁾を参考に、表-2.9のように設定する。ただし、係船岸、護岸の上載荷重の設計値は、施設の利用条件からその最大値として設定されているため、変動係数 $CV=0$ の固定値としている。なお、防波堤本土工、上部工の自重を捨石マウンドに対する上載荷重として入力している場合は、本土工、上部工の単位体積重量と同値の変動係数 $CV=0.03$ を与えている。

表-2.9 物性値およびMCS計算条件

物性値	平均値	変動係数
単位体積重量	-	0.03
潮位面	L.W.L	-
残留水位面	-	0.05
上載荷重 (係船岸の荷役等)	-	0.00
(防波堤の自重)	-	0.03
原地盤粘性土層 粘着力 c^*	$c_k/(b_1 b_2)$ ※③で後述	$CV_{org} \cdot \Gamma(V/\theta)$ ※④で後述
原地盤砂質土層 内部摩擦角 $\tan \phi$	-	$0.10 \cdot \Gamma(V/\theta)$
その他層の 内部摩擦角 $\tan \phi$	-	0.10
MCS	平均値	変動係数
モデル化誤差 ΔM ※(3)②で後述	1.00	0.067
試行回数 n	500,000	
重点サンプリング回数	5	

③ 原地盤強度の補正係数 b_1, b_2

本検討のMCSでは、物性値の確率分布関数は竹信ら²⁾の検討を参考に、正規分布を仮定する。そのため、物性値は平均値と変動係数で与えられる。特に地盤強度の平均値については、地盤調査で測定された地盤強度データの平均値にあたる。現行設計法では、地盤調査データのばらつきに応じた補正係数 b_1 、ならびに調査点数に応じた補正係数 b_2 を用いて、平均値を割り引き、照査に用いる特性値を求める。これは、旧来ばらついた測定値から設計に用いる値を決める際に、技術者が測定の不確実性を考慮して、一定の余裕分を持たせて設計に用いる値を決めていた判断を定式化したものである¹⁶⁾。本検討では、目標破壊確率 P_T を満たすよう調整された粘着力の特性値 c_k と、後述する地盤強度の補正係数 b_1, b_2 を用いて粘着力 c の平均値 c^* を逆算する（式(9)、表-2.10）。

$$c^* = \frac{1}{b_1 b_2} \times c_k \quad (9)$$

表-2.10 地盤強度の補正係数 b_1 と粘着力平均値 c^*

CV_{org}	b_1	b_2	$c^* = c_k/(b_1 b_2)$
0.10	1.00	1.00	$1.00c_k$
0.15	0.95	1.00	$1.05c_k$
0.25	0.90	1.00	$1.11c_k$
0.40	0.85	1.00	$1.18c_k$
0.60	0.75	1.00	$1.33c_k$

④ 粘着力の変動係数

MCSに用いる粘性土地盤の変動係数 CV は、現行設計法（表-2.11）で地盤の補正係数 b_1 の閾値である $CV=0.10, 0.15, 0.25, 0.40, 0.60$ とする。ただし、後述する方法で地盤の自己相関性によるばらつきの低減を考慮する。

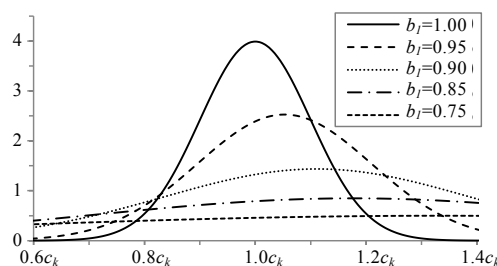


図-2.9 粘着力平均値 c^* の確率密度分布関数

表-2.11 現行設計法の補正係数 b_1

変動係数 CV	補正係数 b_1 (特性値を導出値よりも小さい値に補正する必要がある場合)
$CV < 0.10$	1.00
$0.10 \leq CV < 0.15$	0.95
$0.15 \leq CV < 0.25$	0.90
$0.25 \leq CV < 0.40$	0.85
$0.40 \leq CV < 0.60$	0.75
$0.60 \leq CV$	結果の解釈やモデル化の再検討、あるいは再調査

⑤ 原地盤の自己相関性によるばらつきの低減

本研究では、海性粘土を含む基礎地盤を対象としているため、基礎地盤の物性値は空間的な相関性を持って連続的に変化していると考えられる。現行設計法および旧設計法では、尾崎ら⁵⁾や土田ら¹⁷⁾のように、深度方向に2~2.5m程度を単位として確率的に独立な土層として扱った。本研究では、Vanmarcke^{18,19)}の分散関数を導入し、局所空間平均を取る長さ（円弧すべりでは層厚）が長くなるほど、分散、つまりは粘着力の変動係数が低減されるような処理を行う。

Vanmarckeの分散関数 Γ は式(10)で与えられる。 Γ は地盤の自己相関距離 θ と層厚 V によって定まり、これを地盤調査結果から得られる CV_{org} ($=0.10, 0.15, 0.25, 0.40, 0.60$)に乗じた CV_{calc} を、その土層の変動係数として用いる（式(11)）。 θ は既往の研究^{5,17)}等にならない、粘性土の場合は $\theta_c =$

2.5/2=1.25 m, 砂質土の場合は $\theta_{\tan \phi}=2.0/2=1.0$ mとする。層厚 V はすべり破壊に寄与する範囲を設定するために、**図-2.10**のように、すべり円弧が該当層を上端から下端まで通過する場合は代表的な層厚を、すべり円弧の最低面に該当する場合は層上端から円弧底面までとする。

$$\Gamma(V/\theta) = \frac{\theta}{V} \sqrt{2\{V/\theta - 1 + \exp(-V/\theta)\}} \quad (10)$$

$$CV_{calc.} = \Gamma(V/\theta) \cdot CV_{org.} \quad (11)$$

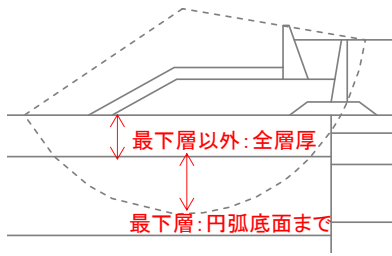


図-2.10 層厚 V の考え方

(3) 性能関数

① 照査式

円弧すべりの破壊モードに関する性能関数を**式(12)**のように定義する。荷重項 S (起動モーメント) と抵抗項 R (抵抗モーメント) の比に、モデル化誤差を表す係数 ΔM (詳細は後述する) を乗じる。 $Z \geq 0$ のとき非破壊 (すべらない), $Z < 0$ のとき破壊 (すべる) とする。 R, S は修正フェレニウス法の**式(1), (2)**により求める。

$$Z = \Delta M \cdot R/S - 1 \quad (12)$$

② モデル化誤差 ΔM

Matsuo et al.¹⁰⁾ は粘性土地盤上の盛土について、既往の破壊事例の安全率を事後評価した結果、修正フェレニウス法による安全率法の破壊・非破壊の判定誤差は-0.1~0.1の範囲に一様分布であったとしている。大竹ら⁸⁾のなかで、この誤差の変動係数を求めた結果、 $CV=0.058$ が得られている。また、Wu¹¹⁾ は平均値の偏り (*bias*) が0.98~1.00, 変動係数 CV が0.067~0.087であると報告している。

一方、本研究ではMCSを用いた信頼性解析を行ううえで、モデル化誤差の確率密度関数が一様分布とした場合、尤度が一定で最尤点 (設計点) が収束しないため、部分係数が一意に決定することができないという問題が発生する。そこで、Matsuo et al.¹⁰⁾ の一様分布が誤差ゼロを

中心としている点と変動係数が $CV=0.058$ である点をふまえ、Wu¹¹⁾ をもとに、モデル化誤差の確率密度関数は $bias=1.00$ (偏りなし), $CV=0.067$ (Wu¹¹⁾ の最小値) の正規分布関数とした。

図-2.11のように、 ΔM のばらつきによってMCSの試行ごとにRS図上の破壊・非破壊の境界線がランダムに移動する。そのため、破壊点と非破壊点の分布は**図-2.12**のように明瞭な境界線を持たない。破壊点数 n_{BT} と総試行回数 n の比から P_f を求める ($P_f = n_{BT}/n$) 。

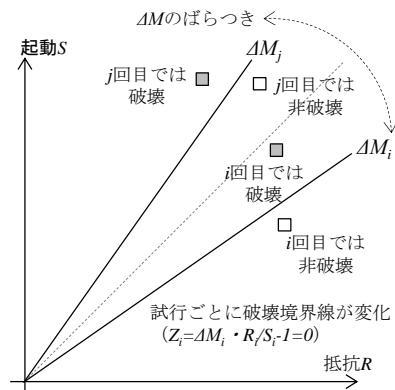


図-2.11 ΔM のばらつきによる破壊・非破壊判定の変化

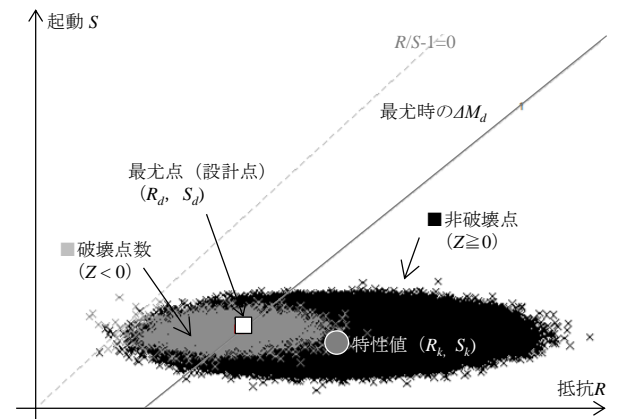


図-2.12 MCSのRS座標中の分布

(4) 目標破壊確率 P_{fT} の計算方法

2.3節において、港湾構造物の永続状態における円弧すべり照査で満たすべき安全性水準を「目標安全率 $F_{ST}=1.25$ 」に置き換えた。MCSによって部分係数を求めるには、目標安全率 F_{ST} をちょうど満たす断面について破壊確率を求めた上で、その結果を用いて目標破壊確率 P_{fT} を設定する必要がある。

MCSにより破壊確率を求めるにあたり「地盤調査結果から得られた地盤強度の推定値から特性値を求める際に、どの程度割り引いたか」および「物性値のばらつき (変

動係数 CV をいかに与えるか」を設定しなければならない。具体的には各物性値の変動係数 CV 、地盤の補正係数 b_1, b_2 である。 b_1 は地盤強度のばらつきにより決まる係数、 b_2 は調査点数により決まる係数である。

現行設計法の補正係数に関する渡部ら¹⁶⁾の考え方について、 b_1 は、データのばらつきが小さい試験結果を得る努力をすることで設計上有利になるように、 b_2 は統計処理をするのに十分なデータ数 n があることを前提としている。本研究でも渡部ら¹⁶⁾の設計思想にならない、量、質ともに十分なデータがあることを前提として、目標破壊確率 P_{JT} 設定の検討ケースを以下のように設定した。

① 補正係数 b_1 、変動係数 CV

各検討断面のうち、現行設計法に基づいて設計されたものについては、各粘性土層の粘着力 c の CV が設計資料において整理されている(表-2.12)。ただし、本検討では変動係数の違いが各検討断面においてどのように破壊確率に影響するかを把握するために、設計資料記載の CV のみに検討対象をしぼらず、幅広い変動係数の値のケースを設定する。

表-2.12 検討断面設計資料の補正係数 b_1, b_2

検討断面	b_1	b_2
A 防波堤	0.90(Ac1), 0.95(Ac2)	1.00(Ac1), 1.00(Ac2)
B 防波堤	-	-
C 防波堤	0.75(Asc), 0.85(Ac), 0.85(Dc)	1.00(Asc), 1.00(Ac), 1.00(Dc)
D 防波堤	-	-
E 防波堤	-	-
F 防波堤	1.00(Ac1), 0.90(Ac2)	0.88(Ac1), 0.94(Ac2)
G 防波堤	1.00(-10m 以浅), 1.00(-10m 以深)	1.00(-10m 以浅), 0.90(-10m 以深)
H 護岸	0.90(AcU 海), 0.90(AcU 陸), 0.85(AcM 海), 0.85(AcM 陸), 0.90(AcL 海)	1.00(AcU 海), 1.00(AcU 陸), 1.00(AcM 海), 1.00(AcM 陸), 1.00(AcL 海)
I 護岸	-	-
J 護岸	-	-
K 岸壁	-	-
L 岸壁	-	-
M 岸壁	1.00(Ac)	1.00(Ac)
N 岸壁	0.85(Ac1), 0.90(Ac2)	1.00(Ac1), 1.00(Ac2)

※括弧内は各地盤モデルの土層名

松原ら²⁰⁾は地盤データベース(国土地盤情報検索サイト「KuniJiban」²¹⁾)から、全国港湾の粘性土地盤の一軸圧縮強度試験の土層ごとの調査点数 n および変動係数 CV を取りまとめている。それによると、粘性土地盤の CV は0.25未満が64%、調査点数は $n \geq 10$ が72%であった。

また、表-2.12の各設計資料の CV 、 n は、 $CV < 0.25$ および $n \geq 10$ の比率が松原ら²⁰⁾と同程度かそれ以上であると言える。目標安全性水準の設定については、条件を満たすことが現実的な範囲でありつつも、ある程度以上高い

水準であることが要求されるため、補正係数 b_1 の閾値である $CV=0.10, 0.15, 0.25$ ($b_1=1.00, 0.95, 0.90$)を P_{JT} の設定対象ケースとする。 $b_1=0.85, 0.75$ ($CV=0.40, 0.60$)のケースは P_{JT} の設定対象とせず、 P_f の計算、および P_{JT} を満足する部分係数の計算を行う。

② 補正係数 b_2 、調査点数 n

渡部ら¹⁶⁾および現行設計法の思想として、十分な数の調査を行い地盤乗数の信頼性を高めることを念頭に置いているため、補正係数 $b_2=1.00$ (調査点数 $n \geq 10$)を P_{JT} の設定対象ケースとする。

③ 目標破壊確率 P_{JT} の設定対象計算ケース

以上をふまえ、全検討断面の粘性土原地盤強度について、 $b_1=1.00, 0.95, 0.90$ ($CV < 0.25$)、 $b_2=1.00$ ($n \geq 10$)の場合の平均値を P_{JT} とする。

また、 P_f の計算、後述する部分係数の計算は、 $b_1=1.00, 0.95, 0.90, 0.85, 0.75$ ($CV=0.10, 0.15, 0.25, 0.40, 0.60$)、 $b_2=1.00$ ($n \geq 10$)を対象として行い、各 b_1, b_2 の組み合わせに応じた部分係数を求める。

(5) 破壊確率 P_{JT} の計算結果と目標破壊確率 P_{JT} の設定

破壊確率 P_f の計算結果を表-2.13に示す。また、各ケースのMCS結果図を付録Dに示す。全体的な傾向として、粘性土強度の変動係数の増大(および b_1 の減少)に応じて破壊確率が大きくなっている。破壊確率の値は最小で0.2%程度、最大で20%程度であり、安全率がすべて $F_5=1.25$ と同一であっても、地盤強度のばらつきによって破壊確率が100倍程度の差が生じる結果となった。

破壊確率の変化傾向は各検討断面によって異なり、一部ケースでは傾向が逆転する。E防波堤、J護岸は他の検討断面と比較して CV による P_f の変動幅が小さい。これは、両検討断面が他に比べ施設規模が大きいいため、粘性土地盤強度の変動による影響が相対的に小さいからであると考えられる。K岸壁、L岸壁は全て砂質土層、M岸壁はほとんどが砂質土層であるため、破壊確率の大きな変化はない。破壊確率の値に若干の変動があるのは、MCSで発生させた乱数が計算ケースごとに異なるためである。

以上の結果から、目標破壊確率 P_{JT} の設定対象ケース($b_1=1.00, 0.95, 0.90$; $CV=0.10, 0.15, 0.25$, $b_2=1.00$; $n \geq 10$)計42ケースの破壊確率 P_f の相乗平均を取り、これを目標破壊確率(目標安全性水準②) $P_{JT}=1.08 \times 10^{-2}$ とした。

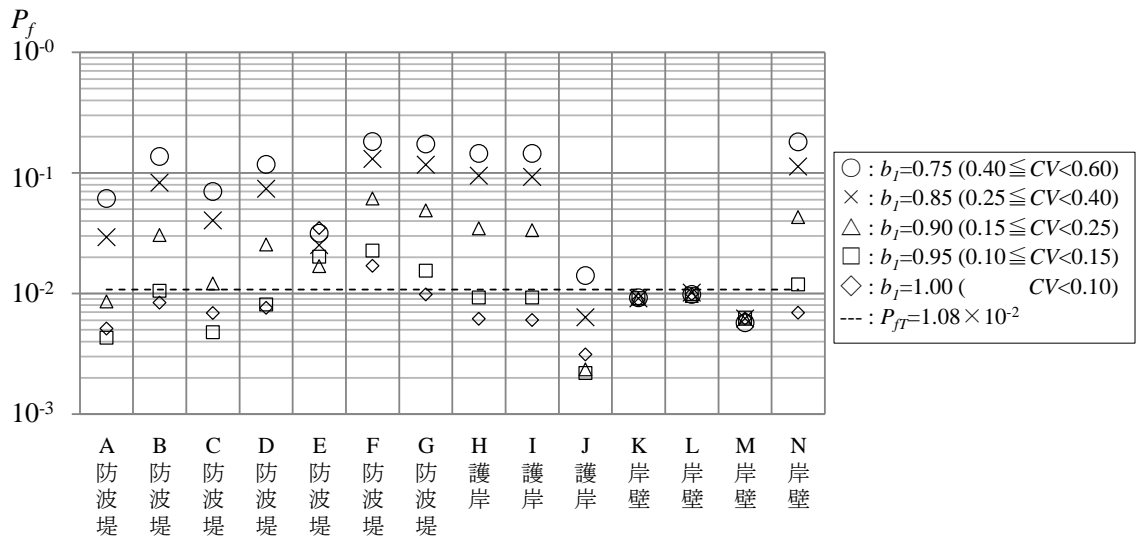


図-2.13 破壊確率 P_f の計算結果

表-2.13 破壊確率 P_f の計算結果

検討断面	b_I CV_{org}	1.00	0.95	0.90	0.85	0.75
		0.10	0.15	0.25	0.40	0.60
A 防波堤		5.10×10^{-3}	4.29×10^{-3}	8.59×10^{-3}	2.93×10^{-2}	6.13×10^{-2}
B 防波堤		8.36×10^{-3}	1.05×10^{-2}	3.04×10^{-2}	8.26×10^{-2}	1.37×10^{-1}
C 防波堤		6.90×10^{-3}	4.77×10^{-3}	1.21×10^{-2}	4.03×10^{-2}	6.99×10^{-2}
D 防波堤		7.61×10^{-3}	8.10×10^{-3}	2.55×10^{-2}	7.39×10^{-2}	1.18×10^{-1}
E 防波堤		3.49×10^{-2}	2.02×10^{-2}	1.69×10^{-2}	2.52×10^{-2}	3.16×10^{-2}
F 防波堤		1.70×10^{-2}	2.26×10^{-2}	6.12×10^{-2}	1.31×10^{-1}	1.81×10^{-1}
G 防波堤		9.79×10^{-3}	1.54×10^{-2}	4.89×10^{-2}	1.17×10^{-1}	1.74×10^{-1}
H 護岸		6.14×10^{-3}	9.26×10^{-3}	3.46×10^{-2}	9.47×10^{-2}	1.45×10^{-1}
I 護岸		6.00×10^{-3}	9.27×10^{-3}	3.35×10^{-2}	9.26×10^{-2}	1.45×10^{-1}
J 護岸		3.12×10^{-3}	2.19×10^{-3}	2.34×10^{-3}	6.32×10^{-3}	1.41×10^{-2}
K 岸壁		8.81×10^{-3}	9.15×10^{-3}	9.10×10^{-3}	9.07×10^{-3}	9.19×10^{-3}
L 岸壁		9.88×10^{-3}	9.87×10^{-3}	9.55×10^{-3}	1.02×10^{-2}	9.82×10^{-3}
M 岸壁		6.18×10^{-3}	6.30×10^{-3}	6.16×10^{-3}	6.21×10^{-3}	5.72×10^{-3}
N 岸壁		6.93×10^{-3}	1.19×10^{-2}	4.30×10^{-2}	1.13×10^{-1}	1.80×10^{-1}
平均値		8.13×10^{-3}	8.76×10^{-3}	1.75×10^{-2}	3.72×10^{-2}	5.42×10^{-2}
P_{fT}			1.08×10^{-2}			

3. 部分係数の検討

ここでは、MCSを用いた信頼性解析により、目標破壊確率 $P_{fT}=1.08 \times 10^{-2}$ を満足する部分係数を設定する。

3.1 検討方法とフロー

目標破壊確率 P_{fT} の設定に用いた断面データ、各検討条件データセットを基に、検討断面ごとに差がある破壊確率を性能関数 Z の調整値 ΔZ を導入することで $P_f=1.08 \times 10^{-2}$ となるように調整する。部分係数設定のフローを図-3.1に示す。

各検討断面の破壊確率 P_f を目標破壊確率 P_{fT} に調整後、破壊点の中から最尤点（設計点）を抽出し、設計値と特性値から部分係数を求める。最後に、各検討断面の部分係数の値を平均することで提案する部分係数を決定する。

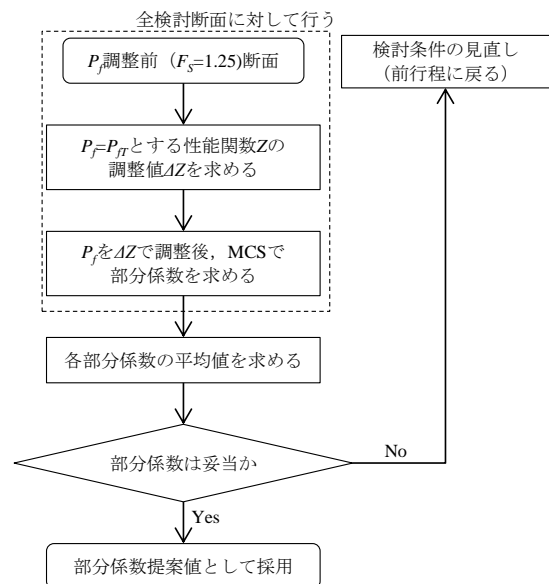


図-3.1 部分係数の設定フロー

(1) 部分係数のフォーマット

部分係数法のフォーマットについては、竹信ら²⁾の重力式岸壁の永続状態の滑動・転倒の設計法に関する研究において検討され、国土交通省港湾局「港湾技術基準の改訂方針」³⁾にて「荷重抵抗係数アプローチによる部分係数法」の導入の方向性が示されている。本検討ではこの方向性にならない、荷重項 S （起動モーメントの総和）と抵抗項 R （抵抗モーメントの総和）の特性値を求めた後に係数を乗じる、荷重抵抗係数アプローチによる部分係数法を採用する。

ただし、修正フェレニウス法を用いた円弧すべり照査については、既往研究により照査式のモデル化誤差の値が提案されている。このモデル化誤差は安全率、つまり

は抵抗の特性値 R_k と荷重の特性値 S_k の比全体 (R_k/S_k) に対して定義されているため、荷重項、抵抗項のいずれか一方にまとめて考慮することはできない。そこで本検討では、荷重抵抗アプローチによる部分係数として、荷重項のばらつきを考慮した部分係数（以下、荷重係数 γ_S という）、抵抗項のばらつきを考慮した部分係数（以下、抵抗係数 γ_R という）、モデル化誤差に関する部分係数 $\gamma_{\Delta M}$ を求める。これら3つの部分係数を用いた場合の性能照査式を式(13)に示す。

$$\frac{1}{\gamma_{\Delta M}} \left(\frac{\gamma_S S_k}{\gamma_R R_k} \right) \leq 1.0 \quad (13)$$

ただし、 S_k ：荷重（起動モーメント）の特性値
 R_k ：抵抗（抵抗モーメント）の特性値

(2) 目標破壊確率に合わせるための性能関数値の調整 ΔZ
 MCSにおける破壊確率は、全試行回数 n に対する破壊点（性能関数 Z が負値を取った点）の個数 n_B の割合で求められる（式(14)）。つまり、目標破壊確率 P_{fT} が決まれば、目標とする破壊点数 n_{BT} は P_{fT} と n の積で求められる（式(15)）。ここで、破壊確率 P_f を目標破壊確率 P_{fT} に合わせるための、性能関数調整値として、 ΔZ を導入する。図-3.2に示すように、全 n 回試行の性能関数 Z の値を負から順に並び替え、 ΔZ を式(16)のように $Z(n_{BT})$ と $Z(n_{BT+1})$ の平均値とすれば、 $Z(1) \sim Z(n_{BT})$ が破壊点 ($Z < 0$)、 $Z(n_{BT+1}) \sim Z(n)$ が非破壊点 ($Z \geq 0$) となり、破壊確率は P_{fT} に一致する。 ΔZ を導入した性能関数を式(17)に示す。

$$P_f = \frac{n_B}{n} \quad (14)$$

$$n_{BT} = P_{fT} \times n \quad (15)$$

$$\Delta Z = \frac{Z_{n_{BT}} + Z_{n_{BT+1}}}{2} \quad (16)$$

$$Z = \Delta M R / S - 1 - \Delta Z \quad (17)$$

(3) 計算ケース

$b_1=1.00, 0.95, 0.90, 0.85, 0.75$ ($CV=0.10, 0.15, 0.25, 0.40, 0.60$)、 $b_2=1.00$ ($n \geq 10$) の14断面×5係数セットの計70ケースについて、各 b_1 、 b_2 の組み合わせに応じた部分係数を求める。

(4) 部分係数の計算方法

まず、破壊点の中から各物性値（確率変数）の確率密度の積が最大である最尤点（設計点）を抽出する。(1)で示した3つの部分係数は、最尤点の設計値（荷重設計値 S_d 、

抵抗設計値 R_d 、モデル化誤差の設計値 ΔM_d)と特性値（荷重特性値 S_k 、抵抗特性値 R_k 、モデル化誤差の特性値 ΔM_k (=1.0))の比（式(18)～(20)）である。

$$\gamma_S = S_d / S_k \quad (18)$$

$$\gamma_R = R_d / R_k \quad (19)$$

$$\gamma_{\Delta M} = \Delta M_d / \Delta M_k \quad (20)$$

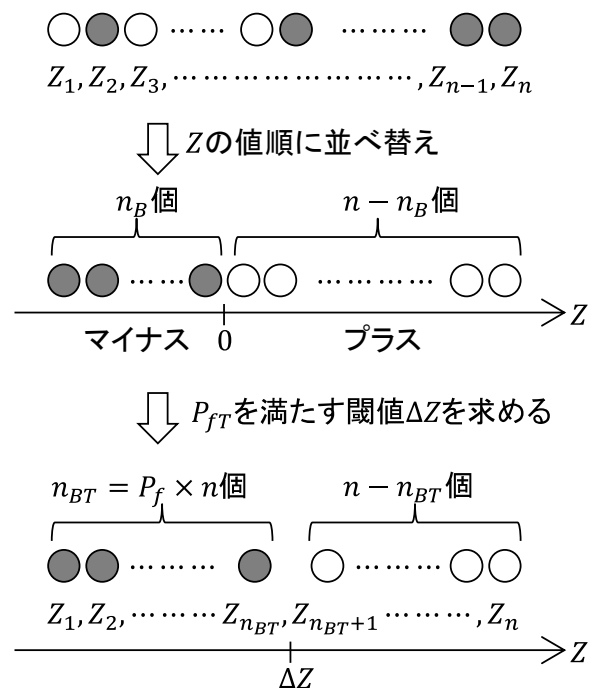


図-3.2 性能関数調整値 ΔZ を用いた P_{fT} への調整
 (※○：非破壊, $Z \geq 0$, ●：破壊, $Z < 0$)

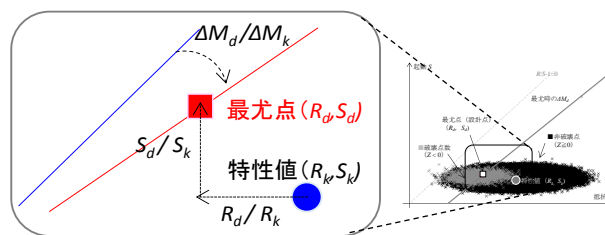


図-3.3 部分係数計算のイメージ

3.2 部分係数の計算結果

各計算ケースの部分係数計算結果を表-3.1～表3.3に示す。各 b_1 、 CV ごとの全検討断面の平均値、および砂質土主体地盤を持つ検討断面（K、L、M岸壁）での平均値を示す。これは、設計対象断面が砂地盤主体である場合、通常補正係数 b_1 を乗じることは行わないためである。また、各ケースのMCS結果図を付録Eに示す。

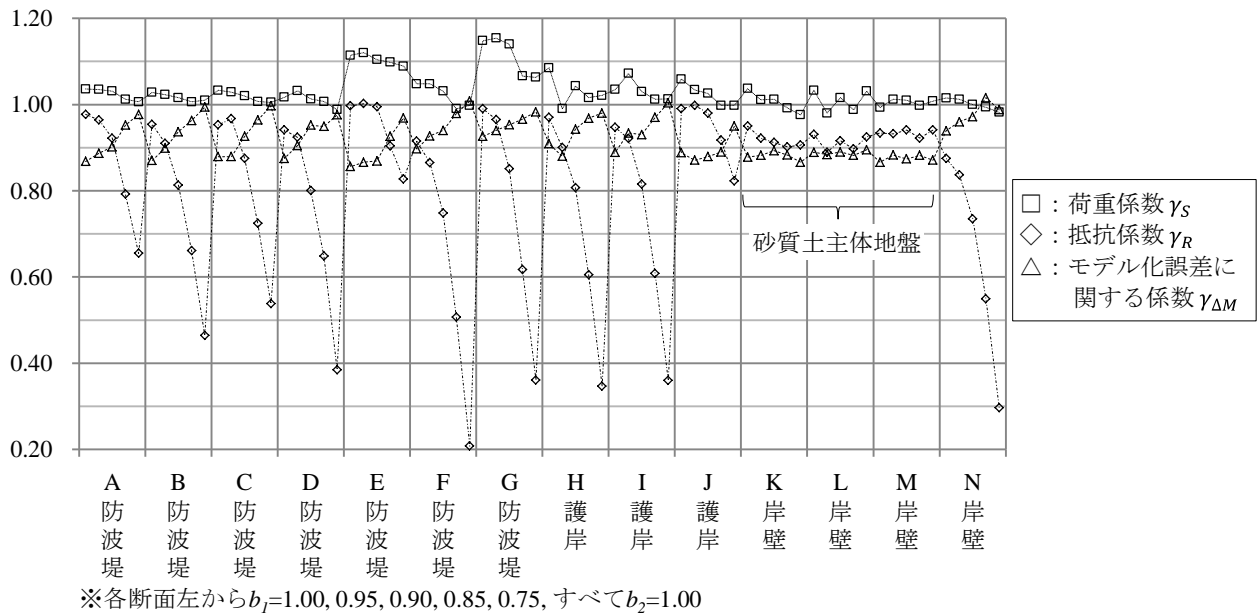


図-3.4 部分係数の計算結果

表-3.1 荷重係数 γ_S

検討断面	b_1	1.00	0.95	0.90	0.85	0.75
	CV_{org}	0.10	0.15	0.25	0.40	0.60
A 防波堤		1.036	1.035	1.031	1.012	1.006
B 防波堤		1.028	1.023	1.016	1.006	1.010
C 防波堤		1.033	1.029	1.020	1.007	1.005
D 防波堤		1.017	1.032	1.013	1.007	0.988
E 防波堤		1.114	1.120	1.104	1.098	1.089
F 防波堤		1.048	1.048	1.031	0.990	0.998
G 防波堤		1.148	1.154	1.140	1.066	1.063
H 護岸		1.085	0.990	1.043	1.016	1.021
I 護岸		1.035	1.072	1.030	1.012	1.013
J 護岸		1.059	1.034	1.026	0.998	0.998
K 岸壁※		1.037	1.011	1.012	0.992	0.976
L 岸壁※		1.033	0.980	1.016	0.9880	1.031
M 岸壁※		0.993	1.012	1.010	0.998	1.008
N 岸壁		1.015	1.012	1.000	0.994	0.982
平均値		1.05	1.04	1.04	1.01	1.01
※砂地盤				1.01		

表-3.2 抵抗係数 γ_R

検討断面	b_1	1.00	0.95	0.90	0.85	0.75
	CV_{org}	0.10	0.15	0.25	0.40	0.60
A 防波堤		0.977	0.964	0.922	0.792	0.655
B 防波堤		0.954	0.910	0.813	0.661	0.464
C 防波堤		0.953	0.967	0.875	0.724	0.538
D 防波堤		0.941	0.924	0.800	0.648	0.385
E 防波堤		0.997	1.002	0.995	0.904	0.827
F 防波堤		0.915	0.865	0.748	0.507	0.208
G 防波堤		0.990	0.965	0.851	0.617	0.361
H 護岸		0.970	0.900	0.807	0.605	0.347
I 護岸		0.947	0.921	0.815	0.608	0.360
J 護岸		0.990	0.998	0.980	0.917	0.823
K 岸壁※		0.950	0.922	0.912	0.902	0.906
L 岸壁※		0.931	0.889	0.916	0.897	0.925
M 岸壁※		0.934	0.932	0.941	0.922	0.941
N 岸壁		0.875	0.837	0.735	0.549	0.297
平均値		0.95	0.93	0.87	0.73	0.57
※砂地盤				0.92		

表-3.3 モデル化誤差に関する係数 $\gamma_{\Delta M}$

検討断面	b_1	1.00	0.95	0.90	0.85	0.75
	CV_{org}	0.10	0.15	0.25	0.40	0.60
A 防波堤		0.868	0.887	0.902	0.952	0.977
B 防波堤		0.870	0.899	0.937	0.963	0.994
C 防波堤		0.879	0.879	0.926	0.964	0.997
D 防波堤		0.875	0.905	0.952	0.949	0.976
E 防波堤		0.856	0.866	0.869	0.926	0.969
F 防波堤		0.897	0.927	0.940	0.979	1.008
G 防波堤		0.926	0.940	0.953	0.966	0.983
H 護岸		0.909	0.880	0.943	0.968	0.980
I 護岸		0.889	0.934	0.930	0.970	1.004
J 護岸		0.888	0.871	0.879	0.890	0.950
K 岸壁※		0.878	0.882	0.893	0.883	0.866
L 岸壁※		0.889	0.887	0.890	0.882	0.895
M 岸壁※		0.866	0.883	0.874	0.882	0.871
N 岸壁		0.939	0.960	0.972	1.016	0.988
平均値		0.89	0.90	0.92	0.94	0.96
※砂地盤				0.88		

3.3 提案設計法の適用性

本研究の検討断面は、表層が石層または砂質土層、下層が粘性土の地盤構成、またはすべて砂質土のケースがほとんどである。これら断面を用いた検討で求められる部分係数は、同様の地盤構成の設計断面にのみ適用することを想定して設定されたものである。

