

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No. 994

October 2017

津波浸透流を考慮した防波堤の支持力設計法に対する 解析的検討

佐藤健彦・高橋英紀・宮田正史・竹信正寛

Analytical Study of the Bearing Capacity Design Method of Breakwaters
Considering Seepage Flow Caused by Tsunami

Takehiko SATO, Hidenori TAKAHASHI, Masafumi MIYATA, Masahiro TAKENOBU

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

津波浸透流を考慮した防波堤の支持力設計法に対する解析的検討

佐藤健彦*・高橋英紀**・宮田正史***・竹信正寛****

要 旨

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震が引き起こした巨大津波によって、防波堤をはじめとする多くの港湾施設が被災した。津波に対する防波堤の安定性に関しては、震災後に行われた遠心模型実験や有限要素法等を用いた数値計算による研究によって、防波堤の港内外の水位差によって腹付工を含む基礎マウンド内に浸透流が発生し、この浸透流によって基礎マウンド内に浸透力が働き、基礎マウンドの支持力を低下させることが明らかにされているが、津波によって発生する浸透流を考慮した支持力設計法の構築には至っていない。

本研究では、津波によって基礎マウンド内に発生する浸透流に関して、腹付工や基礎マウンドの形状を変化させた様々な防波堤断面を対象として有限要素法を用いた数値計算を行い、浸透流が基礎マウンドの支持力を低下させることを確認した。また、数値計算結果から支持力低下の程度は防波堤の港内外の水位差と関係があり、本研究が対象とする防波堤の断面諸元の範囲においては、港内外の水位差が10mのとき最大2割程度であることがわかった。現在の基礎マウンドの支持力性能照査に用いられる簡易ビショップ法による円弧すべり計算において、耐力作用比の許容値を港内外の水位差に応じて割り増すことで、津波によって発生する浸透流による基礎マウンドの支持力低下を間接的に考慮する方法を、浸透流を考慮した支持力設計法として提案した。

キーワード：津波，浸透流，基礎マウンド，支持力，設計法，防波堤

* 港湾研究部 港湾施設研究室 交流研究員（五洋建設株式会社）

** 港湾空港技術研究所 地盤改良研究グループ グループ長

*** 港湾研究部 港湾施設研究室 室長

**** 港湾研究部 主任研究官

Analytical Study of the Bearing Capacity Design Method of Breakwaters Considering Seepage Flow Caused by Tsunami

Takehiko SATO*
Hidenori TAKAHASHI**
Masafumi MIYATA***
Masahiro TAKENOBU****

Synopsis

Tsunamis caused by the Great East Japan Earthquake of 2011 damaged many port facilities including breakwaters. After the earthquake, many studies of the stability of breakwaters under the tsunami were conducted using centrifugal model tests and the finite element method. As one research result, it has been clarified that seepage flow occurs in a foundation mound including a reinforcing embankment due to the water level difference outside and inside a breakwater and that seepage force works in the foundation mound and lowers the bearing capacity of the foundation mound. However, the bearing capacity design method considering the seepage flow generated by a tsunami has not yet been established.

In this study, numerical calculation was performed using the finite element method for various breakwater sections with variously shaped reinforcing embankments and foundation mounds and it was confirmed that the seepage flow lowered the bearing capacity of the foundation mound. In addition, from the numerical calculation results, the degree of decrease in the bearing capacity was related to the water level difference inside and outside the breakwater, and when the water level difference inside and outside the breakwater was 10 m, the bearing capacity of the foundation mound decreased by up to 20%. For the circular slip failure analysis by the simplified Bishop's method currently used for the verification of the bearing capacity of a foundation mound, a method of increasing the allowable value of the resistance action ratio according to the water level difference inside and outside the breakwater was proposed as a method to indirectly consider the lowering of the bearing capacity of the foundation mound caused by the seepage flow.

Key Words : tsunami, seepage flow, foundation mound, bearing capacity, design method, breakwater

* Exchanging Researcher, Port Facilities Division, Port and Harbor Department, NILIM
(PENTA-OCEAN CONSTRUCTION Co., Ltd.)

** Head, Soil Stabilization Group, Geotechnical Engineering Division, PARI

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

**** Senior Researcher, Port and Harbor Department, NILIM

National Institute for Land and Infrastructure Management

Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism

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. はじめに	1
2. 津波に対する防波堤の設計法の現状	2
2.1 本章の概要	2
2.2 最新の知見の整理	2
3. 津波浸透流に関する既往の研究成果	4
3.1 本章の概要	4
3.2 津波浸透流を考慮した防波堤の支持力に関する既往の研究	4
4. 有限要素解析を用いた津波浸透流の影響検討	6
4.1 本章の概要	6
4.2 検討条件	6
4.3 検討結果	12
5. 津波浸透流を考慮した設計法の検討	15
5.1 本章の概要	15
5.2 津波浸透流を考慮した支持力設計法	15
5.3 有限要素解析と円弧すべり計算の比較	16
5.4 提案法の適用範囲に関する注意点	19
6. 結論	19
7. おわりに	19
謝辞	19
参考文献	19
付録 A 有限要素法を用いた数値計算結果	21
付録 B 円弧すべり計算を用いた支持力検討結果	34

1. はじめに

「港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成 19 年）¹⁾」（以下、「H19 技術基準」という。）には、作用が津波の場合に対する防波堤の設計法が示されており、これまで、これに準拠して津波防波堤が造られてきた。しかし、2011 年 3 月に発生した東北地方太平洋沖地震が引き起こした巨大津波によって、防波堤をはじめとする港湾の施設は甚大な被害を受け、この未曾有の災害を契機に、津波に対する防波堤の設計法の認識を変えざるを得なくなった。その後、防波堤の被災調査や被災メカニズムおよび巨大津波への対策方法に関する研究等が数多く行われた。2013 年 9 月に国土交通省港湾局から「防波堤の耐津波設計ガイドライン²⁾」（以下、「ガイドライン」という。）として最新の研究成果による知見が取りまとめられ、これにより津波に対する設計の概念や考え方等が更新されている。ガイドラインでは、防波堤の倒壊原因は津波による水平力に加え、これまであまり知見がなかった越流や基礎マウンド内に発生する浸透流も要因となっている可能性があるとしてされている。

津波が防波堤に作用するとき、防波堤の港内外で水位差が生じて基礎マウンド内に浸透流が発生する（図-1.1）。ガイドラインでは、浸透流によって基礎マウンド内に浸透力が発生し、基礎マウンドの支持力が低下することも示されている。しかし現時点においては、浸透流による基礎マウンドの支持力低下を考慮した設計法は確立されていないため、今後、成果が期待される課題となっていた。

津波が防波堤に作用する際に基礎マウンド内に発生する浸透流（以下、「津波浸透流」という。）に関して、今瀬ら³⁾は、遠心模型実験装置を用いて、防波堤に津波が作用した実験を行った。この実験において、津波による波力、揚圧力、浸透力が同時に作用した場合の防波堤の破壊現象の再現に成功している。笠間ら⁴⁾は、重力場

において防波堤模型の港内外に、津波を模擬した水位差を与え、防波堤模型に鉛直荷重を作用し沈下を発生させた。この実験により、基礎マウンドの沈下に対する支持力が低下することを確認している。高橋ら⁵⁾⁶⁾は、遠心模型実験装置を用いて、浸透流の影響のみを分離した実験を行い、その結果から、防波堤に津波が作用することで生じる港内外の水位差と基礎マウンドの支持力低下の関係について、定量的に評価している。これらの既往の研究成果から、津波浸透流が基礎マウンドに与える影響については、実験の条件下においてはある程度把握されている。

本研究では、複数の防波堤断面に対して有限要素法を用いた数値計算（以下、「FEM解析」という。）を実施し、津波浸透流が基礎マウンドの支持力低下に与える影響を定量的に検討する。また、津波浸透流の影響を、H19技術基準で支持力性能照査に用いられている簡易ビショップ法を用いた円弧すべり計算（以下、「円弧すべり計算」という。）において考慮する方法を検討し、津波浸透流の影響を考慮した設計法を提案することを目的とする。

本資料の構成は以下のとおりである。第 2 章では、津波に対する防波堤の設計法の現状について、ガイドラインにおける支持力設計法の考え方を整理し、現在の設計法の課題を整理する。第 3 章では、津波が越流した防波堤に関する既往の研究を整理し、津波浸透流が基礎マウンドの支持力に与える影響に関する知見を整理する。第 4 章では、FEM 解析結果を用いて、津波浸透流が支持力に与える影響について検討する。第 5 章では、第 4 章で確認された津波浸透流が支持力に与える影響を、円弧すべり計算を用いた設計法において考慮する方法について検討する。第 6 章には、津波浸透流の影響を考慮した設計法について本研究の成果をまとめる。

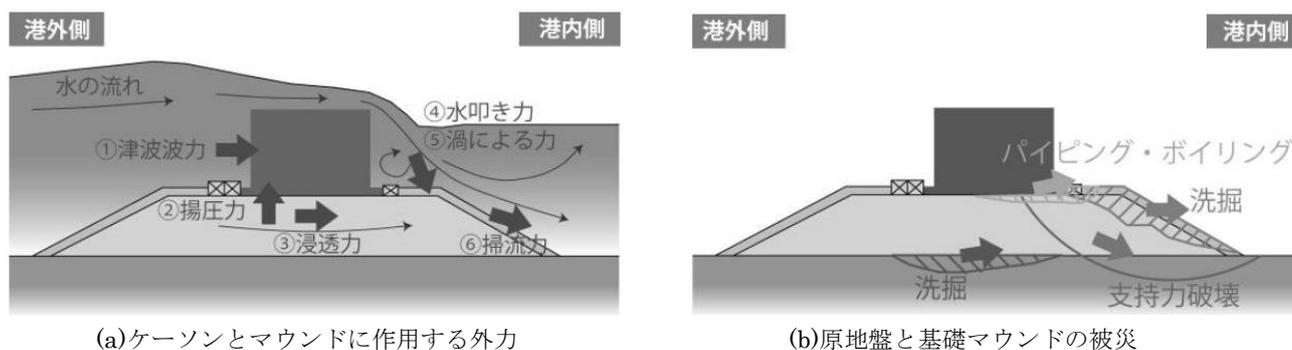


図-1.1 防波堤堤内外で水位差が生じた場合における外力と被災の概念図²⁾⁵⁾

2. 津波浸透流に対する防波堤の設計法の現状

2.1 本章の概要

本章では、津波に対する防波堤の基礎地盤の支持力設計に関する最新の知見として、ガイドラインの記載内容のうち、津波と支持力に関する内容について整理する。

2.2 最新の知見の整理

(1)対象施設

ガイドラインの位置付けに関しては、『本ガイドラインは、港湾の施設としての防波堤を対象とした耐津波設計の基本的考え方を示すものであり、防波堤の耐津波設計を行う際に「港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成 19 年）」に対して付加的に考慮すべき点を取りまとめたものである。』と記載がある。また、『本ガイドラインの適用対象施設は、「港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成 19 年）」に示す外郭施設としての防波堤のうち、港湾機能を維持するために津波発災直後から波浪に対して一定の港内静穏度を確保する必要がある防波堤や、津波を低減する効果を期待する防波堤である。なお、その構造形式としては、主に混成堤及び消波ブロック被覆堤を対象としている。』とも記載がある。

すなわち、港湾の施設としての防波堤のうち、混成堤と消波ブロック被覆堤が対象であり、「偶発対応施設の防波堤」と「偶発対応施設の津波防波堤」の両者に同じく適用可能と解釈できる。

(2)設計津波の考え方

津波の設定に関してガイドラインには、『港湾における津波対策の検討にあたっては、「発生頻度の高い津波」及び「最大クラスの津波」の二つのレベルの津波を踏まえ、地域防災計画や海岸保全基本計画等を踏まえた上で、背後の構造物等の重要度に応じて、「発生頻度の高い津波」から「最大クラスの津波」までの間で設計外力としての津波を「設計津波」として設定する。』と記載されている。

(3)基礎地盤の支持力の性能照査式

ガイドラインの性能照査式は、H19 技術基準に準じている。基礎地盤の支持力の性能照査式を式(2.1)に示す。

$$\sum \left[\{c'_d s + (w'_d + q_d) \tan \phi'_d\} \sec \theta / (1 + \tan \theta \tan \phi'_d / F_f) \right] / [\gamma_a \{ \sum \{ (w'_d + q_d) \sin \theta \} + a_1 P_{H_d} / R \}] = F_f \geq 1.0 \quad (2.1)$$

ここに、

P_H : 津波の水平波力 (kN/m)

a_1 : 津波の水平波力のアーム長 (m)

c' : 粘性土地盤の場合においては、非排水せん断強さ、砂質土地盤の場合においては、排水条件における見掛けの粘着力 (kN/m²)

s : 分割細片の幅 (m)

w' : 分割細片の重量 (kN/m)

q : 分割細片に作用する上載荷重 (kN/m)

ϕ' : 有効応力に基づく見かけのせん断抵抗角 (°)

θ : 分割細片の底面となす角 (°)

F_f : 耐力の設計用値と作用効果の設計用値の比を示す補助パラメータ

R : すべり円弧の半径 (m)

γ_a : 構造解析係数

※添え字 d は設計用値を示す。

(4)部分係数

部分係数についてガイドラインでは、「構造解析係数を除き全て 1.00 を用いても良い。構造解析係数は、防波堤に要求される性能に応じた適切な値を設定する。」と記載されている。

また、「設計津波」に対する当面の安定性照査手法として、構造解析係数の参考値が表-2.1 のように示されている。これは、2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う津波の作用を受けた港湾の第一線防波堤を対象として、防波堤の大規模な被災の発生有無について整理した結果であるが、基礎の支持力の構造解析係数は $\gamma_a=1.0$ と設定されている。

表-2.1 構造解析係数の参考値²⁾

照査項目	構造解析係数
直立部の滑動	1.2
直立部の転倒	1.2
基礎の支持力	1.0

(5)粘り強い構造の検討

ガイドラインでは、「設計津波」を超える規模の津波に対して「粘り強い構造」を目指している。粘り強い構造については、『「設計津波」を超える規模の津波に対しても可能な限り防波堤の全体安定性を損なわない』構造と定義されており、『津波の規模に応じた防波堤の破壊形態と構造上の弱点について十分な検討を行ったうえで、施設の重要度や費用対効果等を踏まえつつ、その弱点部分に付加的な対策を施すことによって、「設計津波」

を超える規模の津波に対しても防波堤が変形しつつも倒壊しない』と記載されている。

粘り強い構造の具体的な設計法は明示されていないが、粘り強い構造を目指すために、「津波の規模に応じた防波堤構造の弱点を抽出し、その弱点部分に構造上の工夫を施す」ことや、「滑動安全率等が 1.0 を上回るレベル」が一つの目安になると考えられることが示されている。

(6)津波波力算定式

ガイドラインでは、2011年東北地方太平洋沖地震によって襲来した津波を考慮して、「波状段波の発生の有無」と「越流の発生の有無」により、「修正谷本式」、「谷本式」、「静水圧差による算定式」から津波波力算定式を選定することとなっている。津波波力の算定手順を図-2.1に示す。本研究では、津波が防波堤を越流する場合を検討対象とするため、静水圧差による算定式が対象となる。

津波波力の算定式を式(2.2)から式(2.4)に示し、津波波力の考え方を図-2.2に示す。

$$p_1 = \alpha_f \rho_0 g (\eta_f + h') \quad (2.2)$$

$$p_2 = \frac{\eta_f - h_c}{\eta_f + h'} p_1 \quad (2.3)$$

$$p_3 = \alpha_r \rho_0 g (\eta_r + h') \quad (2.4)$$

ここに、

- p_1 : 直立壁前面の底面における波圧強度 (kN/m²)
- p_2 : 直立壁前面の天端面における波圧強度 (kN/m²)
- p_3 : 直立壁背面の底面における波圧強度 (kN/m²)
- $\rho_0 g$: 海水の単位体積重量 (kN/m³)

- h' : 直立壁の底面の水深 (m)
- h_c : 静水面から直立壁天端面までの高さ (m)
- η_f : 直立壁前面の静水面からの津波高さ (m)
- η_r : 直立壁背面の静水面からの津波高さ (m)
- α_f : 直立壁前面の静水圧補正係数 (=1.05)
- α_r : 直立壁背面の静水圧補正係数 (=0.90)

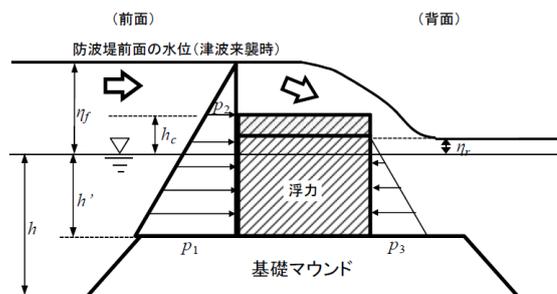


図-2.2 津波波力の考え方 (静水圧差による算定式) 2)

また、ガイドラインは、取りまとめられた時点において得られている知見に基づくものであり、耐津波設計に係る様々な課題の全てが必ずしも明確になっているわけではない。そのため、ガイドラインの中では今後期待される成果についていくつかの項目が挙げられている。その中で、津波浸透流に関する項目は、次の2項目である。

- ・津波水位差による浸透流の評価手法
- ・浸透流が基礎の支持力と全体安定性に及ぼす影響の評価手法

すなわち、津波浸透流の影響を考慮した支持力性能照査方法の確立が望まれていた。

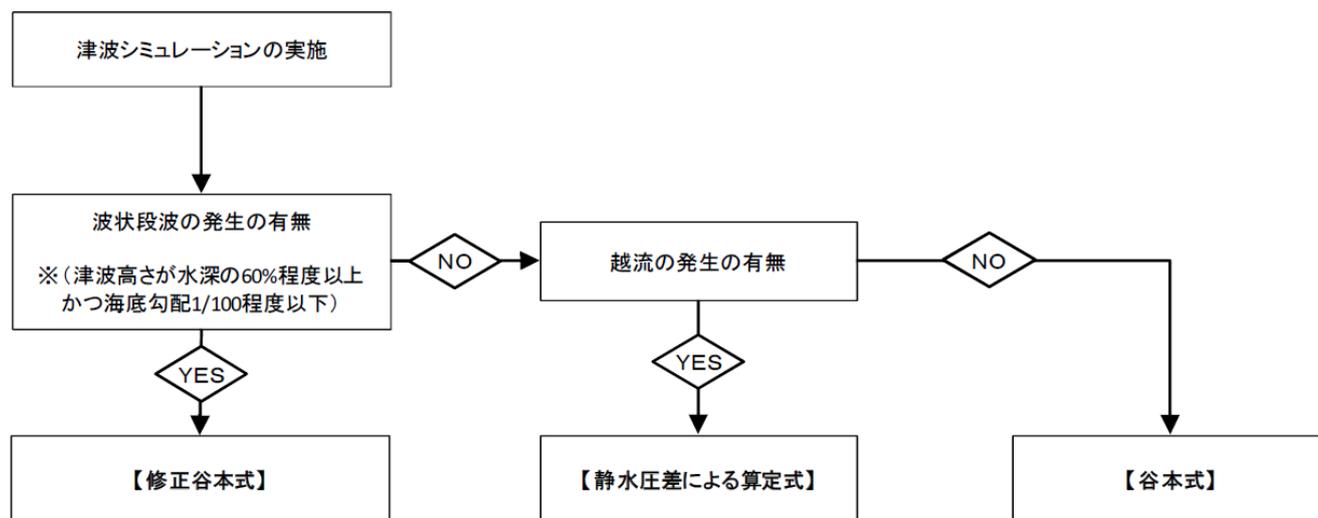


図-2.1 防波堤に対する津波波力算定手順 2)

3. 津波浸透流に関する既往の研究成果

3.1 本章の概要

本章では、本研究で行う FEM 解析の参考とするために、津波浸透流が基礎マウンドの支持力低下に及ぼす影響に関する既往の成果として、高橋ら⁵⁾による研究成果を紹介する。

3.2 津波浸透流を考慮した防波堤の支持力に関する既往の研究

(1)高橋ら⁵⁾による模型実験並びに FEM 解析

高橋ら⁵⁾は、浸透流が作用したマウンドの支持力低減効果を確認するために、遠心模型実験装置を用いた遠心力場における実験を行っている。実験は、浸透流を発生させずに支持力を調べる水平載荷実験と、浸透流を発生させた条件下での支持力を調べる実験であり、両者を比較することで、支持力の低下を確認している。

浸透流を発生させない実験の断面を図-3.1 に示す。この断面は仮想断面であり、支持力破壊が卓越するように、マウンドを高く、法勾配を大きく、法肩幅を狭くしている。マウンド上のケーソン上端に対して水平載荷する実験を行い、基礎マウンドが極限状態に至った水平力を支持力とする。この実験により、浸透力が発生しないときの支持力として、861kN/m が得られている。

浸透流を発生させた実験の断面を図-3.2 に示す。この断面の止水壁左側に給水すると、止水壁の両側に設置された排水孔の高さに水位が固定されることで、基礎マウンドを挟んで水位差が発生する。この水位差で浸透流を発生させている。このとき、止水壁を設けて下部から浸透を行うことで、揚圧力による支持力低下の影響を取り除く工夫をしている。しかし、この対策によりケーソン下部に水平方向に発生する浸透力の向きが、上向きになってしまうため、浸透力による支持力の低減効果がいくらか大きめとなっていることが注意点とされている。浸透力の作用時間内で水平荷重を作用させることが困難なため、ケーソンに対して滑車を介しておもりをぶら下げておき、浸透流を発生させたときの挙動を確認している。この実験により、図-3.3 の結果が得られている。水平荷重が 548kN/m では防波堤は破壊せず、水平荷重が 663kN/m では防波堤が破壊している。したがって、破壊時における基礎マウンドの浸透流による支持力低下の割合は、23%と 36%の間のどこかにあることが示されている。

浸透流がマウンドの支持力に与える影響をさらに詳細に調べるために、FEM 解析を実施した結果を図-3.4 に

示す。例えば、水圧差 98kN/m² (水位差 10m) では支持力低減効果が 17% (2 割弱) であることが示されている。

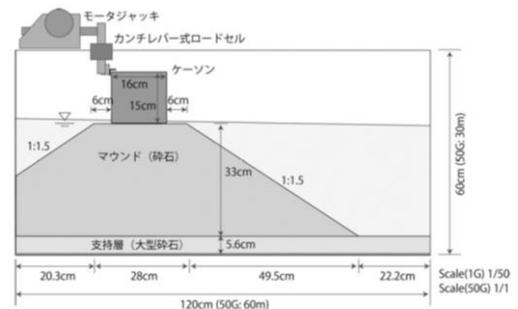


図-3.1 水平載荷実験用模型断面⁵⁾

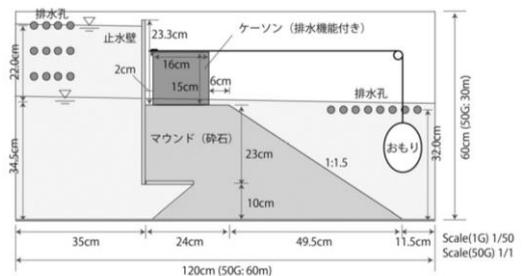
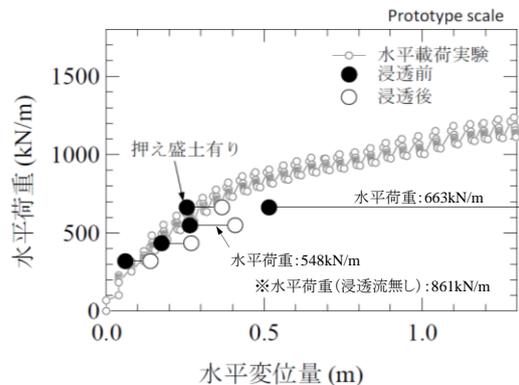
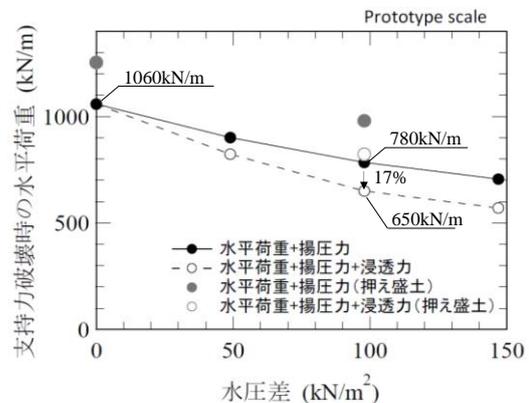


図-3.2 支持力低下確認実験用模型断面⁵⁾



※高橋ら⁵⁾の図に一部加筆

図-3.3 浸透を作用させた場合の荷重～変位関係⁵⁾



※高橋ら⁵⁾の図に一部加筆

図-3.4 防波堤前後の水圧差と支持力の関係⁵⁾

(2) 高橋ら⁶⁾による模型実験

(1)に示す高橋ら⁵⁾の実験では、揚圧力の影響を除去する工夫から浸透力の方向が現場でのものと異なっている箇所があった。このため、高橋ら⁶⁾の実験では、浸透流を発生させる実験において、揚圧力に相当する鉛直荷重をケーソンの重量からあらかじめ引いておき、浸透流を発生しない実験との支持力の差分が浸透力の影響のみになるようにした。浸透力が作用したマウンドの支持力低減効果を確認するため、遠心模型実験方法にこのような工夫を追加し、より厳密な実験を行って支持力の低下を確認している。

浸透流を発生させない実験の断面を図-3.5に示す。この実験により、浸透力が発生しないときの支持力として、3,740kN/mが得られている。

浸透流を発生させた実験の断面を図-3.6に示す。この断面のケーソン左側に給水すると、排水口の高さで水位が固定され、港内外に一定の水位差が発生する。この水位差で浸透流を発生させる。港内外の水位が保たれている時間は6秒間ほどであり、浸透流の作用時間内で水平荷重を作用させることが困難なため、ケーソンに対して滑車を介しておもりをぶら下げておき、浸透流を発生させたときの挙動を確認している。この実験により、図-3.7の結果が得られている。水平荷重が3,144kN/mでは防波堤は破壊せず、水平荷重が3,363kN/mでは防波堤が破壊している。また、浸透流を作用した実験における水位差のピーク時は8.3mから9.3mである。この結果から、破壊時における基礎マウンドの浸透力による支持力低下の割合は、8.3mから9.3mの水位差の間で、10%と16%の間のどこかにあることが示されている。

(3)まとめ

浸透力が基礎マウンドの支持力を低減する割合については、高橋ら⁵⁾のFEM解析によると水位差10mで17%減少し、高橋ら⁶⁾の遠心模型実験によると水位差8.3mから9.3mの間で10%から16%の間で減少することが示されている。また、水位差が大きくなるほど支持力の低減も大きくなることも示されている。以上から、これらの実験や解析で対象とした防波堤の断面諸元の範囲では、浸透力による基礎マウンドの支持力低下は水位差に応じて異なり、浸透力を考慮しない場合に対して、おおよそ水位差10mで最大2割程度、水位差5mで最大1割程度の支持力低下が生じていることとなる。