よって、本研究の検討断面と地盤構成が大きく異なる設計断面に対して適用すると、所要の安全性が満足できない可能性があると考えられる。そのため、本研究の提案設計法は、先述のような地盤構成に対する限定的な運用とする。

一方、例えば原地盤が粘性土のみで構成される地盤(かつ地盤改良を施さない)の設計断面に対しては、従来設計法と同程度の安全性水準(旧設計法および現行設計法

の部分係数が設定されていない構造形式に対する構造解析係数 $\gamma_a=1.3$) とすべきであると考えられる。

以下、本章のまとめとして、提案設計法を構成する要素として、性能照査式、部分係数、適用できる地盤構成と部分係数の適用（使い分け）の考え方について、具体的に示す。

(1) 性能照査式

提案設計法では、式(21)と後述する部分係数（荷重係数 γ_S 、抵抗係数 γ_R 、モデル化誤差に関する部分係数 $\gamma_{\Delta M}$ ）を用いて、作用耐力比が1.0以下であることを照査する。

$$\frac{1}{\gamma_{\Delta M}} \left(\frac{\gamma_S S_k}{\gamma_R R_k} \right) \leq 1.0 \quad (21)$$

ただし、 S_k ：荷重（起動モーメント）の特性値

R_k ：抵抗（抵抗モーメント）の特性値

(2) 部分係数

表-3.4に本研究で求めた部分係数を示す。なお、これらの部分係数を適用できる地盤構成や部分係数の使い分けの考え方については、(3)において詳述する。

表-3.4 提案設計法の部分係数

(a) 粘性土層を含む場合			
粘性土地盤粘着力の変動係数 CV	荷重係数 γ_S	抵抗係数 γ_R	モデル化誤差に関する係数 $\gamma_{\Delta M}$
$CV < 0.10$	1.05	0.95	0.89
$0.10 \leq CV < 0.15$	1.04	0.93	0.90
$0.15 \leq CV < 0.25$	1.04	0.87	0.92
$0.25 \leq CV < 0.40$	-	-	-
$0.40 \leq CV < 0.60$	-	-	-
(b) 砂質土主体地盤である場合			
砂質土主体地盤である場合	荷重係数 γ_S	抵抗係数 γ_R	モデル化誤差に関する係数 $\gamma_{\Delta M}$
	1.01	0.92	0.88

(3) 適用できる地盤構成

提案設計法が適用できる断面の地盤構成は、以下の2ケースである。

- ・粘性土層を含む地盤
- ・砂質土主体の地盤

以下、各地盤構成の定義及び部分係数の適用の考え方を示す。

1) 粘性土層を含む地盤

① 基本事項

「粘性土層を含む地盤」とは、「すべり円弧上端付近に内部摩擦力($\sigma \tan \phi$)を期待できる層(捨石マウンド、裏込石の石材層、埋立土層、原地盤砂質土層等)があり、かつその下層に薄層ではない粘性土層がある場合」である。この時、主たる粘性土地盤の粘着力 c の変動係数 CV の値によって、部分係数を使い分ける。ここで主たる粘性土地盤とは、「最小すべり円弧が通過する基礎地盤のなかで、円弧が横切る層厚が最も大きい粘性土層」、「円弧の最低面が通過する粘性土層」、「構造物の本土工直下に位置する粘性土層」などである。

なお、粘性土地盤強度である粘着力 c の変動係数が $CV \geq 0.25$ である場合は、本研究の P_{JT} に対する信頼性解析によって部分係数を求めると、旧設計法と比較して目標耐力作用比($\gamma_S/(\gamma_R \cdot \gamma_{\Delta M})$)が過大となる結果が示された。そのため、粘性土地盤強度の $CV \geq 0.25$ である場合は、信頼性解析によって目標安全性水準を担保するのは困難であると考え、提案から除外する。そのため、 CV が大きい場合の設計法は、別途設定されなければならない。

② 詳細事項

表-2.2より、本研究の検討断面は捨石マウンド、裏込石の石材層や、埋立土層、原地盤砂質土層等の内部摩擦力を期待できる層が、おおそ5m以上確保されているため、これと同程度以上の層厚の石材層、砂質土層をすべり円弧が通過する状態であることが望ましい。

防波堤の場合は、図-3.5(a)のように捨石マウンドを設置する原地盤の表層が砂質土層であり、その下に薄層ではない粘性土層が分布し、かつすべり円弧がその粘性土層を通過する場合である。この時、すべり円弧が通過する捨石マウンドの厚さと砂質土層の厚さは、5m程度またはそれ以上である。

係船岸、護岸の場合は、図-3.5(b)のように陸側すべり円弧端で埋土層を通過する場合も多いことから、すべり円弧が通過する埋立砂質土層、裏込石、捨石マウンド層、原地盤砂質土層が5m程度またはそれ以上であり、その下に薄層ではない粘性土層が分布し、かつすべり円弧がその粘性土層を通過する場合を対象とする。ただし、すべり円弧の中心が土層天端高より下方にある場合に発生するクラックはこの長さを含めない。鉛直方向に発生するクラックは、すべり面にせん断抵抗力が期待できないためである。

なお、これら層厚に関する数値は、本研究の検討断面および全国港湾の照査法運用実績から決定した。

2) 砂質土主体の地盤

「砂質土主体の地盤」とは、すべり円弧が通過するほぼ全体の土層が石材層、砂質土層である地盤である。ただし、図-3.5(c)のように、薄層の粘性土層が含まれる場合も、これに該当する。

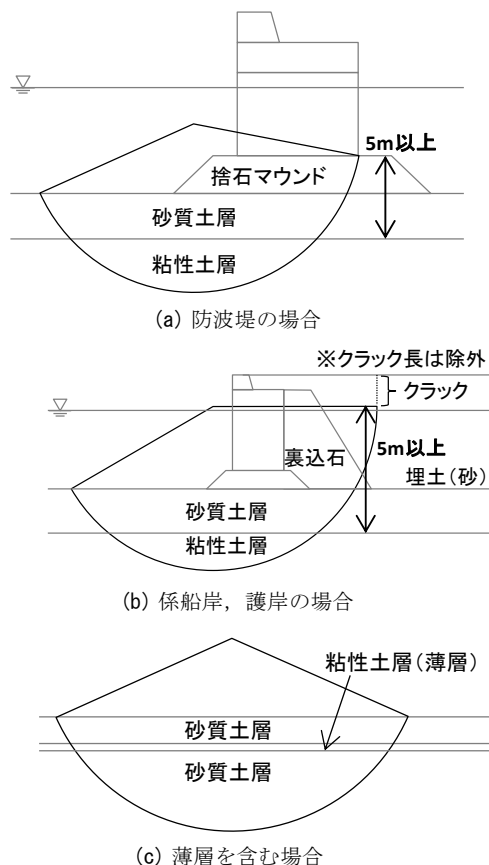


図-3.5 適用できる地盤構成と層厚

4. 結論

本研究の結論を示す。現行設計法によるレベル1信頼性設計法の円弧すべり照査法（修正フェレニウス法）について、現行設計法の方法係数アプローチをフォーマットとした部分係数法とは異なる、荷重項、抵抗項をまとめて評価する荷重抵抗係数アプローチをフォーマットとした新たな部分係数法を提案した。

第2章では、性能照査において満たすべき最低限の安全性の指標となり、また信頼性解析において目標値となる目標安全性水準について検討した。

2.1節では、設計法の変遷および全国港湾における安全性水準の運用実績をレビューし、特性値を用いた円弧すべり照査（荷重抵抗係数アプローチによる部分係数法も、これに当てはまる）の精度が、既往の研究、運用によって示されてきたことを述べた。また、提案設計法の目標安全性水準は、現存する港湾構造物の有する安全性と同等とする方向性を示した。

2.2節では、全国の港湾施設の設計に関する資料を収集し、設計断面決定において円弧すべり照査が支配的である事例を抽出し、本研究の検討断面として選定した。また、円弧すべり照査が支配的となるような断面の特徴について述べた。

2.3節では、検討断面の有する安全性を評価し、目標安全性水準を数値的に定義するために、参考とする安全率を求め、そこから目標安全率の値（ $F_{ST}=1.25$ ）を設定した。また、簡易ビショップ法や土田の方法などの他の円弧すべり照査法を用いたチェックにより、修正フェレニウス法による目標安全率の妥当性を確認した。

2.4節では、モンテカルロ・シミュレーションを用いて、2.3節で設定した目標安全率を満たす断面の破壊確率を求め、信頼性解析において目標安全性水準の具体値となる目標破壊確率の値（ $P_{FT}=1.08 \times 10^{-2}$ ）を設定した。また検討において、地盤強度の補正係数 b_1 、 b_2 との関連性や、原地盤強度の自己相関性によるばらつきによる低減効果や、既往研究で示されている修正フェレニウス法のモデル化誤差についても考慮し、計算を行った。

第3章では、モンテカルロ・シミュレーションを用いた信頼性解析を行い、目標破壊確率を満たす部分係数（荷重係数 γ_S 、抵抗係数 γ_R 、モデル化誤差に関する部分係数 $\gamma_{\Delta M}$ ）を求め、原地盤強度の変動係数に応じた係数セットを設定した。ただし、地盤強度のばらつきが大きい場合については、目標安全性水準を満たそうとすると従来の設計法と比較して過大な耐力作用比が要求されるため、これらを信頼性解析によって安全性を担保できる範囲外とし、提案設計法から除外した。

また、提案設計法の詳細については、3.3節にとりまとめた。技術者が円弧すべり照査を行う際には、図-4.1に示すフローに従って、使用する部分係数を選択することができる。

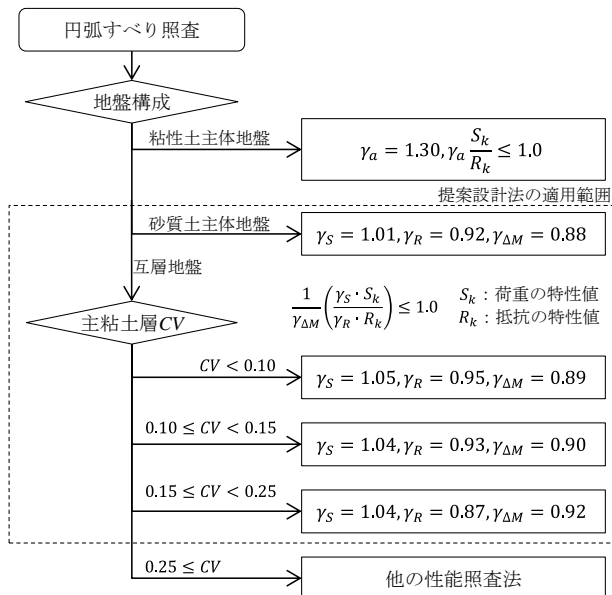


図-4.1 提案設計法の適用範囲と使い分けのフロー

なお、本研究では目標安全性水準①を設定する際に、余裕分を見込んだ値を用いた。しかし、余裕分を見込まない、現有構造物から設定される安全性水準や部分係数を用いる必要がある場合を想定し、余裕分を見込まず、その他を同様に検討した結果を付録F、付録G、付録Hに示す。

(2017年2月14日受付)

謝辞

本稿をとりまとめるにあたり、円弧すべり照査の有する安全性、モンテカルロ・シミュレーションを用いた信頼性解析、モデル化誤差について、岐阜大学の本城勇介名誉教授、新潟大学の竹雄准教授より、懇切丁寧なご指導および適切なお助言、様々な参考情報を頂きました。

また、全国港湾における円弧すべり照査法の運用実績について、北海道大学の渡部要一教授、広島大学の土田孝教授、善功企元九州大学大学院教授、小林正樹氏、広瀬宗一氏より、懇切丁寧なご助言を頂きました。

また、港湾施設研究室の交流研究員である松原弘晃氏、佐藤健彦氏、西岡悟史氏、高野向後氏、勝俣優氏および渡部富博港湾研究部長、福永勇介主任研究官には、本稿の執筆方針および検討内容に対して貴重な意見を頂きました。

ここに記して、深く感謝の意を表します。

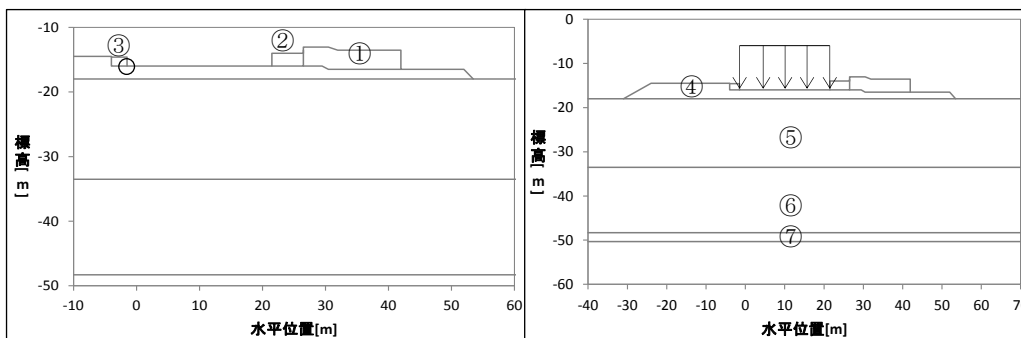
参考文献

- 1) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2007.
- 2) 竹信正寛，西岡悟史，佐藤健彦，宮田正史：荷重抵抗係数アプローチによるレベル1信頼性設計法に関する基礎的研究～永続状態におけるケーソン式岸壁の滑動および転倒照査を対象に～，国土技術政策総合研究所資料，No.880，2015.
- 3) 国土交通省港湾局技術企画課技術管理室：港湾技術基準の改訂方針，国土交通省ホームページ（URL：<http://www.mlit.go.jp/common/001141002.pdf>），2016.
- 4) 川俣秀樹，竹信正寛，宮田正史：修正フェレニウス法を用いた円弧すべり解析における安全性水準の基準間比較，国土技術政策総合研究所資料，No.900，2016.
- 5) 尾崎竜三，長尾毅：防波堤を対象とした円弧すべりに関する信頼性設計法の適用，海洋開発論文集第21号，pp.963-968，2005.
- 6) 尾崎竜三，長尾毅，柴崎隆一：経済損失を考慮した期待総費用最小化に基づく港湾構造物の常時のレベル1信頼性設計法，国土技術政策総合研究所資料，No.217，2005.
- 7) 宮田正史，竹信正寛：港湾の施設の技術上の基準の改訂に向けた部分係数法（信頼性設計法）の見直し方向性，一般財団法人沿岸技術研究センター機関誌，Vo.46，pp.14-15，2016.
- 8) 大竹雄，本城勇介：地盤構造物設計におけるモデル化誤差の定量化，土木学会論文集C（地圏工学），Vol.70，No.2，pp.170-185，2014.
- 9) Wu T., Kraft L. M. : Safety Analysis of Slopes, Journal of Soils Mechanics and Foundations, ASCE, Vol.96, No.2, pp.609-630, 1970.
- 10) Matsuo M., Asaoka A. : A statistical study on conventional "safety factor method", Soils and Foundations, Vol.16, No.1, pp.75-90, 1976.
- 11) Wu T. : Reliability of geotechnical predictions, Proc. of the Second International Symposium on Geotechnical Risk and Safety, pp.3-10, 2009.
- 12) 土田考，水野健太，引屋敷英人：実用分割法円弧すべり解析における新しい計算法，地盤工学会論文報告集，Vol.42，No.2，pp.139-152，2002.
- 13) The R Foundation : The R Project for Statistical Computing（URL：<https://www.r-project.org/>）.
- 14) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，1999.
- 15) 小林正樹：有限要素法による地盤の安定解析，港湾技術研究所報告，Vol.23，No.1，pp.83-101，1984.
- 16) 渡部要一，田中政典，佐々真志，菊池喜昭：信頼性設計に基づく性能設計実現に向けた新しい地盤定数設定法の提案，港湾空港技術研究所報告，Vol.48，No.2，pp.123-143，2009.
- 17) 土田考，湯怡新：港湾構造物の円弧すべり解析における最適な安全率，港湾技術研究所報告，Vol.35，No.1，pp.117-146，1996.
- 18) Vanmarcke E.H. : Probabilistic modelling of soil profiles, Jour. of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.103, No.GT11, pp.1227-1246, 1977.
- 19) Vanmarcke E.H. : Random Fields : analysis and synthesis, The MIT Press, 1983.
- 20) 松原弘晃，竹信正寛，宮田正史，渡部要一：控え矢板式岸壁の永続状態におけるレベル1信頼性設計法に関する基礎的研究，国土技術政策総合研究所資料，No.956，2017.
- 21) 国土交通省：国土地盤情報検索サイト「KuniJiban」（URL：<http://www.kunijiban.pwri.go.jp/jp/>）.

付録 A 検討断面諸元

①A防波堤

(1) 断面図



※番号：土層番号
 矢印：上載荷重位置
 ○印：円弧通過点

(2) 構造物表面，土層下端座標

土層	x 座標 [m]	y 座標 [m]
表面	-40.00,-31.00,-24.00,-4.00,-4.00,-1.50,-1.50,21.50,21.50,26.50,26.50,30.45,31.95,41.95,41.95,51.95,53.45,70.00	-18.00,-18.00,-14.50,-14.50,-14.60,-14.60,-16.00,-16.00,-14.00,-14.00,-13.04,-13.04,-13.54,-13.54,-16.50,-16.50,-18.00,-18.00
①	26.50, 29.46, 30.46, 41.95	-16.00, -16.00, -16.50, -16.50
②	21.50, 26.50	-16.00, -16.00
③	-4.00, -1.50	-16.00, -16.00
④	-31.00, 53.45	-18.00, -18.00
⑤	-40.00, 70.00	-33.50, -33.50
⑥	-40.00, 70.00	-48.30, -48.30
⑦	-40.00, 70.00	-50.30, -50.30

(3) 海面・残留水位面表

座標 [m]	x	y
1	-40.00	0.00
2	70.00	0.00

(4) 上載荷重座標，円弧通過点座標

座標 [m]	x	y
上載荷重左端	-1.50	-16.00
上載荷重右端	21.50	-16.00
円弧通過点	-1.50	-16.00

(5) 土層物性値

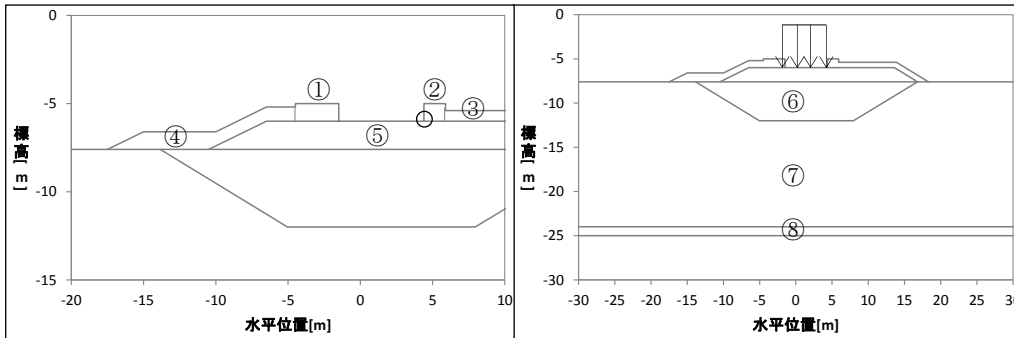
土層	湿潤重量 [kN/m ³]	飽和重量 [kN/m ³]	φ[度]	CV _{tanφ}	c ₀ 特性値 [kN/m ²]	k	CV _c
①	15.6	15.6	-	-	999	0	0
②	21.6	21.6	-	-	999	0	0
③	21.6	21.6	-	-	999	0	0
④	18.0	20.0	40	0.10	-	-	-
⑤	18.0	20.0	37	0.10·Γ(V/θ)	-	-	-
⑥	16.6	16.6	-	-	39.6	2.98	CV _{org} ·Γ(V/θ)
⑦	18.0	20.0	31	0.10·Γ(V/θ)	-	-	-

(6) その他設定値

項目	設定値
H.W.L [m]	0.00
L.W.L [m]	0.00
c ₀ 基準高 [m]	-33.50
上載荷重[kN/m ²]	225.15

②B防波堤

(1) 断面図



※番号：土層番号
 矢印：上載荷重位置
 ○印：円弧通過点

(2) 構造物表面，土層下端座標

土層	x 座標 [m]	y 座標 [m]
表面	-30.00,-17.50,-15.00,-10.00,-6.50,-4.50,-4.50,-1.50,-1.50,4.40,4.40,5.90,5.90,13.90,18.30,30.00	-7.60,-7.60,-6.60,-6.60,-5.20,-5.20,-5.00,-5.00,-6.00,-6.00,-5.00,-5.00,-5.40,-5.40,-7.60,-7.60
①	-4.50,-1.50	-6.00,-6.00
②	4.40,5.90	-6.00,-6.00
③	5.90,13.60,16.80,18.30	-6.00,-6.00,-7.60,-7.60
④	-17.50,-10.50,-6.50,-4.50	-7.60,-7.60,-6.00,-6.00
⑤	-10.50,16.80	-7.60,-7.60
⑥	-13.85,-5.05,7.95,16.80	-7.60,-12.00,-12.00,-7.60
⑦	-30.00,30.00	-24.00,-24.00
⑧	-30.00,30.00	-25.00,-25.00

(3) 海面・残留水位面表

座標 [m]	x	y
1	-30.00	0.00
2	30.00	0.00

(4) 上載荷重座標，円弧通過点座標

座標 [m]	x	y
上載荷重左端	-1.50	-6.00
上載荷重右端	4.40	-6.00
円弧通過点	4.40	-6.00

(5) 土層物性値

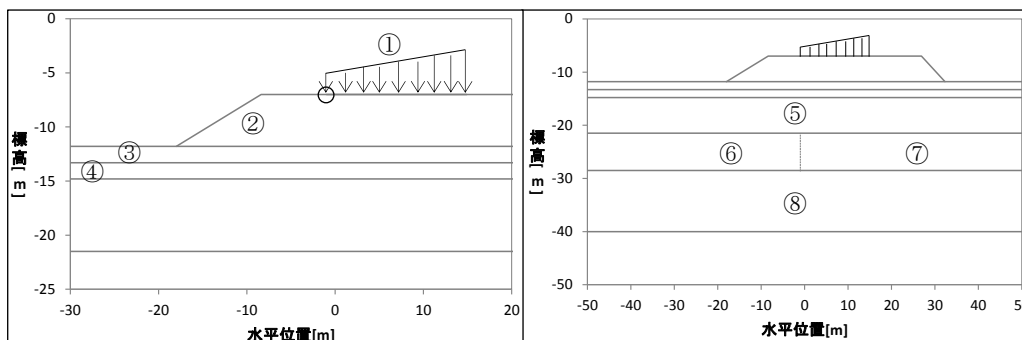
土層	湿潤重量 [kN/m ³]	飽和重量 [kN/m ³]	φ[度]	CV _{tanφ}	c ₀ 特性値 [kN/m ²]	k	CV _c
①	18.0	20.0	-	-	999	-	-
②	18.0	20.0	-	-	999	-	-
③	18.0	20.0	40	0.10	-	-	-
④	18.0	20.0	40	0.10	-	-	-
⑤	18.0	20.0	40	0.10	-	-	-
⑥	18.0	20.0	40	0.10	-	-	-
⑦	15.2	15.2	-	-	10.0	2.0	CV _{org} ・Γ(V/θ)
⑧	18.0	18.0	30	0.10・Γ(V/θ)	-	-	-

(6) その他設定値

項目	設定値
H.W.L [m]	0.00
L.W.L [m]	0.00
c ₀ 基準高 [m]	-8.00
上載荷重[kN/m ²]	96.2

③C防波堤

(1) 断面図



※番号：土層番号
 矢印：上載荷重位置
 ○印：円弧通過点

※土層①は傾斜荷重を土層に換算して入力

(2) 構造物表面，土層下端座標

土層	x 座標 [m]	y 座標 [m]
表面	-50.00,-18.00,-8.40,-1.00,-1.00,14.90,14.90,26.90,32.30,50.00	-11.80,-11.80,-7.00,-7.00,-6.34,-4.69,-7.00,-7.00,-11.80,-11.80
①	-1.00,14.90	-7.00,-7.00
②	-18.00,32.30	-11.80,-11.80
③	-50.00,50.00	-13.30,-13.30
④	-50.00,50.00	-14.80,-14.80
⑤	-50.00,50.00	-21.50,-21.50
⑥	-50.00,-1.00	-28.50,-28.50
⑦	-1.00,50.00	-28.50,-28.50
⑧	-50.00,50.00	-40.00,-40.00

(3) 海面・残留水位面表

座標 [m]	x	y
1	-50.00	0.00
2	50.00	0.00

(4) 上載荷重座標，円弧通過点座標

座標 [m]	x	y
上載荷重左端	-	-
上載荷重右端	-	-
円弧通過点	14.90	-7.00

(5) 土層物性値

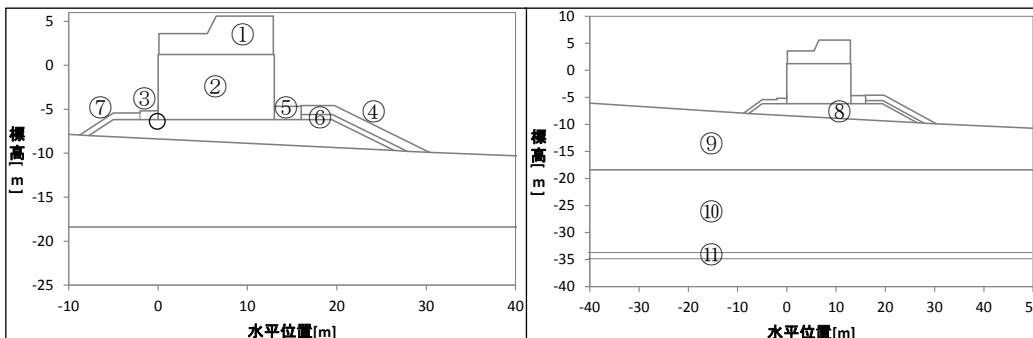
土層	湿潤重量 [kN/m ³]	飽和重量 [kN/m ³]	φ[度]	CV _{tanφ}	c ₀ 特性値 [kN/m ²]	k	CV _c
①	110	110	-	-	999	-	-
②	18.0	20.0	40	0.10	-	-	-
③	18.0	20.0	37	0.10・Γ(V/θ)	-	-	-
④	20.0	20.0	-	-	142	-	CV _{org} ・Γ(V/θ)
⑤	18.2	18.2	-	-	39	-	CV _{org} ・Γ(V/θ)
⑥	18.8	18.8	-	-	51	-	CV _{org} ・Γ(V/θ)
⑦	18.8	18.8	-	-	51	-	CV _{org} ・Γ(V/θ)
⑧	20.0	20.0	-	-	540	-	CV _{org} ・Γ(V/θ)

(6) その他設定値

項目	設定値
H.W.L [m]	0.00
L.W.L [m]	0.00
c ₀ 基準高 [m]	-11.8
上載荷重[kN/m ²]	-

④D防波堤

(1) 断面図



※番号：土層番号
 矢印：上載荷重位置
 ○印：円弧通過点

(2) 構造物表面，土層下端座標

土層	x 座標 [m]	y 座標 [m]
表面	-40.00,-19.65,-8.75,-5.00,-2.00,-2.00,0.00,0.00,0.10,0.10,5.51,6.50,12.90,12.90,13.00,13.00,16.00,16.00,19.73,30.35,50.00	-6.09,-7.28,-7.92,-5.42,-5.42,-5.17,-5.17,1.23,1.23,3.60,3.60,5.60,5.60,1.23,1.23,-4.67,-4.67,-4.59,-4.59,-9.90,-10.70
①	0.10,12.90	1.23,1.23
②	0.00,13.00	-6.17,-6.17
③	-2.00,0.00	-6.17,-6.17
④	16.00,19.50,27.90,30.35	-5.60,-5.60,-9.80,-9.90
⑤	13.00,16.00	-6.17,-6.17
⑥	16.00,19.40,26.40,27.90	-6.17,-6.17,-9.67,-9.80
⑦	-8.75,-7.75,-5.00,-2.00	-7.92,-8.00,-6.17,-6.17
⑧	-7.75,26.40	-8.00,-9.67
⑨	-40.00,50.00	-18.40,-18.40
⑩	-40.00,50.00	-34.40,-34.40
⑪	-40.00,50.00	-35.00,-35.00

(3) 海面・残留水位面表

座標 [m]	x	y
1	-40.0	0.00
2	50.0	0.00

(4) 上載荷重座標，円弧通過点座標

座標 [m]	x	y
上載荷重左端	-	-
上載荷重右端	-	-
円弧通過点	0.00	-6.17

(5) 土層物性値

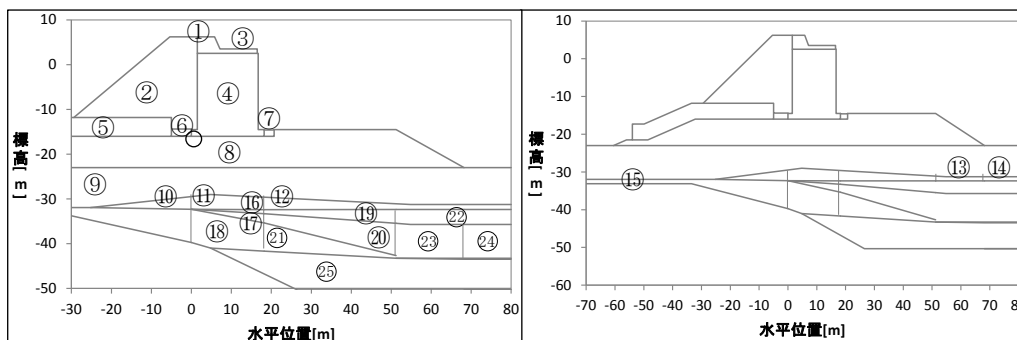
土層	湿潤重量 [kN/m ³]	飽和重量 [kN/m ³]	φ[度]	CV _{tan φ}	c ₀ 特性値 [kN/m ²]	k	CV _c
①	22.6	22.6	-	-	999	-	-
②	21.11	21.11	-	-	999	-	-
③	22.6	22.6	-	-	999	-	-
④	11.30	16.35	-	-	0	-	-
⑤	22.6	22.6	-	-	0	-	-
⑥	18.8	18.8	40	0.10	-	-	-
⑦	18.0	20.0	40	0.10	-	-	-
⑧	18.0	20.0	40	0.10	-	-	-
⑨	17.44	17.44	34	0.10・Γ(V/θ)	-	-	-
⑩	16.0	16.0	-	-	55.1	-	CV _{org} ・Γ(V/θ)
⑪	18.0	20.0	36	0.10・Γ(V/θ)	-	-	-

(6) その他設定値

項目	設定値
H.W.L [m]	0.00
L.W.L [m]	0.00
c ₀ 基準高 [m]	0.00
上載荷重[kN/m ²]	-

⑤E防波堤

(1) 断面図



※番号：土層番号
 矢印：上載荷重位置
 ○印：円弧通過点

(2) 構造物表面，土層下端座標

土層	x 座標 [m]	y 座標 [m]
表面	-70.00,-60.50,-56.00,-54.00,-54.00,-49.95,-33.45,-29.40,-5.40,1.50,1.70,5.80,7.15,16.50,16.50,16.70,16.70,18.20,18.20,20.70,20.70,51.20,68.20,80.00	-23.00,-23.00,-21.50,-21.50,-17.30,-17.30,-11.80,-11.80,6.20,6.20,6.20,6.20,3.50,3.50,2.50,2.50,-14.50,-14.50,-14.60,-14.60,-14.50,-14.50,-23.00,-23.00
①	1.50,1.70	2.50,2.50
②	-29.40,-5.00,-5.00,0.00,0.00,1.50	-11.80,-11.80,-14.40,-14.40,-14.50,-14.50
③	1.70,16.50	2.50,2.50
④	0.00,18.20	-16.00,-16.00
⑤	-54.00,-48.64,-32.14,-5.00	-21.50,-21.50,-16.00,-16.00
⑥	-5.00,0.00	-16.00,-16.00
⑦	18.20,20.70	-16.00,-16.00
⑧	-60.50,68.20	-23.00,-23.00
⑨	-70.00,-25.20,4.80,54.80,80.00	-31.95,-31.95,-29.00,-31.25,-31.25
⑩	-25.20,0.00	-31.95,-32.33
⑪	0.00,18.20	-32.33,-32.39
⑫	18.20,51.20	-32.39,-32.35
⑬	51.20,68.20	-32.35,-32.35
⑭	68.20,80.00	-32.35,-32.35
⑮	-70.00,-33.45,0.00	-33.10,-33.10,-39.74
⑯	0.00,18.20	-32.33,-33.28
⑰	0.00,18.20	-32.33,-35.36
⑱	0.00,4.80,18.20	-39.74-41.00-41.66
⑲	18.20,51.20	-33.28-35.46
⑳	18.20,51.20	-35.36-42.65
㉑	18.20,51.20	-41.66-43.27
㉒	51.20,54.80,68.20	-35.46-35.70-35.70
㉓	51.20,68.20	-43.27-43.45
㉔	68.20,80.00	-50.35-50.35
㉕	4.80,26.49,80.00	-41.00-50.35-50.35

(3) 海面・残留水位面表

座標 [m]	x	y
1	-70.00	0.00
2	80.00	0.00

(4) 上載荷重座標，円弧通過点座標

座標 [m]	x	y
上載荷重左端	-	-
上載荷重右端	-	-
円弧通過点	0.00	-16.00

(5) 土層物性値

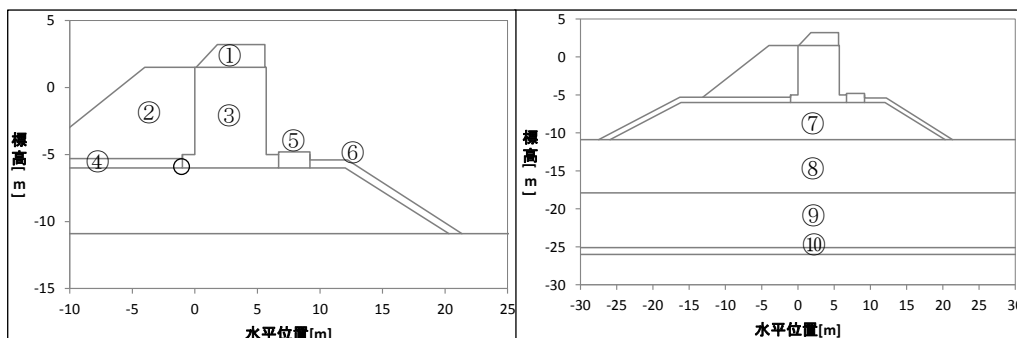
土層	湿潤重量 [kN/m ³]	飽和重量 [kN/m ³]	ϕ [度]	$CV_{\tan\phi}$	c_0 特性値 [kN/m ²]	k	CV_c
①	11.3	16.4	-	-	0	-	-
②	11.3	16.4	-	-	0	-	-
③	22.6	22.6	-	-	999	-	-
④	22.2	22.2	-	-	999	-	-
⑤	15.2	15.2	-	-	0	-	-
⑥	22.6	22.6	-	-	0	-	-
⑦	22.6	22.6	-	-	0	-	-
⑧	18.0	20.0	40	0.10	-	-	-
⑨	18.0	20.0	35	$0.10 \cdot \Gamma(V/\theta)$	-	-	-
⑩	15.6	15.6	-	-	28.5	0.8	$CV_{org} \cdot \Gamma(V/\theta)$
⑪	15.6	15.6	-	-	41.2	0.8	$CV_{org} \cdot \Gamma(V/\theta)$
⑫	15.6	15.6	-	-	27.8	0.8	$CV_{org} \cdot \Gamma(V/\theta)$
⑬	15.6	15.6	-	-	27.8	0.8	$CV_{org} \cdot \Gamma(V/\theta)$
⑭	15.6	15.6	-	-	27.8	0.8	$CV_{org} \cdot \Gamma(V/\theta)$
⑮	14.8	14.8	-	-	41.6	1.1	$CV_{org} \cdot \Gamma(V/\theta)$
⑯	14.7	14.7	-	-	83.7	1.5	$CV_{org} \cdot \Gamma(V/\theta)$
⑰	14.3	14.3	-	-	100.4	1.6	$CV_{org} \cdot \Gamma(V/\theta)$
⑱	14.8	14.8	-	-	54	1.1	$CV_{org} \cdot \Gamma(V/\theta)$
⑲	14.7	14.7	-	-	42.7	1.5	$CV_{org} \cdot \Gamma(V/\theta)$
⑳	14.3	14.3	-	-	53.8	1.6	$CV_{org} \cdot \Gamma(V/\theta)$
㉑	14.8	14.8	-	-	31.7	1.1	$CV_{org} \cdot \Gamma(V/\theta)$
㉒	14.7	14.7	-	-	25	1.5	$CV_{org} \cdot \Gamma(V/\theta)$
㉓	14.3	14.3	-	-	32.2	1.6	$CV_{org} \cdot \Gamma(V/\theta)$
㉔	14.3	14.3	-	-	22.5	1.6	$CV_{org} \cdot \Gamma(V/\theta)$
㉕	15.3	15.3	-	-	40.1	1.6	$CV_{org} \cdot \Gamma(V/\theta)$

(6) その他設定値

項目	設定値
H.W.L [m]	0.00
L.W.L [m]	0.00
c_0 基準高 [m]	-23.00
上載荷重[kN/m ²]	-

⑥防波堤

(1) 断面図



※番号：土層番号
 矢印：上載荷重位置
 ○印：円弧通過点

(2) 構造物表面，土層下端座標

土層	x 座標 [m]	y 座標 [m]
表面	-30.00,-27.50,-16.29,-13.13,-4.00,0.10,1.80,5.60,5.60,5.70,5.70,6.70,6.70,9.20,9.20,12.20,21.34,30.00	-10.90,-10.90,-5.30,-5.30,1.50,1.50,3.20,3.20,1.50,1.50,-5.00,-5.00,-4.80,-4.80,-5.40,-5.40,-10.90,-10.90
①	0.10,5.60	1.50,1.50
②	-13.13,-1.00,-1.00,0.00	-5.30,-5.30,-5.00,-5.00
③	-1.00,6.70	-6.00,-6.00
④	-27.50,-25.93,-16.13,-1.00	-10.90,-10.90,-6.00,-6.00
⑤	6.70,9.20	-6.00,-6.00
⑥	9.20,12.02,20.31,21.34	-6.00,-6.00,-10.90,-10.90
⑦	-25.93,20.31	-10.90,-10.90
⑧	-30.00,30.00	-17.90,-17.90
⑨	-30.00,30.00	-25.10,-25.10
⑩	-30.00,30.00	-26.00,-26.00

(3) 海面・残留水位面表

座標 [m]	x	y
1	-30.00	0.00
2	30.00	0.00

(4) 上載荷重座標，円弧通過点座標

座標 [m]	x	y
上載荷重左端	-	-
上載荷重右端	-	-
円弧通過点	-1.00	-6.00

(5) 土層物性値

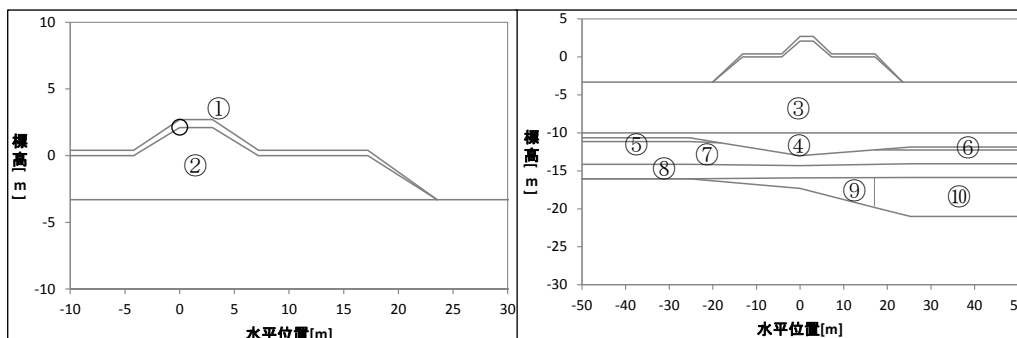
土層	湿潤重量 [kN/m ³]	飽和重量 [kN/m ³]	φ[度]	CV _{tan φ}	c ₀ 特性値 [kN/m ²]	k	CV _c
①	22.6	22.6	-	-	999	-	-
②	11.30	16.35	-	-	0	-	-
③	23.3	23.3	-	-	999	-	-
④	18.0	20.0	-	-	0	-	-
⑤	18.0	20.0	-	-	0	-	-
⑥	18.0	20.0	-	-	0	-	-
⑦	18.0	20.0	40	0.10	-	-	-
⑧	18.4	18.4	-	-	29.56	5.48	CV _{org} ・Γ(V/θ)
⑨	19.0	19.0	32.9	0.10・Γ(V/θ)	-	-	-
⑩	15.6	15.6	-	-	22.35	2.11	CV _{org} ・Γ(V/θ)

(6) その他設定値

項目	設定値
H.W.L [m]	0.00
L.W.L [m]	0.00
c ₀ 基準高 [m]	-11.41
上載荷重[kN/m ²]	-

⑦G防波堤

(1) 断面図



※番号：土層番号
 矢印：上載荷重位置
 ○印：円弧通過点

(2) 構造物表面，土層下端座標

土層	x 座標 [m]	y 座標 [m]
表面	-50.00,-20.08,-13.20,-4.21,0.00,3.00,7.21,17.21,23.55,50.00	-3.30,-3.30,0.40,0.40,2.70,2.70,0.40,0.40,-3.30,-3.30
①	-20.08,-13.20,-4.20,0.00,3.00,7.20,17.20,23.55	-3.30,0.00,0.00,2.10,2.10,0.00,0.00,-3.30
②	-20.08,23.55	-3.30,-3.30
③	-50.00,50.00	-10.00,-10.00
④	-50.00,-25.30,-18.18,0.00,17.20,25.30,50.00	-10.64,-10.64,-11.31,-13.01,-12.23,-11.86,-11.86
⑤	-50.00,-25.30,-18.18	-11.14,-11.14,-11.31
⑥	17.20,25.30,50.00	-12.23,-12.26,-12.26
⑦	-50.00,-25.30,0.00,25.30,50.00	-14.14,-14.14,-14.31,-14.06,-14.06
⑧	-50.00,-25.30,0.00,25.30,50.00	-16.04,-16.04,-15.91,-15.86,-15.86
⑨	-50.00,-25.30,0.00,17.20	-16.04,-16.04,-17.31,-19.83
⑩	17.20,25.30,50.00	-19.83,-21.01,-21.01

(3) 海面・残留水位面表

座標 [m]	x	y
1	-50.00	0.00
2	50.00	0.00

(4) 上載荷重座標，円弧通過点座標

座標 [m]	x	y
上載荷重左端	-	-
上載荷重右端	-	-
円弧通過点	0.00	2.70

(5) 土層物性値

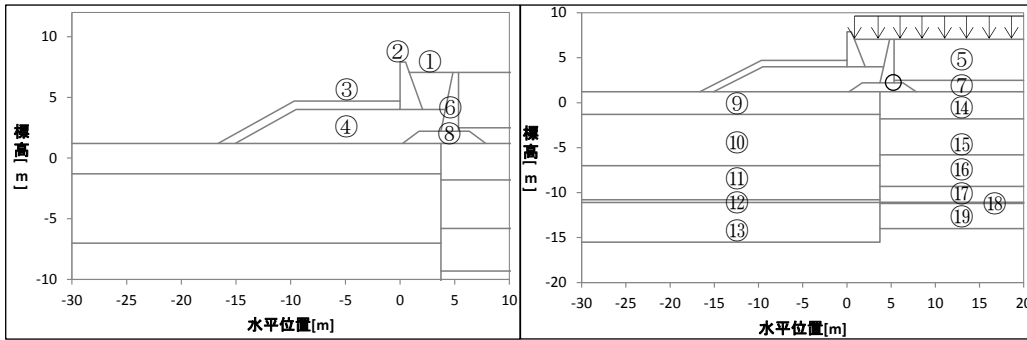
土層	湿潤重量 [kN/m ³]	飽和重量 [kN/m ³]	φ[度]	CV _{tan φ}	c ₀ 特性値 [kN/m ²]	k	CV _c
①	18.0	19.9	40	0.10	-	-	-
②	18.0	19.9	40	0.10	-	-	-
③	17.0	16.9	-	-	8.0	2.0	CV _{org} ・Γ(V/θ)
④	17.0	16.9	-	-	15.2	-	CV _{org} ・Γ(V/θ)
⑤	18.0	19.9	31	0.10・Γ(V/θ)	-	-	-
⑥	18.0	19.9	31	0.10・Γ(V/θ)	-	-	-
⑦	18.0	19.9	37	0.10・Γ(V/θ)	-	-	-
⑧	18.0	19.9	41	0.10・Γ(V/θ)	-	-	-
⑨	18.0	19.9	36	0.10・Γ(V/θ)	-	-	-
⑩	18.0	19.9	36	0.10・Γ(V/θ)	-	-	-

(6) その他設定値

項目	設定値
H.W.L [m]	0.00
L.W.L [m]	0.00
c ₀ 基準高 [m]	-3.00
上載荷重[kN/m ²]	-

⑧H護岸

(1) 断面図



※番号：土層番号
 矢印：上載荷重位置
 ○印：円弧通過点

(2) 構造物表面，土層下端座標

土層	x 座標 [m]	y 座標 [m]
表面	-30.00,-16.65,-9.67,0.00,0.00,0.50,0.84,20.00	1.21,1.21,4.70,4.70,7.90,7.90,7.05,7.05
①	0.84,2.06,4.14,4.84	7.05,4.00,4.00,7.05
②	0.00,2.06	4.00,4.00
③	-16.65,-15.08,-9.50,0.00	1.21,1.21,4.00,4.00
④	-15.08,0.24,1.74,3.74,4.14	1.21,1.21,2.21,2.21,4.00
⑤	5.34,20.00	2.50,2.50
⑥	3.74,5.34	2.21,2.21
⑦	5.34,6.34,7.84,20.00	2.21,2.21,1.21,1.21
⑧	0.24,7.84	1.21,1.21
⑨	-30.00,3.74	-1.30,-1.30
⑩	-30.00,3.74	-7.00,-7.00
⑪	-30.00,3.74	-10.80,-10.80
⑫	-30.00,3.74	-11.10,-11.10
⑬	-30.00,3.74	-15.50,-15.50
⑭	3.74,20.00	-1.80,-1.80
⑮	3.74,20.00	-5.80,-5.80
⑯	3.74,20.00	-9.30,-9.30
⑰	3.74,20.00	-11.10,-11.10
⑱	3.74,20.00	-11.20,-11.20
⑲	3.74,20.00	-14.00,-14.00

(3) 海面・残留水位面表

座標 [m]	x	y
1	-30.00	0.06
2	3.74	0.06
3	3.74	1.28
4	20.00	1.28

(4) 上載荷重座標，円弧通過点座標

座標 [m]	x	y
上載荷重左端	0.84	7.05
上載荷重右端	20.00	7.05
円弧通過点	5.34	2.21

(5) 土層物性値

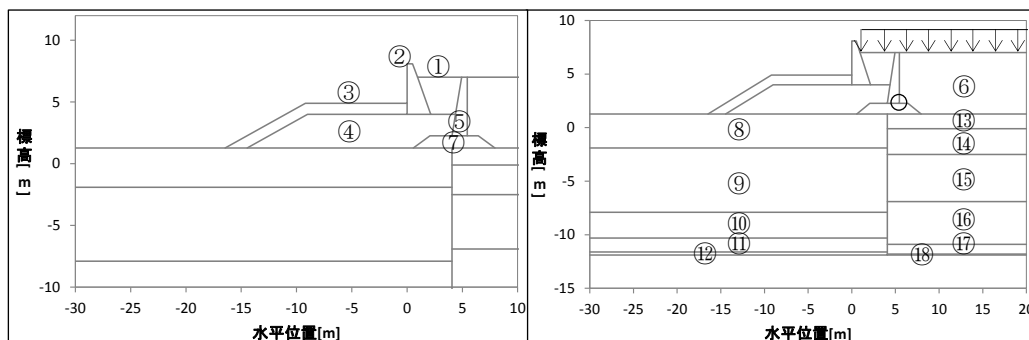
土層	湿潤重量 [kN/m ³]	飽和重量 [kN/m ³]	ϕ [度]	$CV_{\tan\phi}$	c_0 特性値 [kN/m ²]	k	CV_c
①	18.0	20.0	40	0.10	-	-	-
②	22.6	22.6	-	-	999	-	-
③	18.0	20.0	-	-	0	-	-
④	18.0	20.0	40	0.10	-	-	-
⑤	18.0	20.0	34	0.10	-	-	-
⑥	22.6	22.6	-	-	999	-	-
⑦	18.0	20.0	33	0.10	-	-	-
⑧	18.0	20.0	40	0.10	-	-	-
⑨	18.0	20.0	31	$0.10 \cdot \Gamma(V/\theta)$	-	-	-
⑩	16.6	16.6	-	-	18.61	1.24	$CV_{org} \cdot \Gamma(V/\theta)$
⑪	15.1	15.1	-	-	21.79	0.88	$CV_{org} \cdot \Gamma(V/\theta)$
⑫	18.0	20.0	36	$0.10 \cdot \Gamma(V/\theta)$	-	-	-
⑬	18.0	20.0	38	$0.10 \cdot \Gamma(V/\theta)$	-	-	-
⑭	18.0	20.0	33	$0.10 \cdot \Gamma(V/\theta)$	-	-	-
⑮	16.9	16.9	-	-	17.07	4.49	$CV_{org} \cdot \Gamma(V/\theta)$
⑯	15.4	15.4	-	-	43.20	0.07	$CV_{org} \cdot \Gamma(V/\theta)$
⑰	19.0	19.0	-	-	60.42	-	$CV_{org} \cdot \Gamma(V/\theta)$
⑱	18.0	20.0	33	$0.10 \cdot \Gamma(V/\theta)$	-	-	-
⑲	18.0	20.0	36	$0.10 \cdot \Gamma(V/\theta)$	-	-	-

(6) その他設定値

項目	設定値
H.W.L [m]	3.90
L.W.L [m]	0.06
c_0 基準高 [m]	0.00
上載荷重[kN/m ²]	5.0

⑨I護岸

(1) 断面図



※番号：土層番号
 矢印：上載荷重位置
 ○印：円弧通過点

(2) 構造物表面，土層下端座標

土層	x 座標 [m]	y 座標 [m]
表面	-30.00,-16.46,-9.20,0.00,0.00,0.50,0.94,20.00	1.27,1.27,4.90,4.90,8.10,8.10,7.01,7.01
①	0.94,2.14,4.38,4.94	7.01,4.00,4.00,7.01
②	0.00,2.14	4.00,4.00
③	-16.46,-14.46,-9.00,0.00	1.27,1.27,4.00,4.00
④	-14.46,0.56,2.06,4.06,4.38	1.27,1.27,2.27,2.27,4.00
⑤	4.06,5.44	2.27,2.27
⑥	5.44,6.44,7.94,20.00	2.27,2.27,1.27,1.27
⑦	0.56,7.94	1.27,1.27
⑧	-30.00,4.06	-1.90,-1.90
⑨	-30.00,4.06	-7.90,-7.90
⑩	-30.00,4.06	-10.30,-10.30
⑪	-30.00,4.06	-11.60,-11.60
⑫	-30.00,4.06	-11.90,-11.90
⑬	4.06,20.00	-0.10,-0.10
⑭	4.06,20.00	-2.50,-2.50
⑮	4.06,20.00	-6.90,-6.90
⑯	4.06,20.00	-10.90,-10.90
⑰	4.06,20.00	-11.80,-11.80
⑱	4.06,20.00	-11.90,-11.90

(3) 海面・残留水位面表

座標 [m]	x	y
1	-30.00	0.06
2	4.06	0.06
3	4.06	1.28
4	20.00	1.28

(4) 上載荷重座標，円弧通過点座標

座標 [m]	x	y
上載荷重左端	0.94	7.01
上載荷重右端	20.00	7.01
円弧通過点	5.44	2.27

(5) 土層物性値

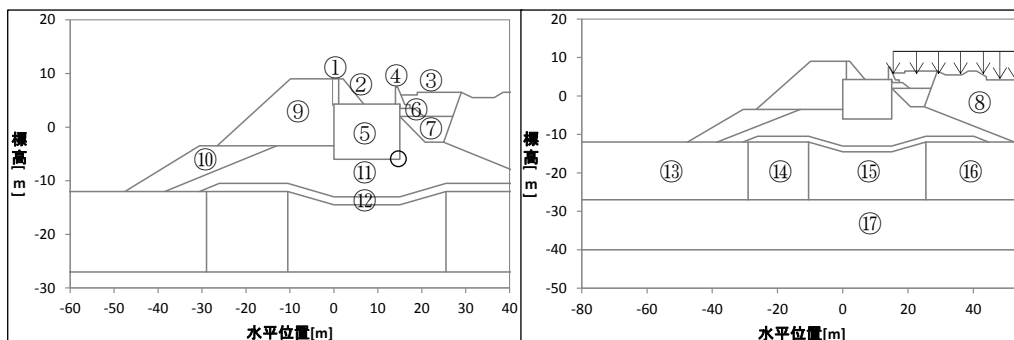
土層	湿潤重量 [kN/m ³]	飽和重量 [kN/m ³]	ϕ [度]	$CV_{\tan\phi}$	c_0 特性値 [kN/m ²]	k	CV_c
①	18.0	20.0	40	0.10	-	-	-
②	22.6	22.6	-	-	999	-	-
③	18.0	20.0	-	-	0	-	-
④	18.0	20.0	40	0.10	-	-	-
⑤	22.6	22.6	-	-	999	-	-
⑥	18.0	20.0	34	0.10	-	-	-
⑦	18.0	20.0	40	0.10	-	-	-
⑧	18.0	20.0	31	$0.10 \cdot \Gamma(V/\theta)$	-	-	-
⑨	16.6	16.6	-	-	18.61	1.24	$CV_{org} \cdot \Gamma(V/\theta)$
⑩	17.8	17.8	-	-	35.09	-	$CV_{org} \cdot \Gamma(V/\theta)$
⑪	18.0	20.0	36	$0.10 \cdot \Gamma(V/\theta)$	-	-	-
⑫	18.0	20.0	36	$0.10 \cdot \Gamma(V/\theta)$	-	-	-
⑬	18.0	20.0	34	$0.10 \cdot \Gamma(V/\theta)$	-	-	-
⑭	18.0	20.0	33	$0.10 \cdot \Gamma(V/\theta)$	-	-	-
⑮	16.9	16.9	-	-	17.07	4.49	$CV_{org} \cdot \Gamma(V/\theta)$
⑯	15.4	15.4	-	-	43.20	0.07	$CV_{org} \cdot \Gamma(V/\theta)$
⑰	19.0	19.0	-	-	60.42	-	$CV_{org} \cdot \Gamma(V/\theta)$
⑱	18.0	20.0	36	$0.10 \cdot \Gamma(V/\theta)$	-	-	-

(6) その他設定値

項目	設定値
H.W.L [m]	3.90
L.W.L [m]	0.06
c_0 基準高 [m]	0.00
上載荷重[kN/m ²]	5.0

⑩J護岸

(1) 断面図



※番号：土層番号
 矢印：上載荷重位置
 ○印：円弧通過点

(2) 構造物表面，土層下端座標

土層	x 座標 [m]	y 座標 [m]
表面	-80.00,-47.57,-30.57,-26.57,-9.90,0.00,1.10,2.10,6.80,14.00,14.00,14.50,15.25,19.00,19.00,29.00,31.50,36.50,38.50,41.00,44.00,44.00,55.00	-12.00,-12.00,-3.50,-3.50,9.00,9.00,9.00,9.00,4.30,4.30,7.50,7.50,6.00,6.00,6.50,6.50,5.50,5.50,6.50,6.50,5.00,4.20,4.20
①	0.00,1.10	4.30,4.30
②	1.10,6.80	4.30,4.30
③	15.25,16.15,17.30,17.30,18.30,20.55,27.06,29.00	6.00,4.20,4.20,3.50,3.50,2.00,2.00,6.50
④	14.00,15.00,15.00,17.30	4.30,4.30,3.50,3.50
⑤	0.00,15.00	-6.00,-6.00
⑥	15.00,20.55	2.00,2.00
⑦	15.00,20.76,25.00,27.06	2.00,-2.80,-2.80,2.00
⑧	25.00,52.60,55.00	-2.80,-12.00,-12.00
⑨	-26.57,0.00	-3.50,-3.50
⑩	-47.57,-38.50,-13.00	-12.00,-12.00,-3.50
⑪	-38.50,-30.59,-26.09,-10.50,0.00,15.00,25.50,40.19,44.69,52.60	-12.00,-12.00,-10.50,-10.50,-13.00,-13.00,-10.50,-10.50,-12.00,-12.00
⑫	-30.59,-10.50,0.00,15.00,25.50,44.69	-12.00,-12.00,-14.50,-14.50,-12.00,-12.00
⑬	-80.00,-29.00	-27.00,-27.00
⑭	-29.00,-10.50	-27.00,-27.00
⑮	-10.50,25.50	-27.00,-27.00
⑯	25.50,55.00	-27.00,-27.00
⑰	-80.00,55.00	-40.00,-40.00

(3) 海面・残留水位面表

座標 [m]	x	y
1	-80.00	0.00
2	15.00	0.00
3	15.00	0.60
4	55.00	0.60

(4) 上載荷重座標，円弧通過点座標

座標 [m]	x	y
上載荷重左端	15.25	6.00
上載荷重右端	44.00	5.00
円弧通過点	15.00	-6.00

(5) 土層物性値

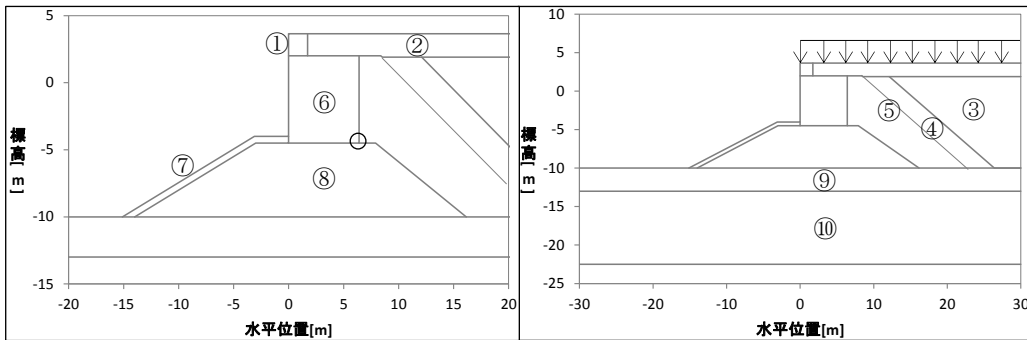
土層	湿潤重量 [kN/m ³]	飽和重量 [kN/m ³]	ϕ [度]	$CV_{\tan\phi}$	c_0 特性値 [kN/m ²]	k	CV_c
①	6.3	11.3	-	-	0	-	-
②	22.6	22.6	-	-	999	-	-
③	18.0	20.0	30	0.10	-	-	-
④	22.6	22.6	-	-	999	-	-
⑤	25.62	25.62	-	-	999	-	-
⑥	18.0	20.0	40	0.10	-	-	-
⑦	18.0	20.0	30	0.10	-	-	-
⑧	18.0	20.0	30	0.10	-	-	-
⑨	6.3	11.3	-	-	0	-	-
⑩	18.0	20.0	40	0.10	-	-	-
⑪	18.0	20.0	40	0.10	-	-	-
⑫	18.20	20.0	30	0.10	-	-	-
⑬	18.0	18.0	-	-	20.80	1.7	$CV_{org} \cdot \Gamma(V/\theta)$
⑭	18.0	18.0	-	-	23.76	2.4	$CV_{org} \cdot \Gamma(V/\theta)$
⑮	18.0	18.0	-	-	26.24	4.1	$CV_{org} \cdot \Gamma(V/\theta)$
⑯	18.0	18.0	-	-	30.80	1.9	$CV_{org} \cdot \Gamma(V/\theta)$
⑰	18.0	20.0	35	$0.10 \cdot \Gamma(V/\theta)$	-	-	-

(6) その他設定値

項目	設定値
H.W.L [m]	1.80
L.W.L [m]	0.00
c_0 基準高 [m]	-12.00
上載荷重[kN/m ²]	5.0

⑩K岸壁

(1) 断面図



※番号：土層番号
 矢印：上載荷重位置
 ○印：円弧通過点

(2) 構造物表面，土層下端座標

土層	x 座標 [m]	y 座標 [m]
表面	-30.00,-15.12,-3.12,0.00,0.00,30.00	-10.00,-10.00,-4.00,-4.00,3.65,3.65
①	0.00,1.73	2.00,2.00
②	1.73,8.38,8.52,30.00	2.00,2.00,1.90,1.90
③	12.10,26.38,30.00	1.90,-10.00,-10.00
④	8.52,22.80,26.38	1.90,-10.00,-10.00
⑤	6.40,7.90,16.15,22.80	-4.50,-4.50,-10.00,-10.00
⑥	0.00,6.40	-4.50,-4.50
⑦	-15.12,-14.00,-3.00,0.00	-10.00,-10.00,-4.50,-4.50
⑧	-14.00,16.15	-10.00,-10.00
⑨	-30.00,30.00	-13.00,-13.00
⑩	-30.00,30.00	-22.50,-22.50

(3) 海面・残留水位面表

座標 [m]	x	y
1	-30.00	0.10
2	6.40	0.10
3	6.40	0.70
4	30.00	0.70

(4) 上載荷重座標，円弧通過点座標

座標 [m]	x	y
上載荷重左端	0.00	3.65
上載荷重右端	30.00	3.65
円弧通過点	6.40	-4.50

(5) 土層物性値

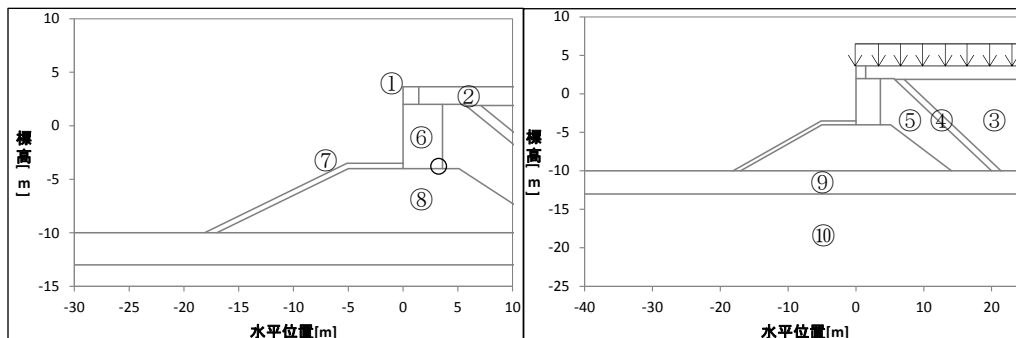
土層	湿潤重量 [kN/m³]	飽和重量 [kN/m³]	ϕ [度]	$CV_{\tan\phi}$	c_0 特性値 [kN/m²]	k	CV_c
①	22.6	22.6	-	-	999	-	-
②	18.0	20.0	30	0.10	-	-	-
③	18.0	20.0	40	0.10	-	-	-
④	19.0	19.0	40	0.10	-	-	-
⑤	19.0	19.0	40	0.10	-	-	-
⑥	20.66	20.66	-	-	999	-	-
⑦	19.0	19.0	-	-	0	-	-
⑧	19.0	19.0	40	0.10	-	-	-
⑨	18.78	18.78	34	$0.10 \cdot \Gamma(V/\theta)$	-	-	-
⑩	19.4	19.4	37	$0.10 \cdot \Gamma(V/\theta)$	-	-	-

(6) その他設定値

項目	設定値
H.W.L [m]	1.90
L.W.L [m]	0.10
c_0 基準高 [m]	0.00
上載荷重[kN/m²]	20.0

⑫L岸壁

(1) 断面図



※番号：土層番号
 矢印：上載荷重位置
 ○印：円弧通過点

(2) 構造物表面，土層下端座標

土層	x 座標 [m]	y 座標 [m]
表面	-40.00,-18.12,-5.12,0.00,0.00,25.00	-10.00,-10.00,-3.50,-3.50,3.65,3.65
①	0.00,1.43	2.00,2.00
②	1.43,5.60,5.72,25.00	2.00,2.00,1.90,1.90
③	7.10,21.38,25.00	1.90,-10.00,-10.00
④	5.72,20.00,21.38	1.90,-10.00,-10.00
⑤	3.60,5.10,14.10,20.00	-4.00,-4.00,-10.00,-10.00
⑥	0.00,3.60	-4.00,-4.00
⑦	-18.12,-17.00,-5.00,0.00	-10.00,-10.00,-4.00,-4.00
⑧	-17.00,14.10	-10.00,-10.00
⑨	-40.00,25.00	-13.00,-13.00
⑩	-40.00,25.00	-22.90,-22.90

(3) 海面・残留水位面表

座標 [m]	x	y
1	-40.00	0.10
2	3.60	0.10
3	3.60	0.70
4	25.00	0.70

(4) 上載荷重座標，円弧通過点座標

座標 [m]	x	y
上載荷重左端	0.00	3.65
上載荷重右端	25.00	3.65
円弧通過点	3.60	-4.00

(5) 土層物性値

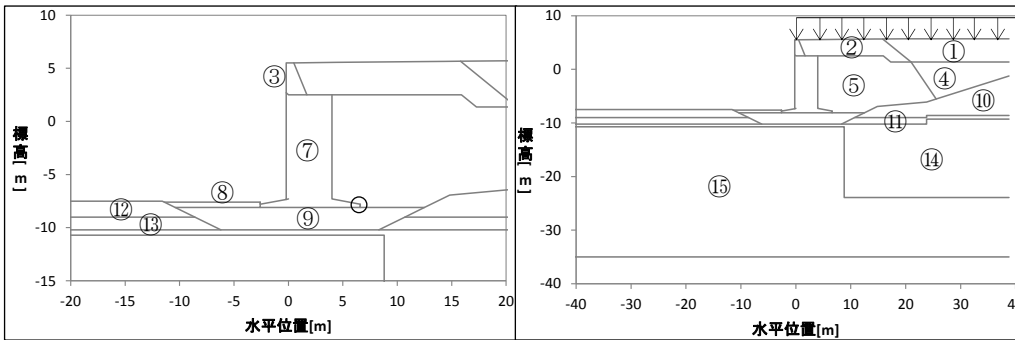
土層	湿潤重量 [kN/m ³]	飽和重量 [kN/m ³]	φ[度]	CV _{tan φ}	c ₀ 特性値 [kN/m ²]	k	CV _c
①	22.6	22.6	-	-	999	-	-
②	18.0	20.0	30	0.10	-	-	-
③	18.0	20.0	30	0.10	-	-	-
④	19.0	19.0	40	0.10	-	-	-
⑤	19.0	19.0	40	0.10	-	-	-
⑥	22.6	22.6	-	-	999	-	-
⑦	19.0	19.0	-	-	0	-	-
⑧	19.0	19.0	40	0.10	-	-	-
⑨	18.78	18.78	34	0.10・Γ(V/θ)	-	-	-
⑩	19.4	19.4	37	0.10・Γ(V/θ)	-	-	-

(6) その他設定値

項目	設定値
H.W.L [m]	1.90
L.W.L [m]	0.10
c ₀ 基準高 [m]	0.00
上載荷重[kN/m ²]	20.0

⑬M岸壁

(1) 断面図



※番号：土層番号
 矢印：上載荷重位置
 ○印：円弧通過点

※⑥は③の張り出し部下の気層および液層

(2) 構造物表面，土層下端座標

土層	x 座標 [m]	y 座標 [m]
表面	-50.00,-11.60,-11.40,-2.60,-2.60,-0.20,-0.20,0.50,4.40,14.40,15.80,19.80,38.80	-7.50,-7.50,-7.60,-7.60,-7.80,-7.34,5.50,5.51,5.55,5.65,5.66,5.70,5.70
①	15.80,20.97,38.80	5.66,1.35,1.35
②	0.50,1.70,15.90,17.28,20.97	5.51,2.50,2.50,1.35,1.35
③	-0.20,0.00,1.70	2.70,2.50,2.50
④	20.97,25.54,38.80	1.35,-5.53,-1.23
⑤	4.00,6.60,6.60,12.50,14.82,23.80,25.54	-7.30,-7.80,-8.10,-8.10,-6.94,-6.10,-5.53
⑥	-0.20,0.00	-7.34,-7.30
⑦	-2.60,6.60	-8.10,-8.10
⑧	-11.40,-10.40,-2.60	-7.60,-8.10,-8.10
⑨	-10.40,-8.60,-6.20,8.30,10.70,12.50	-8.10,-9.00,-10.20,-10.20,-9.00,-8.10
⑩	10.70,23.80,23.80,38.80	-9.00,-9.00,-8.60,-8.60
⑪	8.30,23.80,23.80,38.80	-10.20,-10.20,-9.30,-9.30
⑫	-50.00,-8.60	-9.00,-9.00
⑬	-50.00,-6.20	-10.20,-10.20
⑭	-50.00,8.80,8.80,38.80	-10.70,-10.70,-23.90,-23.90
⑮	-50.00,38.80	-35.00,-35.00