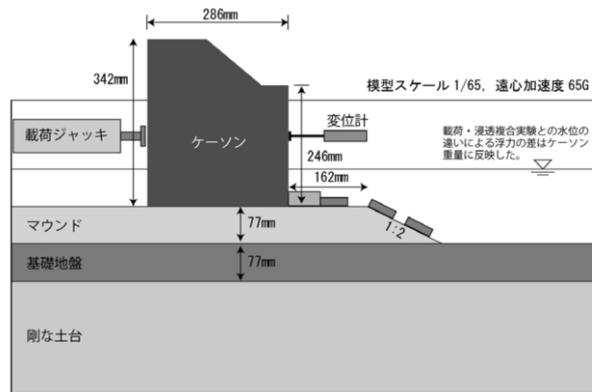


図-3.5 水平荷重実験の概略断面図⁶⁾

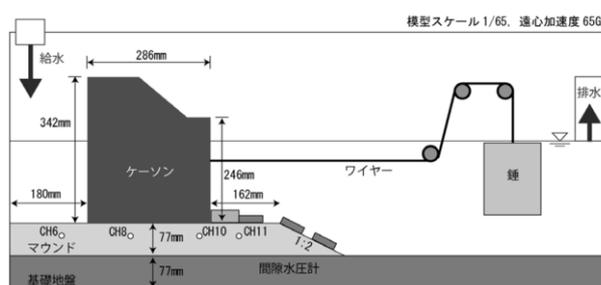
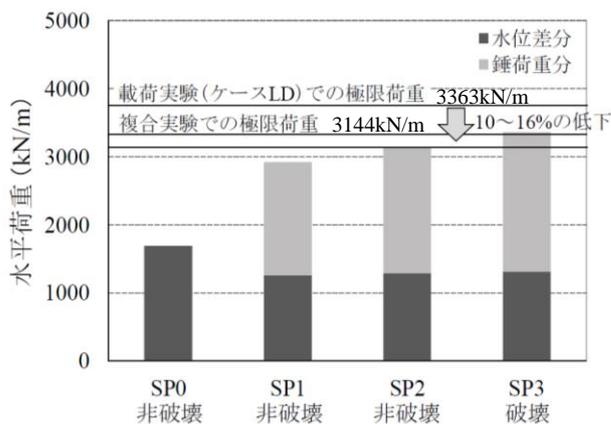


図-3.6 載荷・浸透複合実験の概略断面図⁶⁾



※高橋ら⁶⁾の図に一部加筆

図-3.7 各ケースの極限荷重⁶⁾

4. 有限要素解析を用いた津波浸透流の影響検討

4.1 本章の概要

本章では、津波浸透流を考慮する場合と考慮しない場合の FEM 解析結果を比較することで、津波浸透流による基礎マウンドの支持力低下について検討する。4.2 には検討条件を示し、4.3 では FEM 解析結果を示す。

4.2 検討条件

(1)解析プログラム

FEM 解析のプログラムとして、「地盤解析汎用プログラム (GeoFem) 改良版⁷⁾⁸⁾⁹⁾」(以下、「GeoFem」という。)を用いる。本解析プログラムは、運輸省港湾技術研究所(当時)で開発されたプログラムで、2011年東日本大震災の後に津波浸透流の影響を考慮できるよう、浸透流解析の機能が追加されたプログラムである。GeoFem は仮想的な弾・粘塑性アルゴリズムに基づく計算法(仮想粘性法)を導入し、地盤など一部要素が破壊状態に近い条件であっても安定的に計算を行える特徴を有している。

GeoFem を用いた解析フローを図-4.1 に示す。GeoFem では、浸透流解析と支持力解析は別解析で行われる。はじめに浸透流解析により解析モデル全体に発生する浸透力を計算し、その浸透力を支持力解析に引き継ぐことで浸透流を考慮した支持力解析となる。具体的には、浸透流解析でマウンドの各要素の積分点に作用する浸透力 F を式(4.1)で求め、支持力解析時にこの浸透力

F をマウンド各要素の積分点に付加させる方法を探っている。なお、浸透流の平均流速 v と動水勾配 i の関係には式(4.2)に示すダルシー則を仮定し、式(4.1)に代入する動水勾配 i を算定している。基礎マウンドの中の流れは乱流であり、実際には非線形となるが、高橋ら⁹⁾によると、線形と非線形の差は小さく、ここでは線形関係であるダルシー則を適用した。浸透流解析の結果を支持力解析に引き継がない場合は、浸透流を考慮しない支持力解析となる。

$$F = i \times \gamma_w \quad (4.1)$$

$$v = k \times i \quad (4.2)$$

ここに、 i : 動水勾配

γ_w : 水の単位体積重量 (kN/m³)

v : 浸透流の平均流速 (m/s)

k : 透水係数 (m/s)

(2)検討対象断面

検討対象断面を図-4.2 から図-4.14 に示す。原地盤は N 値が $N=10$ 相当の砂地盤とし、基礎マウンドおよび腹付工の材料は一般的な捨石材であるとする。Case1-2, Case1-3, Case1-4 は、それぞれ Case1-1 に対して、水深を浅くしたケース、基礎マウンドを薄くしたケース、ケーソン幅を広くしたケースである。Case2 シリーズは Case1 シリーズに対して、腹付工を追加したケースである。Case3 シリーズは Case2-1 に対して、腹付工の形状を様々に変化させたケースである。

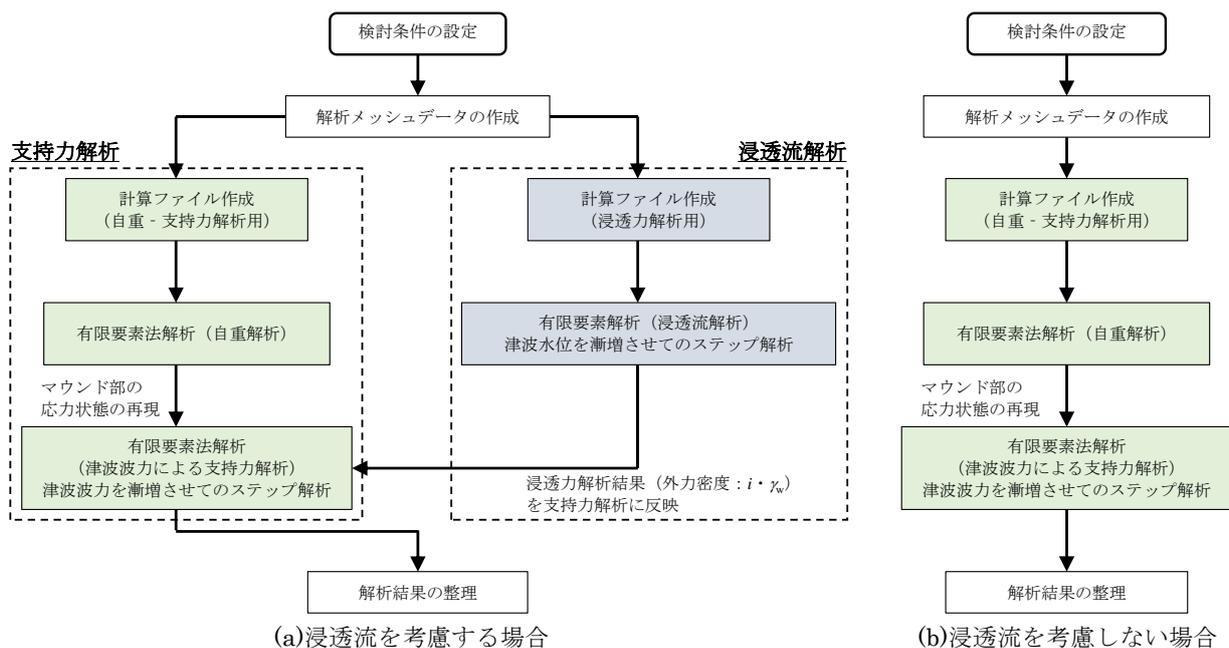


図-4.1 GeoFem における解析フロー⁹⁾ ※図に一部加筆

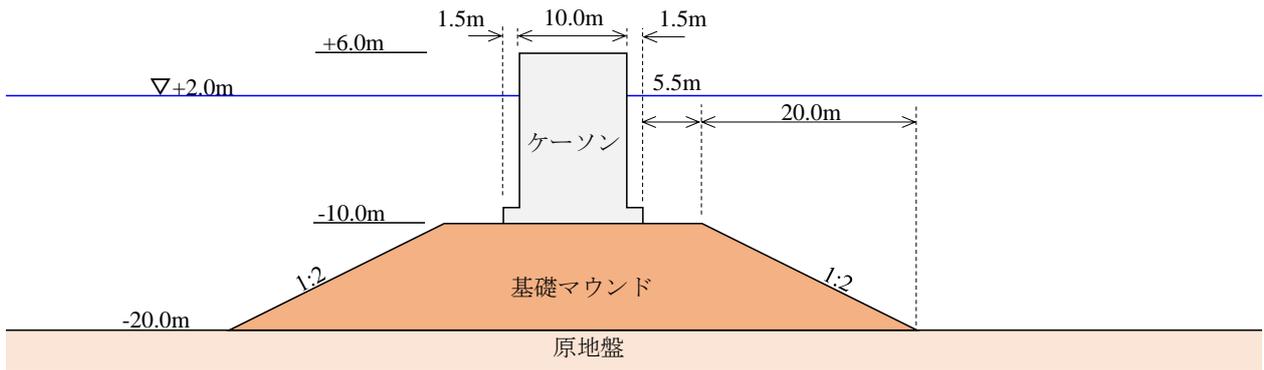


図-4.2 検討断面図【Case1-1】

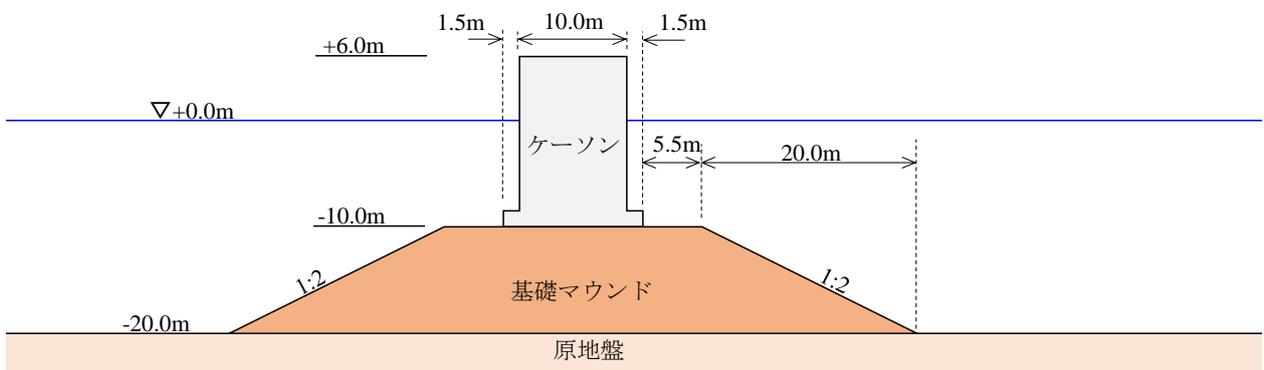


図-4.3 検討断面図【Case1-2】

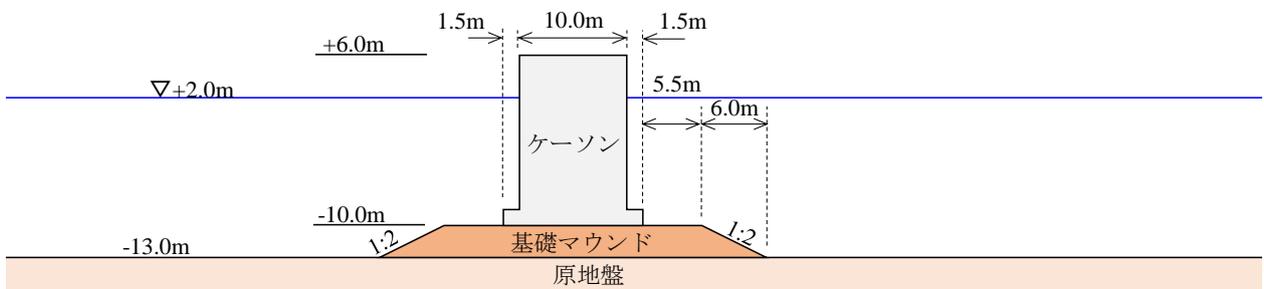


図-4.4 検討断面図【Case1-3】

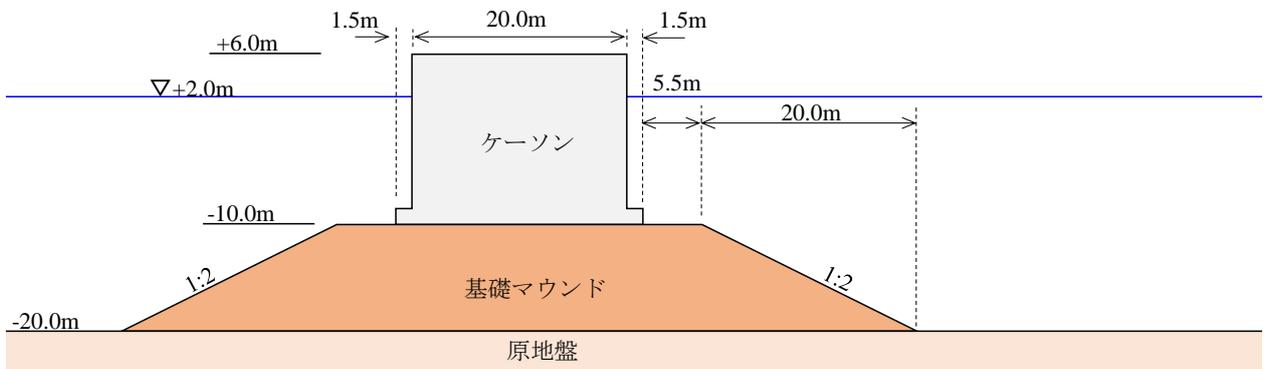


図-4.5 検討断面図【Case1-4】

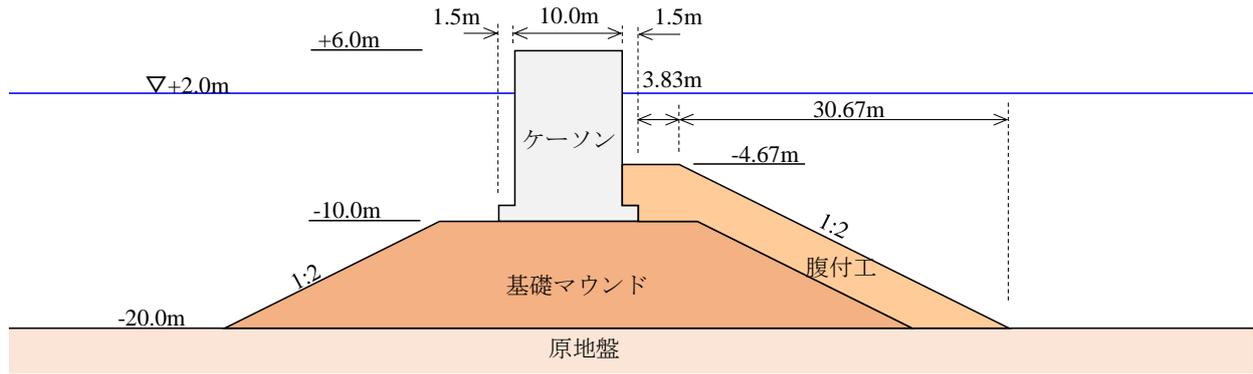


図-4.6 検討断面図【Case2-1】

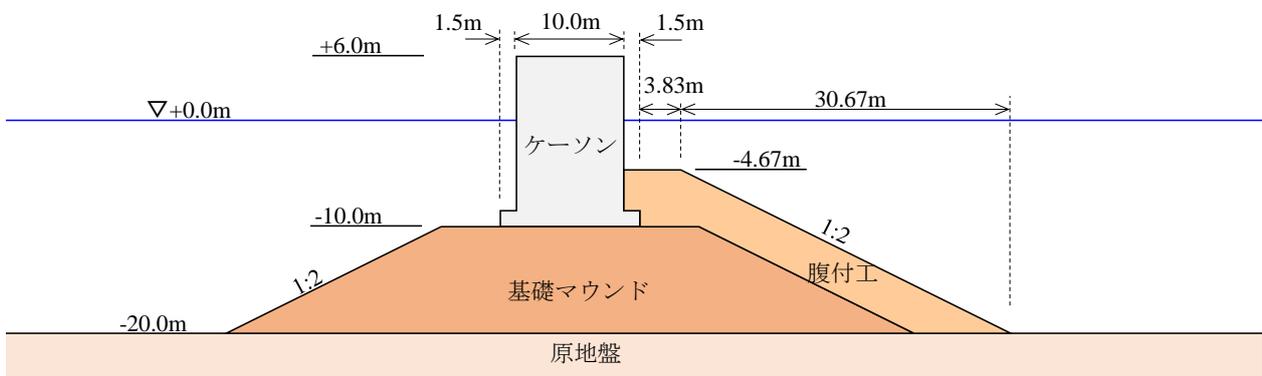


図-4.7 検討断面図【Case2-2】

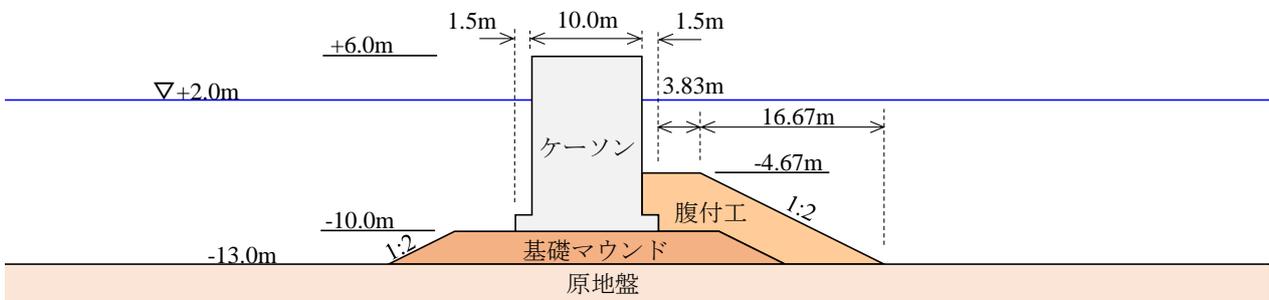


図-4.8 検討断面図【Case2-3】

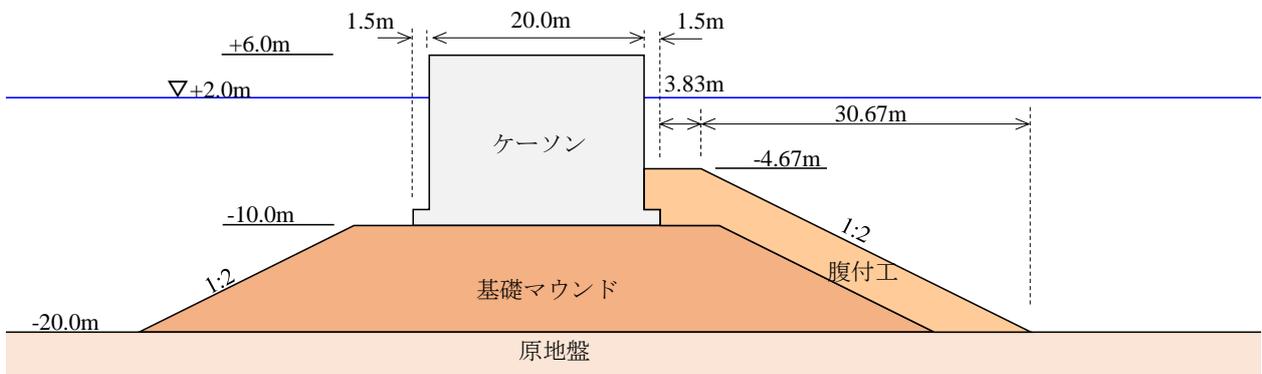


図-4.9 検討断面図【Case2-4】

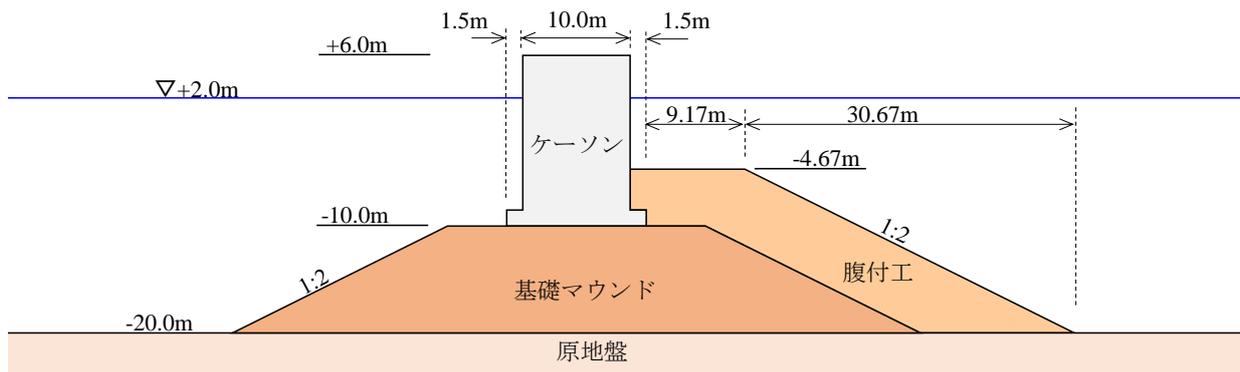


図-4.10 検討断面図【Case3-1】

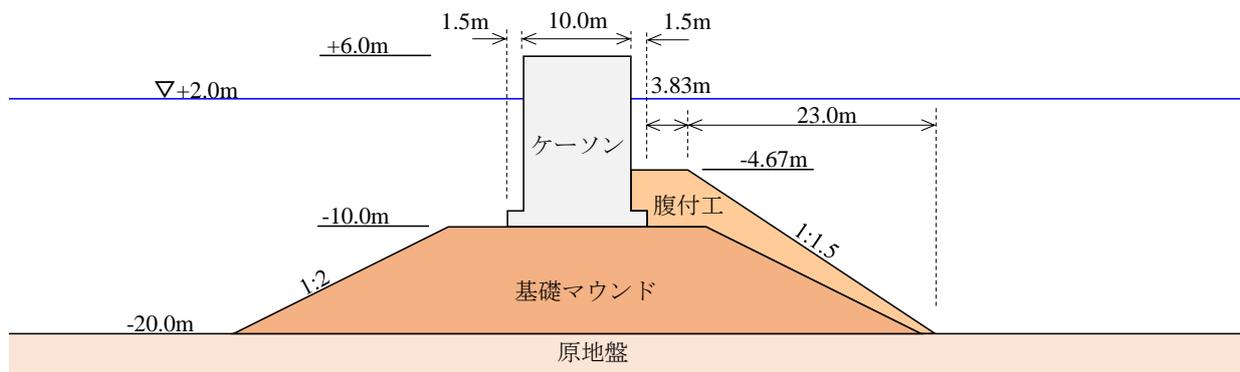


図-4.11 検討断面図【Case3-2】

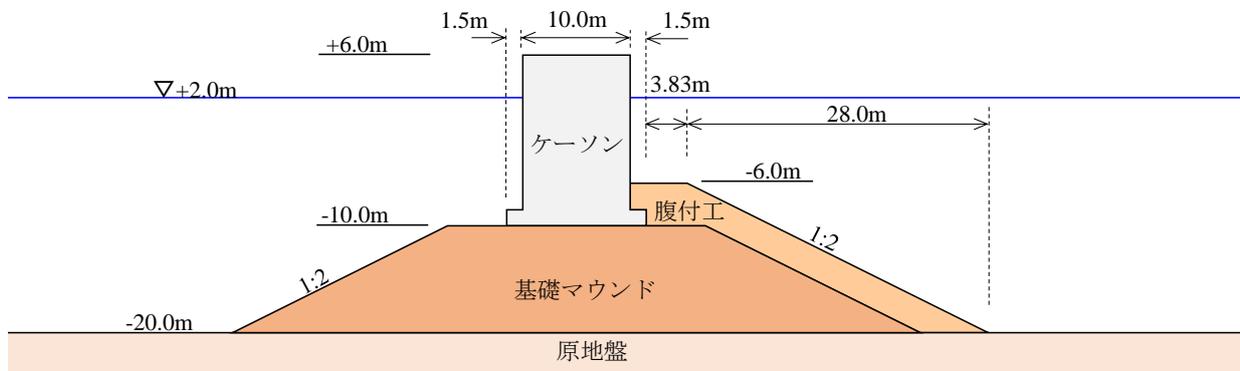


図-4.12 検討断面図【Case3-3】

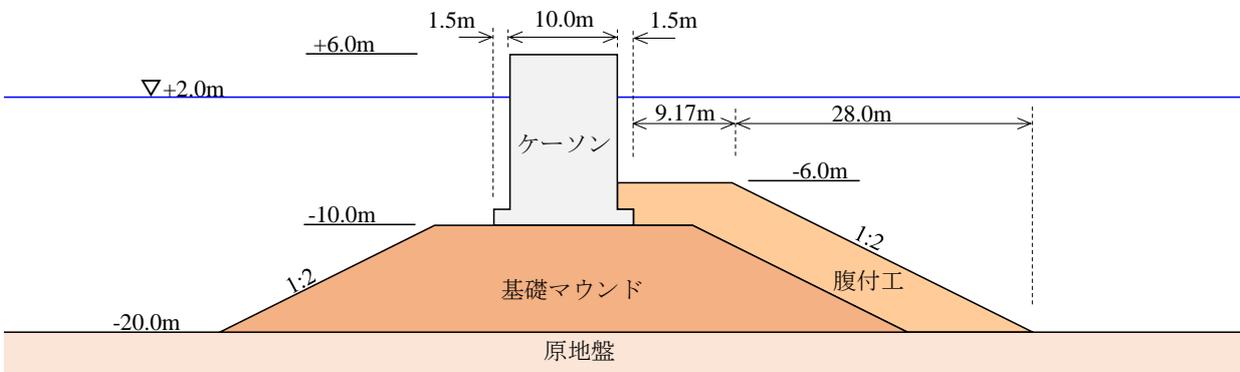


図-4.13 検討断面図【Case3-4】

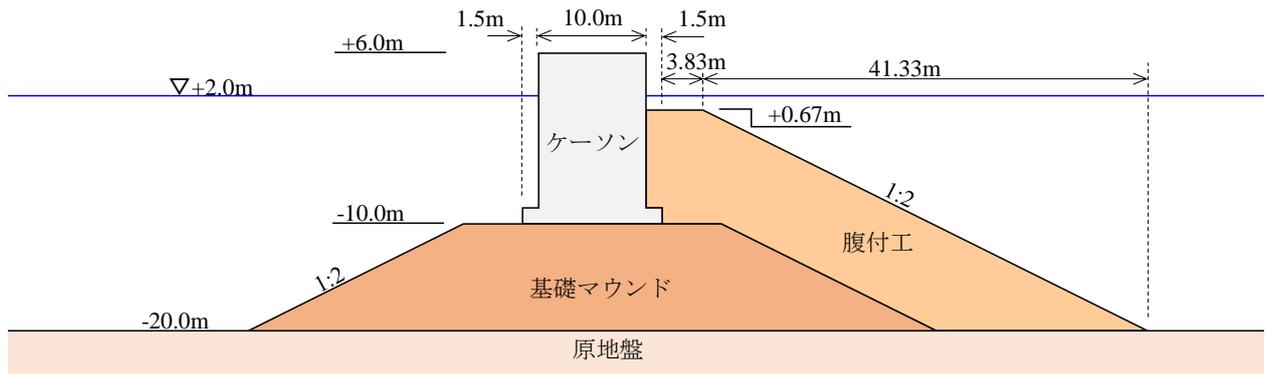


図-4.14 検討断面図【Case3-5】

(3) 浸透流解析モデル

浸透流解析モデルの例を図-4.15 に示す。解析は、港内外の水位差を考慮し、津波水位を漸増させるステップ解析を実施する。解析に用いる地盤等の透水係数は図-4.15 に示すとおりである。