(3) 海面・残留水位面表

座標 [m]	x	y
1	-50.00	0.08
2	0.00	0.08
3	0.00	1.35
4	38.80	1.35

(4) 上載荷重座標，円弧通過点座標

座標 [m]	x	y
上載荷重左端	-0.20	5.50
上載荷重右端	38.80	5.70
円弧通過点	6.60	-8.10

(5) 土層物性値

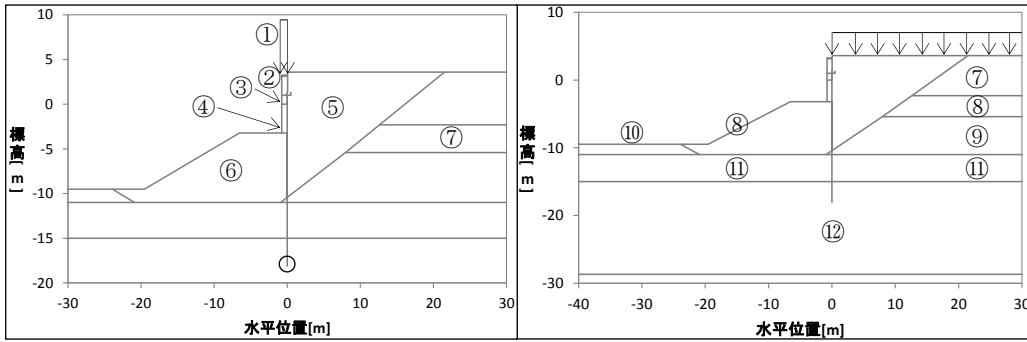
土層	湿潤重量 [kN/m ³]	飽和重量 [kN/m ³]	ϕ [度]	$CV_{\tan\phi}$	c_0 特性値 [kN/m ²]	k	CV_c
①	18.0	20.0	30	0.10	-	-	-
②	18.0	20.0	40	0.10	-	-	-
③	22.6	22.6	-	-	999	-	-
④	18.0	20.0	30	0.10	-	-	-
⑤	18.0	20.0	40	0.10	-	-	-
⑥	0.0	10.0	-	-	-	-	-
⑦	21.03	21.03	-	-	999	-	-
⑧	18.0	20.0	-	-	0	-	-
⑨	18.0	20.0	40	0.10	-	-	-
⑩	14.1	14.2	-	-	5.2	-	$CV_{org} \cdot \Gamma(V/\theta)$
⑪	18.2	18.3	-	-	14.6	-	$CV_{org} \cdot \Gamma(V/\theta)$
⑫	14.1	14.2	-	-	5.2	-	$CV_{org} \cdot \Gamma(V/\theta)$
⑬	18.0	20.0	34	$0.10 \cdot \Gamma(V/\theta)$	-	-	-
⑭	20.0	20.0	37	$0.10 \cdot \Gamma(V/\theta)$	-	-	-
⑮	20.0	20.0	38	$0.10 \cdot \Gamma(V/\theta)$	-	-	-

(6) その他設定値

項目	設定値
H.W.L [m]	3.90
L.W.L [m]	0.08
c_0 基準高 [m]	0.00
上載荷重[kN/m ²]	20.0

⑭N岸壁

(1) 断面図



※番号：土層番号
 矢印：上載荷重位置
 ○印：円弧通過点

※土層①は栈橋荷重を単位体積重量に換算して入力，③と④は②の張り出し部下の気層および液層

(2) 構造物表面，土層下端座標

土層	x 座標 [m]	y 座標 [m]
表面	-40.00,-19.53,-6.53,-0.75,-0.75,0.05,0.05,30.00	-9.50,-9.50,-3.21,-3.21,3.25,3.25,3.60,3.60
①	-0.75,0.05	3.15,3.15
②	-0.75,0.50	1.00,1.00
③	-0.75,0.00	0.00,0.00
④	-0.75,0.00	-3.21,-3.21
⑤	0.00,7.97,12.63,21.49	-10.42,-5.41,-2.31,3.60
⑥	-23.91,-20.91,-0.92,0.00	-9.50,-11.00,-11.00,-10.42
⑦	12.63,30.00	-2.31,-2.31
⑧	7.97,30.00	-5.41,-5.41
⑨	-0.92,30.00	-11.00,-11.00
⑩	-40.00,-20.91	-11.00,-11.00
⑪	-40.00,30.00	-15.00,-15.00
⑫	-40.00,30.00	-28.70,-28.70

(3) 海面・残留水位面表

座標 [m]	x	y
1	-40.00	0.00
2	0.00	0.00
3	0.00	1.33
4	30.00	1.33

(4) 上載荷重座標，円弧通過点座標

座標 [m]	x	y
上載荷重左端	0.05	3.60
上載荷重右端	30.00	3.60
円弧通過点	0.00	-18.10

(5) 土層物性値

土層	湿潤重量 [kN/m ³]	飽和重量 [kN/m ³]	ϕ [度]	$CV_{\tan\phi}$	c_0 特性値 [kN/m ²]	k	CV_c
①	836.25	836.25	-	-	999	-	-
②	22.6	22.6	-	-	999	-	-
③	0.0	10.0	-	-	-	-	-
④	10.0	10.0	-	-	-	-	-
⑤	18.0	20.0	30	0.10	-	-	-
⑥	18.0	20.0	40	0.10	-	-	-
⑦	18.0	20.0	30	0.10	-	-	-
⑧	18.0	20.0	34	0.10	-	-	-
⑨	18.0	20.0	31	0.10	-	-	-
⑩	18.0	20.0	31	$0.10 \cdot \Gamma(V/\theta)$	-	-	-
⑪	18.3	18.3	-	-	-43.3	6.55	$CV_{org} \cdot \Gamma(V/\theta)$
⑫	15.4	15.4	-	-	60.42	-	$CV_{org} \cdot \Gamma(V/\theta)$

(6) その他設定値

項目	設定値
H.W.L [m]	2.00
L.W.L [m]	0.00
c_0 基準高 [m]	0.00
上載荷重[kN/m ²]	20.0

付録 B 現行設計法の部分係数表

本研究で用いた現行設計法の部分係数表を以下に示す。

表-B.1 防波堤（混成堤）の円弧すべりの部分係数

目標信頼性指標 β_T		3.3			
目標破壊確率 P_{FT}		4.5×10^{-4}			
		γ	α	μ/X_k	V
γ_{cl}	地盤強度：粘着力	0.90	0.285	1.00	0.038
$\gamma_{\tan \phi'}$	地盤強度：せん断抵抗角の正接	0.90	0.380	1.00	0.038
γ_{w_i}	マウンドが海底面より下に位置する場合				
	1 海底面より上にある地盤,消波工等	1.00	-0.007	1.00	0.03
	2 マウンド,海底面より下にある砂質土	0.90	0.070		
	3 海底面より下にある粘性土	0.90	0.125		
γ_{w_i}	マウンドが海底面より上に位置する場合				
	1 海底面より上にある地盤,マウンド,消波工等	1.00	-0.007	1.00	0.03
	2 海底面より下にある砂質土	0.90	0.070		
	3 海底面より下にある粘性土	0.90	0.125		
γ_q	分布荷重	1.10	-0.463	1.02	0.04

表-B.2 防波堤（消波ブロック被覆堤）の円弧すべりの部分係数

目標信頼性指標 β_T		3.3			
目標破壊確率 P_{FT}		4.5×10^{-4}			
		γ	α	μ/X_k	V
γ_{cl}	地盤強度：粘着力	0.90	0.327	1.00	0.035
$\gamma_{\tan \phi'}$	地盤強度：せん断抵抗角の正接	0.90	0.364	1.00	0.035
γ_{w_i}	マウンドが海底面より下に位置する場合				
	1 海底面より上にある地盤,消波工等	1.00	-0.034	1.00	0.03
	2 マウンド,海底面より下にある砂質土	0.90	-0.027		
	3 海底面より下にある粘性土	0.90	0.285		
γ_{w_i}	マウンドが海底面より上に位置する場合				
	1 海底面より上にある地盤,マウンド, 消波工等	1.00	-0.034	1.00	0.03
	2 海底面より下にある砂質土	0.90	-0.027		
	3 海底面より下にある粘性土	0.90	0.285		
γ_q	分布荷重	1.10	-0.410	1.02	0.04

表-B.3 重力式係船岸（耐震強化）の円弧すべりの部分係数

目標システム信頼性指標 β_T		3.1			
目標システム破壊確率 P_{FT}		1.0×10^{-3}			
γ の計算に用いる目標信頼性指標 β_T'		3.31			
		γ	α	μ/X_k	V
γ_{cr}	地盤強度：粘着力	0.90	0.407	1.00	0.04
$\gamma_{\tan\phi'}$	地盤強度：せん断抵抗角の正接	0.90	0.330	1.00	0.04
γ_{w_i}	マウンドが海底面より下に位置する場合				
	1 海底面より上にある地盤,消波工等	1.10	-0.176	1.00	0.03
	2 マウンド,海底面より下にある砂質土	0.90	0.227	1.00	0.03
	3 海底面より下にある粘性土	1.00	0.000	1.00	0.03
	マウンドが海底面より上に位置する場合				
	1 海底面より上にある地盤,マウンド, 消波工等	1.10	-0.176	1.00	0.03
	2 海底面より下にある砂質土	0.90	0.227	1.00	0.03
	3 海底面より下にある粘性土	1.00	0.000	1.00	0.03
γ_q	載荷重	1.80	-0.543	1.00	0.40
γ_{RWL}	残留水位	1.10	-0.014	1.00	0.05

表-B.4 重力式係船岸（耐震強化以外）の円弧すべりの部分係数

目標システム信頼性指標 β_T		2.7			
目標システム破壊確率 P_{FT}		4.0×10^{-3}			
γ の計算に用いる目標信頼性指標 β_T'		2.89			
		γ	α	μ/X_k	V
γ_{cr}	地盤強度：粘着力	0.90	0.406	1.00	0.04
$\gamma_{\tan\phi'}$	地盤強度：せん断抵抗角の正接	0.90	0.320	1.00	0.04
γ_{w_i}	マウンドが海底面より下に位置する場合				
	1 海底面より上にある地盤,消波工等	1.10	-0.173	1.00	0.03
	2 マウンド,海底面より下にある砂質土	0.90	0.227	1.00	0.03
	3 海底面より下にある粘性土	1.00	0.000	1.00	0.03
	マウンドが海底面より上に位置する場合				
	1 海底面より上にある地盤,マウンド, 消波工等	1.10	-0.173	1.00	0.03
	2 海底面より下にある砂質土	0.90	0.227	1.00	0.03
	3 海底面より下にある粘性土	1.00	0.000	1.00	0.03
γ_q	載荷重	1.70	-0.551	1.00	0.40
γ_{RWL}	残留水位	1.10	-0.015	1.00	0.05

表-B.5 矢板式係船岸（耐震強化以外）の円弧すべりの部分係数

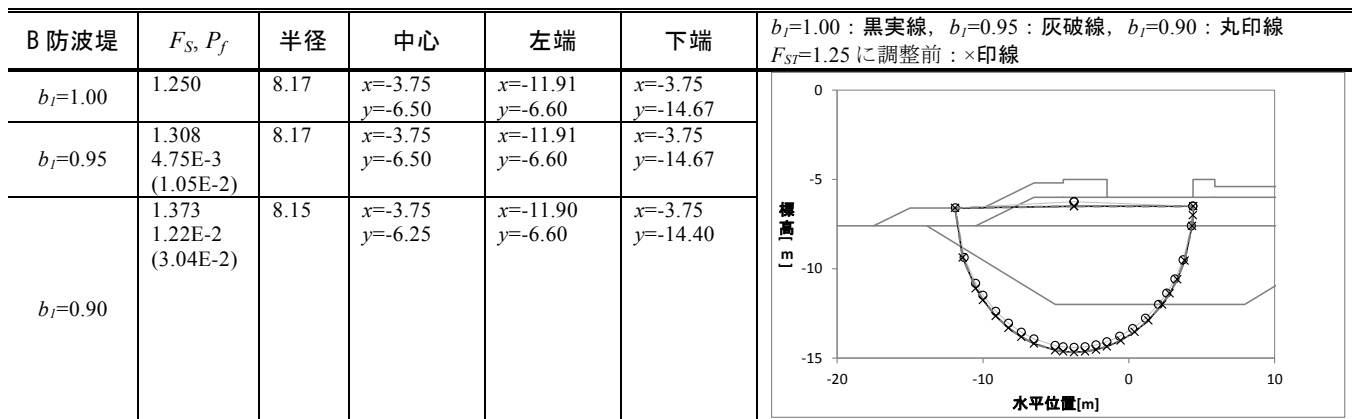
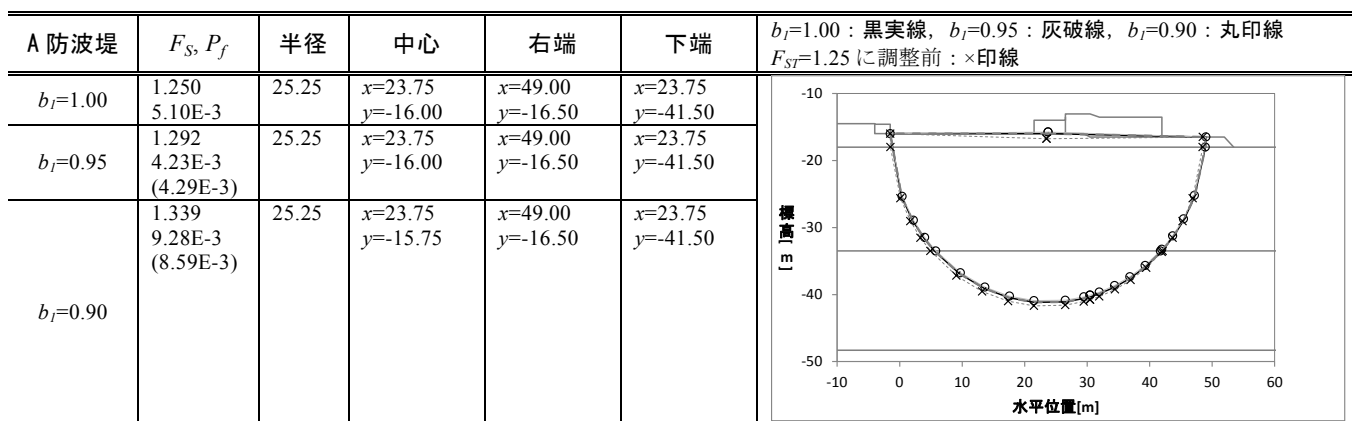
目標システム信頼性指標 β_T		2.7			
目標システム破壊確率 P_{fT}		4.0×10^{-3}			
		γ	α	μ/X_k	V
γ_{ci}	地盤強度：粘着力	0.90	0.329	1.00	0.04
$\gamma_{\tan \phi'}$	地盤強度：せん断抵抗角の正接	0.90	0.396	1.00	0.04
γ_{wi}	1 海底面より上にある地盤等	1.10	-0.271	1.00	0.03
	2 マウンド,海底面より下にある砂質土	0.90	0.312	1.00	0.03
	3 海底面より下にある粘性土	1.00	0.000	1.00	0.03
γ_q	載荷重	1.60	-0.487	1.00	0.40
γ_{RWL}	残留水位	1.10	-0.040	1.00	0.05

付録 C 最小すべり円弧の位置・形状の検討

本研究では、最小すべり円弧の位置・形状を特性値による照査で決定し、破壊確率および部分係数の計算のためのモンテカルロ・シミュレーションを実施するときの粘性土の粘着力の平均値 c^* は特性値 c_k から補正係数 b_1, b_2 を用いて以下の式で求めている。

$$c^* = c_k / (b_1 \cdot b_2)$$

ただし、特性値のすべり円弧位置は平均値の場合とずれている可能性があるため、平均値の最小すべり円弧位置の探索を行った。結果として、施設や円弧の規模に対して、特性値と平均値の円弧位置の変化はわずかであり、特性値による円弧固定で検討上問題は無いと判断した。 $b_1=1.00, 0.95, 0.90$ で平均値を用いた場合および $F_{ST}=1.25$ に調整する前の最小すべり円弧の位置・形状を以下に示す。



C 防波堤	F_S, P_f	半径	中心	左端	下端	$b_I=1.00$: 黒実線, $b_I=0.95$: 灰破線, $b_I=0.90$: 丸印線 $F_{SI}=1.25$ に調整前 : ×印線
$b_I=1.00$	1.250 6.90E-3	18.64	$x=-3.25$ $y=-2.75$	$x=-19.55$ $y=-11.80$	$x=-3.25$ $y=-21.39$	
$b_I=0.95$	(4.77E-3)	18.64	$x=-3.25$ $y=-2.75$	$x=-19.55$ $y=-11.80$	$x=-3.25$ $y=-21.39$	
$b_I=0.90$	(1.21E-2)	18.64	$x=-3.25$ $y=-2.75$	$x=-19.55$ $y=-11.80$	$x=-3.25$ $y=-21.39$	

D 防波堤	F_S, P_f	半径	中心	右端	下端	$b_I=1.00$: 黒実線, $b_I=0.95$: 灰破線, $b_I=0.90$: 丸印線 $F_{SI}=1.25$ に調整前 : ×印線
$b_I=1.00$	1.250 7.61E-3	17.25	$x=17.25$ $y=-6.25$	$x=34.09$ $y=-10.00$	$x=17.25$ $y=-23.50$	
$b_I=0.95$	1.274 1.30E-2 (8.10E-3)	16.25	$x=16.25$ $y=-6.25$	$x=32.06$ $y=-10.00$	$x=16.25$ $y=-22.50$	
$b_I=0.90$	1.326 3.17E-2 (2.55E-2)	16.25	$x=16.25$ $y=-6.25$	$x=32.06$ $y=-10.00$	$x=16.25$ $y=-22.50$	

E 防波堤	F_S, P_f	半径	中心	右端	下端	$b_I=1.00$: 黒実線, $b_I=0.95$: 灰破線, $b_I=0.90$: 丸印線 $F_{SI}=1.25$ に調整前 : ×印線
$b_I=1.00$	1.250 3.49E-2	40.50	$x=38.00$ $y=-2.00$	$x=72.63$ $y=-23.00$	$x=38.00$ $y=-42.50$	
$b_I=0.95$	1.300 1.42E-2 (2.02E-2)	40.50	$x=38.00$ $y=-2.00$	$x=72.63$ $y=-23.00$	$x=38.00$ $y=-42.50$	
$b_I=0.90$	1.355 8.75E-3 (1.69E-2)	40.50	$x=38.00$ $y=-2.00$	$x=72.63$ $y=-23.00$	$x=38.00$ $y=-42.50$	

F 防波堤	F_S, P_f	半径	中心	左端	下端	$b_f=1.00$: 黒実線, $b_f=0.95$: 灰破線, $b_f=0.90$: 丸印線 $F_{St}=1.25$ に調整前: ×印線
$b_f=1.00$	1.250 1.70E-2	8.72	$x=7.63$ $y=-4.75$	$x=15.83$ $y=-7.70$	$x=7.63$ $y=-13.47$	
$b_f=0.95$	1.300 1.98E-2 (2.26E-2)	8.73	$x=7.63$ $y=-4.63$	$x=15.80$ $y=-7.70$	$x=7.63$ $y=-13.36$	
$b_f=0.90$	1.350 5.13E-2 (6.12E-2)	8.61	$x=7.50$ $y=-4.63$	$x=-15.54$ $y=-7.70$	$x=7.63$ $y=-13.24$	

G 防波堤	F_S, P_f	半径	中心	右端	下端	$b_f=1.00$: 黒実線, $b_f=0.95$: 灰破線, $b_f=0.90$: 丸印線 $F_{St}=1.25$ に調整前: ×印線
$b_f=1.00$	1.250 9.79E-3	14.87	$x=14.50$ $y=6.00$	$x=26.10$ $y=-3.30$	$x=14.50$ $y=-8.87$	
$b_f=0.95$	1.306 9.78E-3 (1.54E-2)	14.87	$x=14.50$ $y=6.00$	$x=26.10$ $y=-3.30$	$x=14.50$ $y=-8.87$	
$b_f=0.90$	1.368 2.84E-2 (4.88E-2)	14.87	$x=14.50$ $y=6.00$	$x=26.10$ $y=-3.30$	$x=14.50$ $y=-8.87$	

H 護岸	F_S, P_f	半径	中心	左端	下端	$b_f=1.00$: 黒実線, $b_f=0.95$: 灰破線, $b_f=0.90$: 丸印線 $F_{St}=1.25$ に調整前: ×印線
$b_f=1.00$	1.254 6.14E-3	15.77	$x=-8.38$ $y=10.00$	$x=-21.47$ $y=1.21$	$x=-8.38$ $y=-5.77$	
$b_f=0.95$	1.304 7.37E-3 (9.26E-3)	15.73	$x=-8.25$ $y=10.13$	$x=-21.21$ $y=1.21$	$x=-8.25$ $y=-5.60$	
$b_f=0.90$	1.359 2.72E-2 (3.46E-2)	15.85	$x=-8.25$ $y=10.38$	$x=-21.19$ $y=1.21$	$x=-8.25$ $y=-5.47$	

I 護岸	F_S, P_f	半径	中心	左端	下端	$b_I=1.00$: 黒実線, $b_I=0.95$: 灰破線, $b_I=0.90$: 丸印線 $F_{ST}=1.25$ に調整前: ×印線
$b_I=1.00$	1.253 6.00E-3	15.65	$x=-8.50$ $y=9.38$	$x=-21.88$ $y=1.27$	$x=-8.50$ $y=-6.27$	
$b_I=0.95$	1.302 7.32E-3 (9.27E-3)	15.65	$x=-8.50$ $y=9.38$	$x=-21.88$ $y=1.27$	$x=-8.50$ $y=-6.27$	
$b_I=0.90$	1.357 2.75E-2 (3.35E-2)	15.37	$x=-8.25$ $y=9.25$	$x=-21.25$ $y=1.27$	$x=-8.25$ $y=-6.12$	

J 護岸	F_S, P_f	半径	中心	左端	下端	$b_I=1.00$: 黒実線, $b_I=0.95$: 灰破線, $b_I=0.90$: 丸印線 $F_{ST}=1.25$ に調整前: ×印線
$b_I=1.00$	1.250 3.12E-3	42.30	$x=-20.25$ $y=17.38$	$x=-50.68$ $y=-12.00$	$x=-20.25$ $y=-24.92$	
$b_I=0.95$	1.285 1.62E-3 (2.19E-3)	42.17	$x=-19.50$ $y=18.25$	$x=-48.88$ $y=-12.00$	$x=-19.50$ $y=-23.92$	
$b_I=0.90$	1.336 1.13E-3 (2.34E-3)	42.17	$x=-19.50$ $y=18.25$	$x=-48.88$ $y=-12.00$	$x=-19.50$ $y=-23.92$	

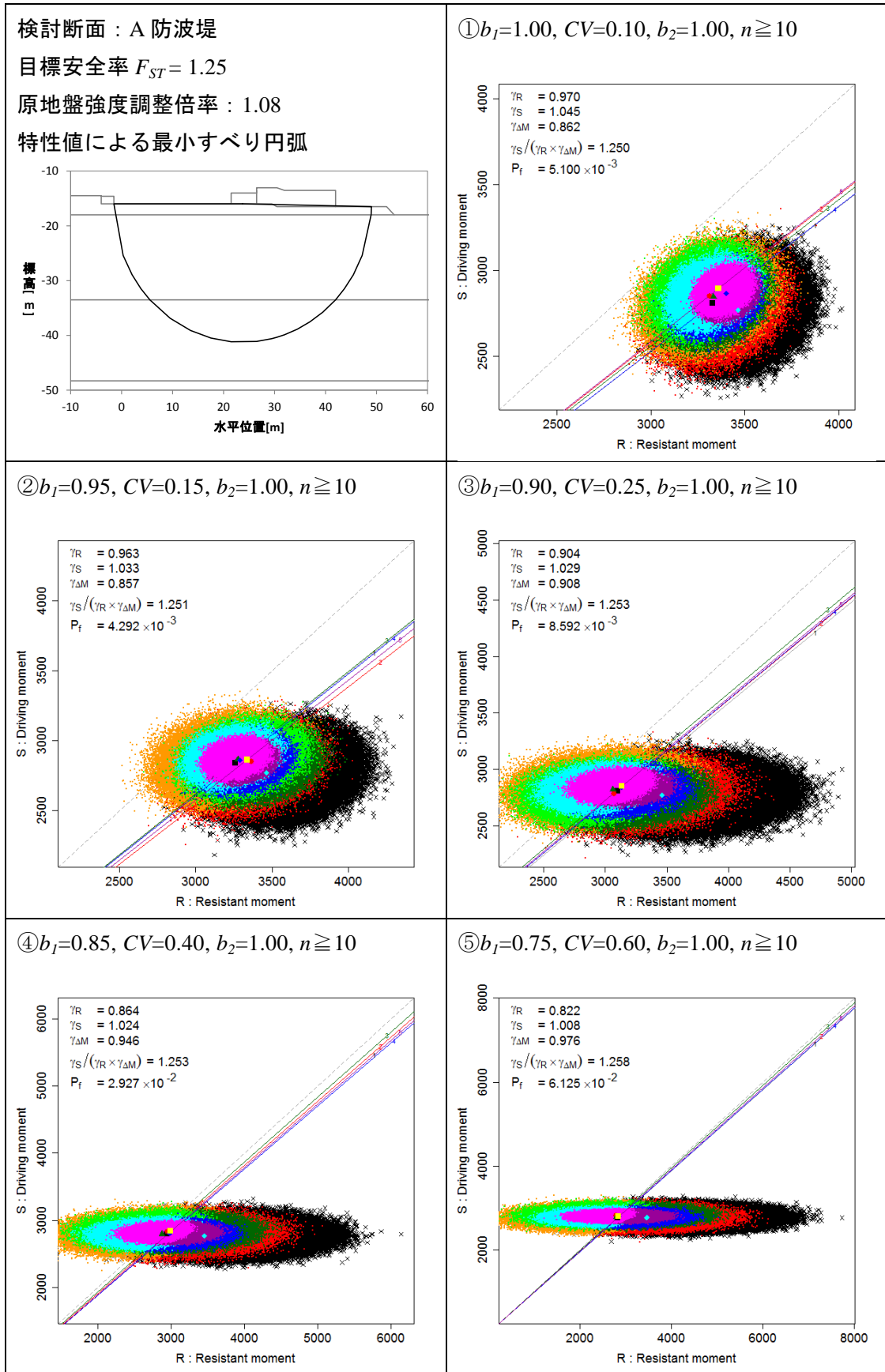
K 岸壁	F_S, P_f	半径	中心	左端	下端	$b_I=1.00$: 黒実線, $b_I=0.95$: 灰破線, $b_I=0.90$: 丸印線 $F_{ST}=1.25$ に調整前: ×印線
$b_I=1.00$	1.250 9.10E-3	17.54	$x=-8.50$ $y=4.75$	$x=-17.99$ $y=-10.00$	$x=-8.50$ $y=-12.79$	

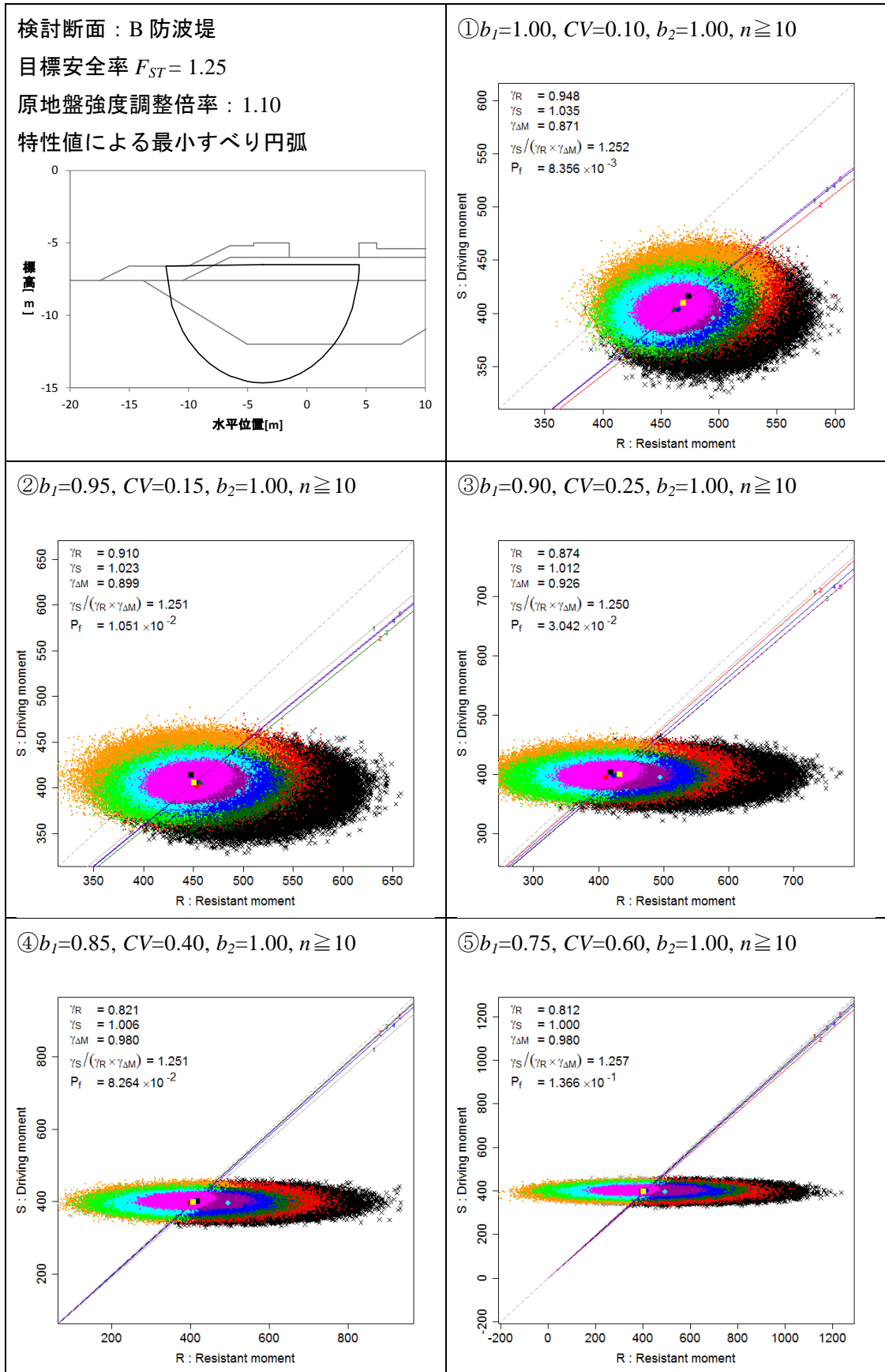
L 岸壁	F_S, P_f	半径	中心	左端	下端	$b_l=1.00$: 黒実線, $b_l=0.95$: 灰破線, $b_l=0.90$: 丸印線 $F_{St}=1.25$ に調整前: ×印線
$b_l=1.00$	1.250 9.55E-3	18.57	$x=-11.63$ $y=6.63$	$x=-19.89$ $y=-10.00$	$x=-11.63$ $y=-11.94$	

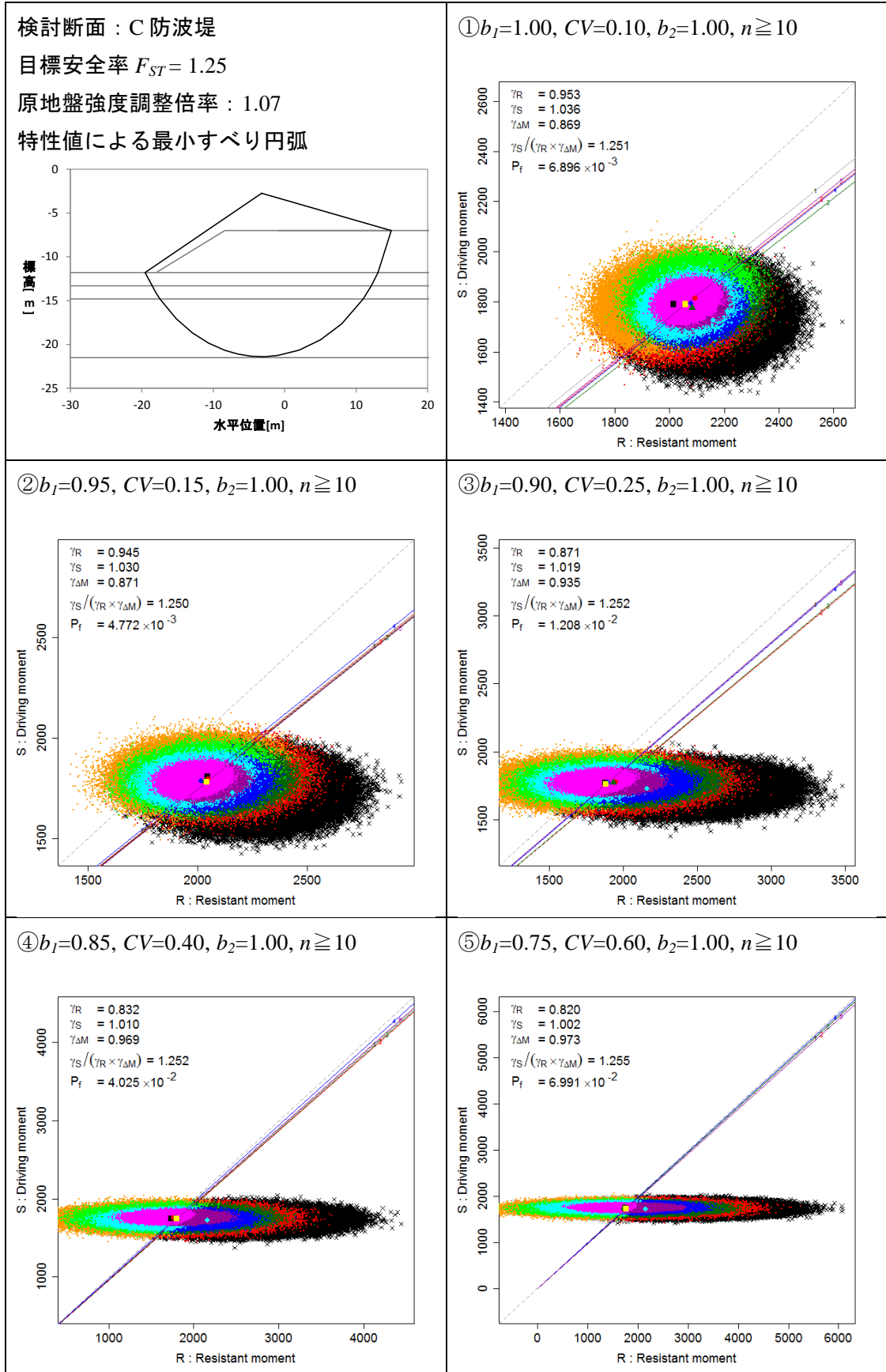
M 岸壁	F_S, P_f	半径	中心	左端	下端	$b_l=1.00$: 黒実線, $b_l=0.95$: 灰破線, $b_l=0.90$: 丸印線 $F_{St}=1.25$ に調整前: ×印線
$b_l=1.00$	1.250 6.18E-3	17.06	$x=-4.63$ $y=4.75$	$x=-16.50$ $y=-7.50$	$x=-16.50$ $y=-12.31$	
$b_l=0.95$	1.251 6.11E-3 (6.30E-3)	17.06	$x=-4.63$ $y=4.75$	$x=-16.50$ $y=-7.50$	$x=-16.50$ $y=-12.31$	
$b_l=0.90$	1.251 6.23E-3 (6.16E-3)	17.06	$x=-4.63$ $y=4.75$	$x=-16.50$ $y=-7.50$	$x=-16.50$ $y=-12.31$	

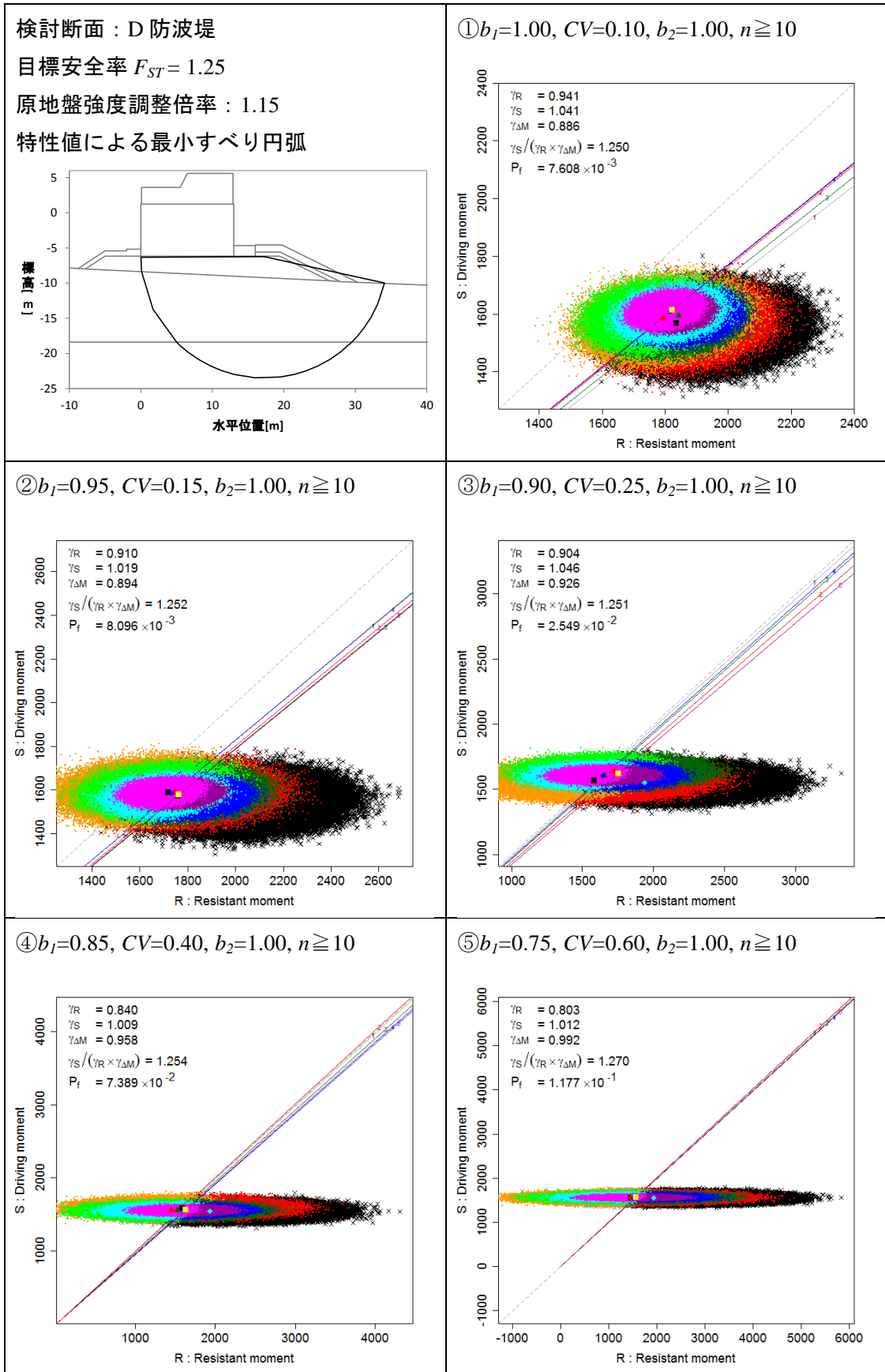
N 岸壁	F_S, P_f	半径	中心	左端	下端	$b_l=1.00$: 黒実線, $b_l=0.95$: 灰破線, $b_l=0.90$: 丸印線 $F_{St}=1.25$ に調整前: ×印線
$b_l=1.00$	1.250 6.93E-3	25.46	$x=-4.25$ $y=7.00$	$x=-23.26$ $y=-9.93$	$x=-4.25$ $y=-18.46$	
$b_l=0.95$	1.307 6.31E-3 (1.19E-2)	25.70	$x=-4.25$ $y=7.25$	$x=-23.26$ $y=-9.93$	$x=-4.25$ $y=-18.45$	
$b_l=0.90$	1.370 (4.30E-2)	25.70	$x=-4.25$ $y=7.25$	$x=-23.26$ $y=-9.93$	$x=-4.25$ $y=-18.45$	

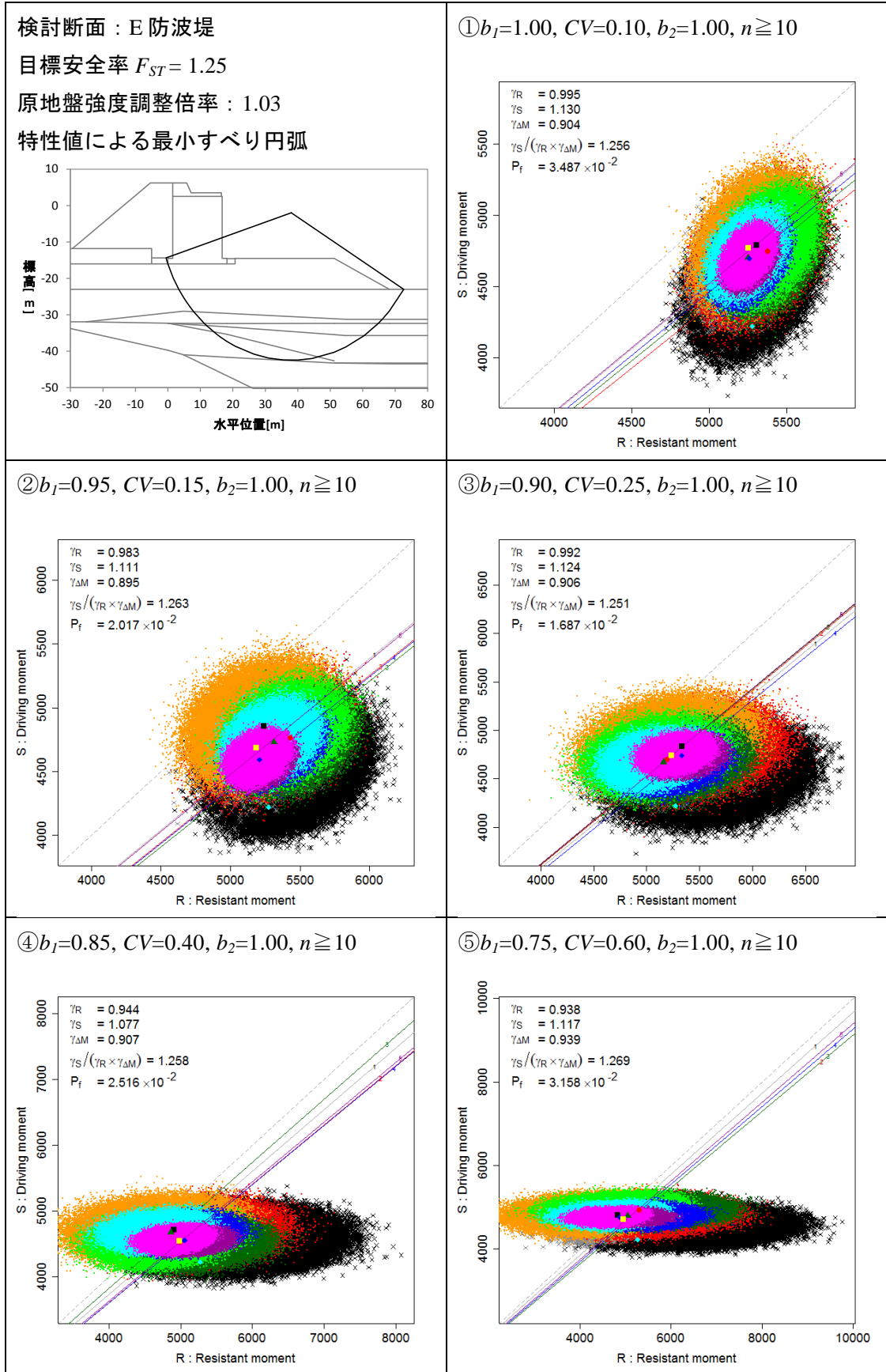
付録 D モンテカルロ・シミュレーション結果図 (目標安全率 $F_{ST}=1.25$ 断面の破壊確率計算)

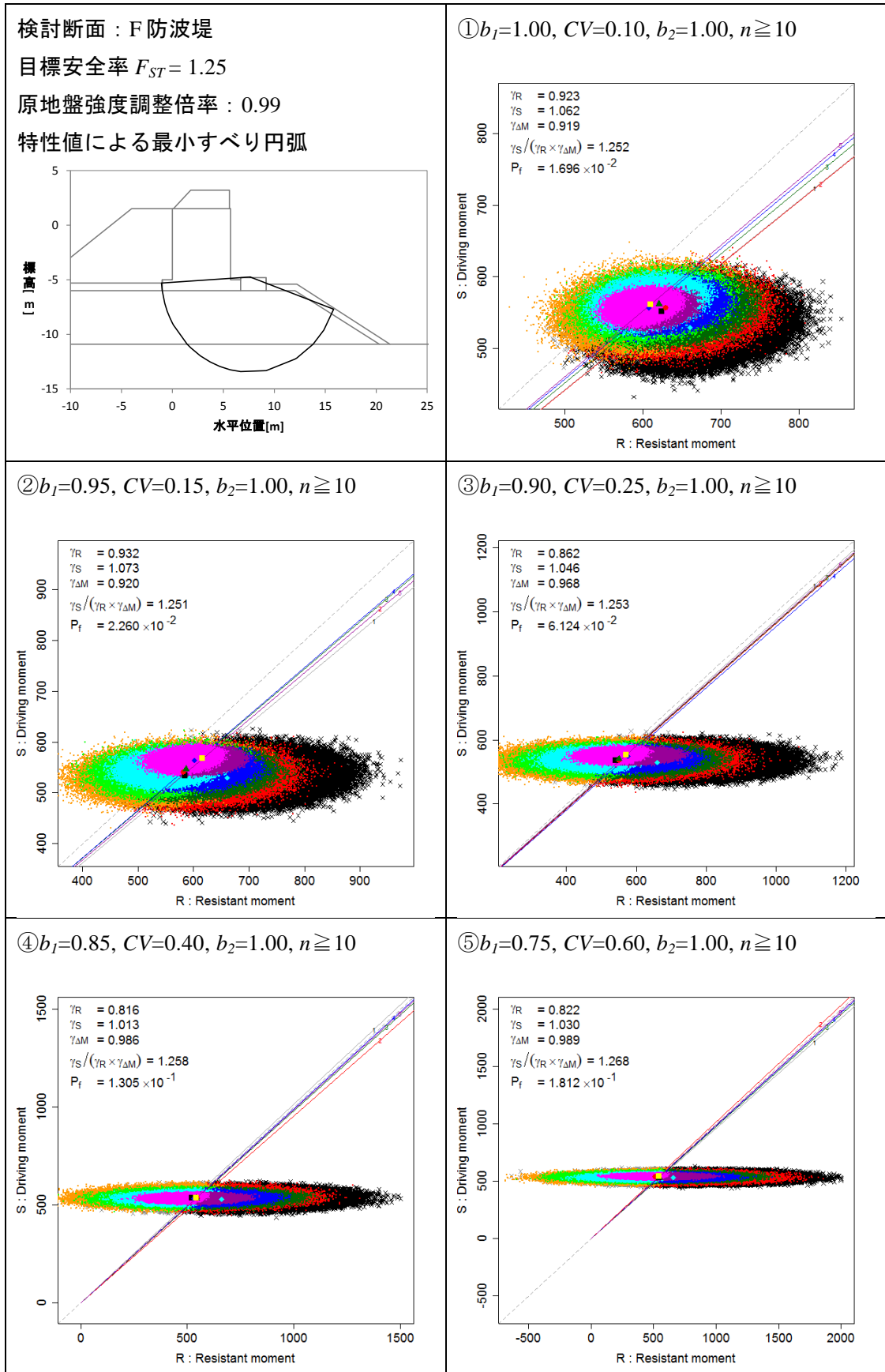










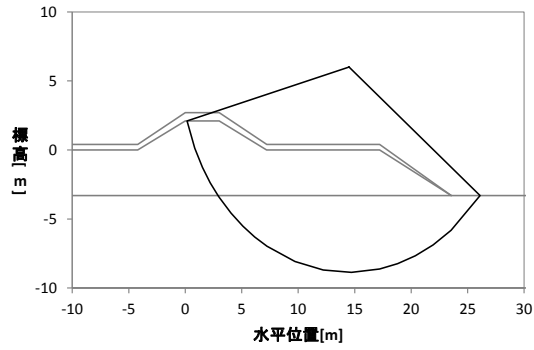


検討断面：G 防波堤

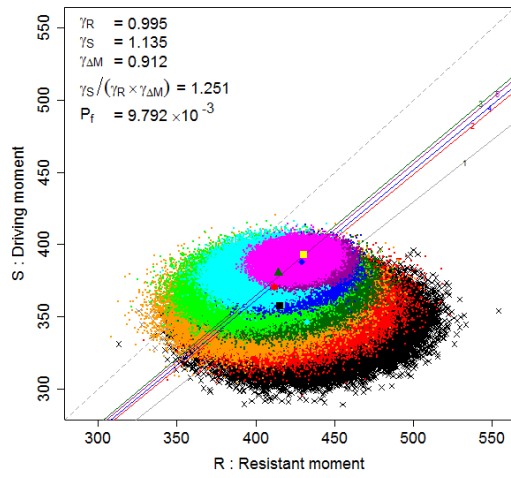
目標安全率 $F_{ST} = 1.25$

原地盤強度調整倍率：0.95

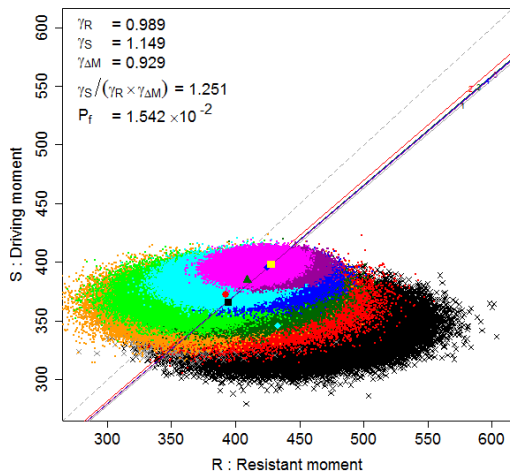
特性値による最小すべり円弧



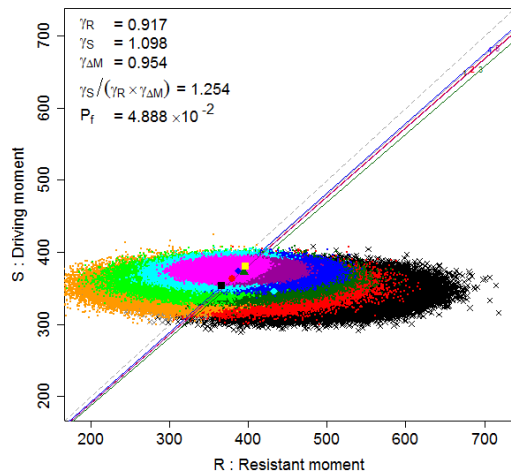
① $b_I=1.00, CV=0.10, b_2=1.00, n \geq 10$



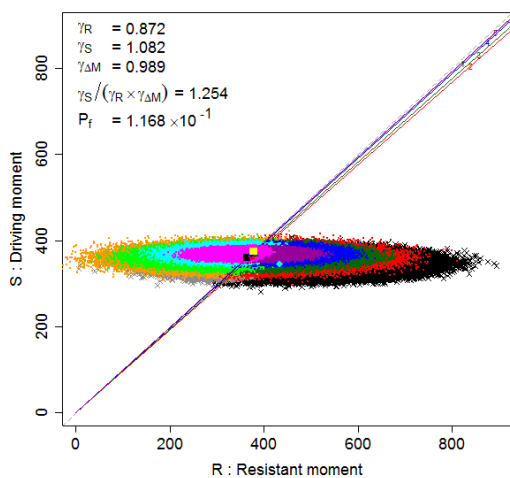
② $b_I=0.95, CV=0.15, b_2=1.00, n \geq 10$



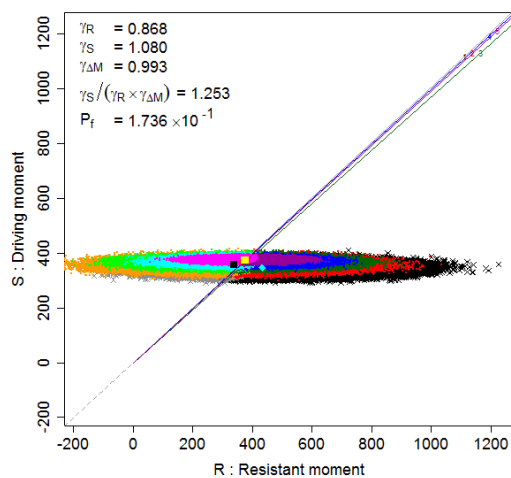
③ $b_I=0.90, CV=0.25, b_2=1.00, n \geq 10$

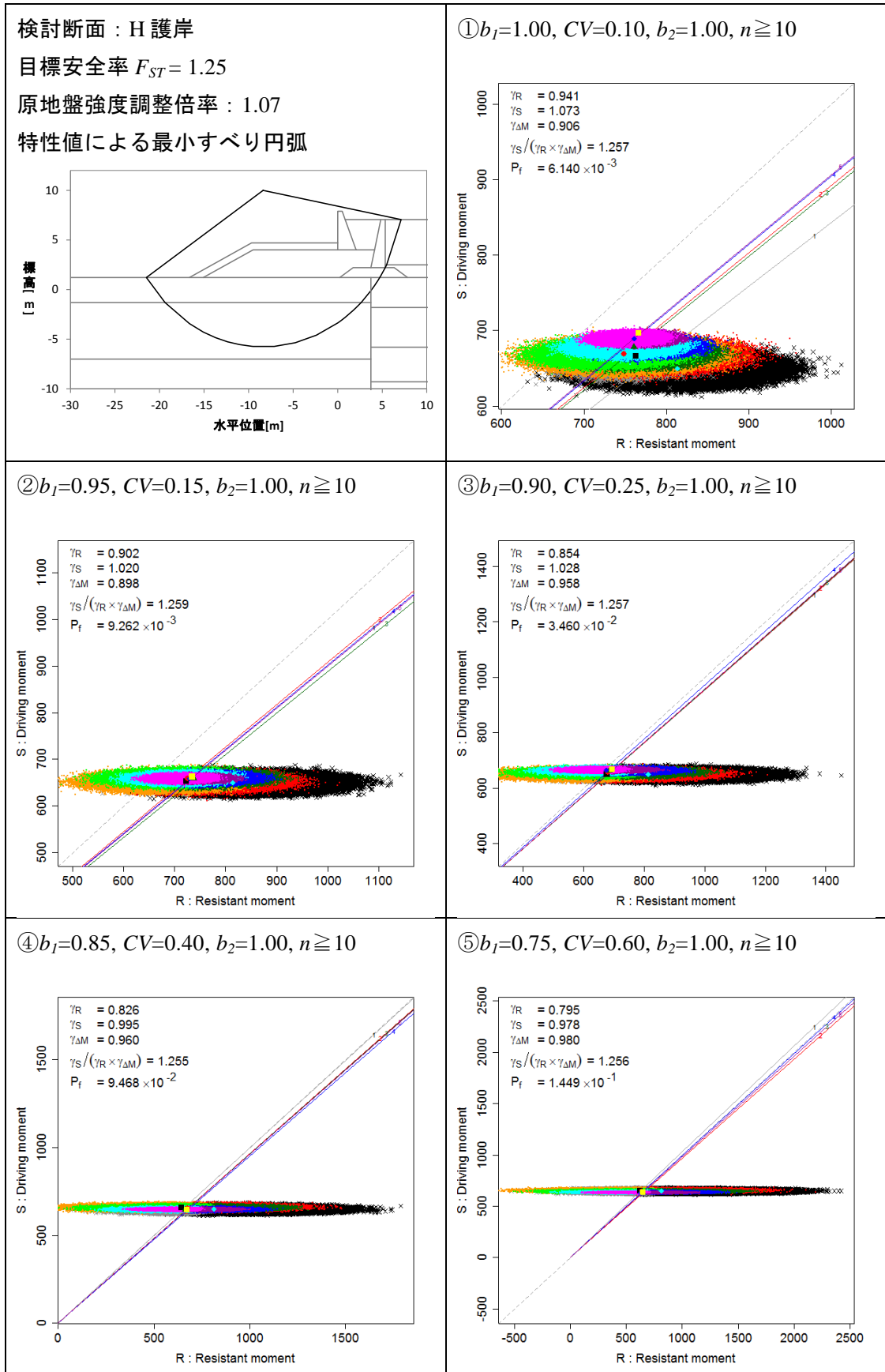


④ $b_I=0.85, CV=0.40, b_2=1.00, n \geq 10$



⑤ $b_I=0.75, CV=0.60, b_2=1.00, n \geq 10$



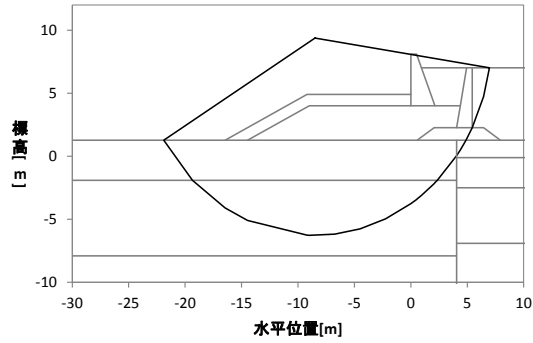


検討断面：I 護岸

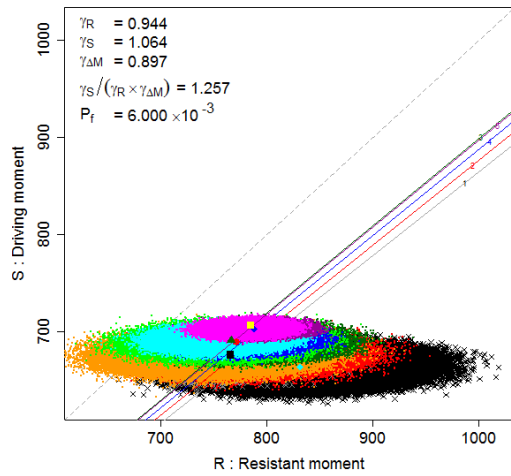
目標安全率 $F_{ST} = 1.25$

原地盤強度調整倍率：1.06

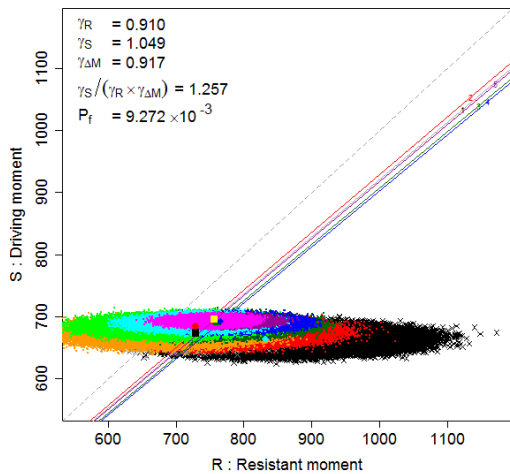
特性値による最小すべり円弧



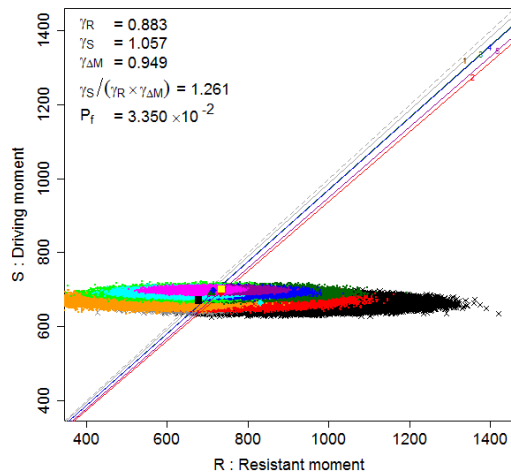
① $b_I=1.00, CV=0.10, b_2=1.00, n \geq 10$



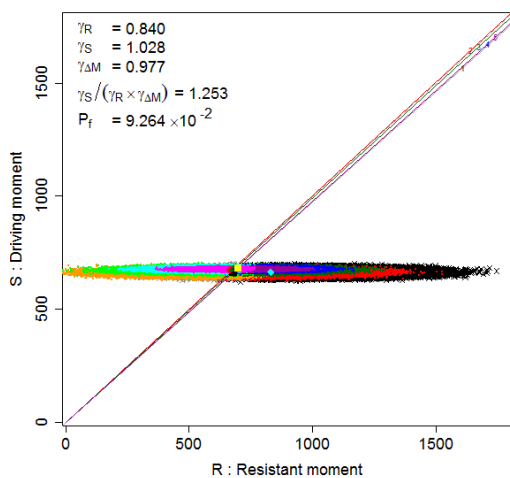
② $b_I=0.95, CV=0.15, b_2=1.00, n \geq 10$



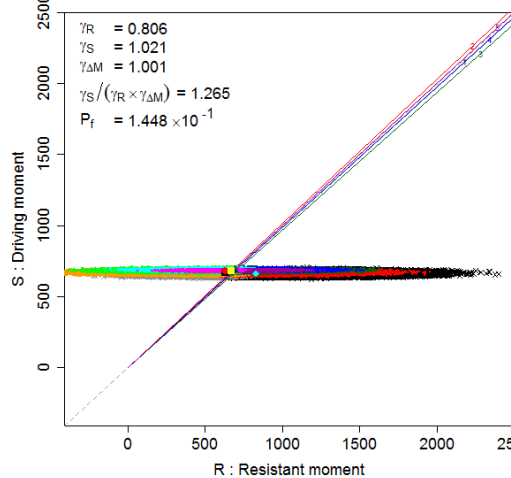
③ $b_I=0.90, CV=0.25, b_2=1.00, n \geq 10$

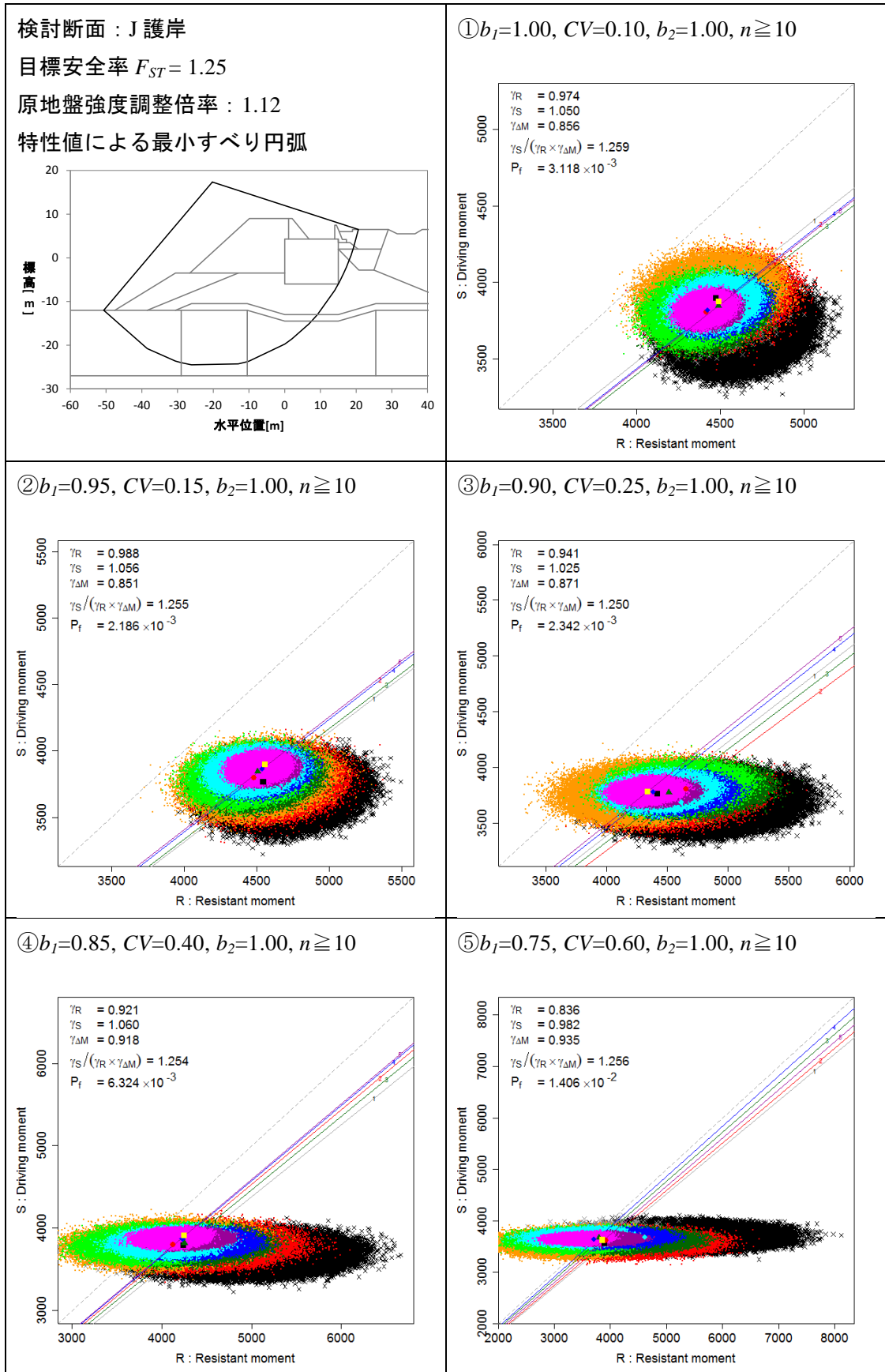


④ $b_I=0.85, CV=0.40, b_2=1.00, n \geq 10$



⑤ $b_I=0.75, CV=0.60, b_2=1.00, n \geq 10$



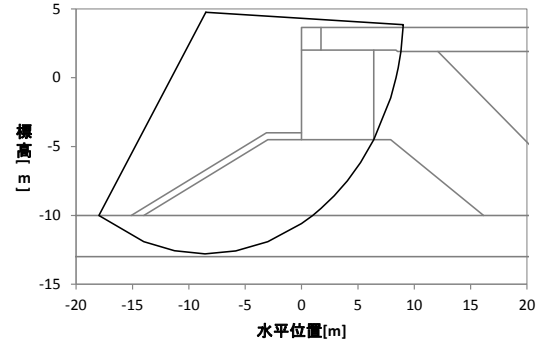


検討断面：K岸壁

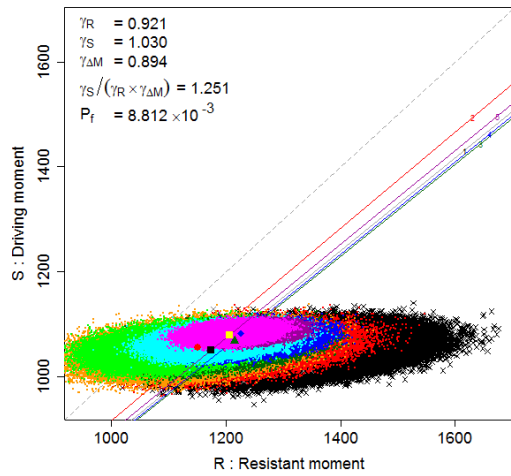
目標安全率 $F_{ST} = 1.25$

原地盤強度調整倍率：1.04

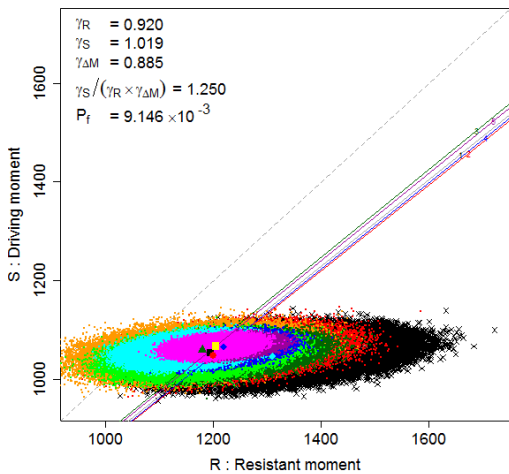
特性値による最小すべり円弧



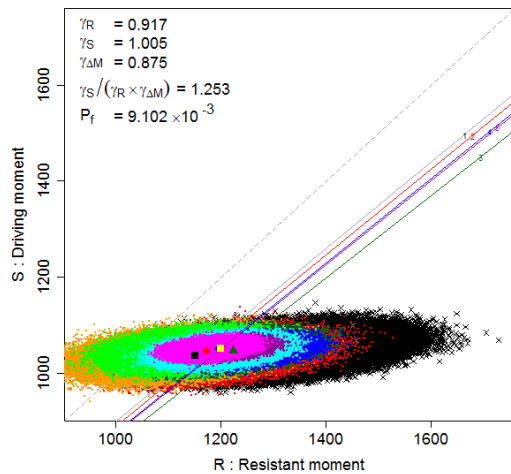
① $b_1=1.00, CV=0.10, b_2=1.00, n \geq 10$



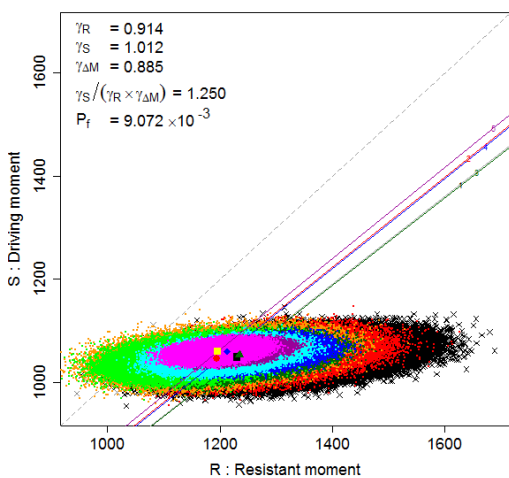
② $b_1=0.95, CV=0.15, b_2=1.00, n \geq 10$