本資料における解析モデルでは、全検討断面に対して最大の水位差を 20.0m とし、解析ステップ数は 100 ステップ、すなわち、1 ステップあたり 0.20m の水位増を基本とする。ただし、本研究ではガイドラインの静水圧差による算定式を用いるため、次のような補正を行う。ガ

イドラインによると、津波が防波堤を越流する場合、港内外の静水圧に、直立壁前面の静水圧補正係数 $\alpha_f=1.05$ と直立壁背面の静水圧補正係数 $\alpha_r=0.90$ を考慮、すなわち、静水圧に対して港外側を 5%増加し、港内側を 10%低減することとなっている。これは水圧への補正であるため、浸透流解析における水位差に対しても同じ補正係数を考慮する。ただし、本研究では FEM 解析の特性上直接この係数を考慮することができないため、図-4.16 に示す水位差を与えて解析することとした。

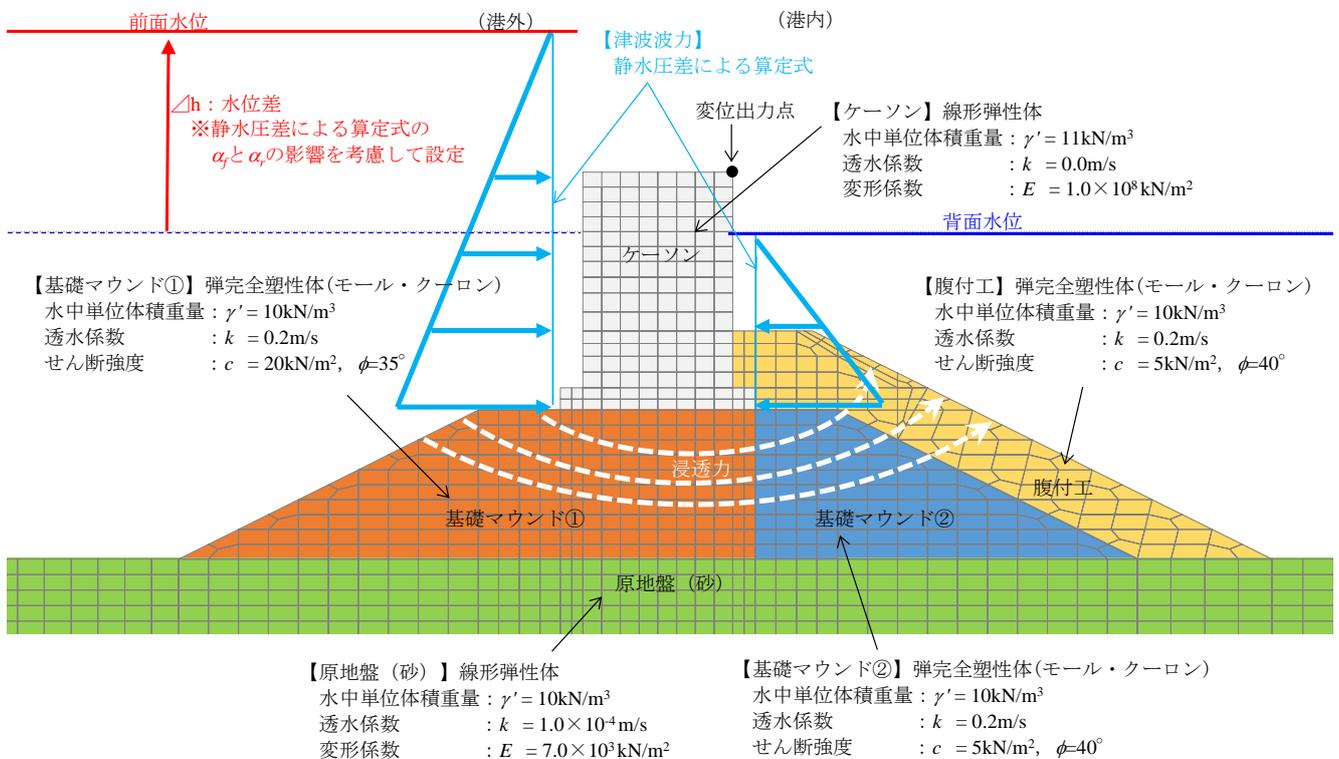


図-4.15 FEM 解析における浸透流解析モデル

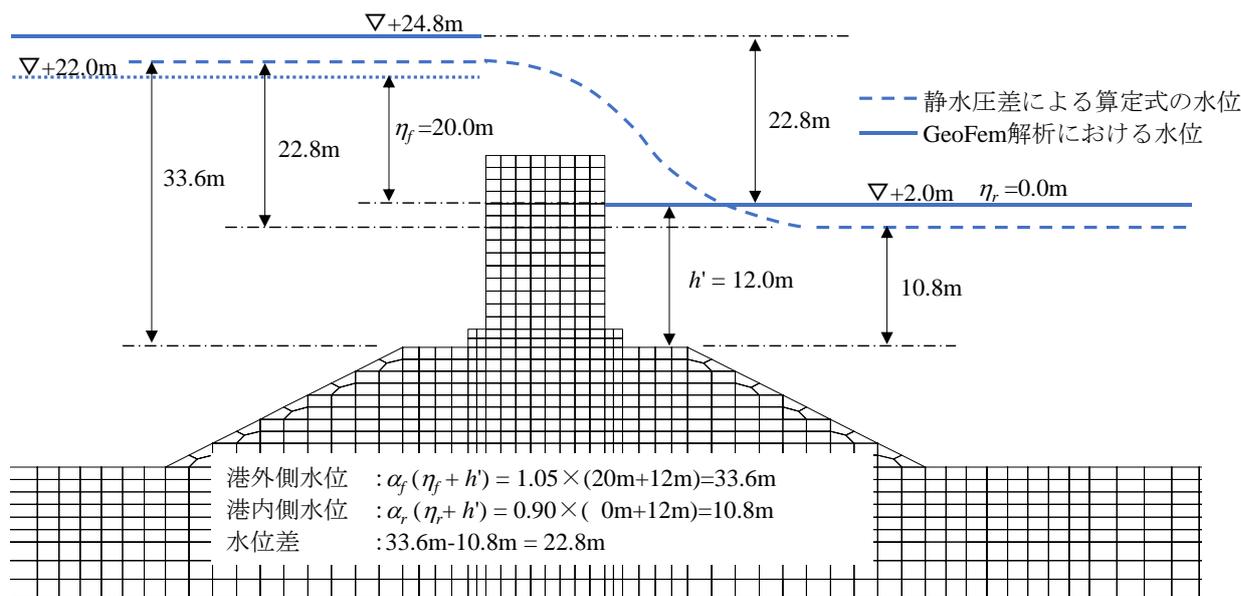


図-4.16 浸透流解析で与える水位差の考え方

(4) 支持力解析モデル

支持力解析には、浸透流解析と同じ有限要素メッシュを用いる（図-4.15）。支持力解析を実施するにあたって、基礎マウンドの応力状態を再現するために、まずは自重解析を実施する。自重解析は、1段階目で砂地盤、2段階目で基礎マウンド、3段階目でケーソンと腹付工の荷重を考慮する解析を実施する。自重解析によって求められた基礎マウンドの応力状態を初期状態とし、引き続き支持力解析を実施する。解析は、港内外の水位差を考慮し、津波水位を漸増させるステップ解析を実施する（図-4.15）。浸透流を考慮する場合は、各ステップにおいて浸透流解析において計算される浸透力を支持力解析に引き継ぐため、最大の水圧差と解析ステップ数は、浸透流解析に合わせる。

解析に用いる地盤等の物性値を図-4.15に併せて示している。原地盤はN値がN=10の砂質土層としているため、透水係数はH19技術基準¹⁾における砂層に対する透水係数の概略値 ($k=10^{-2} \text{cm/s}$) を適用する。変形係数については、GeoFem マニュアル⁷⁾に準じて $E=6N+10$ (kgf/cm^2)（日本道路協会）を用いて設定した。基礎マウンドのせん断強度については、ケーソン後趾から港外側と港内側で物性値を使い分ける。ケーソン後趾から港外側は、ケーソンの重量によって基礎マウンドの拘束圧が大きくなっているが、ケーソン後趾から港内側は、ケーソンの重量が作用しないため基礎マウンドの拘束圧

がケーソン直下に比べて小さく、更に上向きの浸透流の発生により基礎マウンドの拘束圧が低下しているという違いを考慮するためである。ケーソン後趾から港外側については、見かけの粘着力を考慮して見かけの粘着力 $c=20.0 \text{kN/m}^2$ および摩擦抵抗角 $\phi=35^\circ$ を用いる（図-4.17のLine(2)）。これは、小林ら¹⁰⁾によって示された、大型三軸試験の結果から安全側に求めた値であり、港湾構造物の設計において、簡易ビショップ法を用いた基礎マウンドの支持力計算を行う場合の、通常の捨石材に対して一般的に用いられる物性値である。ただし、ケーソン後趾から港内側については浸透流の影響により、見かけの粘着力を見込むとせん断強度を大きく見積もるため、高橋ら¹¹⁾に倣い見かけの粘着力 $c=5.0 \text{kN/m}^2$ および摩擦抵抗角 $\phi=40^\circ$ （図-4.17のLine(1)）を用いた。

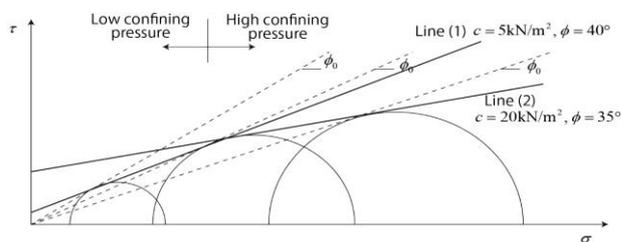


図-4.17 基礎マウンドのせん断強度の考え方¹¹⁾

4.3 検討結果

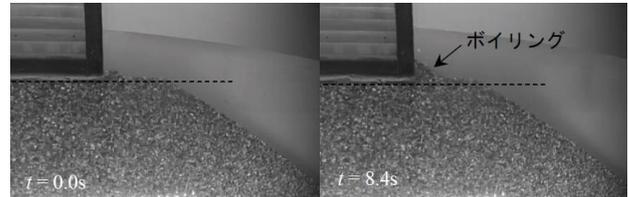
(1) 浸透流解析結果

浸透流解析を実施すると、水位差に応じて基礎マウンド内には浸透流が生じ、浸透流によって浸透力が発生する。Case1-1における浸透流の流速および浸透力の分布を図-4.18 および図-4.19 に示す。流速については、原地盤では非常に小さく、基礎マウンドで局所的に、ケーソン前趾付近で港内側下方に大きく、ケーソン後趾付近で港内側上方に大きくなる。浸透力については、原地盤も含めた全体において発生していることがわかる。原地盤は透水係数が非常に小さいため、流速が非常に小さくても浸透力がある程度発生することがわかる。浸透力が大きくなるのは、流速と同じく、基礎マウンドのケーソン前趾と後趾付近である。浸透力の大きさは最大でおよそ 9.0kN/m^3 となっており、この浸透力の大きさは、基礎マウンドの水中単位体積重量と同程度であるため、ケーソン後趾付近で石材が移動する程度の大きさに相当している。

図-4.20 に高橋ら⁶⁾によって観察された遠心模型実験中の基礎マウンドの様子を示す。10mm 砕石を用いた実験では、ケーソン後趾付近の石が数個移動しており、2mm 珪砂を用いた実験では、ケーソン後趾付近にボイリングが発生している様子が観察される。したがって、浸透流解析の結果は、遠心模型実験の結果と同じ傾向を示すことが確認できる。



(a)10mm 砕石



(b)2mm 珪砂

図-4.20 浸透中のケーソン後趾付近の様子⁶⁾

Case1-1と同じ水位差のときの、Case2-1における浸透流の流速および浸透力の分布を図-4.21 および図-4.22 に示す。Case1-1と異なる点として、腹付工があることによって、同じ水頭差に対しては浸透力が全体的に小さくなることがわかる。また、腹付工があることによって、基礎マウンド表面における浸透力の集中を回避できることがわかる。腹付工があることによって、浸透力が全体的に小さくなり、更に腹付工の表面における局所的な浸透力の集中も回避できることから、基礎マウンドの安定性向上に腹付工が有効であることを示している。

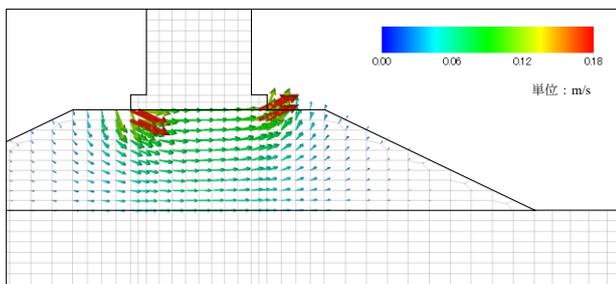


図-4.18 流速分布図【Case1-1】

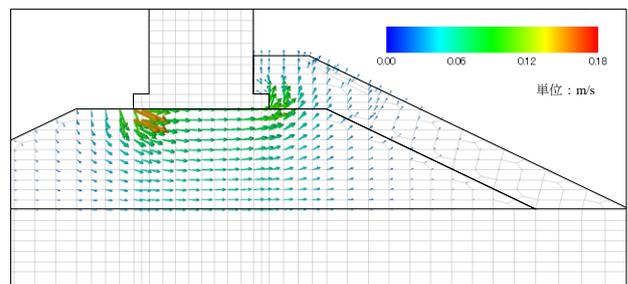


図-4.21 流速分布図【Case2-1】

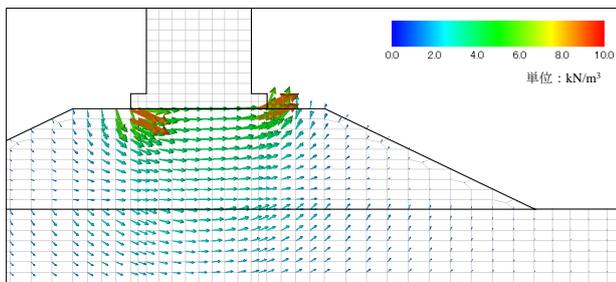


図-4.19 浸透力分布図【Case1-1】

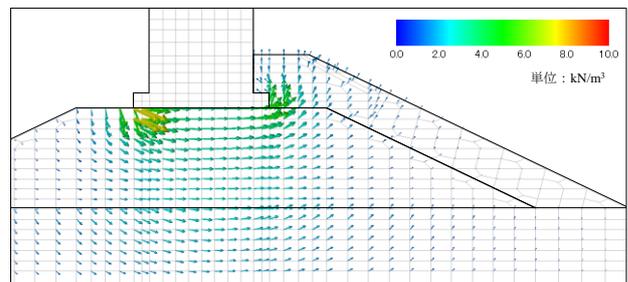


図-4.22 浸透力分布図【Case2-1】

(2)支持力解析結果

支持力解析で発生するケーソン天端の変位出力点（図-4.15）の水平変位と、ケーソン前面波力から背面波力を引いた水平力（図-4.15）の関係を示した解析結果について、代表として、Case1-1の結果を図-4.23に、Case2-1の結果を図-4.24に示す。その他のケースの結果については、付録Aに整理する。

解析ステップに応じて水平力が増加すると、水平変位も増加し、あるステップで解析が発散する。一般に、弾・完全塑性による塑性破壊と計算による発散には強い相関があるため¹²⁾、本研究では、計算の発散を基礎マウンドの破壊と考える。計算が発散する1ステップ前の水平力は、防波堤が抵抗できる水平力の極限值であるため、この水平力の極限值を基礎マウンドの支持力を代表する指標（以下、「極限支持力」という。）とした。浸透流を考慮した場合は、浸透流を考慮しない場合に対して、極限支持力が低下していることがわかる。この現象は全検討ケースにおいて同様に確認される。

極限支持力を発揮する時（以下、「破壊時」という。）の変形図について、Case1-1の結果を図-4.25に、Case2-1の結果を図-4.26に示す。ケーソン下の基礎マウンドに着目すると、浸透流を考慮した場合は、浸透流を考慮しない場合に対して基礎マウンドの変形量が大きいことがわかる。今回の解析においては、変形係数を水平力の増加に伴う基礎地盤内の拘束圧の変化に依らず一定としているので、この変形量の差は、浸透力によるせん断変形に起因するものと考えられる。この現象は全検討ケースにおいて同様に確認される。

図-4.27に、浸透流を考慮した場合と浸透流を考慮しない場合の極限支持力の比（以下、「極限支持力の比」という。）を、防波堤の港内外の水位差ごとで整理した結果を示す。極限支持力の比が全て1.0を下回っていることから、全てのケースで浸透流の影響により極限支持力の低下が起こっていたことがわかる。また、水位差が大きくなるほど極限支持力の比が小さくなる傾向にあるため、浸透流による極限支持力の低減量は、水位差によって異なると考えられる。ここで、Case2-4については浸透流を考慮しない場合、基礎マウンドが破壊に至らなかったため、検討対象から除外している。

FEM解析結果から得られた極限支持力の比に対して、全てのプロットを安全側に包括するラインを図-4.27に併せて示す。浸透流を考慮しないFEM解析で得られた極限支持力に対して、ラインで示される水位差に応じた余裕を見込むことで、浸透流を考慮したFEM解析で得られた極限支持力より全てのケースで安全側となる。このラインは、浸透流を考慮した場合のFEM解析で得られる極限支持力が、浸透力を考慮しない場合に対して、水位差10mで最大2割、水位差5mで最大1割低下することを示しており、既往の研究成果と整合している。ただし、基礎マウンドが薄い場合（Case1-3, Case2-3）やケーソン幅が大きい場合（Case1-4）、腹付工が極端に大きい場合（Case3-5）等は、ラインから遠い位置にプロットがあるなど、必ずしも全てのケースで水位差の増加に応じた極限支持力の低減の程度が同じであるとは限らないことに留意する必要がある。

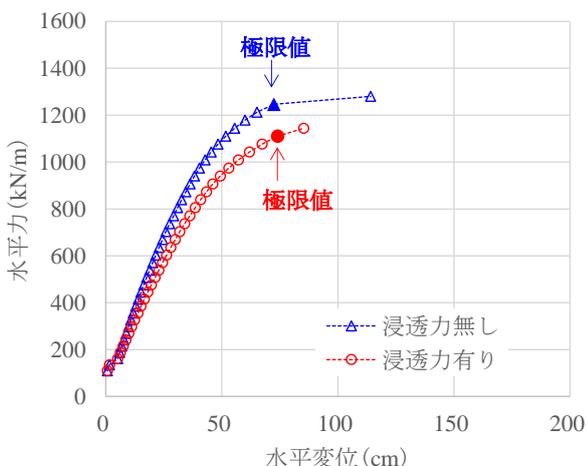


図-4.23 水平変位～水平力関係【Case1-1】

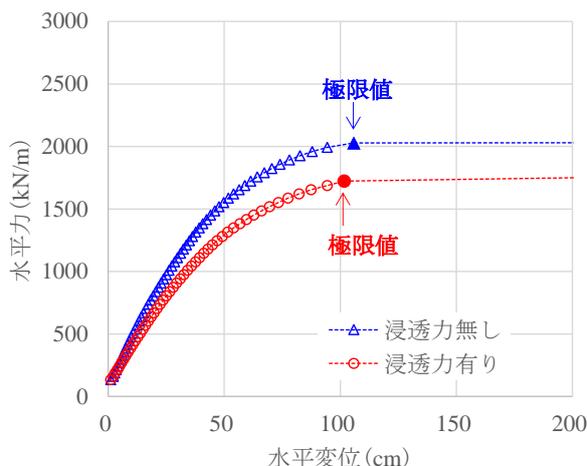


図-4.24 水平変位～水平力関係【Case2-1】

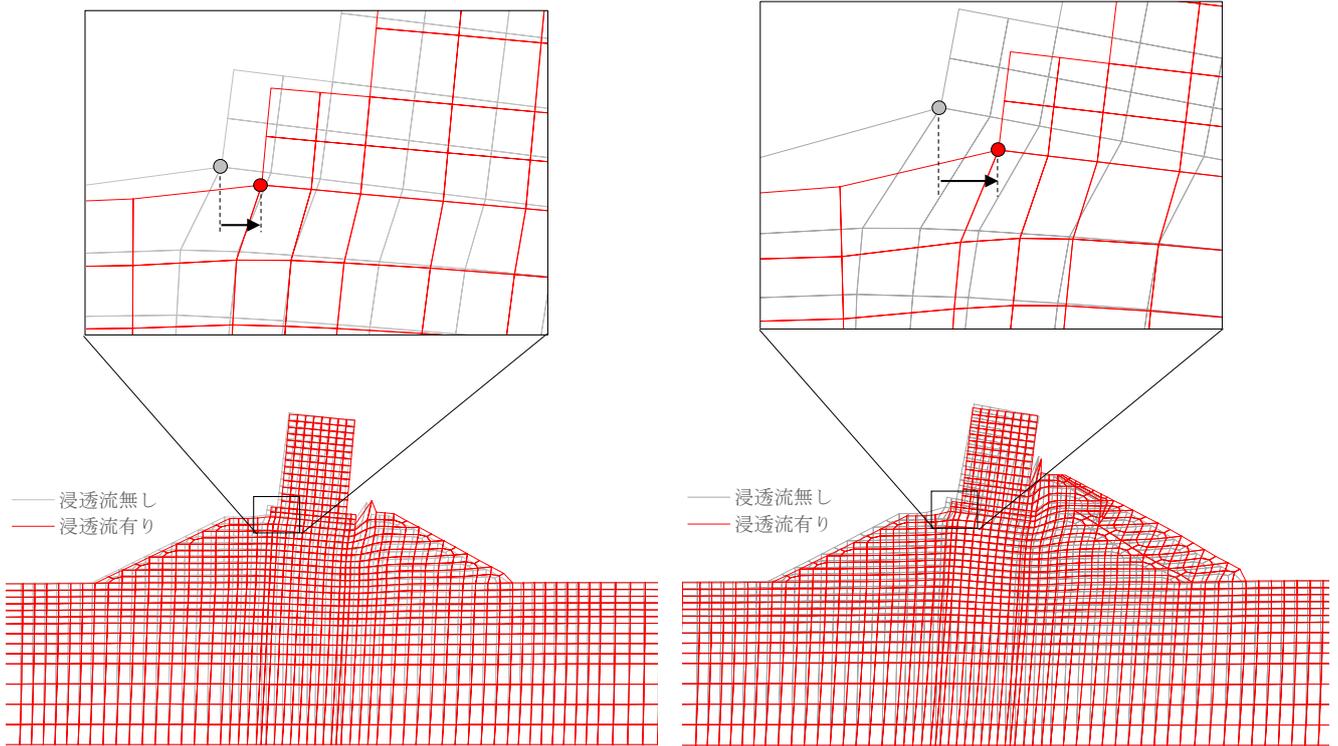


図-4.25 変形図（破壊時）【Case1-1】：変形倍率×5

図-4.26 変形図（破壊時）【Case2-1】：変形倍率×5

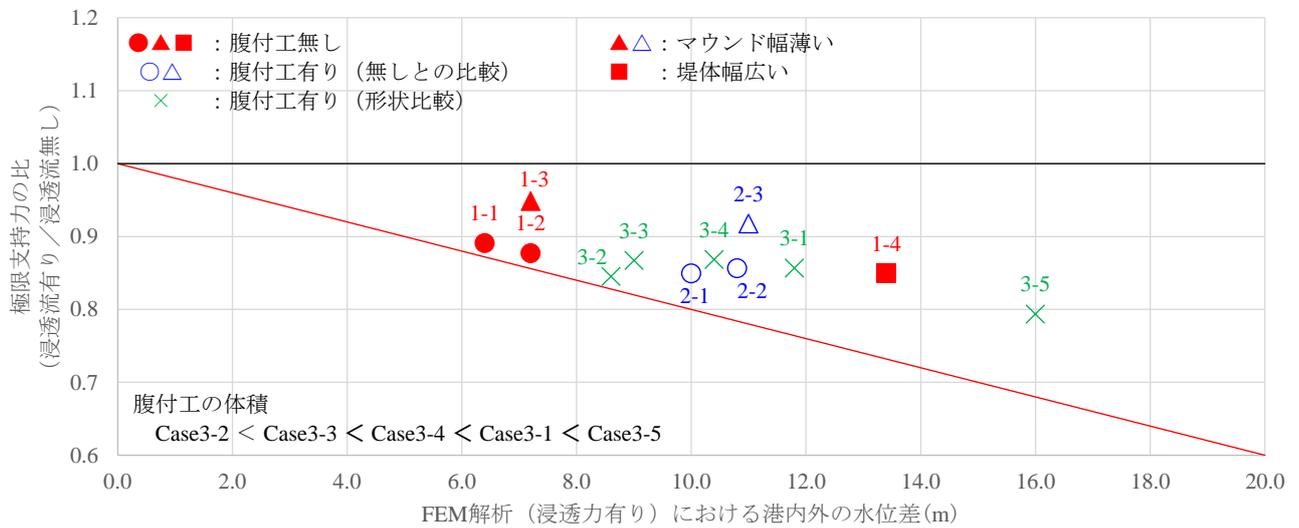


図-4.27 FEM（浸透流無し）とFEM（浸透流有り）の結果の比較

5. 津波浸透流を考慮した設計法の検討

5.1 本章の概要

本章では、第4章の結果を参考とし、現在用いられている支持力の設計法に、津波浸透流の影響を考慮する方法について検討する。5.2では、本研究で提案する津波浸透流を考慮した支持力設計法（以下、「提案法」という。）について説明する。5.3では、提案法で計算した結果とFEM解析の結果を比較することで、設計法としての妥当性を確認する。5.4に、提案法を用いる場合の留意点等について示す。