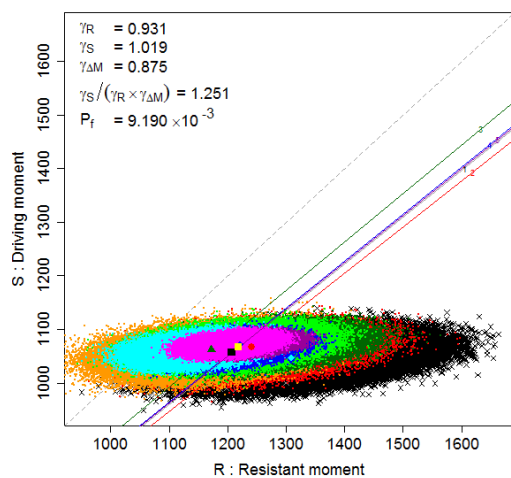
③ $b_1=0.90, CV=0.25, b_2=1.00, n \geq 10$

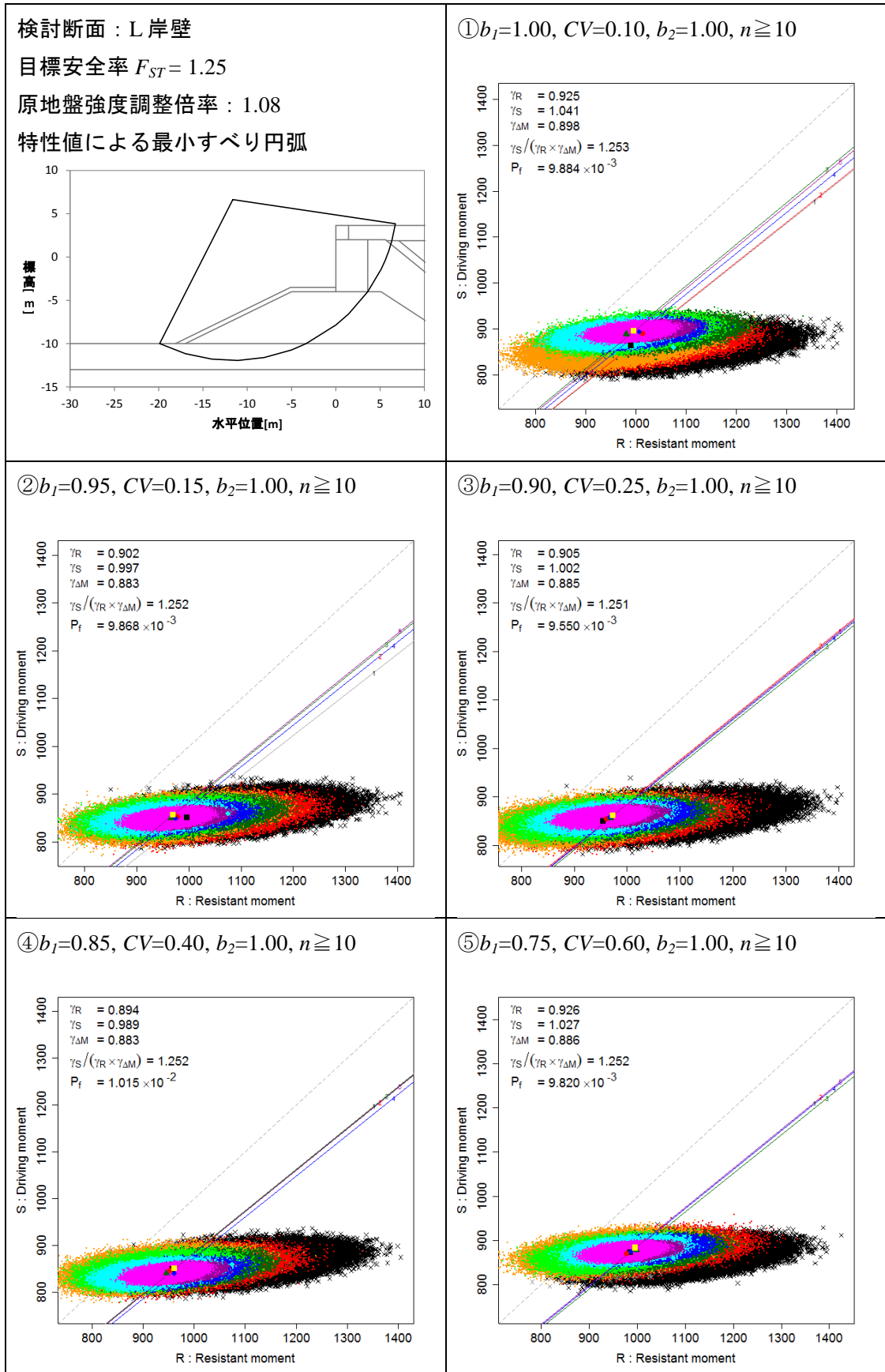


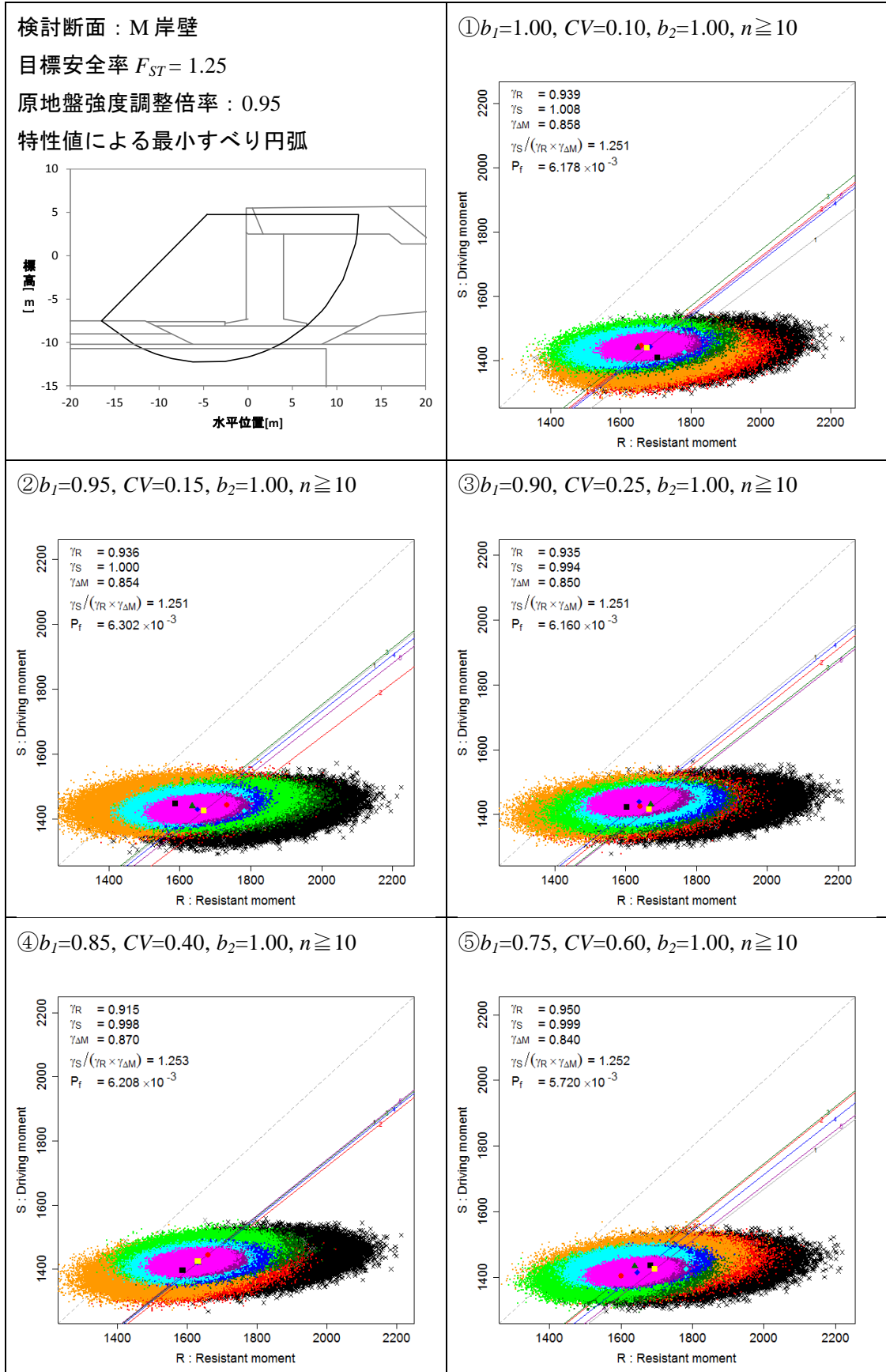
④ $b_1=0.85, CV=0.40, b_2=1.00, n \geq 10$

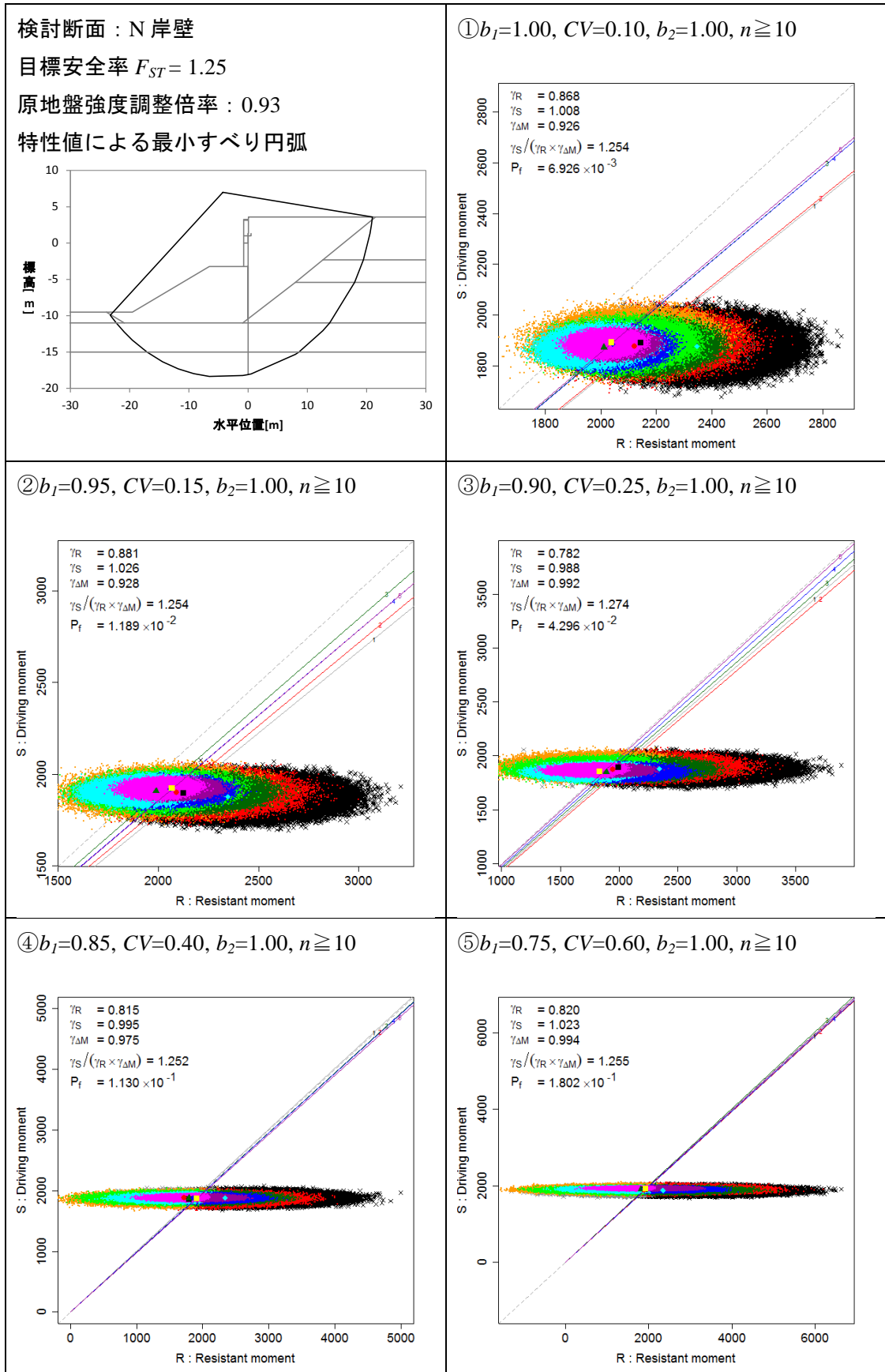


⑤ $b_1=0.75, CV=0.60, b_2=1.00, n \geq 10$

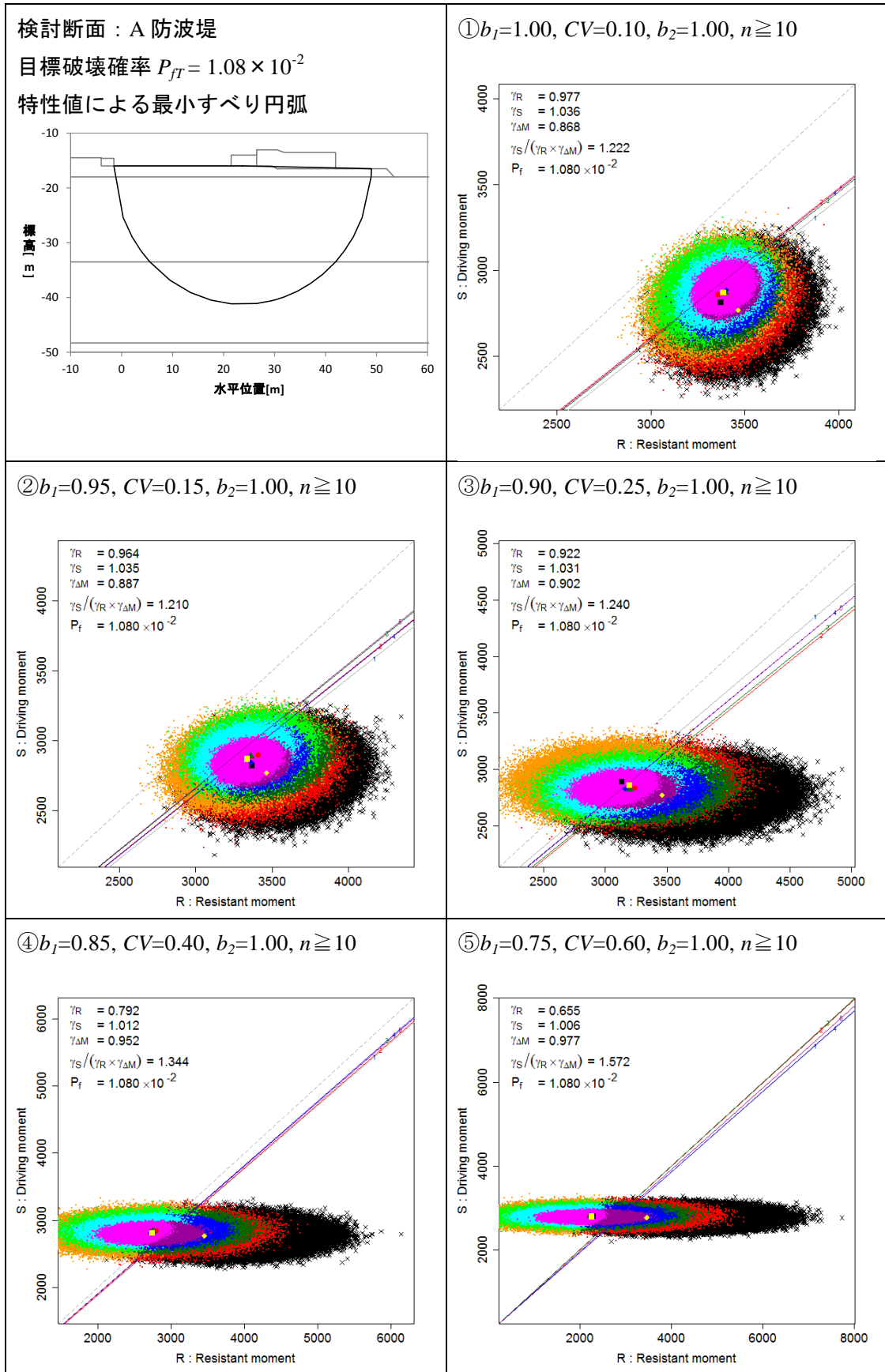


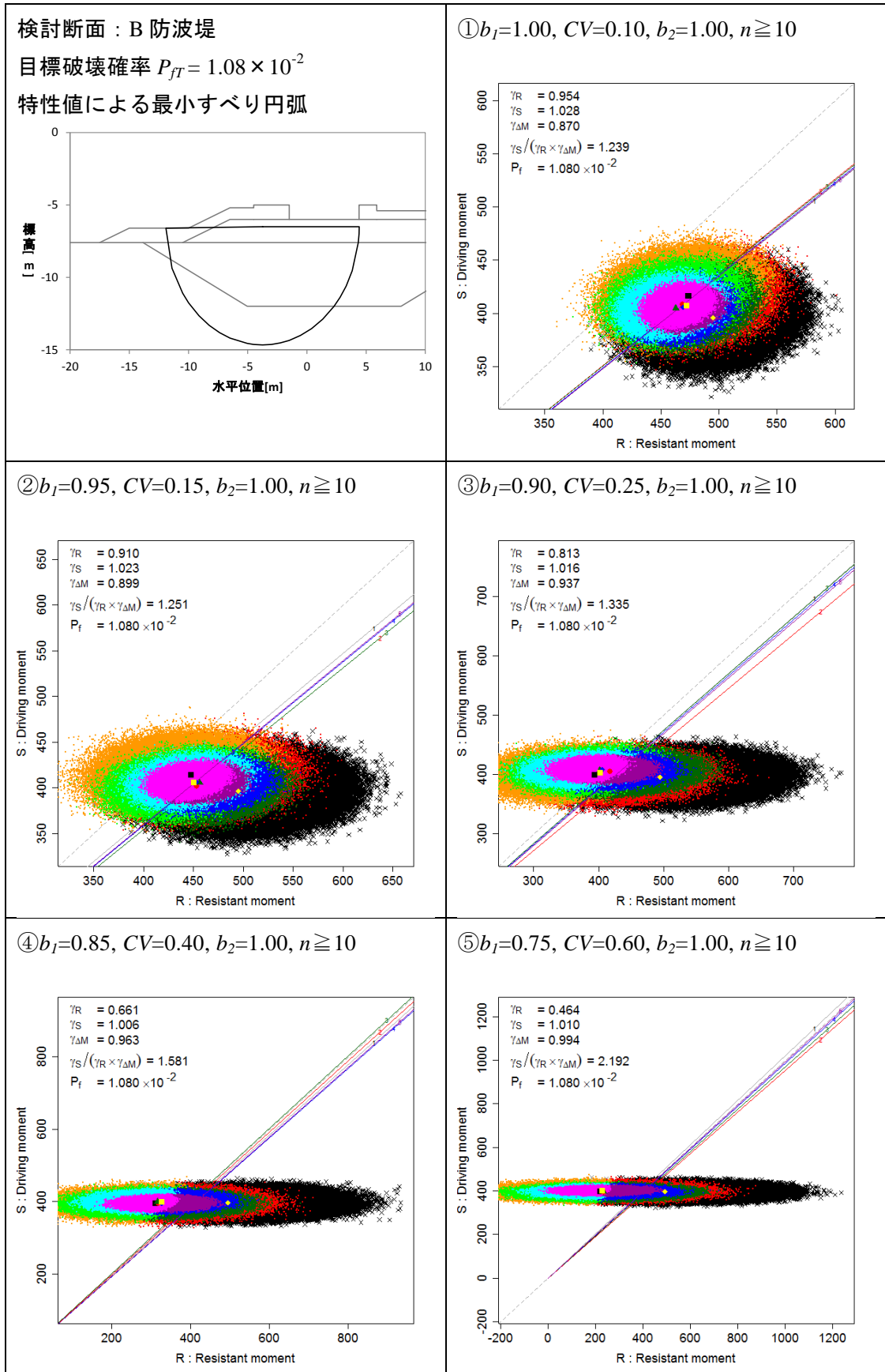






付録 E モンテカルロ・シミュレーション結果図 (目標破壊確率 $P_{fT}=1.08 \times 10^{-2}$ を満たす部分係数の計算)

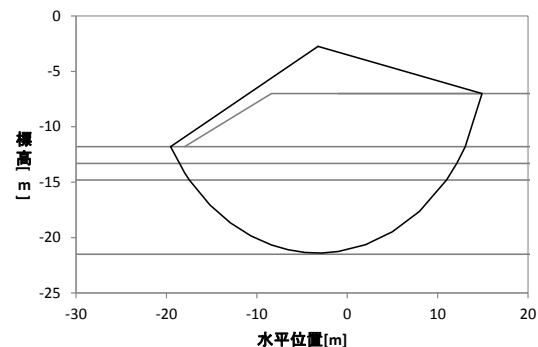




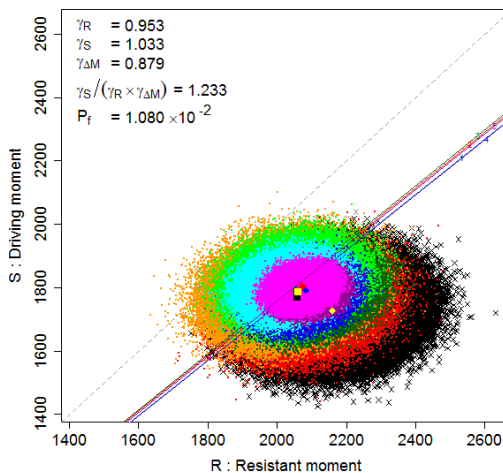
検討断面：C 防波堤

目標破壊確率 $P_{JT} = 1.08 \times 10^{-2}$

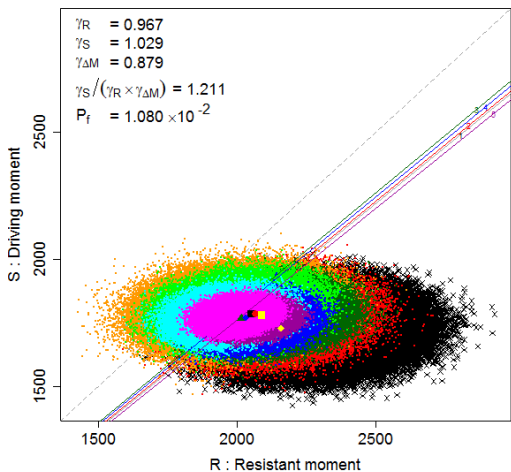
特性値による最小すべり円弧



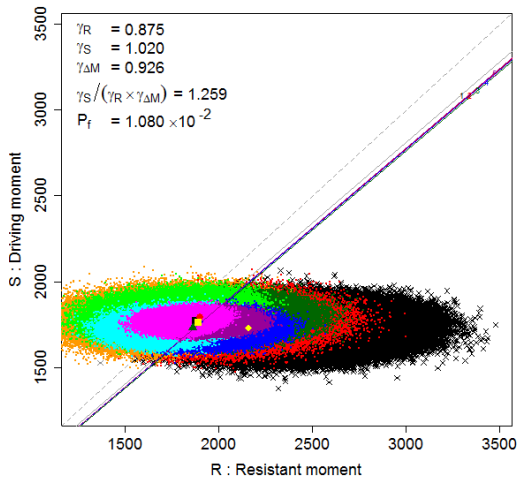
① $b_1=1.00, CV=0.10, b_2=1.00, n \geq 10$



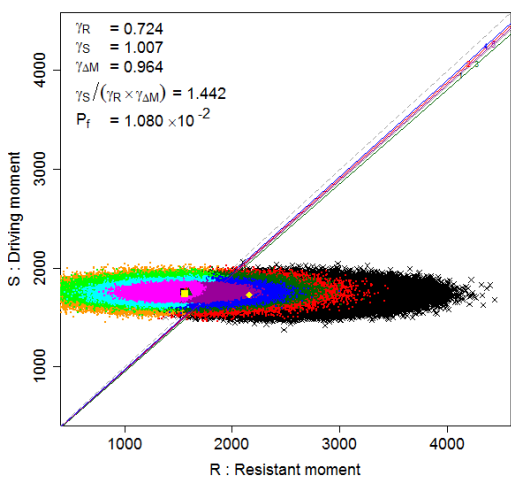
② $b_1=0.95, CV=0.15, b_2=1.00, n \geq 10$



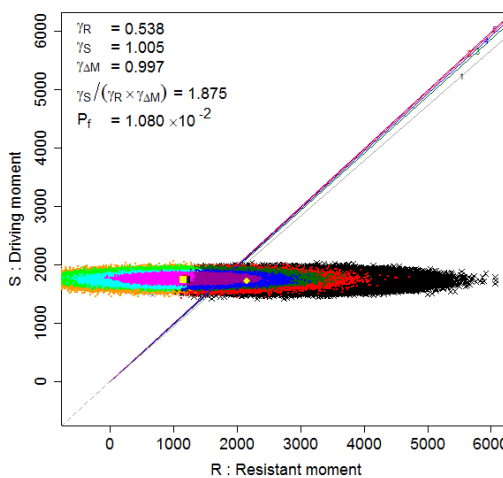
③ $b_1=0.90, CV=0.25, b_2=1.00, n \geq 10$

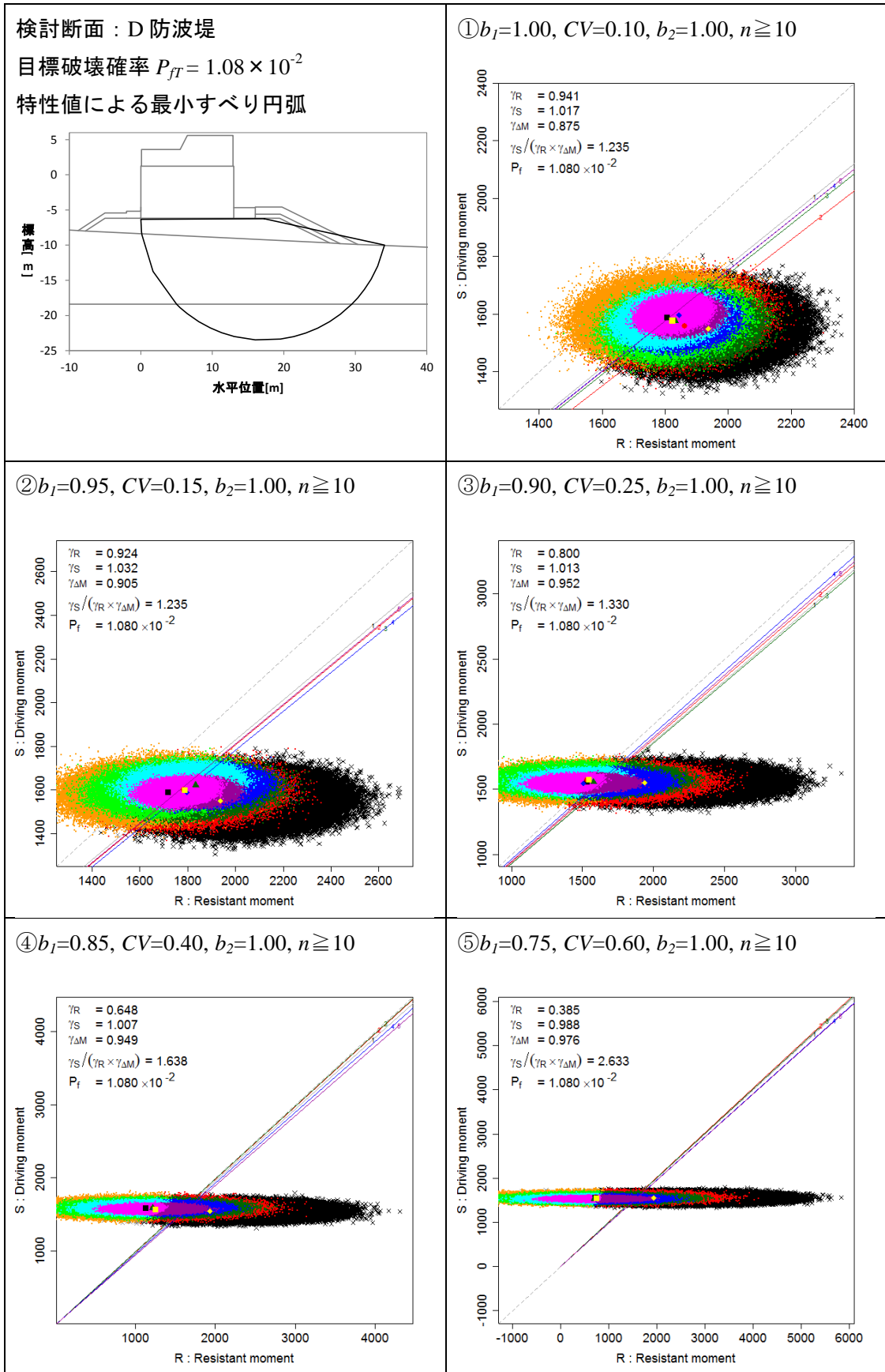


④ $b_1=0.85, CV=0.40, b_2=1.00, n \geq 10$



⑤ $b_1=0.75, CV=0.60, b_2=1.00, n \geq 10$

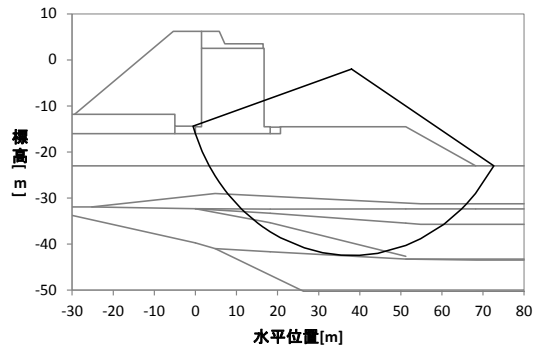




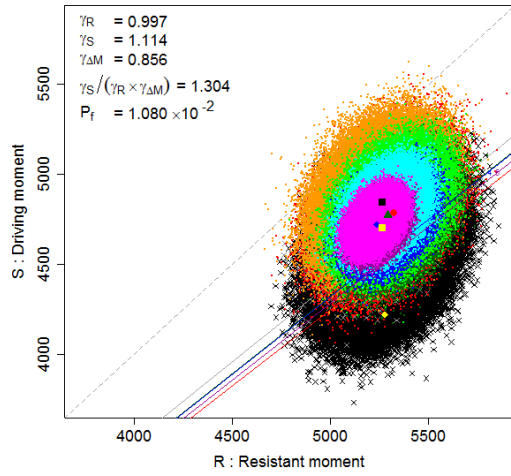
検討断面：E 防波堤

目標破壊確率 $P_{IT} = 1.08 \times 10^{-2}$

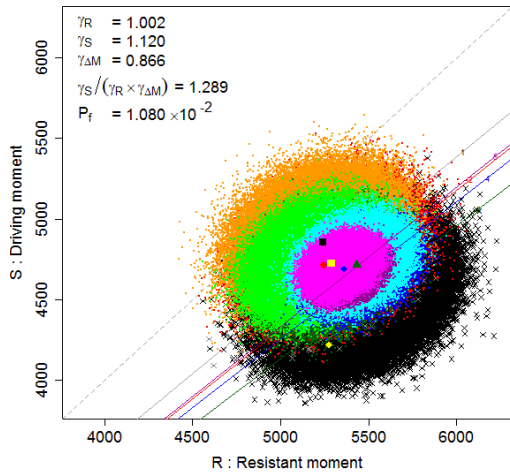
特性値による最小すべり円弧



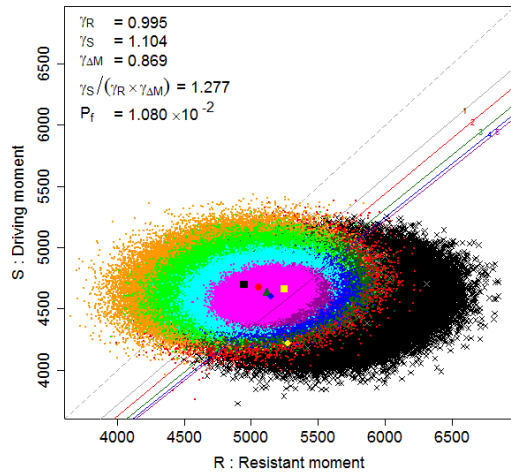
① $b_I=1.00, CV=0.10, b_2=1.00, n \geq 10$



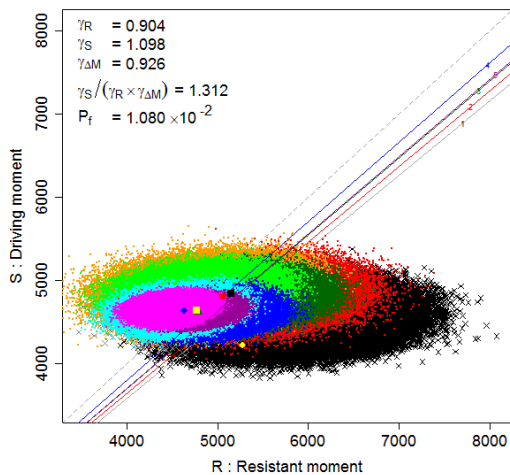
② $b_I=0.95, CV=0.15, b_2=1.00, n \geq 10$



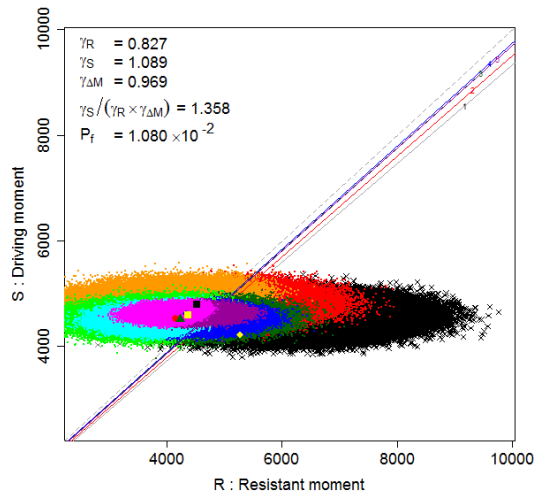
③ $b_I=0.90, CV=0.25, b_2=1.00, n \geq 10$