5.2 津波浸透流を考慮した支持力設計法

港湾の施設の設計において、基礎マウンドの支持力の性能照査には円弧すべり計算が用いられる。この方法において直接浸透流を考慮する設計法は未だ構築されていないため、何らかの形で津波浸透流の効果を考慮する必要がある。

図-5.1は、Case1-1において、破壊時の浸透力の向きと大きさを示したものである。矢印の向きに矢印の大きさに相当する浸透力が発生する。ケーソン後趾付近から港内側の基礎マウンドに着目すると、上向きの浸透力が発生していることがわかる。上向きの浸透力は、基礎捨石部分に上向きの物体力として作用するため、見かけ上は基礎マウンドの有効単位体積重量が減少することになる。これにより、基礎マウンド内部の有効拘束圧が低下し、基礎マウンド部分のせん断強度が小さくなることで、基礎マウンドの極限支持力（抵抗）が低下すると考えられる。また、ケーソン下部付近には港内側へ向かう水平方向の浸透力も発生している。水平方向の浸透力は、地盤や基礎捨石等に対する水平方向の物体力として作用するため、支持力破壊を起こす側の荷重（作用）が増加すると考えられる。

円弧すべり計算に浸透流の影響を考慮するにあたって、津波浸透流は支持力破壊に対して、上述したとおり作用側にも抵抗側にも影響し、その影響の割合は作用側と抵抗側に分解できないことや、断面や外力等の条件によって一定ではないと考えられることから、津波浸透流の影響は、作用と抵抗の両者にまとめて考慮できる方法とすることを考える。基礎マウンドの支持力設計法として、高橋ら⁶⁾と佐藤ら¹³⁾は腹付工がある場合にも対応した円弧すべり計算の方法を示している。性能照査式を式(5.1)から式(5.3)に、荷重の概念図を図-5.2に示す。支持力性能照査は式(5.1)に示されるとおり、抵抗値 R が荷重値 S 以上であることを確認する。そこで性能照査

式を式(5.4)のように変形する。このとき、耐力作用比 R/S が1.0以上であることを確認する式となるが、提案法では、この耐力作用比 R/S の許容値1.0を水位差に応じて割り増すことで、津波浸透流の影響を支持力設計法に考慮することとする。ここでは第4章の結論に基づき、耐力作用比 R/S の許容値を港内外の水位差が5mの場合に1.1、10mの場合に1.2とし、それ以外の水位差については線形補間した値とする。

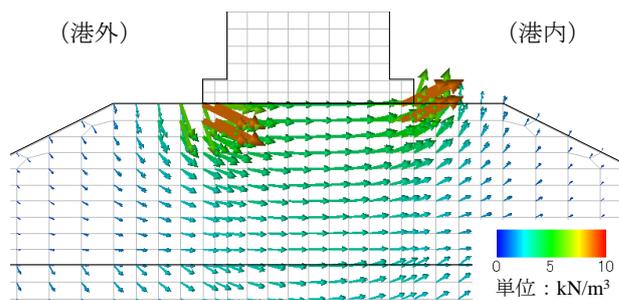


図-5.1 浸透力の向きと大きさ【Case1-1】

$$R \geq S \tag{5.1}$$

$$R = \sum \left\{ \frac{cs + (w' + q)\tan\phi}{\cos\theta(1 + \tan\theta \tan\phi / (R/S))} \right\} \tag{5.2}$$

$$S = \sum \left\{ (w' + q)\sin\theta \right\} + \frac{a_{C1}P_{H1} + a_{C2}P_{H2}}{R_R} \tag{5.3}$$

$$R/S \geq 1.0 \tag{5.4}$$

ここに、

S : 支持力照査における荷重の合計値 (kN/m)

R : 支持力照査における抵抗の合計値 (kN/m)

c : 粘性土地盤においては非排水せん断強さ、砂質土地盤の場合においては0、基礎マウンド又は腹付工（石材）の場合においては排水条件における見かけの粘着力 (kN/m²)

ϕ : 粘性土地盤の場合においては0、砂質土地盤・基礎マウンド・腹付工（石材）の場合においては排水条件におけるせん断抵抗角 (°)

s : 分割細片の幅 (m)

w' : 分割細片の有効重量 (kN/m)

(水面上で気中重量、水面下で水中重量)

q : 分割細片に作用する鉛直荷重 (kN/m)
(q_v, P_v を含む)

θ : 分割細片底面が水平面となす角度 (°)

P_{H1} : 基礎マウンドに作用する水平荷重 (kN/m)

P_{H2} : 腹付工に作用する水平荷重 (kN/m)

(作用高さは補強体の高さ a の1/3の高さ)

a_{C1} : P_{H1} の作用位置の円弧すべりのすべり円中心から腕の長さ (m)

a_{c2} : P_{H2} の作用位置の円弧すべりのすべり円中心から腕の長さ (m)
 R_R : 円弧すべりのすべり円の半径 (m)

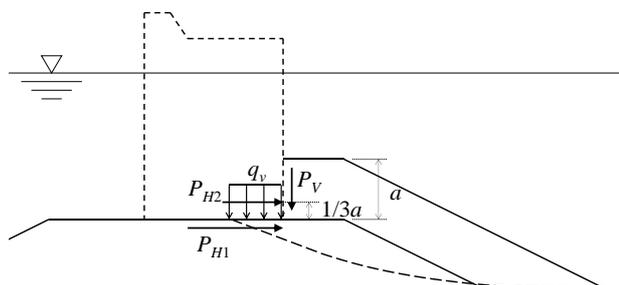


図-5.2 支持力性能照査に用いる荷重¹³⁾

5.3 有限要素解析と円弧すべり計算の比較

(1)津波浸透流を考慮しない場合

基礎マウンドの支持力性能照査には、円弧すべり計算が用いられるが、この計算方法は津波浸透流の影響を考慮していない。初めに、FEM解析と円弧すべり計算に対して、計算手法の違いによる計算結果の違いを確認するために、浸透流を考慮しないFEM解析と円弧すべり計算の結果を比較する。

Case1-1の計算結果として、図-5.3(a)に浸透流を考慮しない円弧すべり計算で求められるすべり面を示す。また、図-5.3(b)に津波浸透流を考慮しないFEM解析の変形図を、図-5.3(c)にせん断応力の分布図を示す。円弧すべりはケーソンの下面から発生し、基礎マウンドの港内側法面に向かう形状をしている。FEM解析の変形図は、ケーソン下面の基礎マウンド内にせん断ひずみが集中している様子がわかる。せん断応力についても、円弧すべりが発生する付近に大きな値が出ていることがわかる。Case2-1の結果について、図-5.4に示すが、Case1-1と同様な結果となっている。したがって、浸透流を考慮しないFEM解析と円弧すべり計算では、概ね同じ位置の円弧すべり面を検討しているため、計算結果を比較した違いは、同じ条件に対する計算手法の違いと見ることができ。その他のケースについて、FEM解析の結果を付録Aに、円弧すべり計算の結果を付録Bに整理する。

図-5.5に、浸透流を考慮しない場合の、円弧すべり計算とFEM解析の極限支持力の比を、港内外の水位差ごとで整理した結果を示す。極限支持力の比が全て1.0を上回っていることから、FEM解析は、円弧すべり計算より極限支持力を大きく計算することがわかる。特に、基礎マウンドが薄い場合(Case1-3, Case2-3)や腹付工が極端に大きい場合(Case3-5)は、FEM解析の結果は円弧すべり計算の結果と乖離が大きくなるが、このメカニズムの究明や対策については今後の課題である。

(2)津波浸透流を考慮した場合

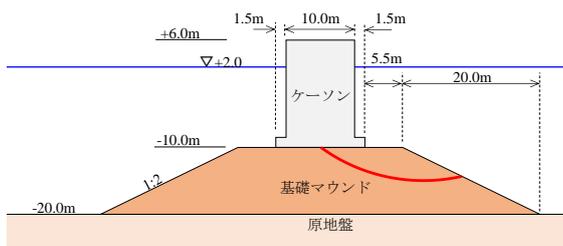
基礎マウンドの支持力性能照査に津波浸透流の影響を考慮する方法として、耐力作用比 R/S の許容値を水位差に応じて割り増す方法を、5.2で提案法として示した。浸透流を考慮したFEM解析と提案法の結果を比較することで、提案法の妥当性について確認する。

Case1-1の計算結果として、図-5.6(a)に浸透流を考慮した提案法で求められるすべり面を示す。また、図-5.6(b)に津波浸透流を考慮したFEM解析の変形図を、図-5.6(c)にせん断応力の分布図を示す。円弧すべりはケーソンの下面から発生し、基礎マウンドの港内側法面に向かう形状をしている。FEM解析の変形図は、ケーソン下面の基礎マウンド内にせん断ひずみが集中している様子がわかる。せん断応力についても、円弧すべりが発生する付近に大きな値が出ていることがわかる。Case2-1の結果について、図-5.7に示すが、Case1-1と同様な結果となっている。したがって、浸透流を考慮したFEM解析と提案法では、概ね同じ位置の円弧すべり面を検討していることを確認できる。その他のケースについて、FEM解析の結果を付録Aに、円弧すべり計算の結果を付録Bに整理する。

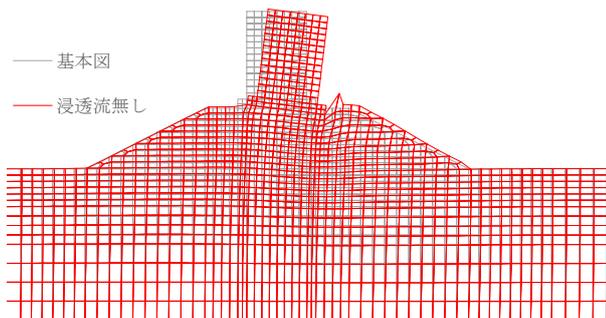
図-5.8に、浸透流を考慮した場合の、提案法とFEM解析の極限支持力の比を、港内外の水位差ごとで整理した結果を示す。極限支持力の比が全て1.0を上回っていることから、浸透流を考慮したFEM解析は、浸透流の影響を考慮した提案法より極限支持力を大きく計算することがわかる。

浸透流を考慮しない円弧すべり計算結果とFEM解析結果の比較から、計算手法による計算結果の違いを確認したところ、FEM解析の方が極限支持力を平均で2割程度大きく計算することがわかった。浸透流を考慮したFEM解析と提案法の結果においても、FEM解析の方が極限支持力を平均で2割程度大きく計算することが確認された。したがって、(1)で述べた浸透流を考慮しない場合の、計算手法の違いによる計算結果の比率と同等であり、提案法でも浸透流の影響をうまく評価できている。

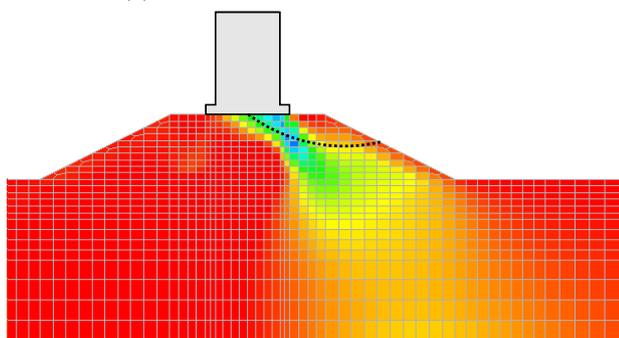
なお、基礎マウンドが薄い場合(Case1-3, Case2-3)やケーソン幅が広い場合(Case1-4)、腹付工が極端に大きい場合(Case3-5)は、FEM解析の結果は円弧すべり計算の結果と乖離が大きくなるが、このメカニズムの究明や対策については、浸透流を考慮しない場合同様、今後の課題である。



(a) 円弧すべり発生位置



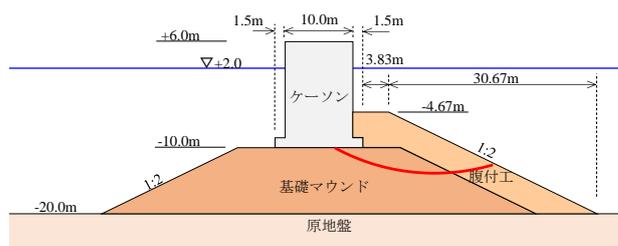
(b) 破壊時変形図 (変形倍率×5)



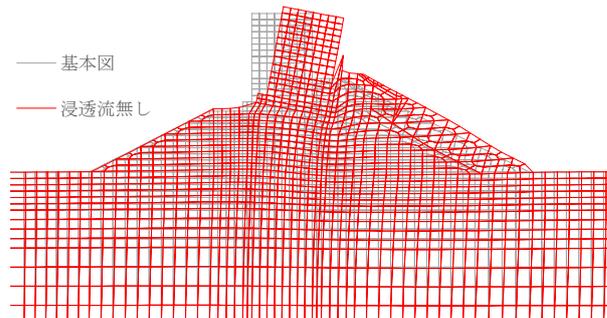
-200 -160 -120 -80 -40 0 kN/m²

(c) 破壊時せん断応力図

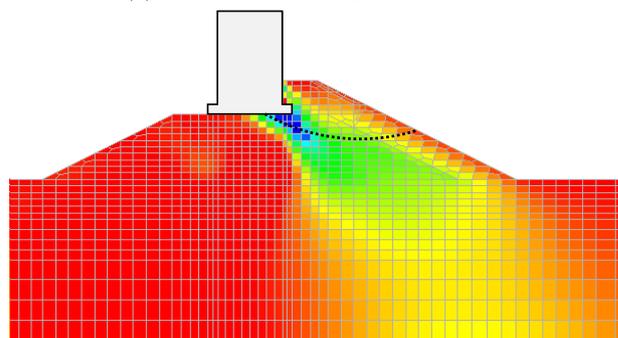
図-5.3 浸透流を考慮しない FEM 解析結果【Case1-1】



(a) 円弧すべり発生位置



(b) 破壊時変形図 (変形倍率×5)



-200 -160 -120 -80 -40 0 kN/m²

(c) 破壊時せん断応力図

図-5.4 浸透流を考慮しない FEM 解析結果【Case2-1】

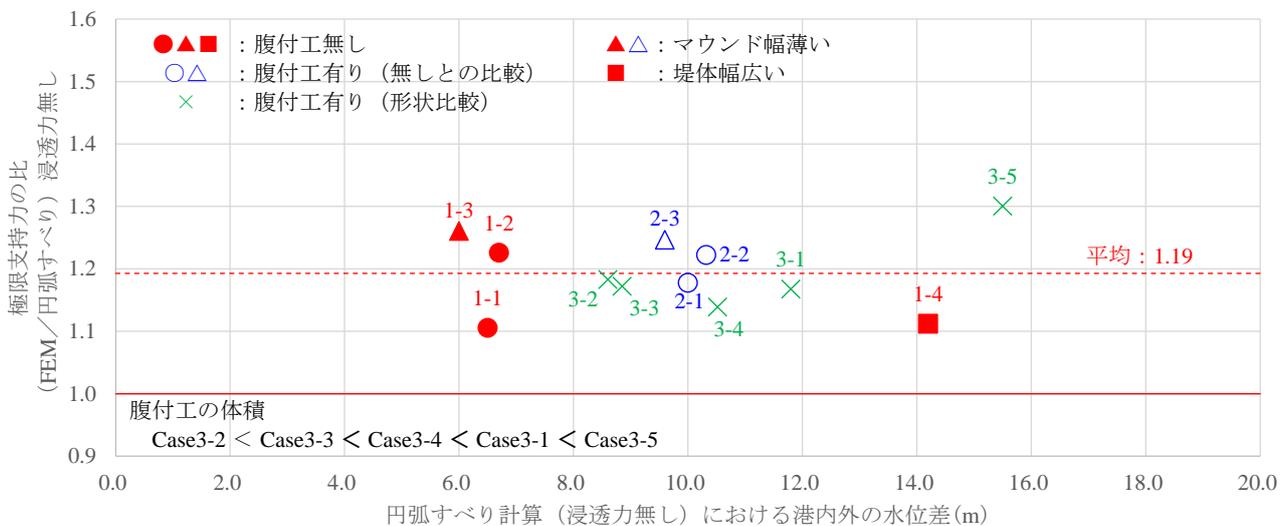
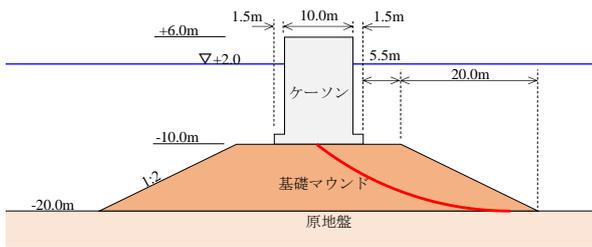
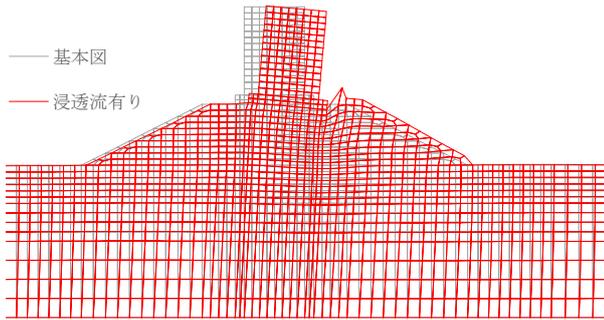


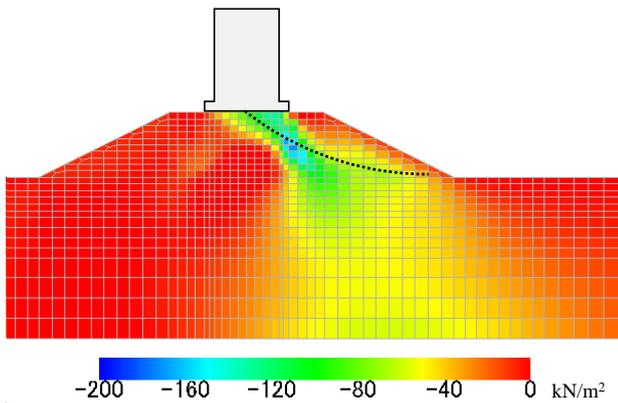
図-5.5 円弧すべり計算と FEM 解析 (浸透流無し) の極限支持力の比



(a) 円弧すべり発生位置【Case1-1】

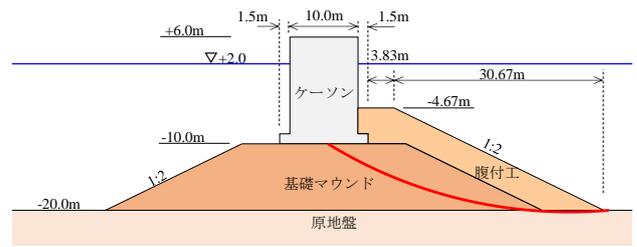


(b) 破壊時変形図【Case1-1】

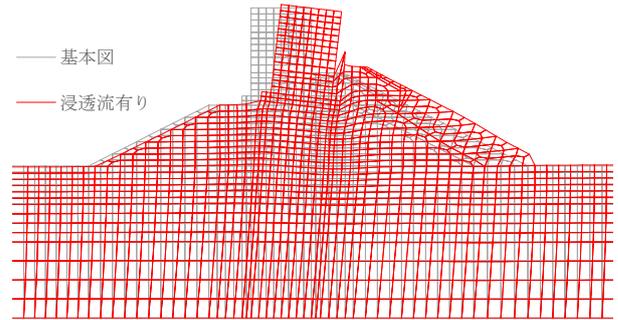


(c) 破壊時せん断応力図【Case1-1】

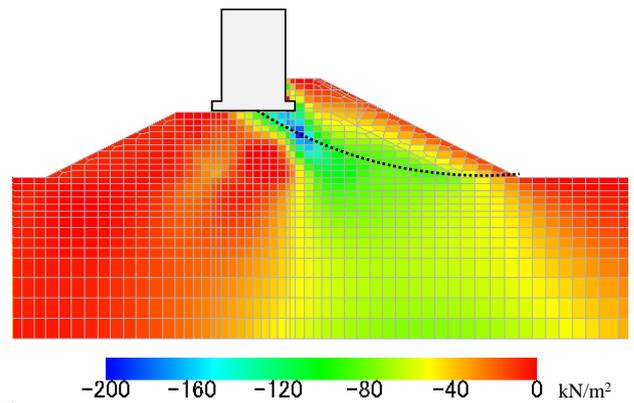
図-5.6 浸透流を考慮した FEM 解析結果【Case1-1】



(a) 円弧すべり発生位置【Case2-1】



(b) 破壊時変形図【Case2-1】



(c) 破壊時せん断応力図【Case2-1】

図-5.7 浸透流を考慮した FEM 解析結果【Case2-1】

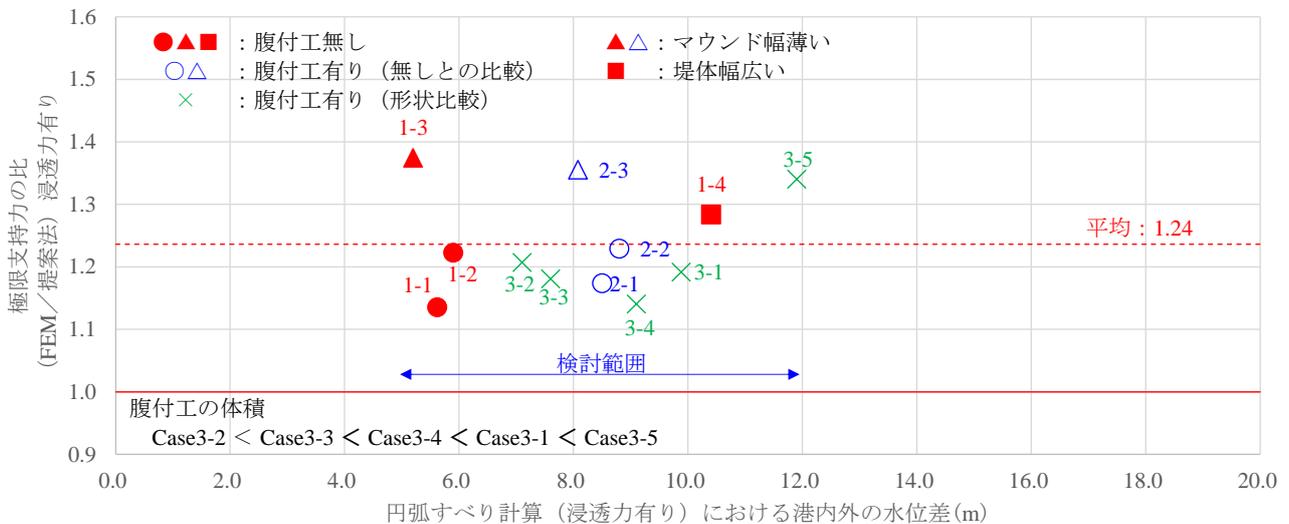


図-5.8 提案法と FEM 解析 (浸透流有り) の極限支持力の比

5.4 提案法の適用範囲に関する注意点

本提案法の適用範囲に関する注意点を以下に示す。

①本提案法は、津波が越流する場合を対象としており、作用として「防波堤の耐津波設計ガイドライン²⁾」における「静水圧差による算定式（静水圧補正係数も所与）」を用いた場合を想定している。このため、津波が越流しない場合や、「静水圧差による算定式」以外を用いる場合には、その適用性について確認が必要である。

②本提案法は、本文中に示す防波堤の断面諸元と図-5.8に示す水位差の範囲のFEM解析に基づき構築されたものである。また、港内側基礎マウンドの被覆材等を考慮しておらず、被覆材は透水性が極めて大きいことを前提としている。このため、対象とする防波堤の断面諸元や水位差等が、上述した条件と大きく異なる場合には、その適用性について確認が必要である。

6. 結論

本研究では、複数の防波堤断面に対して有限要素法を用いた数値計算を実施し、津波浸透流が基礎マウンドの極限支持力低下に与える影響を定量的に検討した。また、津波浸透流の影響を、H19技術基準で支持力性能照査に用いられている簡易ビショップ法を用いた円弧すべり計算へ考慮する方法を検討し、津波浸透流の影響を考慮した設計法を提案した。本研究の結論は以下のとおりである。

有限要素法を用いた検討の結果、本研究で対象とした防波堤の断面諸元の範囲では、浸透流の影響により基礎マウンドの極限支持力は低下し、その低下程度は防波堤の港内外の水位差と関係があり、港内外の水位差が5mで最大1割程度、10mで最大2割程度の低下であることを示した。この結果は、既往の遠心模型実験の結果と同様であった。

提案法は、簡易ビショップ法による円弧すべり計算に対して、耐力作用比 R/S の許容値を港内外の水位差に応じて割り増すことで、円弧すべり計算に対して津波によって発生する浸透流による基礎マウンドの極限支持力低下を間接的に考慮するものである。提案法の妥当性については、浸透流を考慮しないFEM解析と円弧すべり計算結果との比較により評価された計算手法の違いに起因する極限支持力の余裕代（図-5.5の平均19%）が、浸透流を考慮したFEM解析と提案法による計算結果との比較においても確保（図-5.8の平均24%）されている

ことにより確認された。

7. おわりに

本研究で示した、支持力の耐力作用比 R/S の許容値を割り増す方法は、防波堤の断面形状に依らず、FEM解析結果や既往の実験結果より少なくとも安全側となるように設定している。そのため、断面形状によっては、FEM解析結果や既往の実験結果と同等の結果の場合もあれば、かなり安全側の場合もある。したがって、今後、浸透流の影響を耐力作用比の許容値に精緻に加味すれば、断面形状によっては更に合理的な断面形状にできる可能性もある。そのためには、計算上において津波浸透流の影響が大きいパラメータの把握や津波条件や断面条件による違いの把握、および津波浸透流による支持力メカニズムの解明等が期待される。また、腹付工を含む基礎マウンドの更に合理的な形状を選択する手法として、FEM解析手法の一般化も今後の成果として期待される。

(2017年8月31日受付)

謝辞

本稿をとりまとめるにあたり、港湾研究部の交流研究員である高野向後氏、勝俣優氏、田端優憲氏には、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)国土交通省港湾局：防波堤の耐津波設計ガイドライン，2013。
- 3)今瀬達也，前田健一，三宅達夫，鶴ヶ崎和博，澤田豊，角田紘子：捨石マウンドー海底地盤への津波浸透による混成堤の不安定化，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.67，No.2，2011，pp.I_551-I_555。
- 4)笠間清伸，善功企，春日井康夫：浸透流に着目したケーソン式混成防波堤の安定性に関する水理模型実験，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.69，No.2，2013，pp.I_966-I_970。
- 5)高橋英紀，佐々真志，森川嘉之，高野大樹：津波による浸透作用下の防波堤基礎地盤の安定性に関する研究，港湾空港技術研究所報告，Vol.52，No.2，2013。
- 6)高橋英紀，佐々真志，森川嘉之，渡部要一，高野大

- 樹：津波に対するケーソン式防波堤マウンドと腹付工の安定性，港湾空港技術研究所報告，Vol.54，No.2，2015.
- 7)沿岸開発技術研究センター：GeoFem（地盤解析汎用プログラム）マニュアル，1997.
- 8)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.1，1984，pp.83-102.
- 9)沿岸技術研究センター：地盤解析汎用プログラム(GeoFem)改良版，
<http://www.cdit.or.jp/program/geo.html>，2017.
- 10)小林正樹，寺師昌明，高橋邦夫，中島謙二郎，小谷拓：捨石マウンドの支持力の新しい計算法，港湾技術研究所報告，Vol.26，No.2，1987，pp.371-411.
- 11)Takahashi, H., Sassa, S., Morikawa, Y., and Takano, D.: Bearing capacity of breakwater mound under tsunami-induced seepage flow, Geotechnical Hazards from Large Earthquakes and Heavy Rainfalls, Springer, 2017, pp.27-36.
- 12)公益社団法人地盤工学会：入門シリーズ32 斜面の安定・変形解析入門—基礎から実例まで—，2006，pp.43-50.
- 13)佐藤健彦，宮田正史，高橋英紀，竹信正寛，下迫健一郎，鈴木高二朗：腹付工を有する防波堤の耐波設計法の提案，国土技術政策総合研究所資料，No.954，2017.