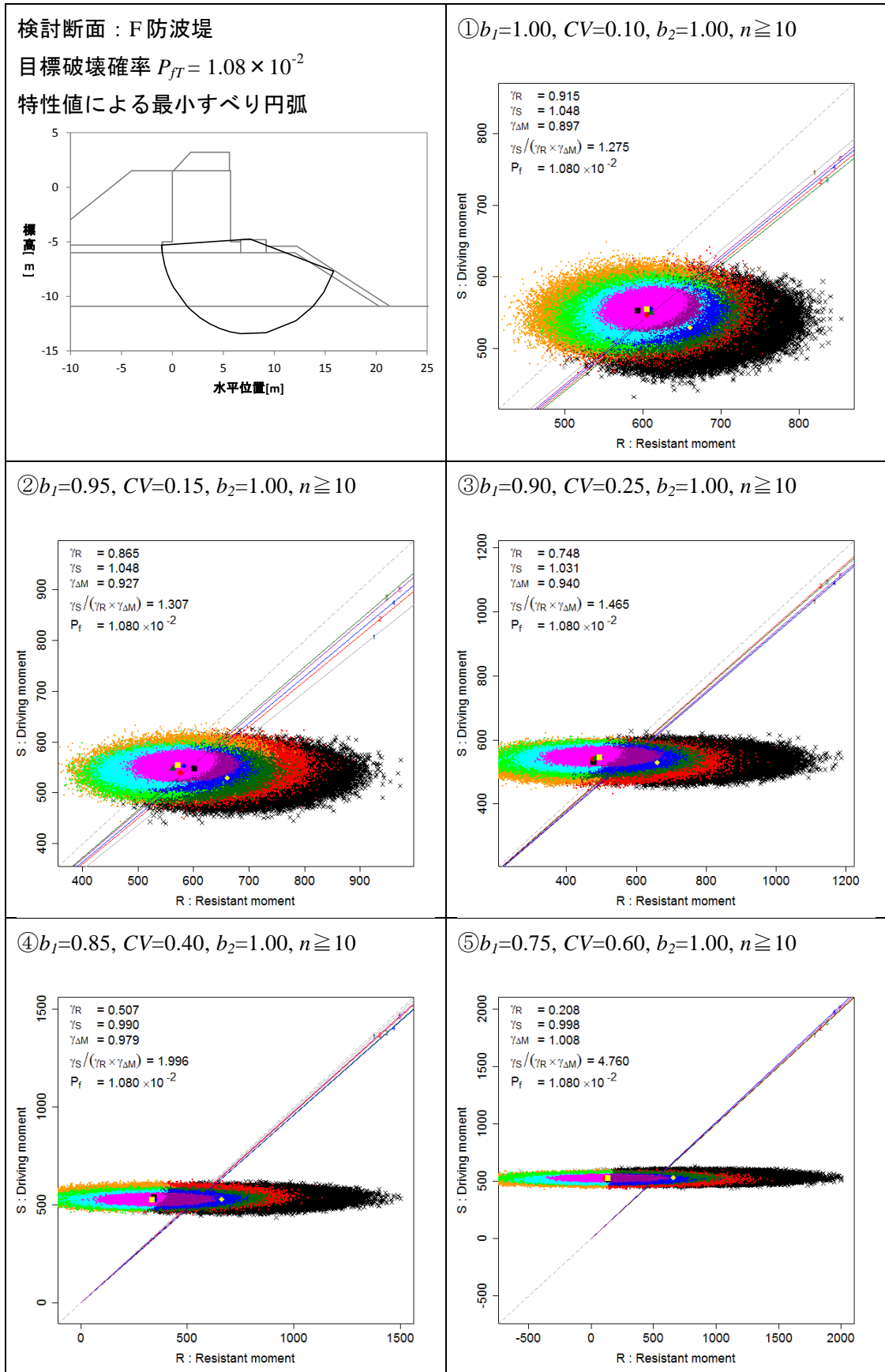


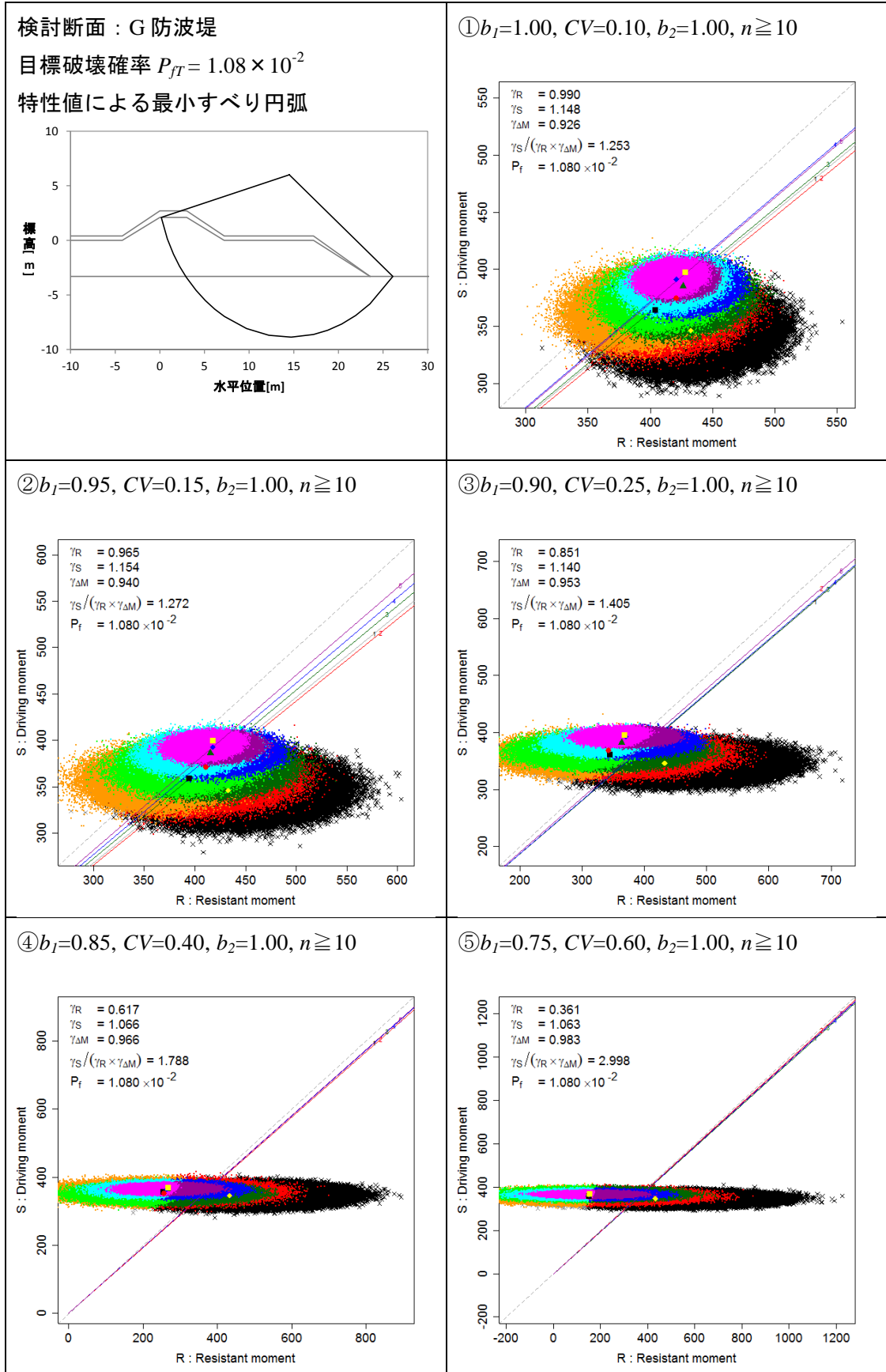
④ $b_I=0.85, CV=0.40, b_2=1.00, n \geq 10$

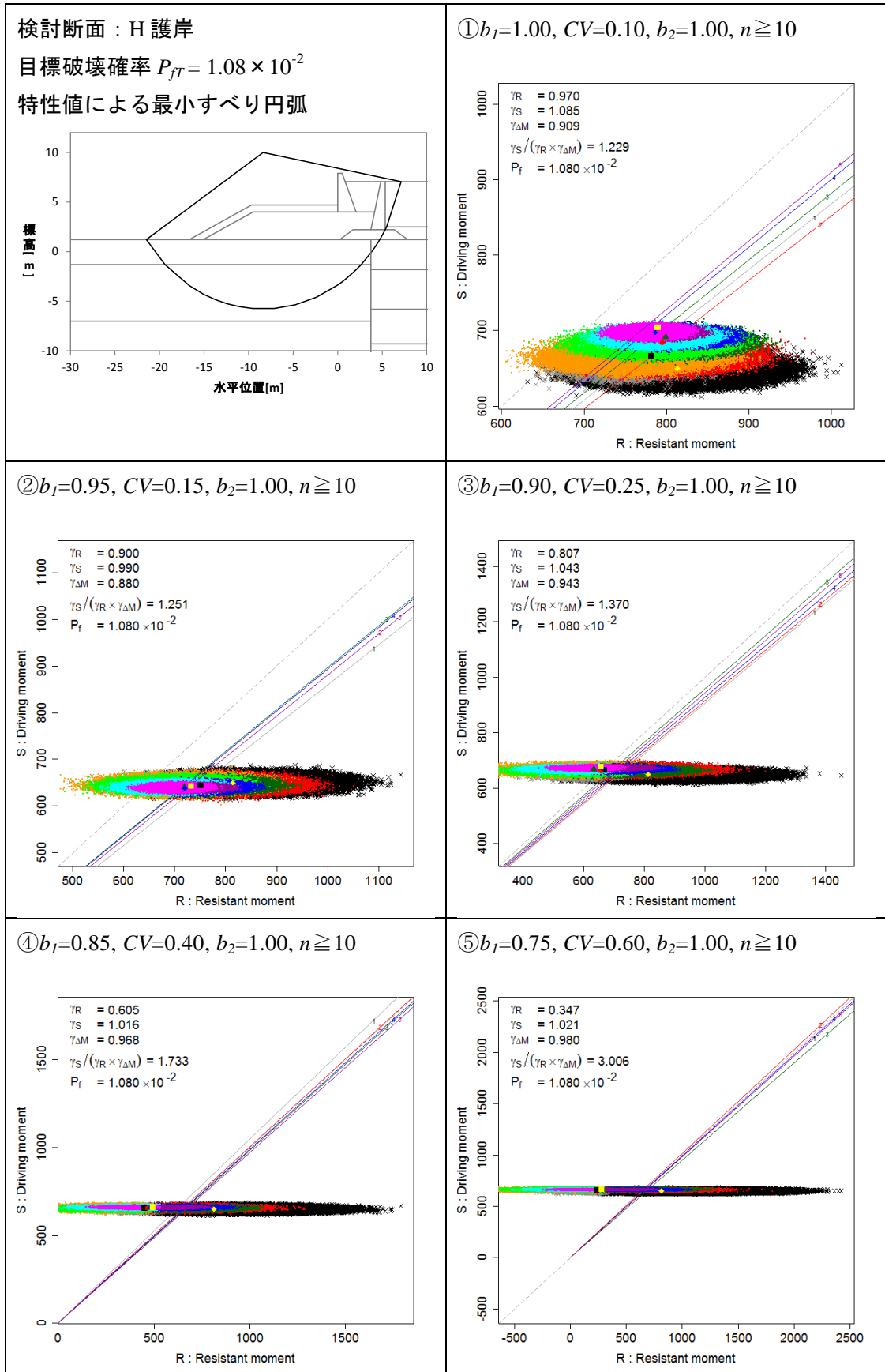


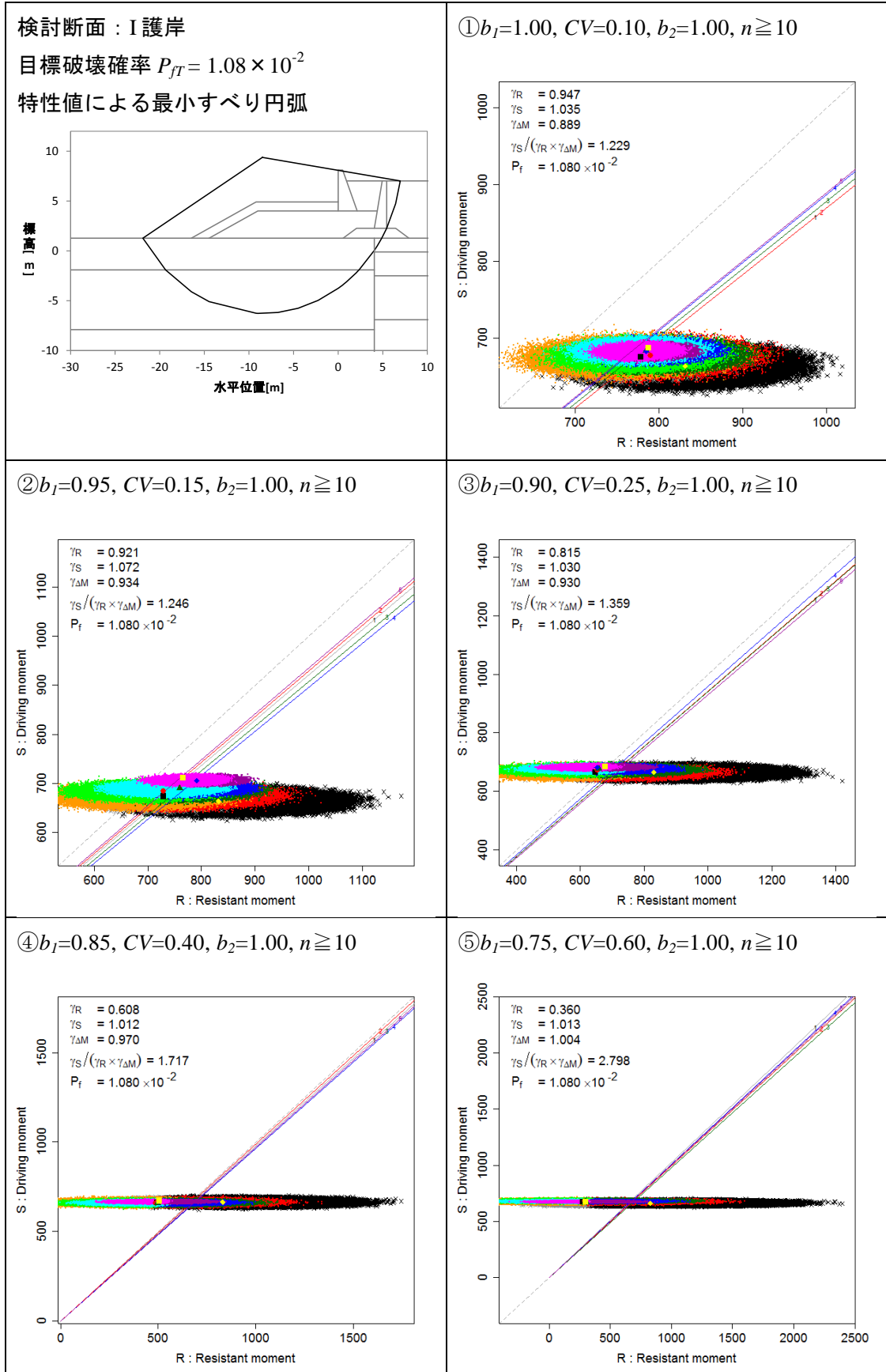
⑤ $b_I=0.75, CV=0.60, b_2=1.00, n \geq 10$

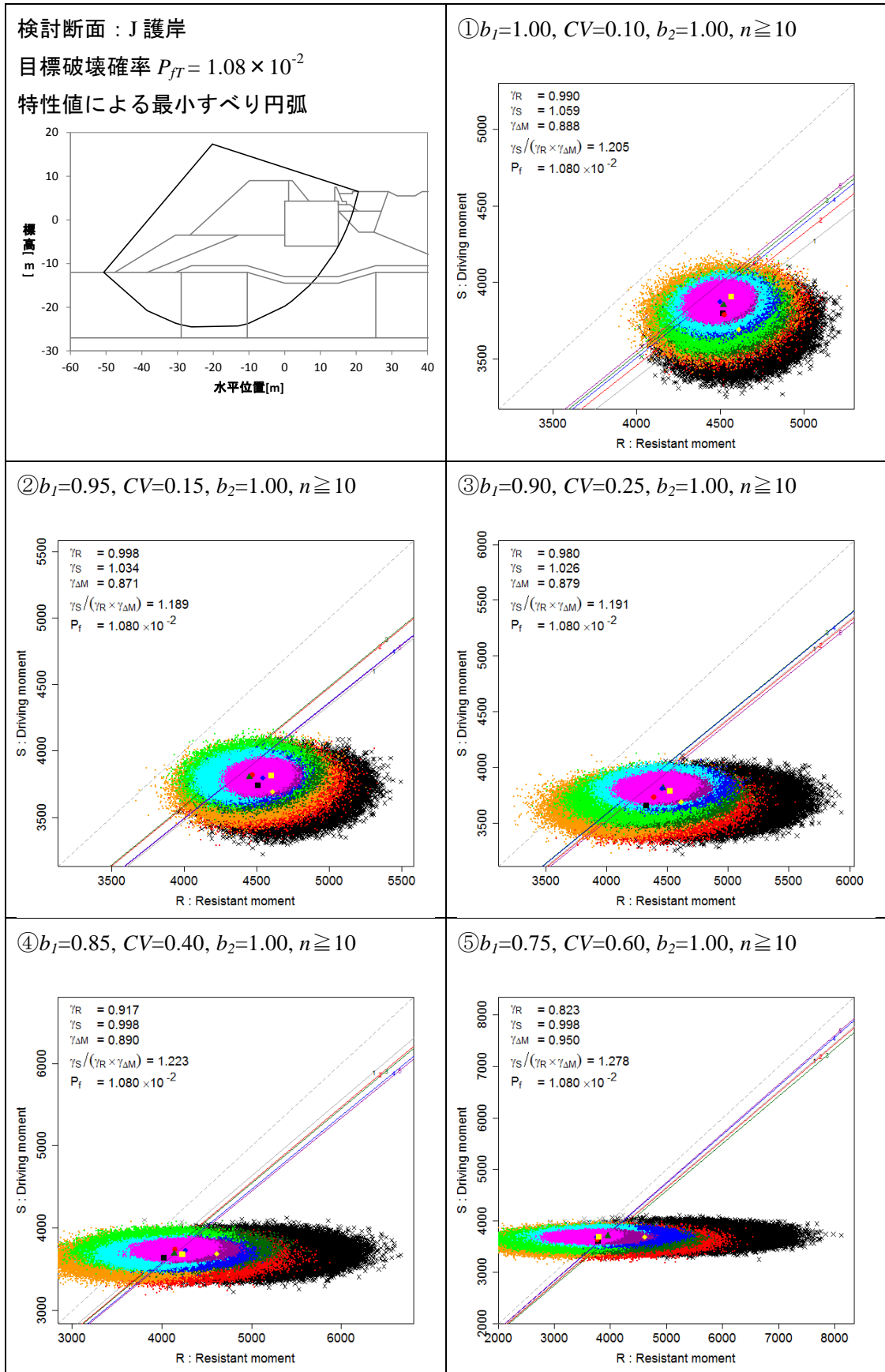


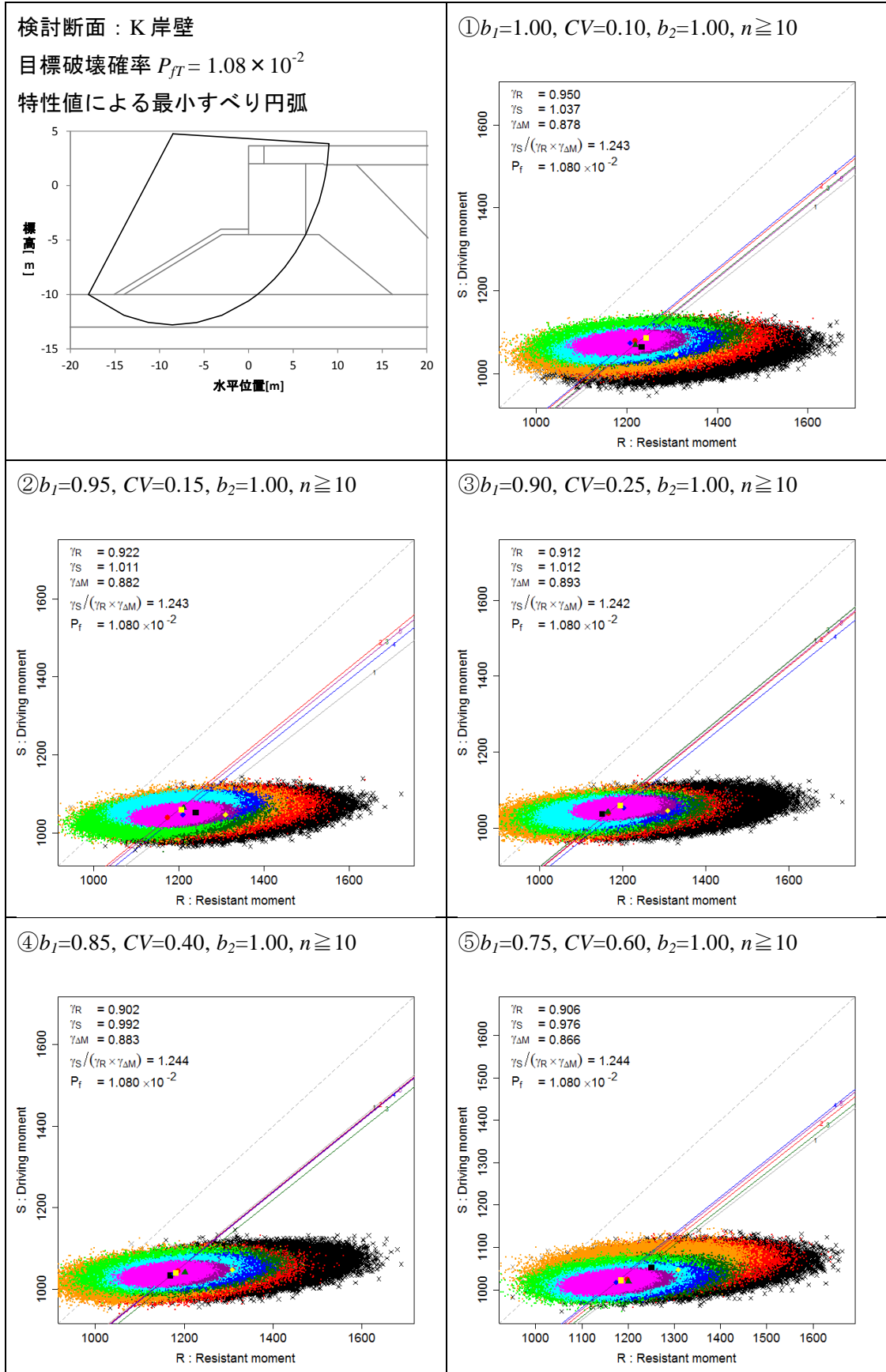


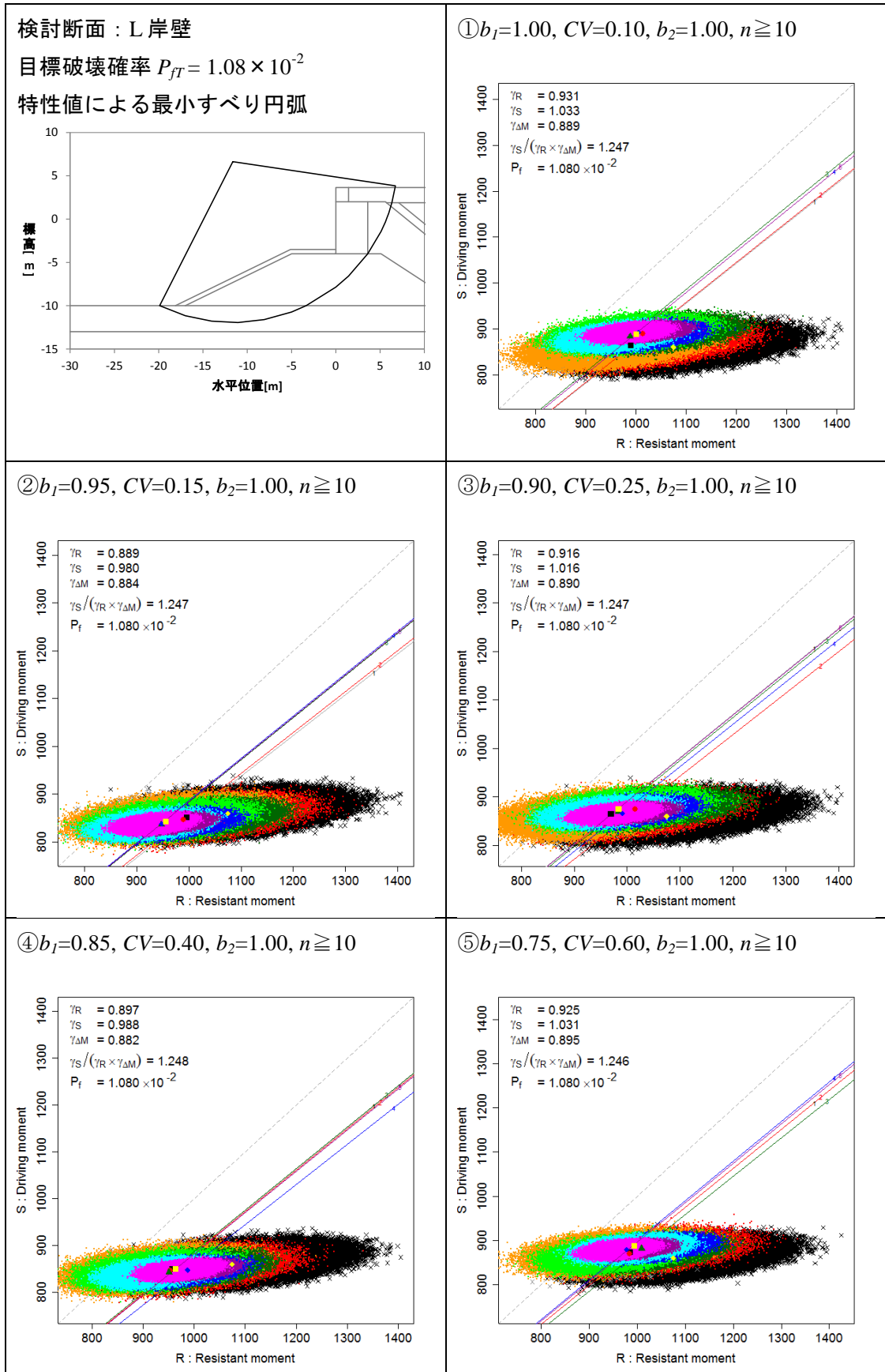


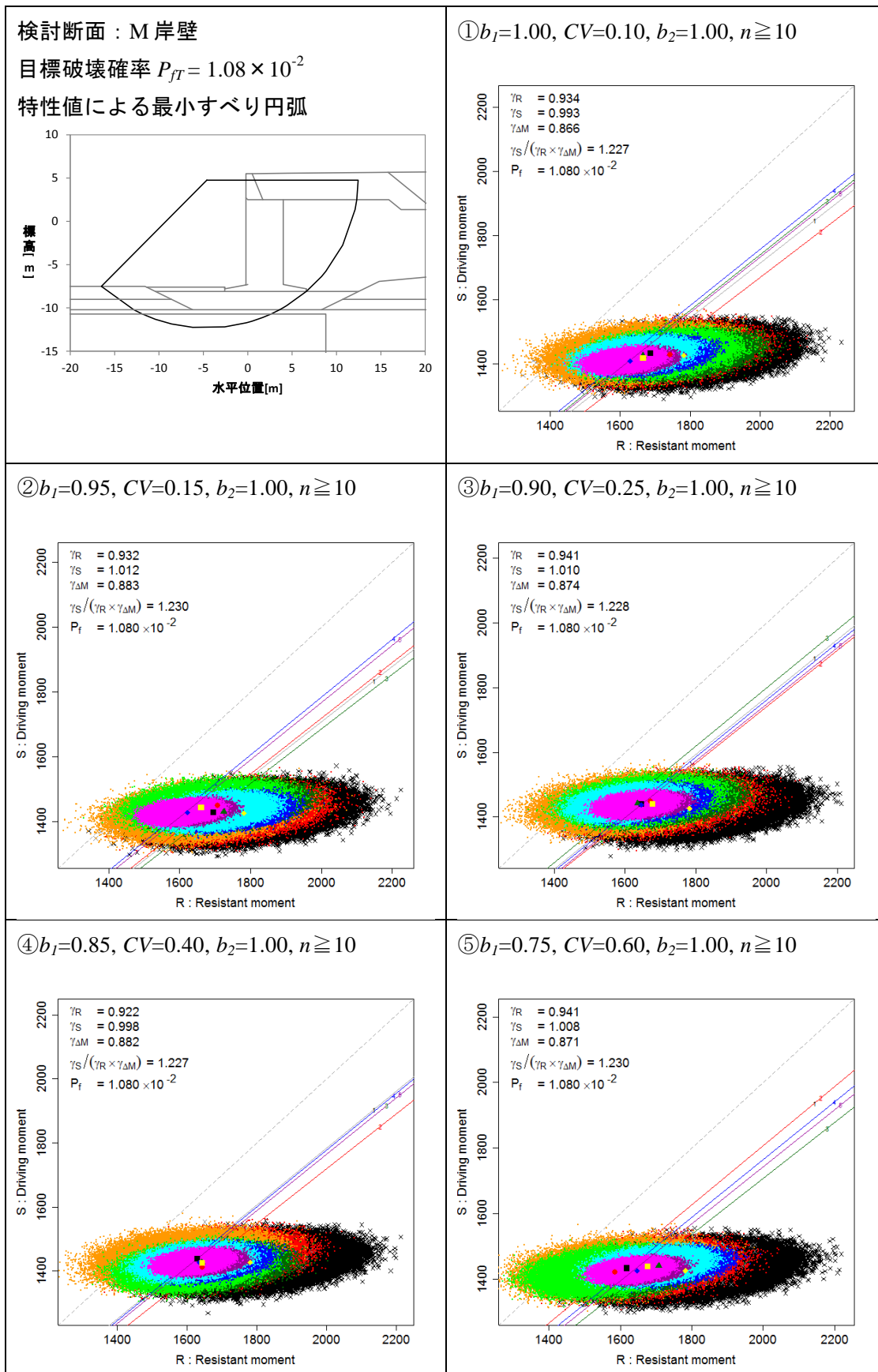


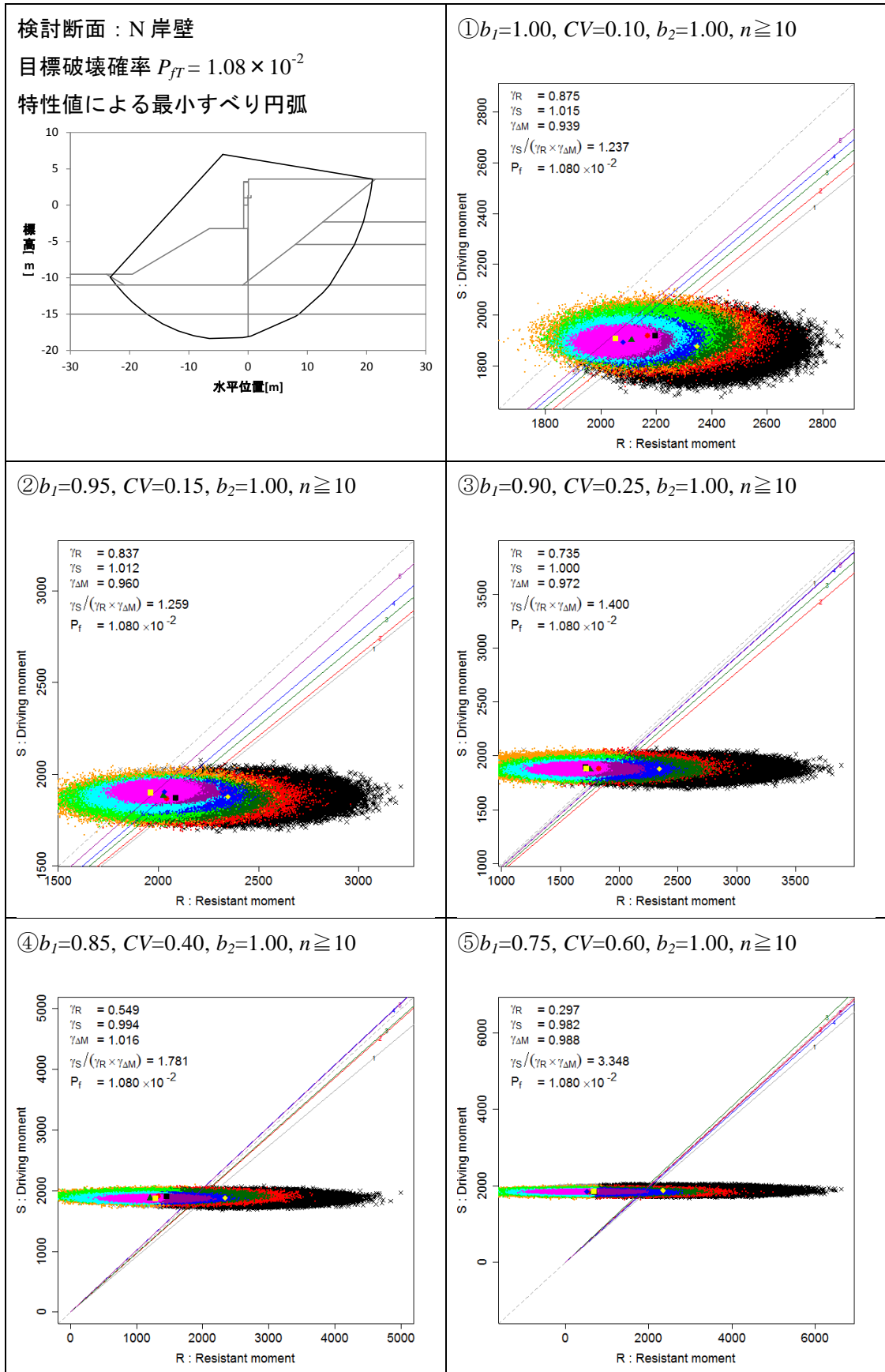












付録 F 目標安全率 $F_{ST}=1.23, 1.21$ とした場合の計算

本編では、検討断面の安全率平均値 $F_S=1.23$ (表-2.6) に余裕分を見込み、目標安全性水準①として目標安全率 $F_{ST}=1.25$ を設定した。ここでは、安全率平均値1.23および $F_S/(R_d/S_d)$ の平均値1.21から、余裕分を見込まずに $F_{ST}=1.23, 1.21$ とした場合の、各検討断面の破壊確率 P_f 、目標破壊確率 P_{JT} および部分係数を、本編検討手順・検討方法に沿ってそれぞれ求める。

1. 検討方法

目標安全性水準の考え方、検討断面、安全率、破壊確率、部分係数の計算方法は本編と共通である。以下の項目は、本編と設定値あるいは結果の値が異なる。

- ・ 目標安全率 : $F_{ST}=1.23, 1.21$
- ・ 地盤強度調整倍率
- ・ 破壊確率 : P_f
- ・ 目標破壊確率 : P_{JT}
- ・ 性能関数調整項 : ΔZ
- ・ 部分係数 : $\gamma_S, \gamma_R, \gamma_{\Delta M}$

2. 地盤強度調整倍率

表-F.1の倍率を各検討断面の原地盤強度 (c または $\tan \phi$) に乗じ、目標安全率を満たす検討断面を作成した。

表-F.1 地盤強度調整倍率

検討断面	調整前 F_S 値	$F_{ST}=1.23$ 調整倍率	$F_{ST}=1.21$ 調整倍率
A 防波堤	1.19	1.05	1.03
B 防波堤	1.18	1.08	1.05
C 防波堤	1.19	1.05	1.03
D 防波堤	1.13	1.12	1.10
E 防波堤	1.22	1.01	0.98
F 防波堤	1.29	0.97	0.95
G 防波堤	1.30	0.94	0.92
H 護岸	1.25	1.05	1.03
I 護岸	1.25	1.03	1.01
J 護岸	1.20	1.10	1.07
K 岸壁	1.23	1.02	1.01
L 岸壁	1.20	1.06	1.04
M 岸壁	1.22	0.93	0.92
N 岸壁	1.35	0.91	0.90