付録 A 有限要素法を用いた数値計算結果

浸透力を作用させた場合と作用させない場合について、FEM解析の結果を示す。図-A.1から図-A.13に水平力と水平変位の関係図を示す。津波に対して防波堤が極限支持力を発揮する時（以下、「破壊時」という。）における変形図を、図-A.14から図-A.26に示す。また、この時のせん断応力 τ_{xy} の分布図について、浸透力を考慮しない場合を図-A.27から図-A.39に、浸透力を考慮する場合を図-A.40から図-A.52に示し、浸透力 i_{xy} の分布図を図-A.53から図-A.65に示す。浸透力については、同じ水位差における比較のために、水位差が6.4mの場合の浸透力 i_{xy} の分布図を図-A.66から図-A.78に示す。

1. 水平力～水平変位の関係

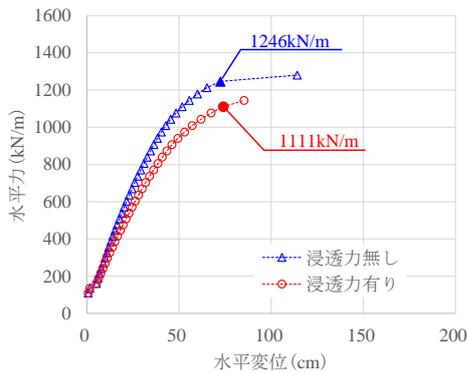


図-A.1 水平力～水平変位関係【Case1-1】

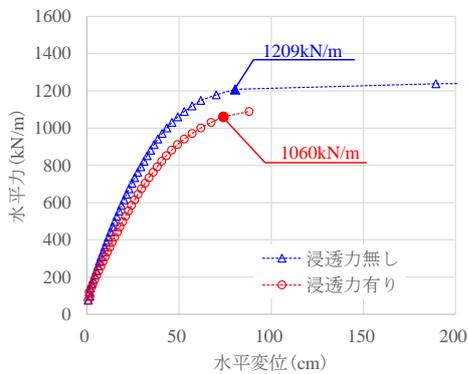


図-A.2 水平力～水平変位関係【Case1-2】

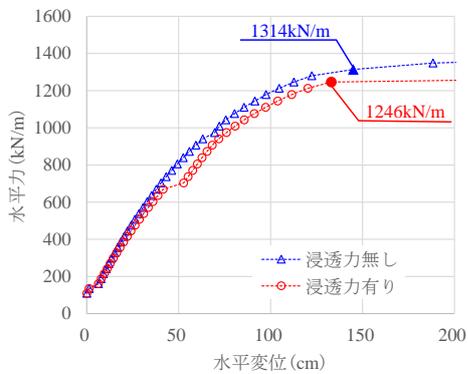


図-A.3 水平力～水平変位関係【Case1-3】

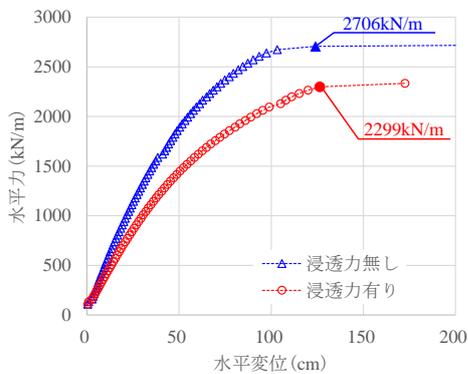


図-A.4 水平力～水平変位関係【Case1-4】

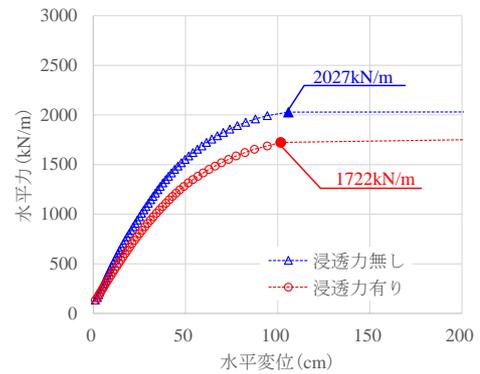


図-A.5 水平力～水平変位関係【Case2-1】

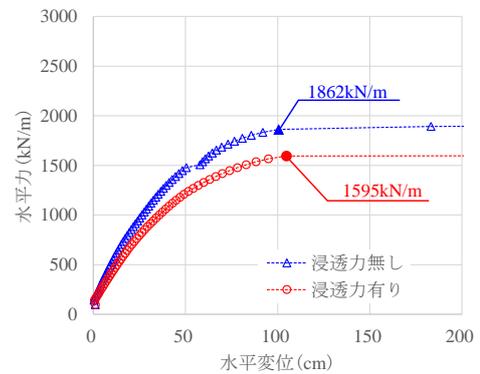


図-A.6 水平力～水平変位関係【Case2-2】

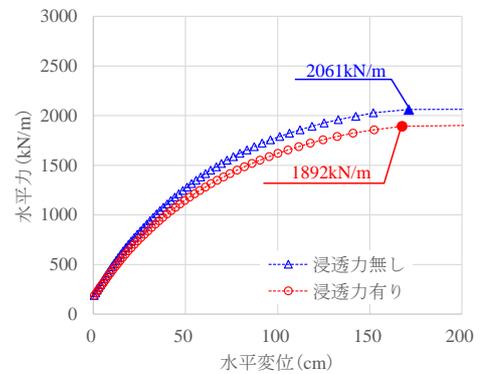


図-A.7 水平力～水平変位関係【Case2-3】

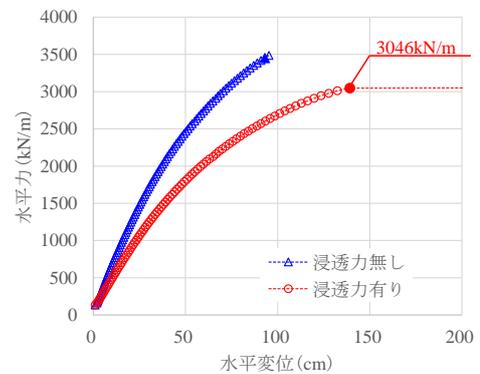


図-A.8 水平力～水平変位関係【Case2-4】

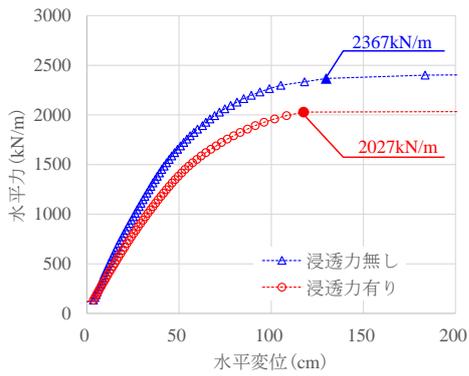


図-A. 9 水平力～水平変位関係【Case3-1】

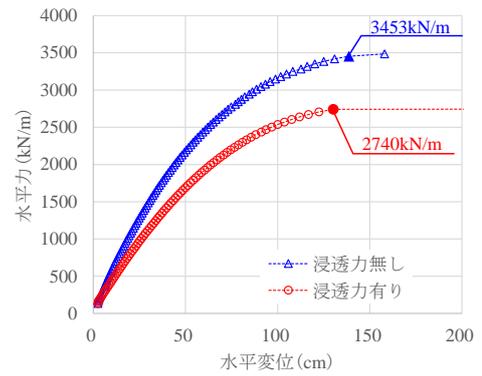


図-A. 13 水平力～水平変位関係【Case3-5】

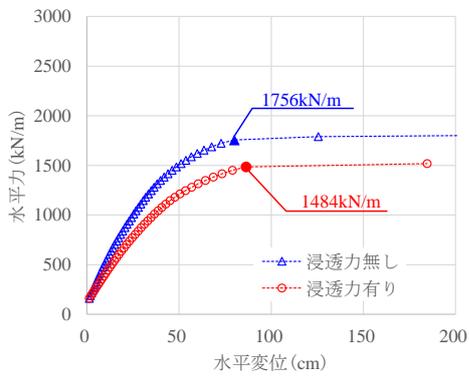


図-A. 10 水平力～水平変位関係【Case3-2】

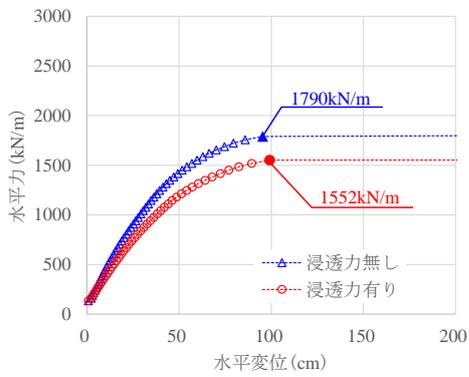


図-A. 11 水平力～水平変位関係【Case3-3】

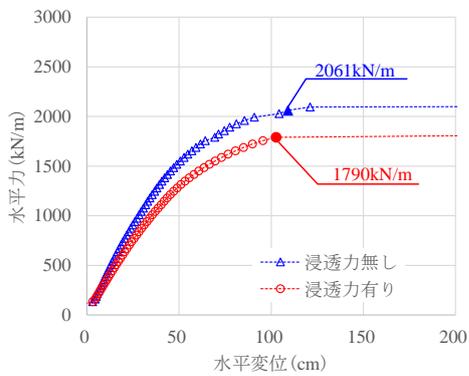


図-A. 12 水平力～水平変位関係【Case3-4】

2. 変形図 (破壊時)

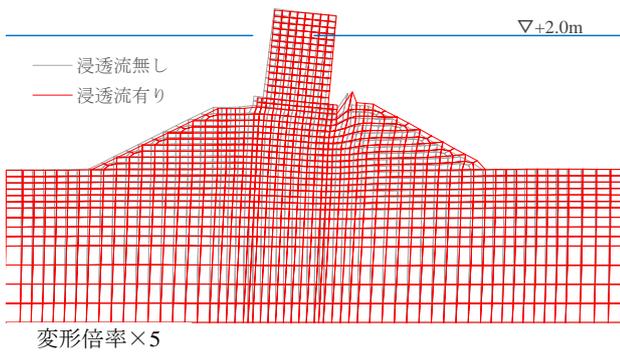


図-A.14 変形図【Case1-1】

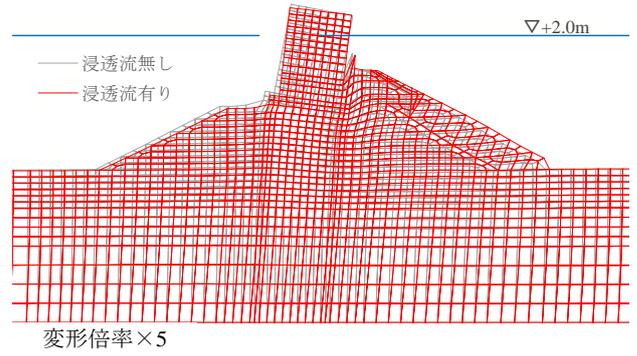


図-A.18 変形図【Case2-1】

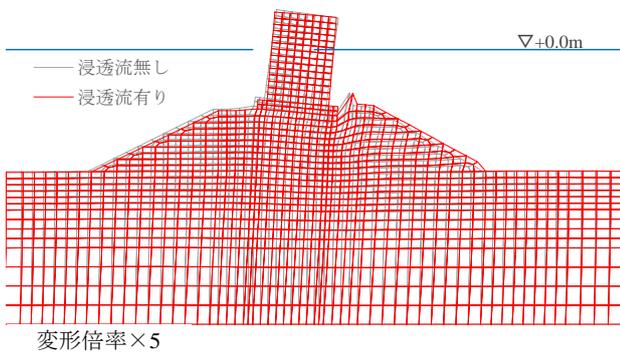


図-A.15 変形図【Case1-2】

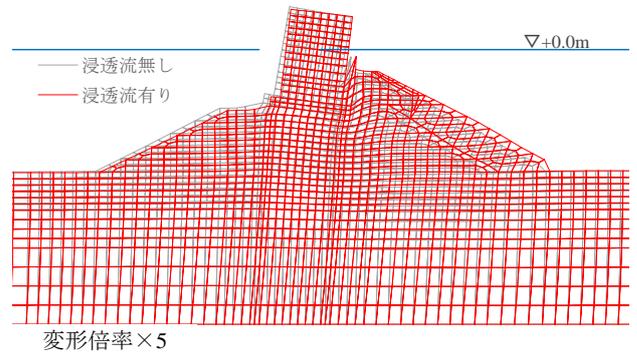


図-A.19 変形図【Case2-2】

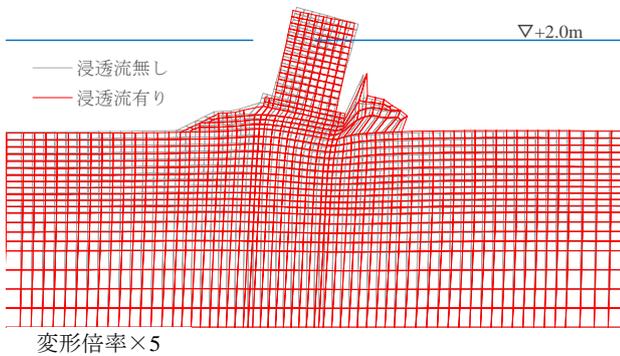


図-A.16 変形図【Case1-3】

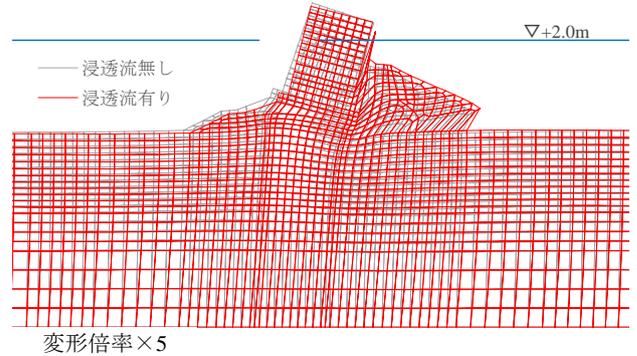


図-A.20 変形図【Case2-3】

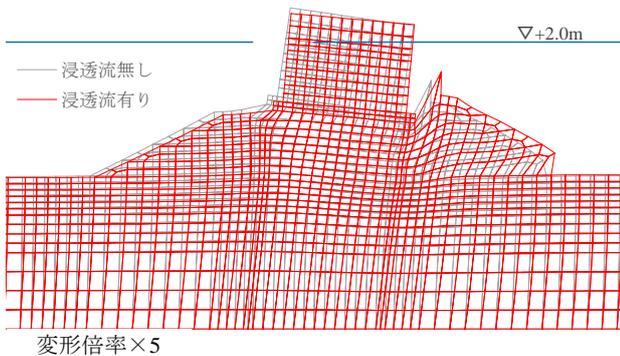


図-A.17 変形図【Case1-4】

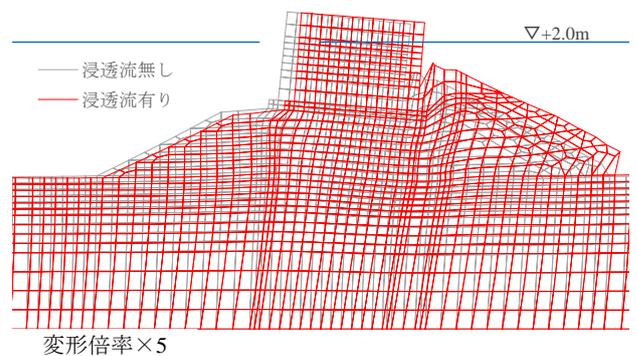


図-A.21 変形図【Case2-4】

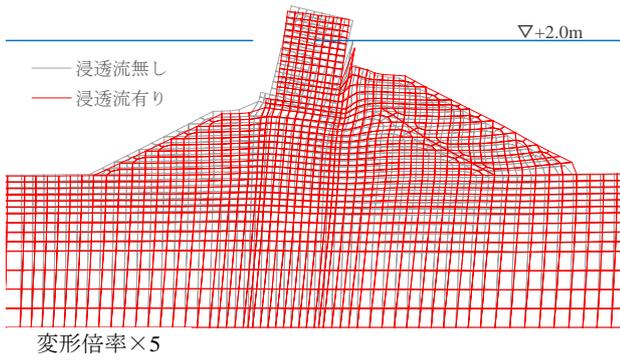


図-A.22 変形図【Case3-1】

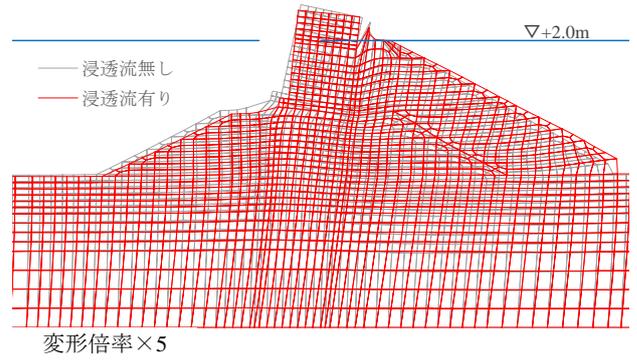


図-A.26 変形図【Case3-5】

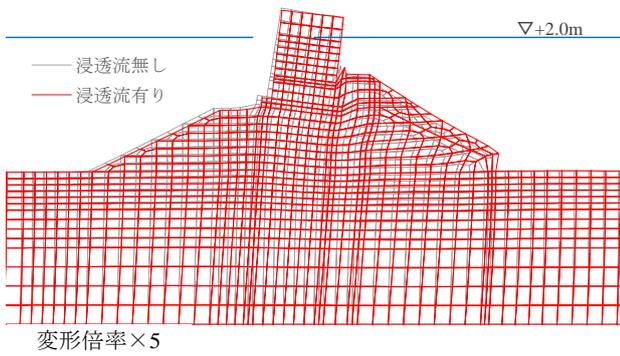


図-A.23 変形図【Case3-2】

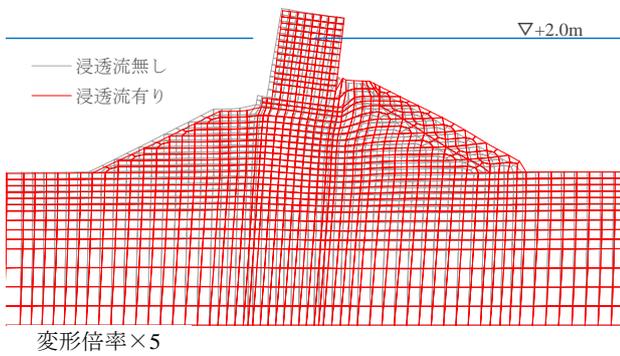


図-A.24 変形図【Case3-3】

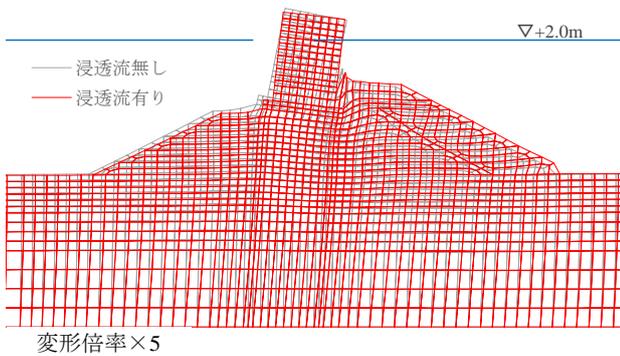


図-A.25 変形図【Case3-4】

3. せん断応力分布図（破壊時）【浸透流無し】

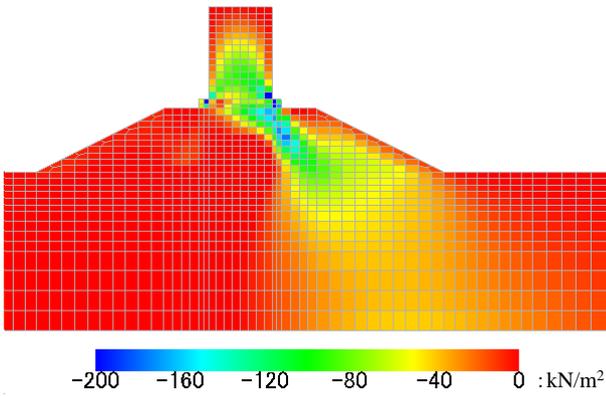


図-A.27 せん断応力分布図【Case1-1】（浸透流無し）

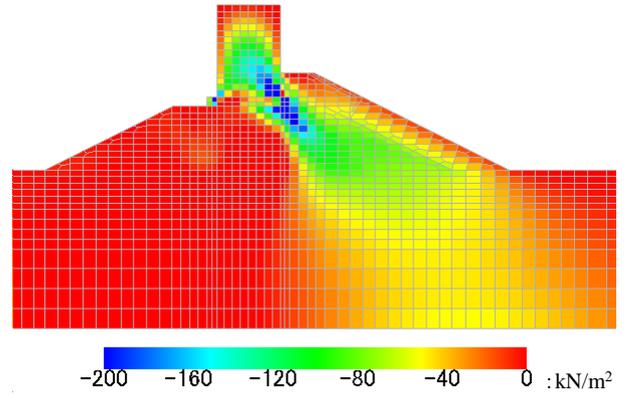


図-A.31 せん断応力分布図【Case2-1】（浸透流無し）

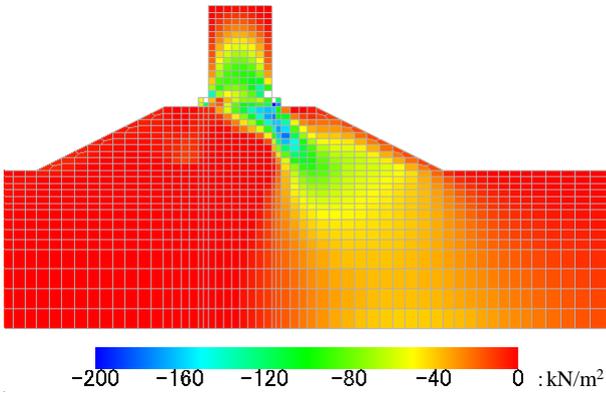


図-A.28 せん断応力分布図【Case1-2】（浸透流無し）

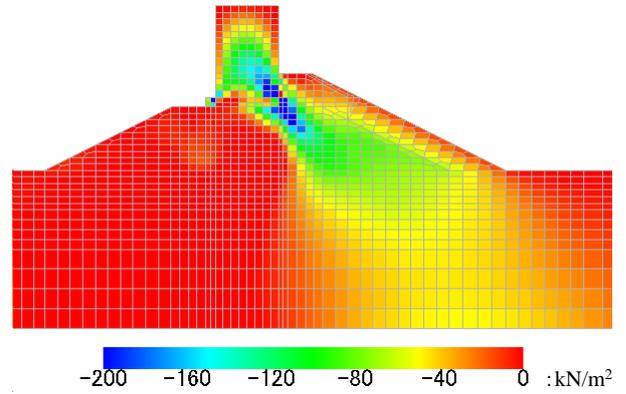


図-A.32 せん断応力分布図【Case2-2】（浸透流無し）

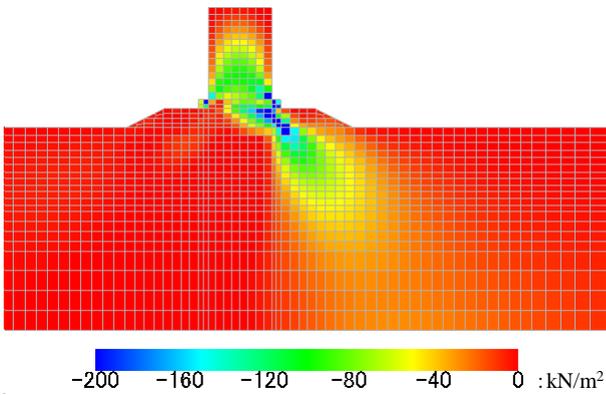


図-A.29 せん断応力分布図【Case1-3】（浸透流無し）

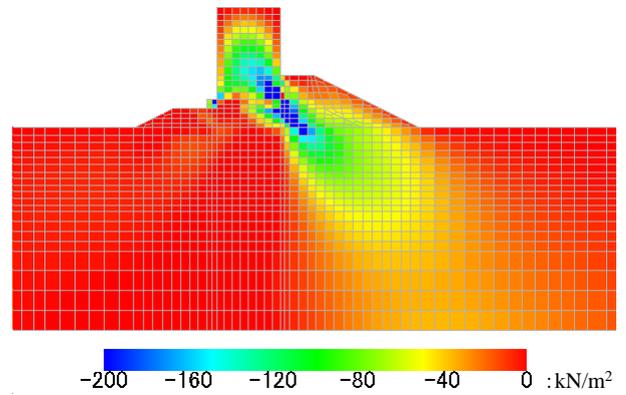


図-A.33 せん断応力分布図【Case2-3】（浸透流無し）

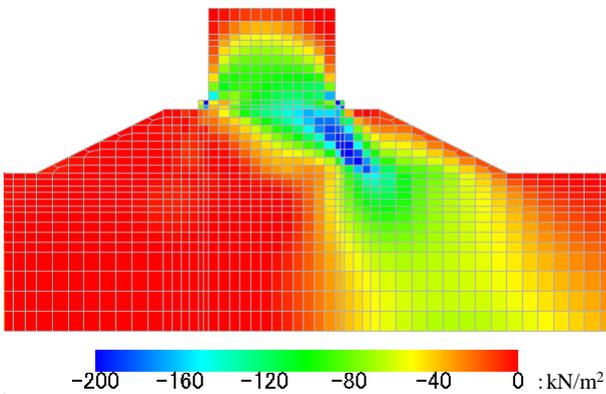


図-A.30 せん断応力分布図【Case1-4】（浸透流無し）

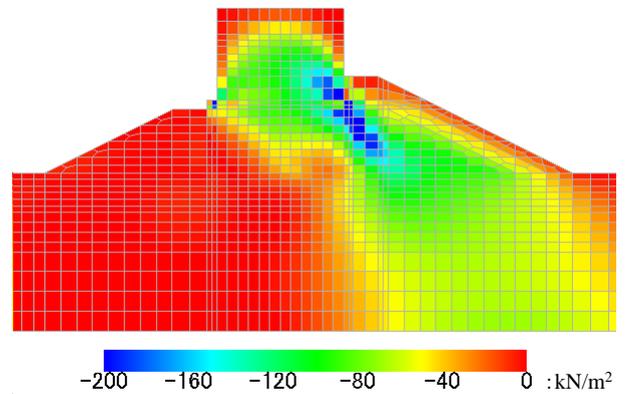


図-A.34 せん断応力分布図【Case2-4】（浸透流無し）

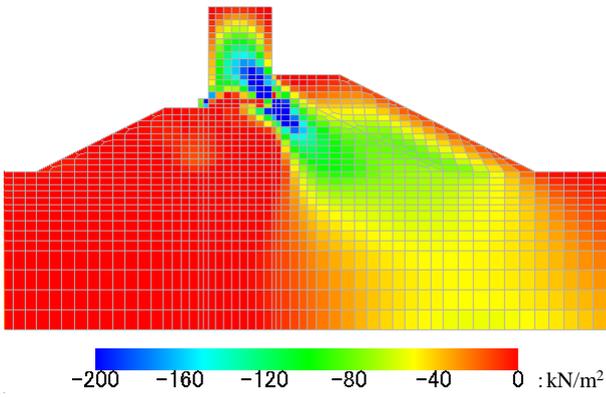


図-A. 35 セン断応力分布図【Case3-1】(浸透流無し)

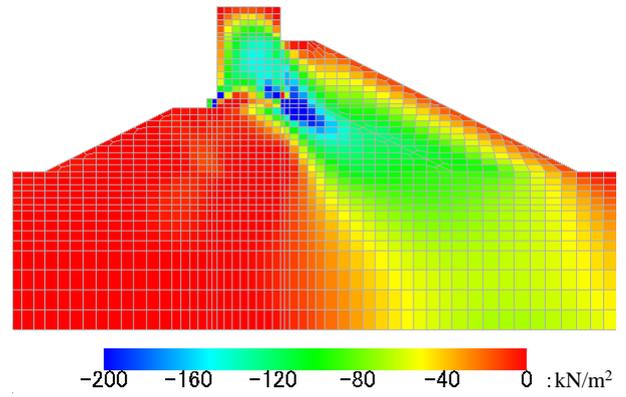


図-A. 39 セン断応力分布図【Case3-5】(浸透流無し)

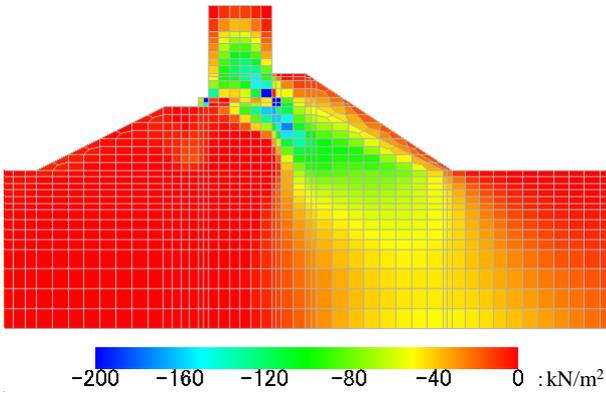


図-A. 36 セン断応力分布図【Case3-2】(浸透流無し)

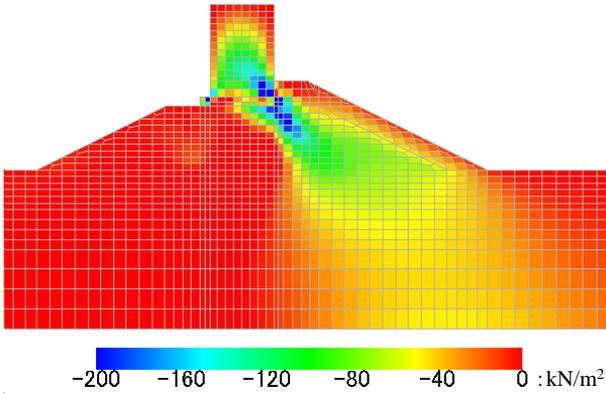


図-A. 37 セン断応力分布図【Case3-3】(浸透流無し)

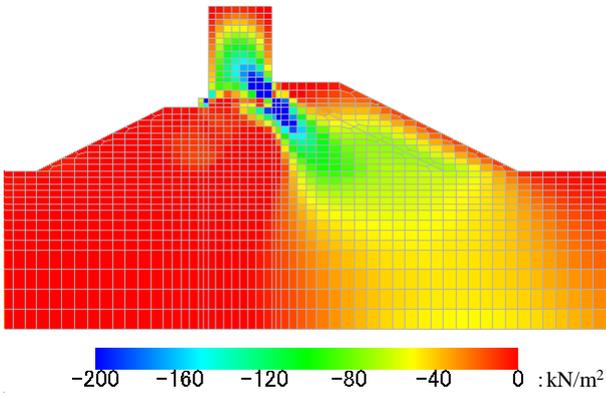


図-A. 38 セン断応力分布図【Case3-4】(浸透流無し)