3. 目標破壊確率の検討

目標安全率に調整した各検討断面の破壊確率 P_f を表-F.2, 表-F.3, 図-F.1, 図-F.2に示す。それぞれ目標破壊確率 P_{JT} の設定対象ケース ($b_1=1.00, 0.95, 0.90; CV=0.10, 0.15, 0.25, b_2=1.00; n \geq 10$) の破壊確率 P_f の相乗平均を取り、これを目標破壊確率 (目標安全性水準②) $P_{JT}=1.63$

$\times 10^{-2}$ ($F_{ST}=1.23$) , 2.35×10^{-2} ($F_{ST}=1.21$) とした。

表-F.2 破壊確率 P_f の計算結果 ($F_{ST}=1.23$)

検討断面	b_1	1.00	0.95	0.90	0.85	0.75
	CV_{org}	0.10	0.15	0.25	0.40	0.60
A 防波堤		9.48×10^{-3}	8.88×10^{-3}	9.59×10^{-2}	9.59×10^{-2}	9.59×10^{-2}
B 防波堤		1.25×10^{-2}	1.55×10^{-2}	1.46×10^{-1}	1.46×10^{-1}	1.46×10^{-1}
C 防波堤		1.06×10^{-2}	7.18×10^{-3}	7.53×10^{-2}	7.53×10^{-2}	7.53×10^{-2}
D 防波堤		1.18×10^{-2}	1.17×10^{-2}	1.24×10^{-1}	1.24×10^{-1}	1.24×10^{-1}
E 防波堤		5.26×10^{-2}	3.12×10^{-2}	3.86×10^{-2}	3.86×10^{-2}	3.86×10^{-2}
F 防波堤		2.46×10^{-2}	3.00×10^{-2}	1.89×10^{-1}	1.89×10^{-1}	1.89×10^{-1}
G 防波堤		1.48×10^{-2}	2.16×10^{-2}	1.83×10^{-1}	1.83×10^{-1}	1.83×10^{-1}
H 護岸		1.06×10^{-2}	1.41×10^{-2}	1.53×10^{-1}	1.53×10^{-1}	1.53×10^{-1}
I 護岸		1.04×10^{-2}	1.42×10^{-2}	1.55×10^{-1}	1.55×10^{-1}	1.55×10^{-1}
J 護岸		5.51×10^{-3}	3.69×10^{-3}	1.77×10^{-2}	1.77×10^{-2}	1.77×10^{-2}
K 岸壁		1.37×10^{-2}	1.41×10^{-2}	1.41×10^{-2}	1.41×10^{-2}	1.41×10^{-2}
L 岸壁		1.52×10^{-2}	1.51×10^{-2}	1.50×10^{-2}	1.50×10^{-2}	1.50×10^{-2}
M 岸壁		1.02×10^{-2}	1.00×10^{-2}	9.33×10^{-3}	9.33×10^{-3}	9.33×10^{-3}
N 岸壁		1.11×10^{-2}	1.70×10^{-2}	1.90×10^{-1}	1.90×10^{-1}	1.90×10^{-1}
平均値		1.30×10^{-2}	1.34×10^{-2}	2.46×10^{-2}	4.76×10^{-2}	6.56×10^{-2}
P_{JT}			1.63×10^{-2}			

表-F.3 破壊確率 P_f の計算結果 ($F_{ST}=1.21$)

検討断面	b_1	1.00	0.95	0.90	0.85	0.75
	CV_{org}	0.10	0.15	0.25	0.40	0.60
A 防波堤		1.53×10^{-2}	1.31×10^{-2}	2.52×10^{-2}	6.40×10^{-2}	1.05×10^{-1}
B 防波堤		1.93×10^{-2}	2.20×10^{-2}	4.82×10^{-2}	1.05×10^{-1}	1.57×10^{-1}
C 防波堤		1.71×10^{-2}	1.08×10^{-2}	2.08×10^{-2}	5.34×10^{-2}	8.08×10^{-2}
D 防波堤		1.83×10^{-2}	1.67×10^{-2}	3.86×10^{-2}	9.08×10^{-2}	1.31×10^{-1}
E 防波堤		7.73×10^{-2}	4.73×10^{-2}	3.66×10^{-2}	4.55×10^{-2}	4.69×10^{-2}
F 防波堤		3.52×10^{-2}	4.02×10^{-2}	8.28×10^{-2}	1.53×10^{-1}	1.97×10^{-1}
G 防波堤		2.24×10^{-2}	3.00×10^{-2}	7.05×10^{-2}	1.41×10^{-1}	1.93×10^{-1}
H 護岸		1.65×10^{-2}	1.97×10^{-2}	5.13×10^{-2}	1.15×10^{-1}	1.61×10^{-1}
I 護岸		1.62×10^{-2}	1.95×10^{-2}	5.15×10^{-2}	1.15×10^{-1}	1.63×10^{-1}
J 護岸		9.26×10^{-3}	6.32×10^{-3}	6.53×10^{-3}	1.28×10^{-2}	2.26×10^{-2}
K 岸壁		2.12×10^{-2}	2.10×10^{-2}	2.08×10^{-2}	2.08×10^{-2}	2.12×10^{-2}
L 岸壁		2.28×10^{-2}	2.30×10^{-2}	2.25×10^{-2}	2.34×10^{-2}	2.27×10^{-2}
M 岸壁		1.57×10^{-2}	1.57×10^{-2}	1.57×10^{-2}	1.57×10^{-2}	1.47×10^{-2}
N 岸壁		1.69×10^{-2}	2.39×10^{-2}	6.31×10^{-2}	1.37×10^{-1}	1.99×10^{-1}
平均値		2.01×10^{-2}	1.97×10^{-2}	3.28×10^{-2}	5.86×10^{-2}	7.70×10^{-2}
P_{JT}			2.35×10^{-2}			

4. 部分係数の検討

MCSを用いた信頼性解析により、目標破壊確率 $P_{JT}=1.63 \times 10^{-2}$ 、および 2.35×10^{-2} を満足する部分係数を設定した。各計算ケースの部分係数計算結果を図-F.3～図-F.4およびに表-F.4～表-F.9示す。

5. 検討結果

表-F.10, 表-F.11に本検討の目標安全率を変えた場合の部分係数の計算結果を示す。本編の表-3.4と同様に、粘性土地盤強度の変動係数が $CV \geq 0.25$ である場合は、旧設計法と比較して目標耐力作用比 ($\gamma_S/(\gamma_R \cdot \gamma_{\Delta M})$) が過大となるため、表-F.10, 表-F.11から除外した。そのため本編と同様、変動係数 CV が大きい場合の設計法は、別途設定されなければならない。

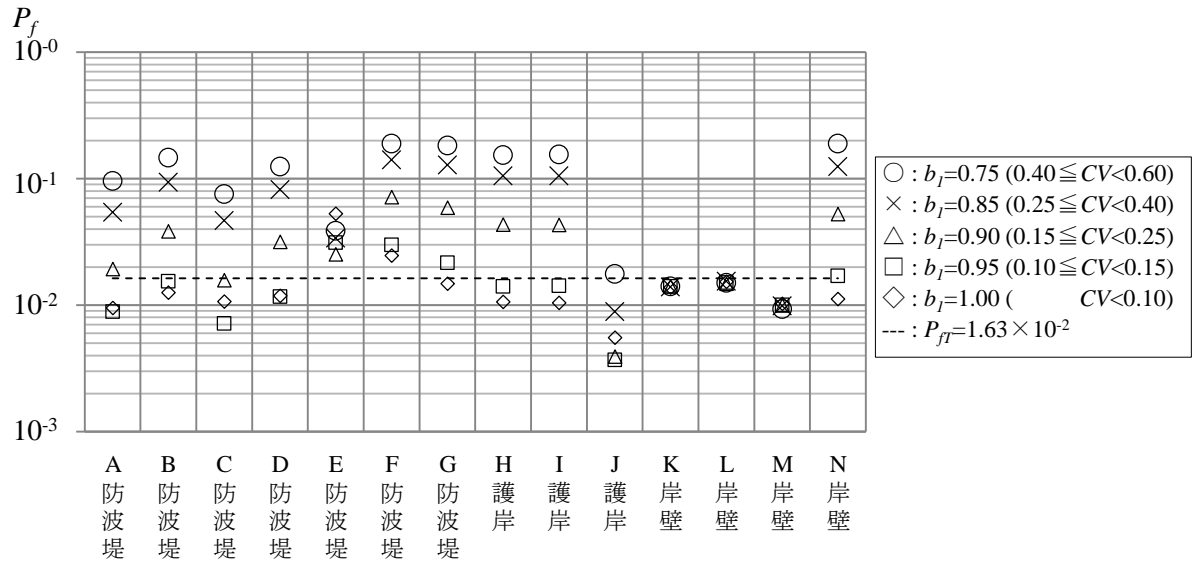


図-F.1 破壊確率 P_f の計算結果 ($F_{ST}=1.23$)

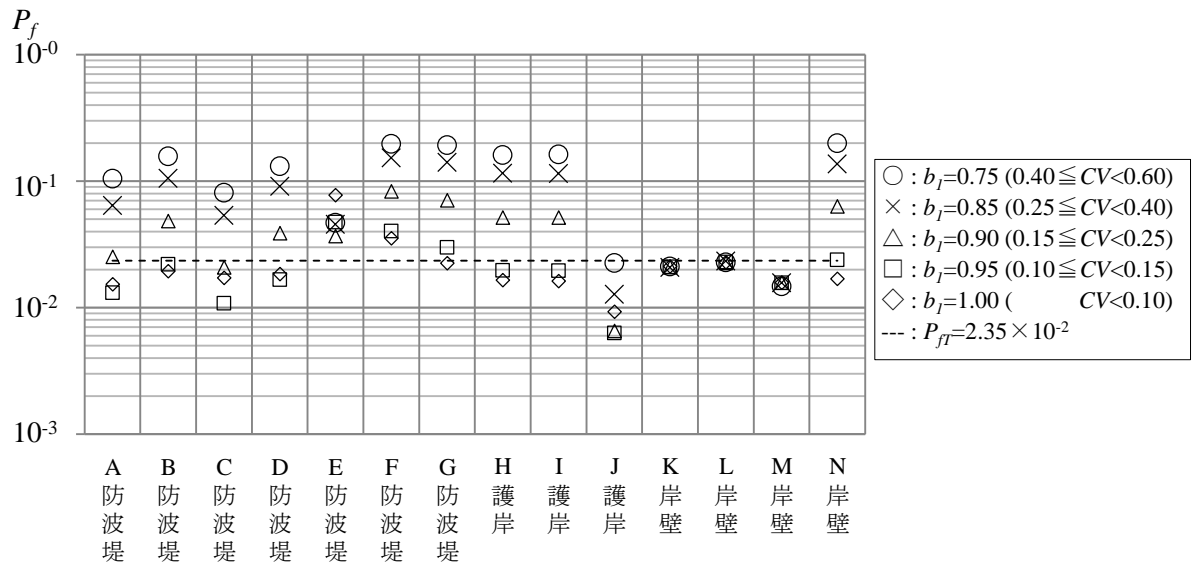


図-F.2 破壊確率 P_f の計算結果 ($F_{ST}=1.21$)

表-F.4 抵抗係数 γ_R

検討 断面	b_I CV_{org}	1.00	0.95	0.90	0.85	0.75
		0.10	0.15	0.25	0.40	0.60
A 防波堤		0.969	0.961	0.903	0.767	0.627
B 防波堤		0.953	0.925	0.845	0.705	0.522
C 防波堤		0.962	0.965	0.894	0.750	0.592
D 防波堤		0.958	0.915	0.829	0.670	0.464
E 防波堤		1.002	0.998	1.004	0.921	0.921
F 防波堤		0.936	0.894	0.748	0.568	0.293
G 防波堤		0.999	0.966	0.841	0.669	0.395
H 護岸		0.972	0.921	0.827	0.652	0.413
I 護岸		0.970	0.933	0.814	0.664	0.430
J 護岸		0.986	1.015	0.967	0.952	0.829
K 岸壁※		0.933	0.917	0.915	0.908	0.927
L 岸壁※		0.933	0.920	0.925	0.910	0.923
M 岸壁※		0.945	0.956	0.941	0.945	0.946
N 岸壁		0.867	0.868	0.751	0.590	0.381
平均値		0.96	0.94	0.87	0.76	0.62
※砂地盤				0.93		

表-F.5 荷重係数 γ_S

検討 断面	b_I CV_{org}	1.00	0.95	0.90	0.85	0.75
		0.10	0.15	0.25	0.40	0.60
A 防波堤		1.032	1.028	1.016	1.016	1.010
B 防波堤		1.025	1.019	1.020	1.022	1.012
C 防波堤		1.029	1.024	1.019	1.011	1.003
D 防波堤		1.047	1.027	1.019	1.012	1.020
E 防波堤		1.144	1.122	1.105	1.094	1.095
F 防波堤		1.078	1.044	1.020	1.011	1.031
G 防波堤		1.141	1.140	1.085	1.088	0.999
H 護岸		1.081	1.036	1.010	1.029	1.005
I 護岸		1.082	1.057	1.029	1.047	1.009
J 護岸		1.032	1.042	0.991	1.028	0.996
K 岸壁※		1.014	1.023	0.993	0.998	1.020
L 岸壁※		1.017	1.000	1.020	0.999	1.007
M 岸壁※		0.998	1.009	1.007	1.007	0.998
N 岸壁		1.022	1.024	1.008	1.009	1.044
平均値		1.05	1.04	1.02	1.03	1.02
※砂地盤				1.01		

表-F.6 モデル化誤差に関する係数 $\gamma_{\Delta M}$

検討 断面	b_I CV_{org}	1.00	0.95	0.90	0.85	0.75
		0.10	0.15	0.25	0.40	0.60
A 防波堤		0.882	0.890	0.907	0.961	0.974
B 防波堤		0.882	0.898	0.927	0.966	0.972
C 防波堤		0.883	0.890	0.929	0.972	0.985
D 防波堤		0.899	0.925	0.946	0.974	0.980
E 防波堤		0.884	0.891	0.866	0.925	0.901
F 防波堤		0.921	0.919	0.962	0.973	1.004
G 防波堤		0.931	0.947	0.948	0.969	0.987
H 護岸		0.919	0.919	0.919	0.972	0.974
I 護岸		0.921	0.927	0.954	0.977	0.968
J 護岸		0.880	0.873	0.874	0.901	0.970
K 岸壁※		0.890	0.911	0.886	0.899	0.899
L 岸壁※		0.889	0.886	0.899	0.893	0.890
M 岸壁※		0.873	0.872	0.885	0.882	0.874
N 岸壁		0.963	0.951	0.991	0.984	0.977
平均値		0.90	0.91	0.92	0.95	0.95
※砂地盤				0.89		

表-F.7 抵抗係数 γ_R

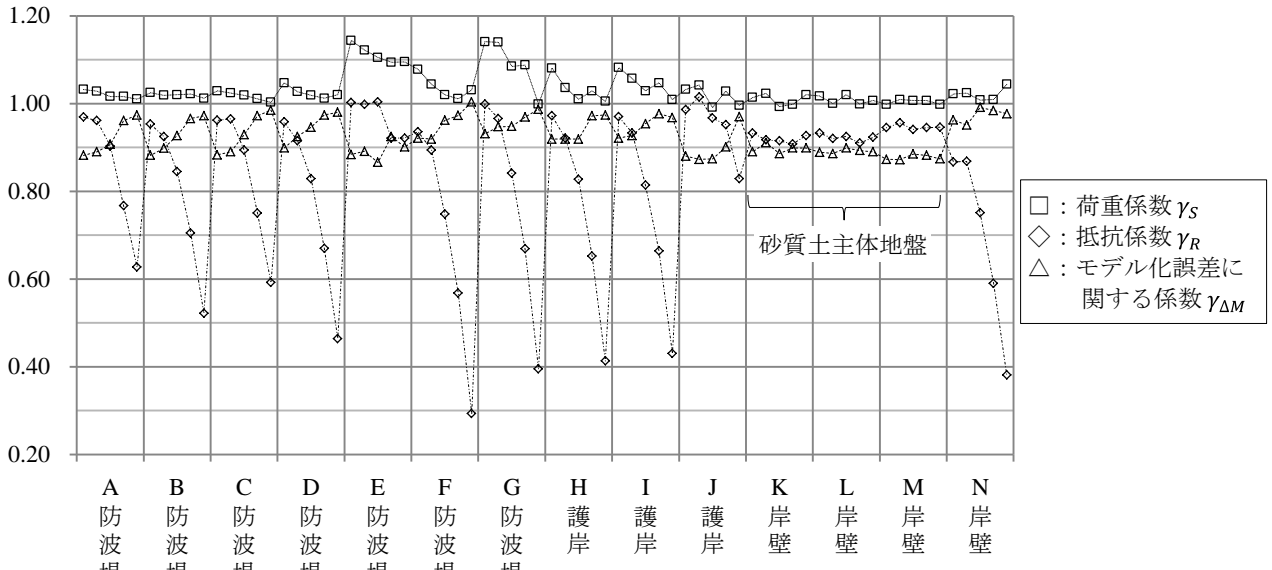
検討 断面	b_I CV_{org}	1.00	0.95	0.90	0.85	0.75
		0.10	0.15	0.25	0.40	0.60
A 防波堤		0.975	0.969	0.923	0.810	0.649
B 防波堤		0.967	0.924	0.846	0.729	0.582
C 防波堤		0.964	0.960	0.919	0.786	0.647
D 防波堤		0.961	0.942	0.840	0.715	0.523
E 防波堤		1.002	1.014	0.971	0.943	0.883
F 防波堤		0.937	0.909	0.801	0.625	0.360
G 防波堤		1.006	0.974	0.878	0.674	0.467
H 護岸		0.950	0.940	0.809	0.686	0.466
I 護岸		0.954	0.976	0.864	0.674	0.463
J 護岸		0.991	0.998	0.971	0.949	0.914
K 岸壁※		0.939	0.936	0.932	0.939	0.919
L 岸壁※		0.928	0.923	0.937	0.916	0.937
M 岸壁※		0.957	0.963	0.942	0.939	0.943
N 岸壁		0.896	0.845	0.773	0.634	0.426
平均値		0.96	0.95	0.89	0.79	0.66
※砂地盤				0.94		

表-F.8 荷重係数 γ_S

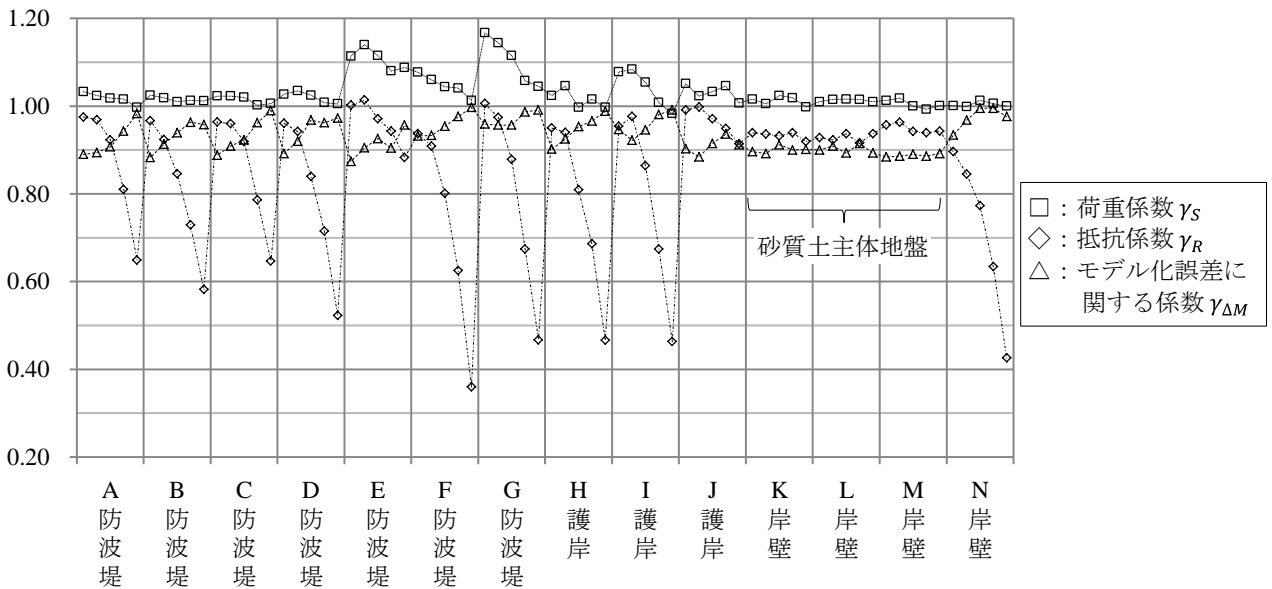
検討 断面	b_I CV_{org}	1.00	0.95	0.90	0.85	0.75
		0.10	0.15	0.25	0.40	0.60
A 防波堤		1.033	1.024	1.018	1.016	0.997
B 防波堤		1.025	1.019	1.010	1.013	1.012
C 防波堤		1.023	1.023	1.020	1.002	1.006
D 防波堤		1.027	1.035	1.025	1.008	1.005
E 防波堤		1.114	1.140	1.115	1.080	1.088
F 防波堤		1.077	1.060	1.044	1.041	1.013
G 防波堤		1.167	1.144	1.115	1.058	1.045
H 護岸		1.024	1.046	0.997	1.016	0.997
I 護岸		1.078	1.084	1.054	1.008	0.983
J 護岸		1.051	1.023	1.033	1.046	1.007
K 岸壁※		1.016	1.005	1.024	1.019	0.998
L 岸壁※		1.010	1.015	1.016	1.015	1.010
M 岸壁※		1.013	1.018	1.000	0.993	1.001
N 岸壁		1.001	0.999	1.013	1.006	1.000
平均値		1.05	1.05	1.03	1.02	1.01
※砂地盤				1.01		

表-F.9 モデル化誤差に関する係数 $\gamma_{\Delta M}$

検討 断面	b_I CV_{org}	1.00	0.95	0.90	0.85	0.75
		0.10	0.15	0.25	0.40	0.60
A 防波堤		0.890	0.894	0.907	0.943	0.983
B 防波堤		0.883	0.913	0.939	0.963	0.958
C 防波堤		0.888	0.909	0.923	0.962	0.990
D 防波堤		0.892	0.920	0.968	0.962	0.973
E 防波堤		0.874	0.905	0.926	0.904	0.957
F 防波堤		0.932	0.933	0.954	0.976	0.997
G 防波堤		0.959	0.957	0.957	0.987	0.991
H 護岸		0.902	0.925	0.953	0.966	0.988
I 護岸		0.947	0.922	0.946	0.981	0.991
J 護岸		0.903	0.884	0.915	0.936	0.912
K 岸壁※		0.896	0.892	0.912	0.900	0.901
L 岸壁※		0.900	0.909	0.893	0.915	0.893
M 岸壁※		0.884	0.886	0.890	0.886	0.892
N 岸壁		0.934	0.968	0.995	0.995	0.976
平均値		0.91	0.92	0.93	0.95	0.96
※砂地盤				0.90		



※各断面左から $b_1=1.00, 0.95, 0.90, 0.85, 0.75$, すべて $b_2=1.00$
 図-F.3 部分係数の計算結果 ($F_{ST}=1.23$)



※各断面左から $b_1=1.00, 0.95, 0.90, 0.85, 0.75$, すべて $b_2=1.00$
 図-F.4 部分係数の計算結果 ($F_{ST}=1.21$)

表-F.10 提案設計法の部分係数 ($F_{ST}=1.23$)

(a) 粘性土層を含む場合			
粘性土地盤粘着力の変動係数 CV	荷重係数 γ_S	抵抗係数 γ_R	モデル化誤差に関する係数 $\gamma_{\Delta M}$
$CV < 0.10$	1.05	0.96	0.90
$0.10 \leq CV < 0.15$	1.04	0.94	0.91
$0.15 \leq CV < 0.25$	1.02	0.87	0.92
$0.25 \leq CV < 0.40$	1.03	0.76	0.95
$0.40 \leq CV < 0.60$	1.02	0.62	0.95
(b) 砂質土主体地盤である場合			
砂質土主体地盤である場合	荷重係数 γ_S	抵抗係数 γ_R	モデル化誤差に関する係数 $\gamma_{\Delta M}$
	1.01	0.93	0.89

表-F.11 提案設計法の部分係数 ($F_{ST}=1.21$)

(a) 粘性土層を含む場合			
粘性土地盤粘着力の変動係数 CV	荷重係数 γ_S	抵抗係数 γ_R	モデル化誤差に関する係数 $\gamma_{\Delta M}$
$CV < 0.10$	1.05	0.96	0.91
$0.10 \leq CV < 0.15$	1.05	0.95	0.92
$0.15 \leq CV < 0.25$	1.03	0.89	0.93
$0.25 \leq CV < 0.40$	1.02	0.79	0.95
$0.40 \leq CV < 0.60$	1.01	0.66	0.96
(b) 砂質土主体地盤である場合			
砂質土主体地盤である場合	荷重係数 γ_S	抵抗係数 γ_R	モデル化誤差に関する係数 $\gamma_{\Delta M}$
	1.01	0.92	0.88

付録 G モデル化誤差をまとめた場合の部分係数

本編では、荷重係数 γ_S 、抵抗係数 γ_R 、モデル化誤差に関する係数 $\gamma_{\Delta M}$ の3種類の部分係数を求めた。これは、性能照査式自体の誤差は荷重と抵抗の比全体にかかるものであることによる。ただし、オリジナルの荷重抵抗係数アプローチによる部分係数法は荷重係数と抵抗係数の2種類の部分係数を用いる。ここでは、2係数を用いる他の性能照査法と性能照査式の形式を整合させる必要性も考えられることから、本編および付録Fの検討結果を用いて、荷重係数、抵抗係数の2係数を設定する。

ただし、モデル化誤差を考慮した信頼性解析の検討方法および各計算ケースの結果は変更せず、全ケースの平均値を用いた、最終的な係数の計算のみを変更する。

1. 荷重係数にまとめる場合

モデル化誤差に関する係数 $\gamma_{\Delta M}$ を荷重係数 γ_S にまとめる場合、新しい荷重係数 γ'_S および性能照査式は式(G1)、(G2)のようになる。

$$\frac{\gamma'_S \cdot S_k}{\gamma_R \cdot R_k} \leq 1.0 \tag{G1}$$

ただし、 S_k ：荷重（起動モーメント）の特性値

R_k ：抵抗（抵抗モーメント）の特性値

$$\gamma'_S = \frac{\gamma_S}{\gamma_{\Delta M}} \tag{G2}$$

この部分係数の組み合わせおよび性能照査式に対応する部分係数を求め、計算結果を表-G.1～表-G.3に示す。

2. 抵抗係数にまとめる場合

モデル化誤差に関する係数 $\gamma_{\Delta M}$ を抵抗係数 γ_R にまとめる場合、新しい抵抗係数 γ'_R および性能照査式は式(G3)、(G4)のようになる。

$$\frac{\gamma_S \cdot S_k}{\gamma'_R \cdot R_k} \leq 1.0 \tag{G3}$$

ただし、 S_k ：荷重（起動モーメント）の特性値

R_k ：抵抗（抵抗モーメント）の特性値

$$\gamma'_R = \gamma_R \cdot \gamma_{\Delta M} \tag{G4}$$

表-G.1 部分係数 ($F_{ST}=1.25$)

(a) 粘性土層を含む場合

粘性土地盤粘着力の変動係数CV	荷重係数 γ'_S	抵抗係数 γ_R
$CV < 0.10$	1.18	0.95
$0.10 \leq CV < 0.15$	1.16	0.93
$0.15 \leq CV < 0.25$	1.13	0.87
$0.25 \leq CV < 0.40$	1.08	0.73
$0.40 \leq CV < 0.60$	1.05	0.57

(b) 砂質土主体地盤である場合

砂質土主体地盤である場合	荷重係数 γ'_S	抵抗係数 γ_R
	1.15	0.93

表-G.2 部分係数 ($F_{ST}=1.23$)

(a) 粘性土層を含む場合

粘性土地盤粘着力の変動係数CV	荷重係数 γ'_S	抵抗係数 γ_R
$CV < 0.10$	1.17	0.96
$0.10 \leq CV < 0.15$	1.15	0.94
$0.15 \leq CV < 0.25$	1.11	0.87
$0.25 \leq CV < 0.40$	1.08	0.75
$0.40 \leq CV < 0.60$	1.07	0.58

(b) 砂質土主体地盤である場合

砂質土主体地盤である場合	荷重係数 γ'_S	抵抗係数 γ_R
	1.13	0.93

表-G.3 部分係数 ($F_{ST}=1.21$)

(a) 粘性土層を含む場合

粘性土地盤粘着力の変動係数CV	荷重係数 γ'_S	抵抗係数 γ_R
$CV < 0.10$	1.16	0.96
$0.10 \leq CV < 0.15$	1.14	0.95
$0.15 \leq CV < 0.25$	1.11	0.89
$0.25 \leq CV < 0.40$	1.08	0.79
$0.40 \leq CV < 0.60$	1.06	0.66

(b) 砂質土主体地盤である場合

砂質土主体地盤である場合	荷重係数 γ'_S	抵抗係数 γ_R
	1.13	0.94

表-G.4 部分係数 ($F_{ST}=1.25$)

(a) 粘性土層を含む場合

粘性土地盤粘着力の変動係数CV	荷重係数 γ_s	抵抗係数 γ'_R
$CV < 0.10$	1.05	0.84
$0.10 \leq CV < 0.15$	1.04	0.84
$0.15 \leq CV < 0.25$	1.04	0.79
$0.25 \leq CV < 0.40$	1.01	0.69
$0.40 \leq CV < 0.60$	1.01	0.55

(b) 砂質土主体地盤である場合

砂質土主体地盤である場合	荷重係数 γ_s	抵抗係数 γ'_R
	1.01	0.81

表-G.6 部分係数 ($F_{ST}=1.21$)

(a) 粘性土層を含む場合

粘性土地盤粘着力の変動係数CV	荷重係数 γ_s	抵抗係数 γ'_R
$CV < 0.10$	1.05	0.87
$0.10 \leq CV < 0.15$	1.05	0.87
$0.15 \leq CV < 0.25$	1.03	0.83
$0.25 \leq CV < 0.40$	1.02	0.75
$0.40 \leq CV < 0.60$	1.01	0.63

(b) 砂質土主体地盤である場合

砂質土主体地盤である場合	荷重係数 γ_s	抵抗係数 γ'_R
	1.01	0.84

表-G.5 部分係数 ($F_{ST}=1.23$)

(a) 粘性土層を含む場合

粘性土地盤粘着力の変動係数CV	荷重係数 γ_s	抵抗係数 γ'_R
$CV < 0.10$	1.05	0.86
$0.10 \leq CV < 0.15$	1.04	0.85
$0.15 \leq CV < 0.25$	1.02	0.80
$0.25 \leq CV < 0.40$	1.03	0.72
$0.40 \leq CV < 0.60$	1.02	0.59

(b) 砂質土主体地盤である場合

砂質土主体地盤である場合	荷重係数 γ_s	抵抗係数 γ'_R
	1.01	0.83

付録 H 部分係数計算結果一覧

本編, 付録F, 付録Gで求めた部分係数の一覧を表-H.1に示す. ただし, 旧設計法と比較して目標耐力作用比 ($\gamma_s/(\gamma_R \cdot \gamma_{\Delta M})$) が過大となる結果が示されたケースについては, 提案から除外しているため, 取消線入りの数値を示している.

表-H.1 部分係数計算結果一覧

F_{ST}	P_T	1.25				1.23				1.21			
		1.08×10^{-2}				1.63×10^{-2}				2.35×10^{-2}			
3 係数	粘着力CV	γ_s	γ_R	$\gamma_{\Delta M}$	$\gamma_s/\gamma_R\gamma_{\Delta M}$	γ_s	γ_R	$\gamma_{\Delta M}$	$\gamma_s/\gamma_R\gamma_{\Delta M}$	γ_s	γ_R	$\gamma_{\Delta M}$	$\gamma_s/\gamma_R\gamma_{\Delta M}$
	$CV < 0.10$	1.05	0.95	0.89	1.242	1.05	0.96	0.90	1.215	1.05	0.96	0.91	1.202
	$CV < 0.15$	1.04	0.93	0.90	1.243	1.04	0.94	0.91	1.216	1.05	0.95	0.92	1.201
	$CV < 0.25$	1.04	0.87	0.92	1.299	1.02	0.87	0.92	1.274	1.03	0.89	0.93	1.244
	$CV < 0.40$	1.01	0.73	0.94	1.472	1.03	0.76	0.95	1.427	1.02	0.79	0.95	1.359
	$CV < 0.60$	1.01	0.57	0.96	1.836	1.02	0.62	0.95	1.732	1.01	0.66	0.96	1.594
	砂質土	1.01	0.92	0.88	1.240	1.01	0.93	0.89	1.220	1.01	0.92	0.88	1.194
2 係数 (γ_s)	粘着力CV	γ'_s	γ_R	γ'_s/γ_R		γ'_s	γ_R	γ'_s/γ_R		γ'_s	γ_R	γ'_s/γ_R	
	$CV < 0.10$	1.18	0.95	1.242		1.17	0.96	1.219		1.16	0.96	1.208	
	$CV < 0.15$	1.16	0.93	1.247		1.15	0.94	1.223		1.14	0.95	1.200	
	$CV < 0.25$	1.13	0.87	1.299		1.11	0.87	1.276		1.11	0.89	1.247	
	$CV < 0.40$	1.08	0.73	1.479		1.08	0.75	1.440		1.08	0.79	1.367	
	$CV < 0.60$	1.05	0.57	1.842		1.07	0.58	1.845		1.06	0.66	1.606	
	砂質土	1.15	0.93	1.237		1.13	0.93	1.215		1.13	0.94	1.202	
2 係数 (γ'_R)	粘着力CV	γ_s	γ'_R	γ_s/γ'_R		γ_s	γ'_R	γ_s/γ'_R		γ_s	γ'_R	γ_s/γ'_R	
	$CV < 0.10$	1.05	0.84	1.250		1.05	0.86	1.221		1.05	0.87	1.207	
	$CV < 0.15$	1.04	0.84	1.238		1.04	0.85	1.224		1.05	0.87	1.207	
	$CV < 0.25$	1.04	0.79	1.316		1.02	0.80	1.275		1.03	0.83	1.241	
	$CV < 0.40$	1.01	0.69	1.464		1.03	0.72	1.431		1.02	0.75	1.360	
	$CV < 0.60$	1.01	0.55	1.836		1.02	0.59	1.729		1.01	0.63	1.603	
	砂質土	1.01	0.81	1.247		1.01	0.83	1.217		1.01	0.84	1.202	

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 955 March 2017

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは
〔〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1
管理調整部企画調整課 電話:046-844-5019〕
E-mail:ysk.nil-kikaku@ml.mlit.go.jp