4. せん断応力分布図（破壊時）【浸透流有り】

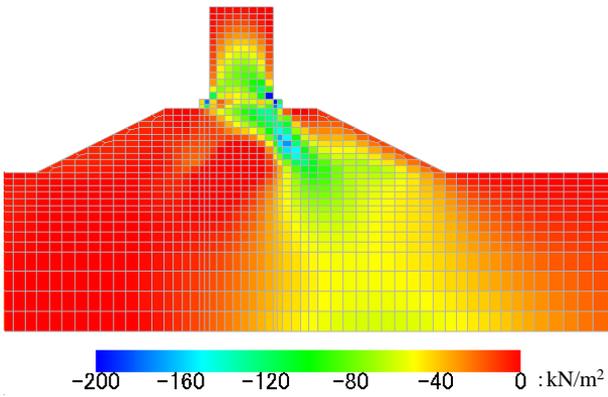


図-A.40 せん断応力分布図【Case1-1】（浸透流有り）

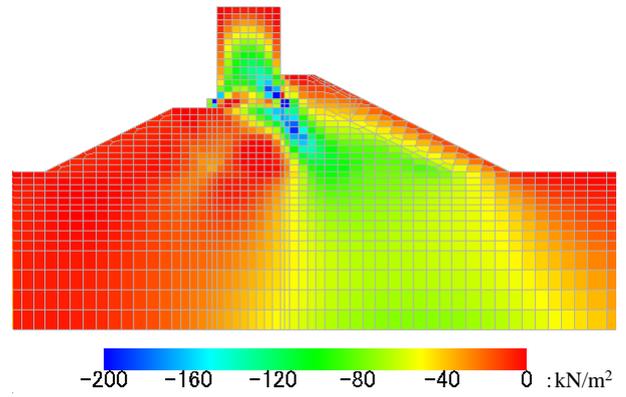


図-A.44 せん断応力分布図【Case2-1】（浸透流有り）

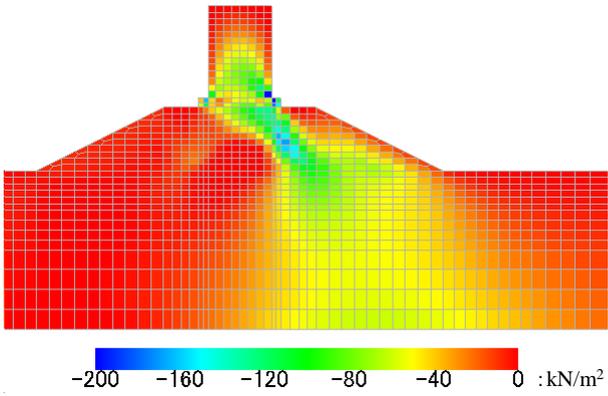


図-A.41 せん断応力分布図【Case1-2】（浸透流有り）

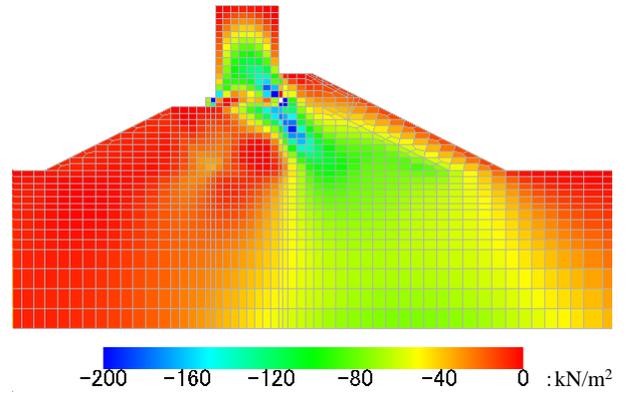


図-A.45 せん断応力分布図【Case2-2】（浸透流有り）

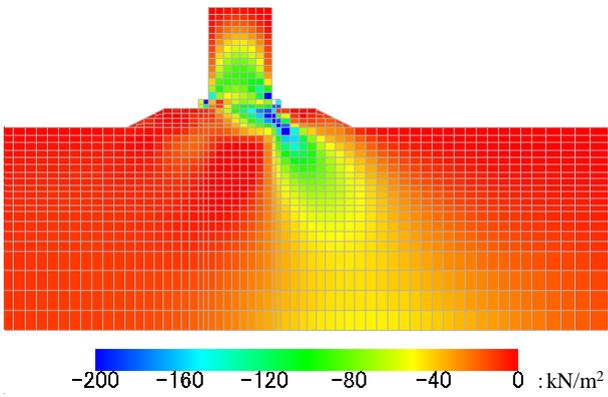


図-A.42 せん断応力分布図【Case1-3】（浸透流有り）

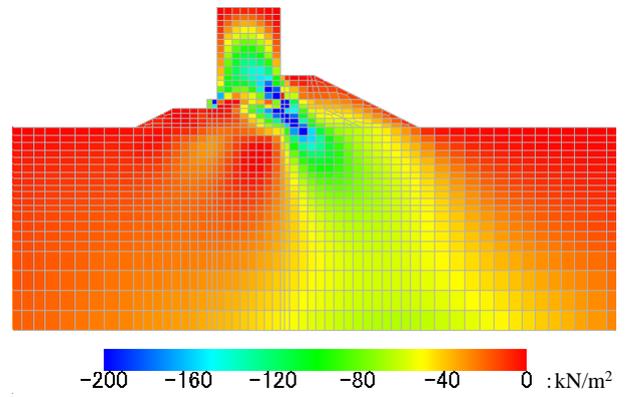


図-A.46 せん断応力分布図【Case2-3】（浸透流有り）

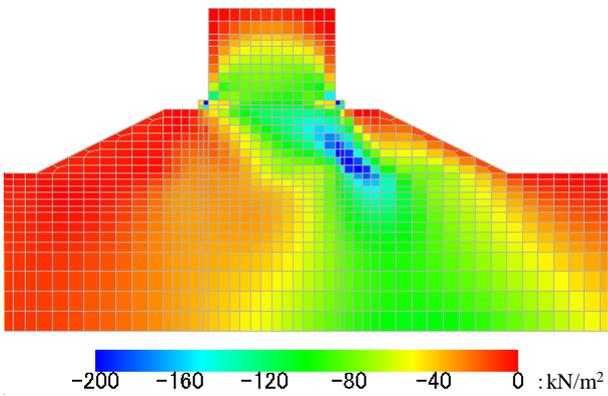


図-A.43 せん断応力分布図【Case1-4】（浸透流有り）

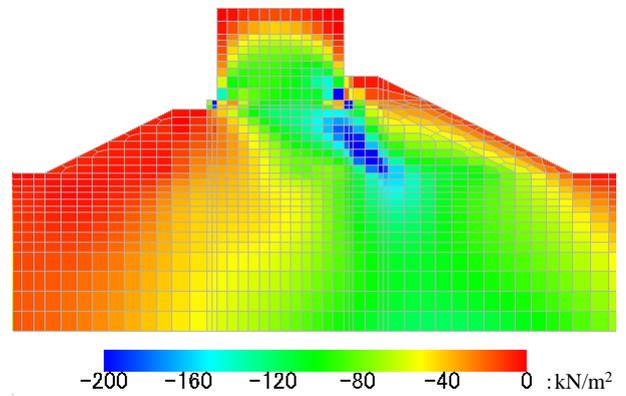


図-A.47 せん断応力分布図【Case2-4】（浸透流有り）

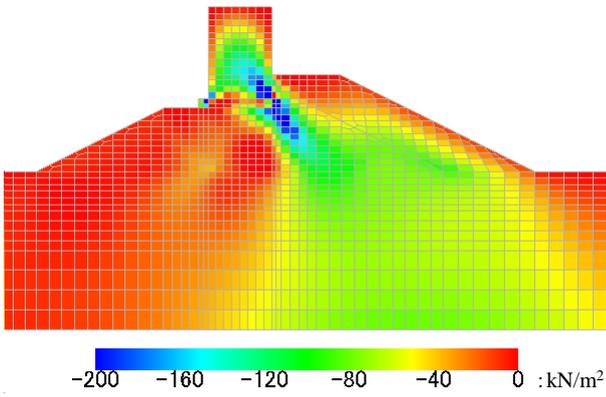


図-A. 48 セン断応力分布図【Case3-1】（浸透流有り）

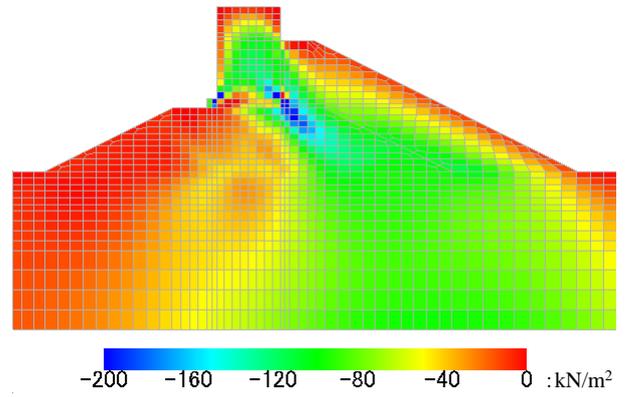


図-A. 52 セン断応力分布図【Case3-5】（浸透流有り）

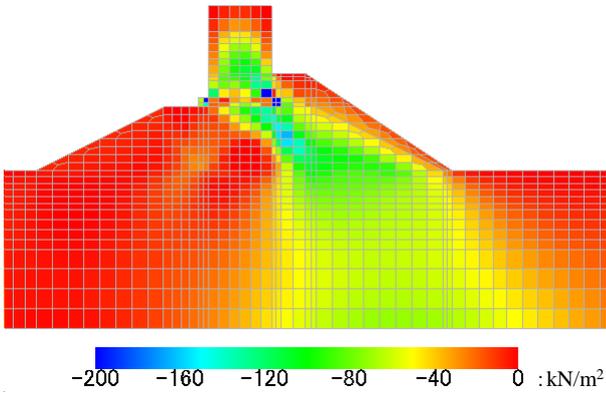


図-A. 49 セン断応力分布図【Case3-2】（浸透流有り）

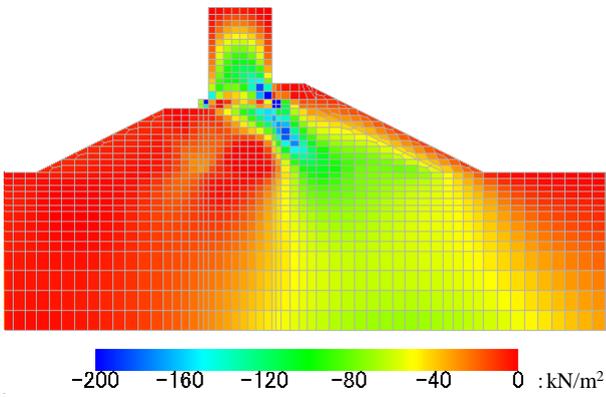


図-A. 50 セン断応力分布図【Case3-3】（浸透流有り）

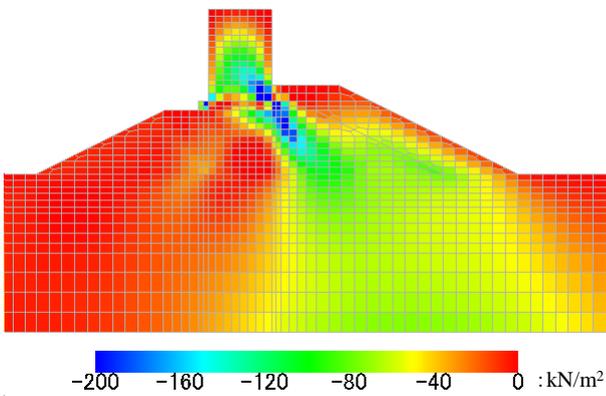


図-A. 51 セン断応力分布図【Case3-4】（浸透流有り）

5. 浸透力分布図（破壊時）

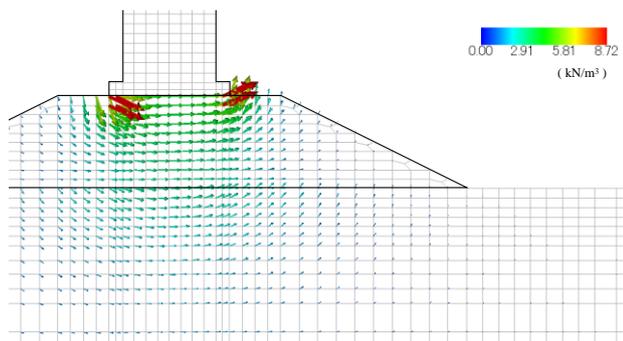


図-A.53 浸透力分布図【Case1-1】水位差：6.4m

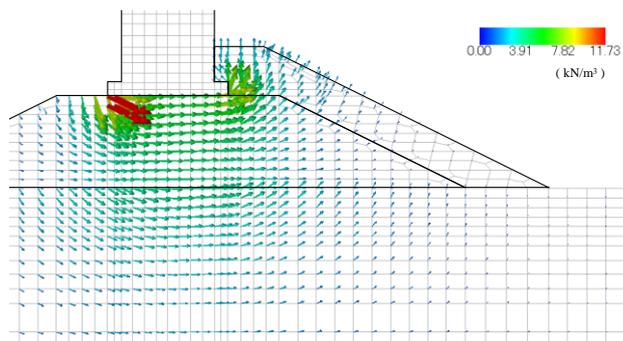


図-A.57 浸透力分布図【Case2-1】水位差：10.0m

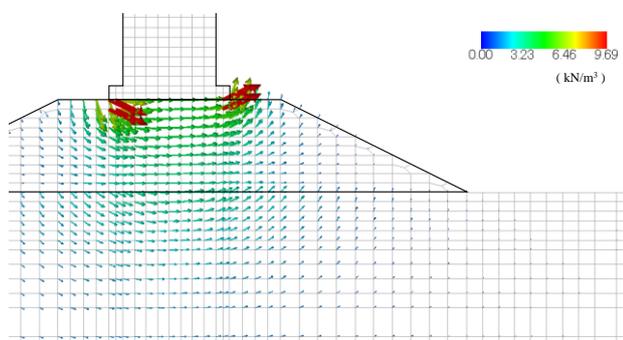


図-A.54 浸透力分布図【Case1-2】水位差：7.2m

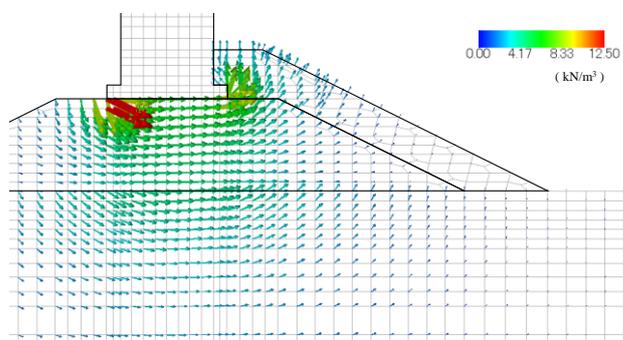


図-A.58 浸透力分布図【Case2-2】水位差：10.8m

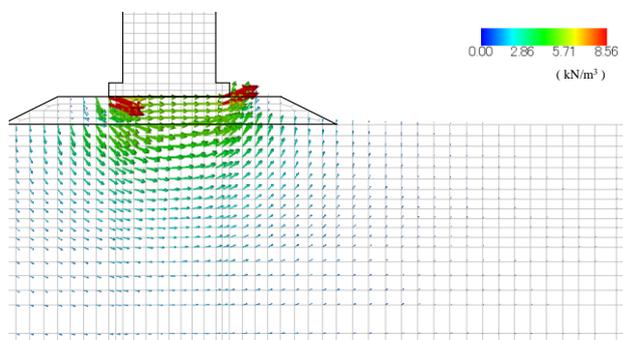


図-A.55 浸透力分布図【Case1-3】水位差：7.2m

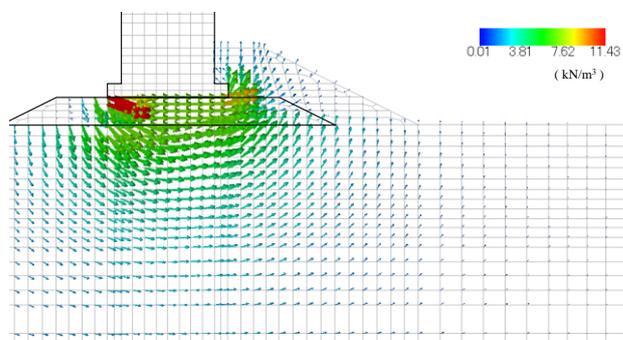


図-A.59 浸透力分布図【Case2-3】水位差：11.0m

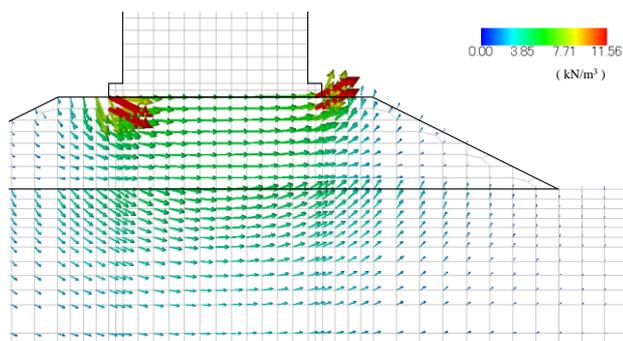


図-A.56 浸透力分布図【Case1-4】水位差：13.4m

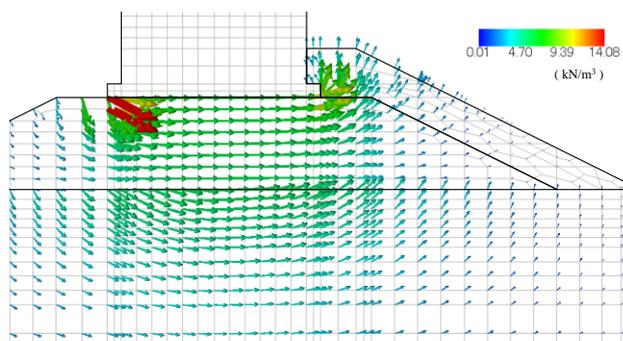


図-A.60 浸透力分布図【Case2-4】水位差：17.9m

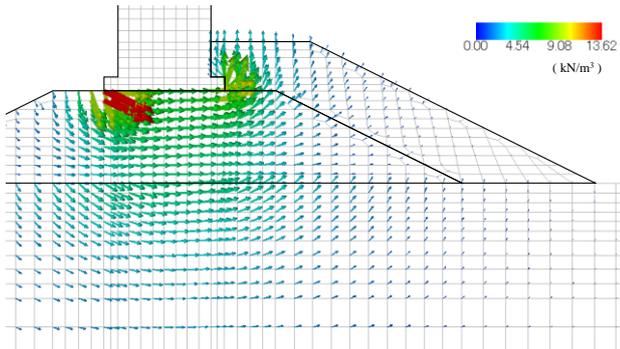


図-A. 61 浸透力分布図【Case3-1】水位差：11.8m

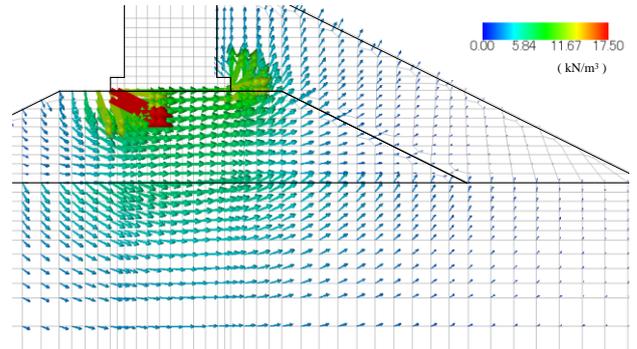


図-A. 65 浸透力分布図【Case3-5】水位差：16.0m

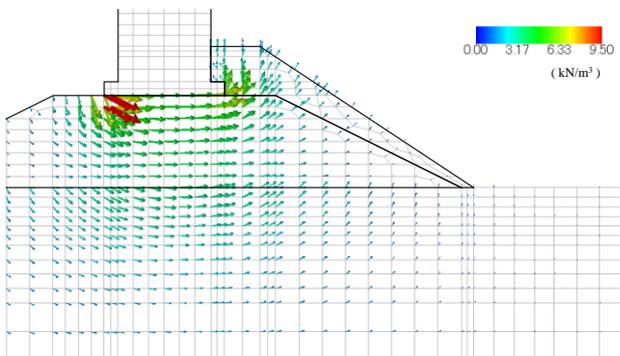


図-A. 62 浸透力分布図【Case3-2】水位差：8.6m

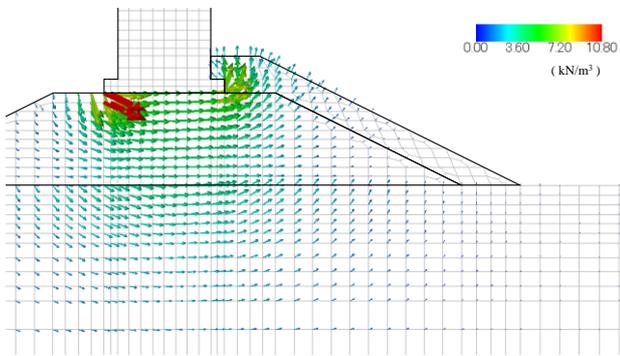


図-A. 63 浸透力分布図【Case3-3】水位差：9.0m

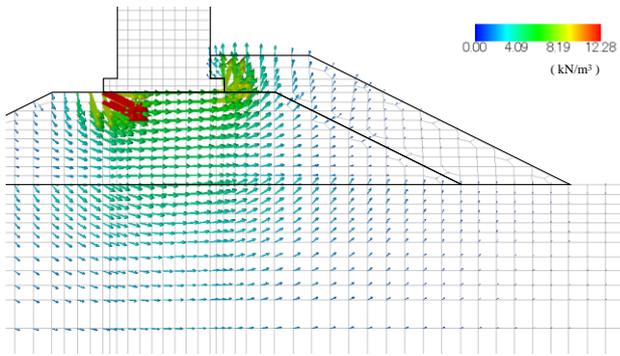


図-A. 64 浸透力分布図【Case3-4】水位差：10.4m

6. 浸透力分布図（水位差 6.4m で比較）

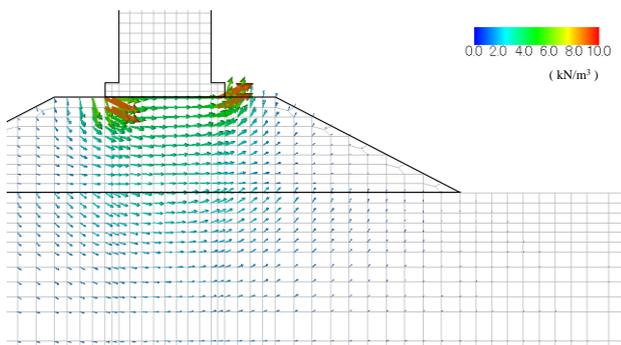


図-A.66 浸透力分布図【Case1-1】水位差：6.4m

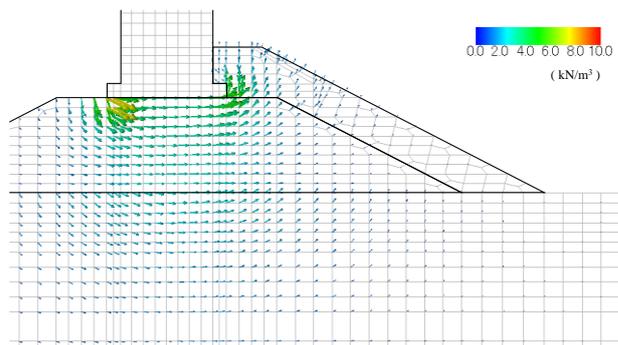


図-A.70 浸透力分布図【Case2-1】水位差：6.4m

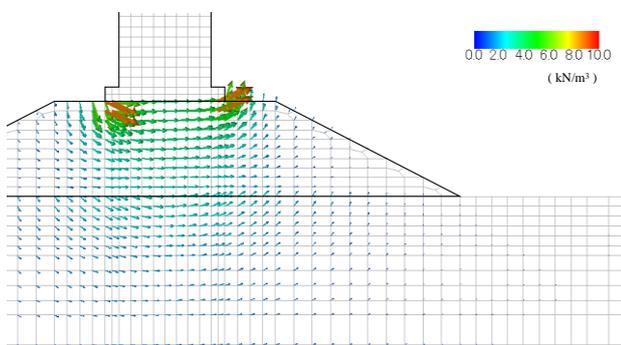


図-A.67 浸透力分布図【Case1-2】水位差：6.4m

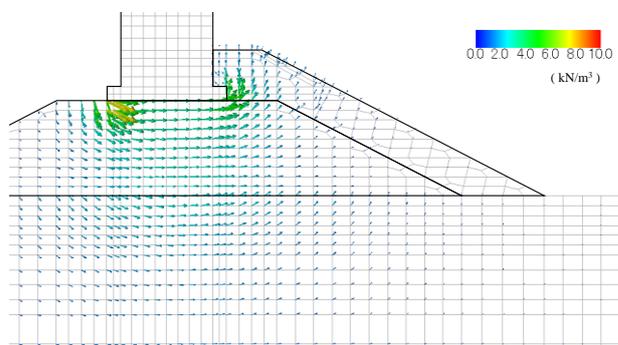


図-A.71 浸透力分布図【Case2-2】水位差：6.4m

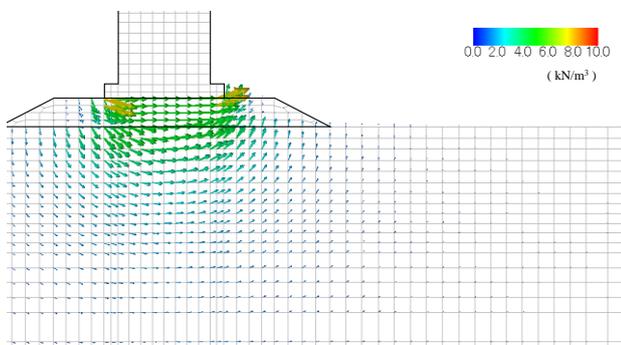


図-A.68 浸透力分布図【Case1-3】水位差：6.4m

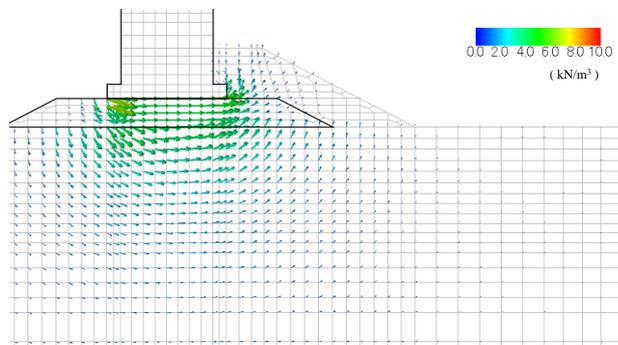


図-A.72 浸透力分布図【Case2-3】水位差：6.4m

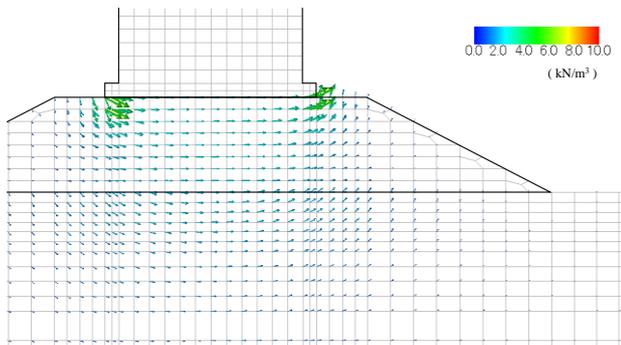


図-A.69 浸透力分布図【Case1-4】水位差：6.4m

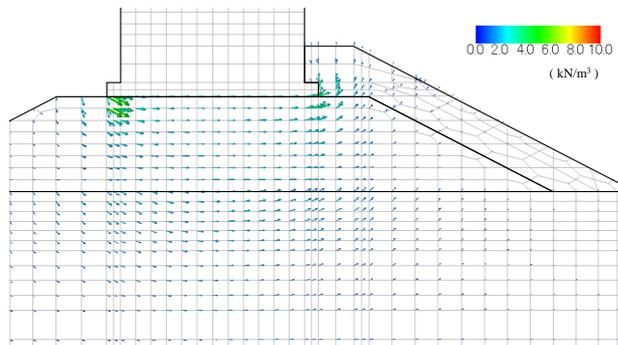


図-A.73 浸透力分布図【Case2-4】水位差：6.4m

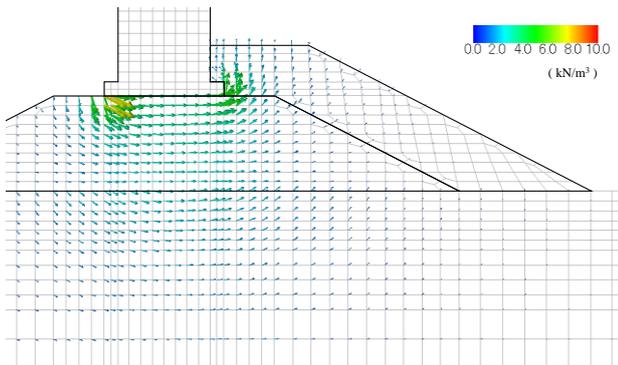


図-A. 74 浸透力分布図【Case3-1】水位差：6.4m

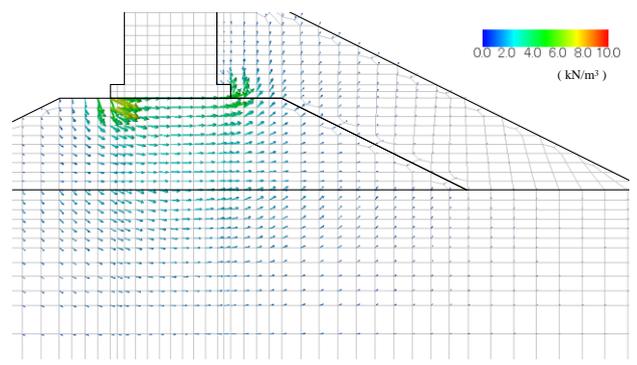


図-A. 78 浸透力分布図【Case3-5】水位差：6.4m

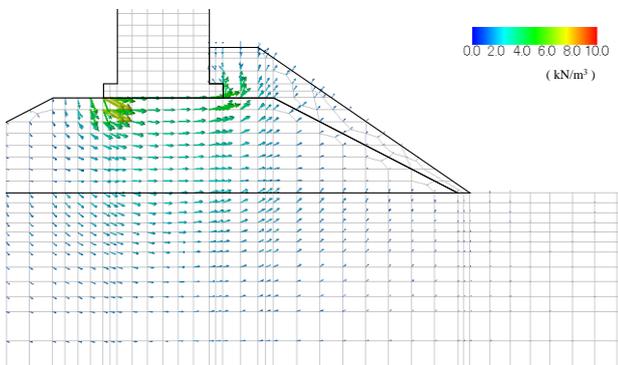


図-A. 75 浸透力分布図【Case3-2】水位差：6.4m

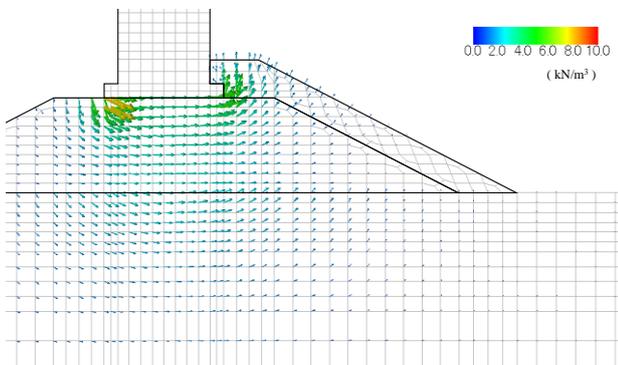


図-A. 76 浸透力分布図【Case3-3】水位差：6.4m

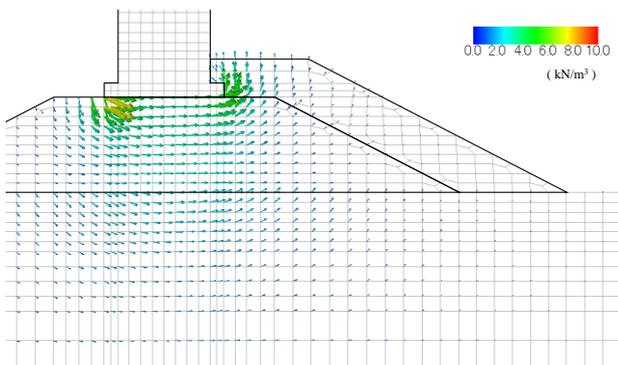


図-A. 77 浸透力分布図【Case3-4】水位差：6.4m

付録 B 円弧すべり計算を用いた支持力検討結果

浸透流を考慮しない場合の支持力検討結果を表-B.1に、提案法を用いて浸透流を考慮した場合の支持力計算結果を表-B.2に示す。

表-B.1の計算結果の詳細を表-B.3から表-B.15に示し、この時の円弧すべりの発生位置を、図-B.1から図-B.13に示す。表-B.2の計算結果の詳細を表-B.16から表-B.28に示し、この時の円弧すべりの発生位置を、図-B.14から図-B.26に示す。

表-B.1 浸透流を考慮しない場合の支持力検討結果

検討 ケース	浸透流を考慮しない場合						
	円弧すべり計算結果				FEM解析結果		極限支持力の比
	水位差	極限支持力 (水平力)	耐力作用比 R/S		水位差	極限支持力 (水平力)	$\frac{\text{FEM解析}}{\text{円弧すべり}}$
許容値			計算値				
Case1-1	6.5	1,128	1.00	1.00	7.2	1,246	1.11
Case1-2	6.7	986	1.00	1.00	8.2	1,209	1.23
Case1-3	6.0	1,043	1.00	0.99	7.6	1,314	1.26
Case1-4	14.2	2,435	1.00	1.00	15.8	2,706	1.11
Case2-1	10.0	1,722	1.00	1.00	11.8	2,027	1.18
Case2-2	10.3	1,524	1.00	1.00	12.6	1,862	1.22
Case2-3	9.6	1,654	1.00	1.00	12.0	2,061	1.25
Case2-4	19.2	3,283	1.00	1.00	—	—	—
Case3-1	11.8	2,027	1.00	1.00	13.8	2,367	1.17
Case3-2	8.6	1,484	1.00	1.00	10.2	1,756	1.18
Case3-3	8.9	1,527	1.00	1.00	10.4	1,790	1.17
Case3-4	10.5	1,810	1.00	1.00	12.0	2,061	1.14
Case3-5	15.5	2,655	1.00	1.00	20.2	3,453	1.30

平均： 1.19

※Case2-4は平均の対象外

表-B.2 浸透流を考慮した場合の支持力検討結果

検討 ケース	浸透流を考慮した場合						
	円弧すべり計算結果（提案法）				FEM解析結果		極限支持力の比
	水位差	極限支持力 (水平力)	耐力作用比 R/S		水位差	極限支持力 (水平力)	$\frac{\text{FEM解析}}{\text{円弧すべり}}$
許容値			計算値				
Case1-1	5.6	978	1.13	1.13	6.4	1,111	1.14
Case1-2	5.9	867	1.14	1.14	7.2	1,060	1.22
Case1-3	5.2	907	1.14	1.15	7.2	1,246	1.37
Case1-4	10.4	1,791	1.27	1.27	13.4	2,299	1.28
Case2-1	8.5	1,467	1.20	1.20	10.0	1,722	1.17
Case2-2	8.8	1,298	1.22	1.22	10.8	1,595	1.23
Case2-3	8.1	1,396	1.22	1.22	11.0	1,892	1.36
Case2-4	13.5	2,316	1.36	1.36	17.8	3,046	1.32
Case3-1	9.9	1,701	1.24	1.24	11.8	2,027	1.19
Case3-2	7.1	1,229	1.17	1.17	8.6	1,484	1.21
Case3-3	7.6	1,314	1.18	1.18	9.0	1,552	1.18
Case3-4	9.1	1,569	1.21	1.21	10.4	1,790	1.14
Case3-5	11.9	2,044	1.32	1.31	16.0	2,740	1.34

平均： 1.24

※Case2-4は平均の対象外

1. 支持力検討結果（浸透流を考慮しない場合）

表-B.3 浸透流を考慮しない

支持力検討結果【Case1-1】

	定義	記号	単位	値
堤体	堤体天端幅	B'	m	10.00
	堤体前面における水深	hc	m	12.00
	フーチング幅	b_F	m	1.50
	フーチング高	h_F	m	1.50
	腹付工の高さ	a	m	0.00
	堤体単位体積重量（気中）	γ_C	kN/m ³	21.00
	摩擦係数（摩擦増大マット）	f		0.75
	堤体気中重量	W	kN/m	3,454.50
	堤体底面幅	B	m	13.00
波圧	静水面上の前面津波高さ	η_f	m	6.50
	静水面上の背面津波高さ	η_r	m	0.00
	堤体の前面における水深	h'	m	12.00
	海水の単位体積重量	ρ_{0g}	kN/m ³	10.10
	静水面から直立壁天端までの高さ	h_C	m	4.00
	係数	a_1		1.05
	係数	a_{IB}		0.90
	静水面における前面波圧強度	p_1	kN/m ³	196.28
	堤体上端部における前面波圧強度	p_2	kN/m ³	26.52
	静水面における背面波圧強度	p_3	kN/m ³	109.13
	フーチング上面における波圧（前面）	p'_1	kN/m ³	180.36
フーチング上面における波圧（背面）	p'_3	kN/m ³	95.49	
合力	前面波力	P_1	kN/m	1,782
	背面波力	P_B	kN/m	655
	浮力	P_B	kN/m	1,662
	堤体重量	W	kN/m	3,455
	前側フーチング上面波力	P'_f	kN/m	271
	後側フーチング上面波力	P'_r	kN/m	143
	壁面摩擦による荷重	P_v	kN/m	0
腹付工の滑動抵抗力	R_s	kN/m	0	
モーメント	前面波力モーメント	M_{P1}	kN/m	10,638
	背面波力モーメント	M_{PB}	kN/m	2,619
	浮力合力モーメント	M_{PU}	kN/m	10,804
	堤体重量モーメント	M_W	kN/m	22,454
	前側フーチング上面波力モーメント	M_{Pf}	kN/m	3,314
	後側フーチング上面波力モーメント	M_{Pr}	kN/m	107
	壁面摩擦による荷重モーメント	M_{Pv}	kN/m	0
腹付工の滑動抵抗力によるモーメント	M_{Rs}	kN/m	0	
支持力	荷重分担比	r		1.0
	基礎マウンドに作用する水平荷重	Pa	kN/m	1,128
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	0
	腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	0
	判定			O.K.
	分割細片に作用する上載荷重	q	kN/m ²	345
	載荷幅	$2b'$	m	6.40
	基礎マウンドに作用する水平荷重	H	kN/m	1,128
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	0
	腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	0
	耐力作用比（許容値）			1.000
耐力作用比（計算値）	R/S		0.996	

表-B.4 浸透流を考慮しない

支持力検討結果【Case1-2】

	定義	記号	単位	値
堤体	堤体天端幅	B'	m	10.00
	堤体前面における水深	hc	m	12.00
	フーチング幅	b_F	m	1.50
	フーチング高	h_F	m	1.50
	腹付工の高さ	a	m	0.00
	堤体単位体積重量（気中）	γ_C	kN/m ³	21.00
	摩擦係数（摩擦増大マット）	f		0.75
	堤体気中重量	W	kN/m	3,034.50
	堤体底面幅	B	m	13.00
波圧	静水面上の前面津波高さ	η_f	m	6.70
	静水面上の背面津波高さ	η_r	m	0.00
	堤体の前面における水深	h'	m	10.00
	海水の単位体積重量	ρ_{0g}	kN/m ³	10.10
	静水面から直立壁天端までの高さ	h_C	m	4.00
	係数	a_1		1.05
	係数	a_{IB}		0.90
	静水面における前面波圧強度	p_1	kN/m ³	177.18
	堤体上端部における前面波圧強度	p_2	kN/m ³	28.65
	静水面における背面波圧強度	p_3	kN/m ³	90.94
	フーチング上面における波圧（前面）	p'_1	kN/m ³	161.26
フーチング上面における波圧（背面）	p'_3	kN/m ³	77.30	
合力	前面波力	P_1	kN/m	1,441
	背面波力	P_B	kN/m	455
	浮力	P_B	kN/m	1,460
	堤体重量	W	kN/m	3,035
	前側フーチング上面波力	P'_f	kN/m	242
	後側フーチング上面波力	P'_r	kN/m	116
	壁面摩擦による荷重	P_v	kN/m	0
腹付工の滑動抵抗力	R_s	kN/m	0	
モーメント	前面波力モーメント	M_{P1}	kN/m	10,004
	背面波力モーメント	M_{PB}	kN/m	2,183
	浮力合力モーメント	M_{PU}	kN/m	9,490
	堤体重量モーメント	M_W	kN/m	19,724
	前側フーチング上面波力モーメント	M_{Pf}	kN/m	2,963
	後側フーチング上面波力モーメント	M_{Pr}	kN/m	87
	壁面摩擦による荷重モーメント	M_{Pv}	kN/m	0
腹付工の滑動抵抗力によるモーメント	M_{Rs}	kN/m	0	
支持力	荷重分担比	r		1.0
	基礎マウンドに作用する水平荷重	Pa	kN/m	986
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	0
	腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	0
	判定			O.K.
	分割細片に作用する上載荷重	q	kN/m ²	341
	載荷幅	$2b'$	m	5.66
	基礎マウンドに作用する水平荷重	H	kN/m	986
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	0
	腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	0
	耐力作用比（許容値）			1.000
耐力作用比（計算値）	R/S		1.002	

表-B.5 浸透流を考慮しない

支持力検討結果【Case1-3】

	定義	記号	単位	値
堤体	堤体天端幅	B'	m	10.00
	堤体前面における水深	hc	m	12.00
	フーチング幅	b_F	m	1.50
	フーチング高	h_F	m	1.50
	腹付工の高さ	a	m	0.00
	堤体単位体積重量 (気中)	γ_C	kN/m ³	21.00
	摩擦係数 (摩擦増大マット)	f		0.75
	堤体気中重量	W	kN/m	3,454.50
	堤体底面幅	B	m	13.00
	波圧	静水面上の前面津波高さ	η_f	m
静水面上の背面津波高さ		η_r	m	0.00
堤体の前面における水深		h'	m	12.00
海水の単位体積重量		$\rho_0 g$	kN/m ³	10.10
静水面から直立壁天端面までの高さ		h_C	m	4.00
係数		a_1		1.05
係数		a_{IB}		0.90
静水面における前面波圧強度		p_1	kN/m ³	190.97
堤体上端部における前面波圧強度		p_2	kN/m ³	21.22
静水面における背面波圧強度		p_3	kN/m ³	109.13
フーチング上面における波圧 (前面)	p'_1	kN/m ³	175.06	
フーチング上面における波圧 (背面)	p'_3	kN/m ³	95.49	
合力	前面波力	P_1	kN/m	1,698
	背面波力	P_B	kN/m	655
	浮力	P_B	kN/m	1,662
	堤体重量	W	kN/m	3,455
	前側フーチング上面波力	P'_f	kN/m	263
	後側フーチング上面波力	P'_r	kN/m	143
	壁面摩擦による荷重	P_v	kN/m	0
腹付工の滑動抵抗力	R_s	kN/m	0	
モーメント	前面波力モーメント	M_{P1}	kN/m	9,959
	背面波力モーメント	M_{PB}	kN/m	2,619
	浮力合力モーメント	M_{PU}	kN/m	10,804
	堤体重量モーメント	M_W	kN/m	22,454
	前側フーチング上面波力モーメント	M_{Pf}	kN/m	3,217
	後側フーチング上面波力モーメント	M_{Pr}	kN/m	107
	壁面摩擦による荷重モーメント	M_{Pv}	kN/m	0
腹付工の滑動抵抗力によるモーメント	M_{Rs}	kN/m	0	
支持力	荷重分担比	r		1.0
	基礎マウンドに作用する水平荷重	Pa	kN/m	1,043
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	0
	腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	0
	判定			O.K.
	分割細片に作用する上載荷重	q	kN/m ²	317
	載荷幅	$2b'$	m	6.94
	基礎マウンドに作用する水平荷重	H	kN/m	1,043
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	0
	腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	0
耐力作用比 (許容値)			1.000	
耐力作用比 (計算値)	R/S		0.992	

表-B.6 浸透流を考慮しない

支持力検討結果【Case1-4】

	定義	記号	単位	値
堤体	堤体天端幅	B'	m	20.00
	堤体前面における水深	hc	m	12.00
	フーチング幅	b_F	m	1.50
	フーチング高	h_F	m	1.50
	腹付工の高さ	a	m	0.00
	堤体単位体積重量 (気中)	γ_C	kN/m ³	21.00
	摩擦係数 (摩擦増大マット)	f		0.75
	堤体気中重量	W	kN/m	6,814.50
	堤体底面幅	B	m	23.00
	波圧	静水面上の前面津波高さ	η_f	m
静水面上の背面津波高さ		η_r	m	0.00
堤体の前面における水深		h'	m	12.00
海水の単位体積重量		$\rho_0 g$	kN/m ³	10.10
静水面から直立壁天端面までの高さ		h_C	m	4.00
係数		a_1		1.05
係数		a_{IB}		0.90
静水面における前面波圧強度		p_1	kN/m ³	277.97
堤体上端部における前面波圧強度		p_2	kN/m ³	108.22
静水面における背面波圧強度		p_3	kN/m ³	109.13
フーチング上面における波圧 (前面)	p'_1	kN/m ³	262.06	
フーチング上面における波圧 (背面)	p'_3	kN/m ³	95.49	
合力	前面波力	P_1	kN/m	3,089
	背面波力	P_B	kN/m	655
	浮力	P_B	kN/m	3,279
	堤体重量	W	kN/m	6,815
	前側フーチング上面波力	P'_f	kN/m	393
	後側フーチング上面波力	P'_r	kN/m	143
	壁面摩擦による荷重	P_v	kN/m	0
腹付工の滑動抵抗力	R_s	kN/m	0	
モーメント	前面波力モーメント	M_{P1}	kN/m	21,095
	背面波力モーメント	M_{PB}	kN/m	2,619
	浮力合力モーメント	M_{PU}	kN/m	37,707
	堤体重量モーメント	M_W	kN/m	78,367
	前側フーチング上面波力モーメント	M_{Pf}	kN/m	8,746
	後側フーチング上面波力モーメント	M_{Pr}	kN/m	107
	壁面摩擦による荷重モーメント	M_{Pv}	kN/m	0
腹付工の滑動抵抗力によるモーメント	M_{Rs}	kN/m	0	
支持力	荷重分担比	r		1.0
	基礎マウンドに作用する水平荷重	Pa	kN/m	2,435
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	0
	腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	0
	判定			O.K.
	分割細片に作用する上載荷重	q	kN/m ²	267
	載荷幅	$2b'$	m	15.24
	基礎マウンドに作用する水平荷重	H	kN/m	2,435
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	0
	腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	0
耐力作用比 (許容値)			1.000	
耐力作用比 (計算値)	R/S		1.002	

表-B.7 浸透流を考慮しない

支持力検討結果【Case2-1】

	定義	記号	単位	値
堤体	堤体天端幅	B'	m	10.00
	堤体前面における水深	hc	m	12.00
	フーチング幅	b_F	m	1.50
	フーチング高	h_F	m	1.50
	腹付工の高さ	a	m	5.33
	堤体単位体積重量 (気中)	γ_C	kN/m ³	21.00
	摩擦係数 (摩擦増大マット)	f		0.75
	堤体気中重量	W	kN/m	3,454.50
	堤体底面幅	B	m	13.00
	波圧	静水面上の前面津波高さ	η_f	m
静水面上の背面津波高さ		η_r	m	0.00
堤体の前面における水深		h'	m	12.00
海水の単位体積重量		$\rho_0 g$	kN/m ³	10.10
静水面から直立壁天端面までの高さ		h_C	m	4.00
係数		a_1		1.05
係数		a_{1B}		0.90
静水面における前面波圧強度		p_1	kN/m ³	233.41
堤体上端部における前面波圧強度		p_2	kN/m ³	63.66
静水面における背面波圧強度		p_3	kN/m ³	109.13
合力	前面波力	P_1	kN/m	2,377
	背面波力	P_B	kN/m	655
	浮力	P_B	kN/m	1,662
	堤体重量	W	kN/m	3,455
	前側フーチング上面波力	P'_f	kN/m	326
	後側フーチング上面波力	P'_r	kN/m	143
	壁面摩擦による荷重	P_v	kN/m	206
モーメント	腹付工の滑動抵抗力	R_s	kN/m	770
	前面波力モーメント	M_{P1}	kN/m	15,391
	背面波力モーメント	M_{PB}	kN/m	2,619
	浮力合力モーメント	M_{PU}	kN/m	10,804
	堤体重量モーメント	M_W	kN/m	22,454
	前側フーチング上面波力モーメント	M_{Pf}	kN/m	3,996
	後側フーチング上面波力モーメント	M_{Pr}	kN/m	107
支持力	壁面摩擦による荷重モーメント	M_{Pv}	kN/m	0
	腹付工の滑動抵抗力によるモーメント	M_{Rs}	kN/m	1,368
	荷重分担比	r		0.56
	基礎マウンドに作用する水平荷重	Pa	kN/m	964
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	758
	腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	203
	判定			O.K.
	分割細片に作用する上載荷重	q	kN/m ²	490
	載荷幅	$2b'$	m	4.20
	基礎マウンドに作用する水平荷重	H	kN/m	964
腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	758	
腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	203	
耐力作用比 (許容値)			1.000	
耐力作用比 (計算値)	R/S		1.003	

表-B.8 浸透流を考慮しない

支持力検討結果【Case2-2】

	定義	記号	単位	値
堤体	堤体天端幅	B'	m	10.00
	堤体前面における水深	hc	m	12.00
	フーチング幅	b_F	m	1.50
	フーチング高	h_F	m	1.50
	腹付工の高さ	a	m	5.33
	堤体単位体積重量 (気中)	γ_C	kN/m ³	21.00
	摩擦係数 (摩擦増大マット)	f		0.75
	堤体気中重量	W	kN/m	3,034.50
	堤体底面幅	B	m	13.00
	波圧	静水面上の前面津波高さ	η_f	m
静水面上の背面津波高さ		η_r	m	0.00
堤体の前面における水深		h'	m	10.00
海水の単位体積重量		$\rho_0 g$	kN/m ³	10.10
静水面から直立壁天端面までの高さ		h_C	m	4.00
係数		a_1		1.05
係数		a_{1B}		0.90
静水面における前面波圧強度		p_1	kN/m ³	215.59
堤体上端部における前面波圧強度		p_2	kN/m ³	67.05
静水面における背面波圧強度		p_3	kN/m ³	90.94
合力	フーチング上面における波圧 (前面)	p'_1	kN/m ³	199.67
	フーチング上面における波圧 (背面)	p'_3	kN/m ³	77.30
	前面波力	P_1	kN/m	1,978
	背面波力	P_B	kN/m	455
	浮力	P_B	kN/m	1,460
	堤体重量	W	kN/m	3,035
	前側フーチング上面波力	P'_f	kN/m	300
モーメント	後側フーチング上面波力	P'_r	kN/m	116
	壁面摩擦による荷重	P_v	kN/m	206
	腹付工の滑動抵抗力	R_s	kN/m	770
	前面波力モーメント	M_{P1}	kN/m	14,920
	背面波力モーメント	M_{PB}	kN/m	2,183
	浮力合力モーメント	M_{PU}	kN/m	9,490
	堤体重量モーメント	M_W	kN/m	19,724
支持力	前側フーチング上面波力モーメント	M_{Pf}	kN/m	3,669
	後側フーチング上面波力モーメント	M_{Pr}	kN/m	87
	壁面摩擦による荷重モーメント	M_{Pv}	kN/m	0
	腹付工の滑動抵抗力によるモーメント	M_{Rs}	kN/m	1,368
	荷重分担比	r		0.50
	基礎マウンドに作用する水平荷重	Pa	kN/m	762
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	762
	腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	204
	判定			O.K.
	分割細片に作用する上載荷重	q	kN/m ²	612
載荷幅	$2b'$	m	2.92	
基礎マウンドに作用する水平荷重	H	kN/m	762	
腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	762	
腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	204	
耐力作用比 (許容値)			1.000	
耐力作用比 (計算値)	R/S		0.998	

表-B.9 浸透流を考慮しない

支持力検討結果【Case2-3】

	定義	記号	単位	値
堤体	堤体天端幅	B'	m	10.00
	堤体前面における水深	hc	m	12.00
	フーチング幅	b_F	m	1.50
	フーチング高	h_F	m	1.50
	腹付工の高さ	a	m	5.33
	堤体単位体積重量 (気中)	γ_C	kN/m ³	21.00
	摩擦係数 (摩擦増大マット)	f		0.75
	堤体気中重量	W	kN/m	3,454.50
	堤体底面幅	B	m	13.00
	波圧	静水面上の前面津波高さ	η_f	m
静水面上の背面津波高さ		η_r	m	0.00
堤体の前面における水深		h'	m	12.00
海水の単位体積重量		$\rho_0 g$	kN/m ³	10.10
静水面から直立壁天端面までの高さ		h_C	m	4.00
係数		a_1		1.05
係数		a_{1B}		0.90
静水面における前面波圧強度		p_1	kN/m ³	229.17
堤体上端部における前面波圧強度		p_2	kN/m ³	59.41
静水面における背面波圧強度		p_3	kN/m ³	109.13
合力	前面波力	P_1	kN/m	2,309
	背面波力	P_B	kN/m	655
	浮力	P_B	kN/m	1,662
	堤体重量	W	kN/m	3,455
	前側フーチング上面波力	P'_f	kN/m	320
	後側フーチング上面波力	P'_r	kN/m	143
	壁面摩擦による荷重	P_v	kN/m	206
モーメント	腹付工の滑動抵抗力	R_s	kN/m	770
	前面波力モーメント	M_{P1}	kN/m	14,848
	背面波力モーメント	M_{PB}	kN/m	2,619
	浮力合力モーメント	M_{PU}	kN/m	10,804
	堤体重量モーメント	M_W	kN/m	22,454
	前側フーチング上面波力モーメント	M_{Pf}	kN/m	3,918
	後側フーチング上面波力モーメント	M_{Pr}	kN/m	107
支持力	壁面摩擦による荷重モーメント	M_{Pv}	kN/m	0
	腹付工の滑動抵抗力によるモーメント	M_{Rs}	kN/m	1,368
	荷重分担比	r		0.54
	基礎マウンドに作用する水平荷重	Pa	kN/m	893
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	761
	腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	204
	判定			O.K.
	分割細片に作用する上載荷重	q	kN/m ²	438
	載荷幅	$2b'$	m	4.68
	基礎マウンドに作用する水平荷重	H	kN/m	893
腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	761	
腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	204	
耐力作用比 (許容値)			1.000	
耐力作用比 (計算値)	R/S		1.003	

表-B.10 浸透流を考慮しない

支持力検討結果【Case2-4】

	定義	記号	単位	値
堤体	堤体天端幅	B'	m	20.00
	堤体前面における水深	hc	m	12.00
	フーチング幅	b_F	m	1.50
	フーチング高	h_F	m	1.50
	腹付工の高さ	a	m	5.33
	堤体単位体積重量 (気中)	γ_C	kN/m ³	21.00
	摩擦係数 (摩擦増大マット)	f		0.75
	堤体気中重量	W	kN/m	6,814.50
	堤体底面幅	B	m	23.00
	波圧	静水面上の前面津波高さ	η_f	m
静水面上の背面津波高さ		η_r	m	0.00
堤体の前面における水深		h'	m	12.00
海水の単位体積重量		$\rho_0 g$	kN/m ³	10.10
静水面から直立壁天端面までの高さ		h_C	m	4.00
係数		a_1		1.05
係数		a_{1B}		0.90
静水面における前面波圧強度		p_1	kN/m ³	331.02
堤体上端部における前面波圧強度		p_2	kN/m ³	161.26
静水面における背面波圧強度		p_3	kN/m ³	109.13
合力	フーチング上面における波圧 (前面)	p'_1	kN/m ³	315.10
	フーチング上面における波圧 (背面)	p'_3	kN/m ³	95.49
	前面波力	P_1	kN/m	3,938
	背面波力	P_B	kN/m	655
	浮力	P_B	kN/m	3,279
	堤体重量	W	kN/m	6,815
	前側フーチング上面波力	P'_f	kN/m	473
モーメント	後側フーチング上面波力	P'_r	kN/m	143
	壁面摩擦による荷重	P_v	kN/m	206
	腹付工の滑動抵抗力	R_s	kN/m	770
	前面波力モーメント	M_{P1}	kN/m	27,885
	背面波力モーメント	M_{PB}	kN/m	2,619
	浮力合力モーメント	M_{PU}	kN/m	37,707
	堤体重量モーメント	M_W	kN/m	78,367
支持力	前側フーチング上面波力モーメント	M_{Pf}	kN/m	10,517
	後側フーチング上面波力モーメント	M_{Pr}	kN/m	107
	壁面摩擦による荷重モーメント	M_{Pv}	kN/m	0
	腹付工の滑動抵抗力によるモーメント	M_{Rs}	kN/m	1,368
	荷重分担比	r		0.77
	基礎マウンドに作用する水平荷重	Pa	kN/m	2,528
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	755
	腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	202
	判定			O.K.
	分割細片に作用する上載荷重	q	kN/m ²	285
載荷幅	$2b'$	m	13.86	
基礎マウンドに作用する水平荷重	H	kN/m	2,528	
腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	755	
腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	202	
耐力作用比 (許容値)			1.000	
耐力作用比 (計算値)	R/S		1.002	

表-B.11 浸透流を考慮しない

支持力検討結果【Case3-1】

	定義	記号	単位	値
堤体	堤体天端幅	B'	m	10.00
	堤体前面における水深	hc	m	12.00
	フーチング幅	b_F	m	1.50
	フーチング高	h_F	m	1.50
	腹付工の高さ	a	m	5.33
	堤体単位体積重量 (気中)	γ_C	kN/m ³	21.00
	摩擦係数 (摩擦増大マット)	f		0.75
	堤体気中重量	W	kN/m	3,454.50
	堤体底面幅	B	m	13.00
	波圧	静水面上の前面津波高さ	η_f	m
静水面上の背面津波高さ		η_r	m	0.00
堤体の前面における水深		h'	m	12.00
海水の単位体積重量		$\rho_0 g$	kN/m ³	10.10
静水面から直立壁天端面までの高さ		h_C	m	4.00
係数		a_1		1.05
係数		a_{1B}		0.90
静水面における前面波圧強度		p_1	kN/m ³	252.51
堤体上端部における前面波圧強度		p_2	kN/m ³	82.75
静水面における背面波圧強度		p_3	kN/m ³	109.13
合力	前面波力	P_1	kN/m	2,682
	背面波力	P_B	kN/m	655
	浮力	P_B	kN/m	1,662
	堤体重量	W	kN/m	3,455
	前側フーチング上面波力	P'_f	kN/m	355
	後側フーチング上面波力	P'_r	kN/m	143
	壁面摩擦による荷重	P_v	kN/m	303
モーメント	腹付工の滑動抵抗力	R_s	kN/m	1,130
	前面波力モーメント	M_{P1}	kN/m	17,835
	背面波力モーメント	M_{PB}	kN/m	2,619
	浮力合力モーメント	M_{PU}	kN/m	10,804
	堤体重量モーメント	M_W	kN/m	22,454
	前側フーチング上面波力モーメント	M_{Pf}	kN/m	4,347
	後側フーチング上面波力モーメント	M_{Pr}	kN/m	107
支持力	壁面摩擦による荷重モーメント	M_{Pv}	kN/m	0
	腹付工の滑動抵抗力によるモーメント	M_{Rs}	kN/m	2,008
	荷重分担比	r		0.5
	基礎マウンドに作用する水平荷重	Pa	kN/m	1,014
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	1,014
	腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	272
	判定			O.K.
	分割細片に作用する上載荷重	q	kN/m ²	759
	載荷幅	$2b'$	m	2.66
	基礎マウンドに作用する水平荷重	H	kN/m	1,014
支持力	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	1,014
	腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	272
	耐力作用比 (許容値)			1.000
	耐力作用比 (計算値)	R/S		1.004

表-B.12 浸透流を考慮しない

支持力検討結果【Case3-2】

	定義	記号	単位	値
堤体	堤体天端幅	B'	m	10.00
	堤体前面における水深	hc	m	12.00
	フーチング幅	b_F	m	1.50
	フーチング高	h_F	m	1.50
	腹付工の高さ	a	m	5.33
	堤体単位体積重量 (気中)	γ_C	kN/m ³	21.00
	摩擦係数 (摩擦増大マット)	f		0.75
	堤体気中重量	W	kN/m	3,454.50
	堤体底面幅	B	m	13.00
	波圧	静水面上の前面津波高さ	η_f	m
静水面上の背面津波高さ		η_r	m	0.00
堤体の前面における水深		h'	m	12.00
海水の単位体積重量		$\rho_0 g$	kN/m ³	10.10
静水面から直立壁天端面までの高さ		h_C	m	4.00
係数		a_1		1.05
係数		a_{1B}		0.90
静水面における前面波圧強度		p_1	kN/m ³	218.56
堤体上端部における前面波圧強度		p_2	kN/m ³	48.80
静水面における背面波圧強度		p_3	kN/m ³	109.13
合力	フーチング上面における波圧 (前面)	p'_1	kN/m ³	202.64
	フーチング上面における波圧 (背面)	p'_3	kN/m ³	95.49
	前面波力	P_1	kN/m	2,139
	背面波力	P_B	kN/m	655
	浮力	P_B	kN/m	1,662
	堤体重量	W	kN/m	3,455
	前側フーチング上面波力	P'_f	kN/m	304
モーメント	後側フーチング上面波力	P'_r	kN/m	143
	壁面摩擦による荷重	P_v	kN/m	171
	腹付工の滑動抵抗力	R_s	kN/m	640
	前面波力モーメント	M_{P1}	kN/m	13,490
	背面波力モーメント	M_{PB}	kN/m	2,619
	浮力合力モーメント	M_{PU}	kN/m	10,804
	堤体重量モーメント	M_W	kN/m	22,454
支持力	前側フーチング上面波力モーメント	M_{Pf}	kN/m	3,724
	後側フーチング上面波力モーメント	M_{Pr}	kN/m	107
	壁面摩擦による荷重モーメント	M_{Pv}	kN/m	0
	腹付工の滑動抵抗力によるモーメント	M_{Rs}	kN/m	1,137
	荷重分担比	r		0.57
	基礎マウンドに作用する水平荷重	Pa	kN/m	846
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	638
	腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	171
	判定			O.K.
	分割細片に作用する上載荷重	q	kN/m ²	372
支持力	載荷幅	$2b'$	m	5.56
	基礎マウンドに作用する水平荷重	H	kN/m	846
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	638
	腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	171
	耐力作用比 (許容値)			1.000
耐力作用比 (計算値)	R/S		0.997	

表-B.13 浸透流を考慮しない

支持力検討結果【Case3-3】

	定義	記号	単位	値	
堤体	堤体天端幅	B'	m	10.00	
	堤体前面における水深	hc	m	12.00	
	フーチング幅	b_F	m	1.50	
	フーチング高	h_F	m	1.50	
	腹付工の高さ	a	m	4.00	
	堤体単位体積重量 (気中)	γ_C	kN/m ³	21.00	
	摩擦係数 (摩擦増大マット)	f		0.75	
	堤体気中重量	W	kN/m	3,454.50	
	堤体底面幅	B	m	13.00	
	波圧	静水面上の前面津波高さ	η_f	m	8.85
静水面上の背面津波高さ		η_r	m	0.00	
堤体の前面における水深		h'	m	12.00	
海水の単位体積重量		$\rho_0 g$	kN/m ³	10.10	
静水面から直立壁天端までの高さ		h_C	m	4.00	
係数		a_1		1.05	
係数		a_{1B}		0.90	
静水面における前面波圧強度		p_1	kN/m ³	221.21	
堤体上端部における前面波圧強度		p_2	kN/m ³	51.46	
静水面における背面波圧強度		p_3	kN/m ³	109.13	
合力	前面波力	P_1	kN/m	2,181	
	背面波力	P_B	kN/m	655	
	浮力	P_B	kN/m	1,662	
	堤体重量	W	kN/m	3,455	
	前側フーチング上面波力	P'_f	kN/m	308	
	後側フーチング上面波力	P'_r	kN/m	143	
	壁面摩擦による荷重	P_v	kN/m	147	
	腹付工の滑動抵抗力	R_s	kN/m	550	
	モーメント	前面波力モーメント	M_{P1}	kN/m	13,829
		背面波力モーメント	M_{PB}	kN/m	2,619
浮力合力モーメント		M_{PU}	kN/m	10,804	
堤体重量モーメント		M_W	kN/m	22,454	
前側フーチング上面波力モーメント		M_{Pf}	kN/m	3,772	
後側フーチング上面波力モーメント		M_{Pr}	kN/m	107	
壁面摩擦による荷重モーメント		M_{Pv}	kN/m	0	
支持力	腹付工の滑動抵抗力によるモーメント	M_{Rs}	kN/m	733	
	荷重分担比	r		0.64	
	基礎マウンドに作用する水平荷重	Pa	kN/m	977	
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	550	
	腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	147	
	判定			O.K.	
	分割細片に作用する上載荷重	q	kN/m ²	435	
	載荷幅	$2b'$	m	4.82	
	基礎マウンドに作用する水平荷重	H	kN/m	977	
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	550	
腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	147		
耐力作用比 (許容値)			1.000		
耐力作用比 (計算値)	R/S		0.999		

表-B.14 浸透流を考慮しない

支持力検討結果【Case3-4】

	定義	記号	単位	値	
堤体	堤体天端幅	B'	m	10.00	
	堤体前面における水深	hc	m	12.00	
	フーチング幅	b_F	m	1.50	
	フーチング高	h_F	m	1.50	
	腹付工の高さ	a	m	4.00	
	堤体単位体積重量 (気中)	γ_C	kN/m ³	21.00	
	摩擦係数 (摩擦増大マット)	f		0.75	
	堤体気中重量	W	kN/m	3,454.50	
	堤体底面幅	B	m	13.00	
	波圧	静水面上の前面津波高さ	η_f	m	10.52
静水面上の背面津波高さ		η_r	m	0.00	
堤体の前面における水深		h'	m	12.00	
海水の単位体積重量		$\rho_0 g$	kN/m ³	10.10	
静水面から直立壁天端までの高さ		h_C	m	4.00	
係数		a_1		1.05	
係数		a_{1B}		0.90	
静水面における前面波圧強度		p_1	kN/m ³	238.93	
堤体上端部における前面波圧強度		p_2	kN/m ³	69.17	
静水面における背面波圧強度		p_3	kN/m ³	109.13	
合力	前面波力	P_1	kN/m	2,465	
	背面波力	P_B	kN/m	655	
	浮力	P_B	kN/m	1,662	
	堤体重量	W	kN/m	3,455	
	前側フーチング上面波力	P'_f	kN/m	335	
	後側フーチング上面波力	P'_r	kN/m	143	
	壁面摩擦による荷重	P_v	kN/m	228	
	腹付工の滑動抵抗力	R_s	kN/m	850	
	モーメント	前面波力モーメント	M_{P1}	kN/m	16,097
		背面波力モーメント	M_{PB}	kN/m	2,619
浮力合力モーメント		M_{PU}	kN/m	10,804	
堤体重量モーメント		M_W	kN/m	22,454	
前側フーチング上面波力モーメント		M_{Pf}	kN/m	4,098	
後側フーチング上面波力モーメント		M_{Pr}	kN/m	107	
壁面摩擦による荷重モーメント		M_{Pv}	kN/m	0	
支持力	腹付工の滑動抵抗力によるモーメント	M_{Rs}	kN/m	1,133	
	荷重分担比	r		0.54	
	基礎マウンドに作用する水平荷重	Pa	kN/m	977	
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	833	
	腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	223	
	判定			O.K.	
	分割細片に作用する上載荷重	q	kN/m ²	602	
	載荷幅	$2b'$	m	3.40	
	基礎マウンドに作用する水平荷重	H	kN/m	977	
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	833	
腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	223		
耐力作用比 (許容値)			1.000		
耐力作用比 (計算値)	R/S		1.001		

表-B.15 浸透流を考慮しない

支持力検討結果【Case3-5】

	定義	記号	単位	値
堤体	堤体天端幅	B'	m	10.00
	堤体前面における水深	hc	m	12.00
	フーチング幅	b_F	m	1.50
	フーチング高	h_F	m	1.50
	腹付工の高さ	a	m	10.67
	堤体単位体積重量（気中）	γ_C	kN/m ³	21.00
	摩擦係数（摩擦増大マット）	f		0.75
	堤体気中重量	W	kN/m	3,454.50
	堤体底面幅	B	m	13.00
波圧	静水面上の前面津波高さ	η_f	m	15.50
	静水面上の背面津波高さ	η_r	m	0.00
	堤体の前面における水深	h'	m	12.00
	海水の単位体積重量	ρ_{0g}	kN/m ³	10.10
	静水面から直立壁天端面までの高さ	h_C	m	4.00
	係数	a_1		1.05
	係数	a_{1B}		0.90
	静水面における前面波圧強度	p_1	kN/m ³	291.76
	堤体上端部における前面波圧強度	p_2	kN/m ³	122.01
	静水面における背面波圧強度	p_3	kN/m ³	109.13
	フーチング上面における波圧（前面）	p'_1	kN/m ³	275.85
フーチング上面における波圧（背面）	p'_3	kN/m ³	95.49	
合力	前面波力	P_1	kN/m	3,310
	背面波力	P_B	kN/m	655
	浮力	P_B	kN/m	1,662
	堤体重量	W	kN/m	3,455
	前側フーチング上面波力	P'_f	kN/m	414
	後側フーチング上面波力	P'_r	kN/m	143
	壁面摩擦による荷重	P_v	kN/m	520
腹付工の滑動抵抗力	R_s	kN/m	1,940	
モーメント	前面波力モーメント	M_{P1}	kN/m	22,860
	背面波力モーメント	M_{PB}	kN/m	2,619
	浮力合力モーメント	M_{PU}	kN/m	10,804
	堤体重量モーメント	M_W	kN/m	22,454
	前側フーチング上面波力モーメント	$M_{P'f}$	kN/m	5,069
	後側フーチング上面波力モーメント	$M_{P'r}$	kN/m	107
	壁面摩擦による荷重モーメント	$M_{P'r}$	kN/m	0
腹付工の滑動抵抗力によるモーメント	M_{R_s}	kN/m	6,900	
支持力	荷重分担比	r		0.5
	基礎マウンドに作用する水平荷重	Pa	kN/m	1,328
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	1,328
	腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	356
	判定			O.K.
	分割細片に作用する上載荷重	q	kN/m ²	1,510
	載荷幅	$2b'$	m	1.32
	基礎マウンドに作用する水平荷重	H	kN/m	1,328
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	1,328
	腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	356
	耐力作用比（許容値）			1.000
耐力作用比（計算値）	RS		1.001	

2. すべり面発生位置（浸透流を考慮しない場合）

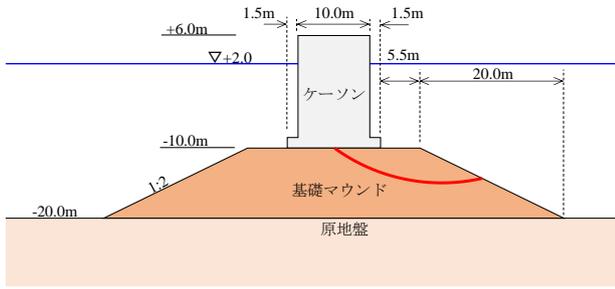


図-B.1 すべり面発生位置【Case1-1】

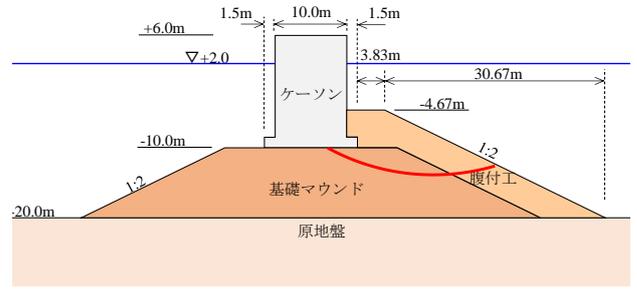


図-B.5 すべり面発生位置【Case2-1】

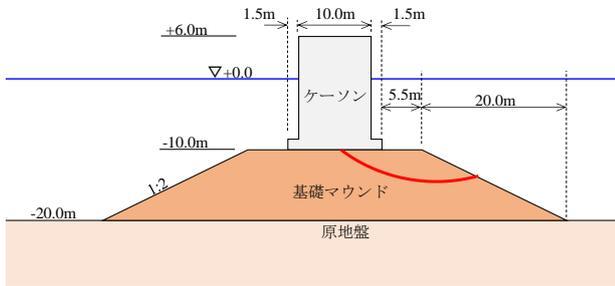


図-B.2 すべり面発生位置【Case1-2】

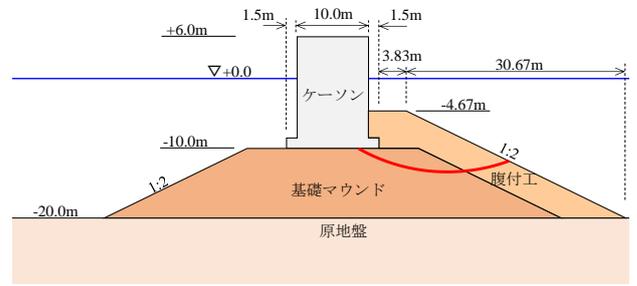


図-B.6 すべり面発生位置【Case2-2】

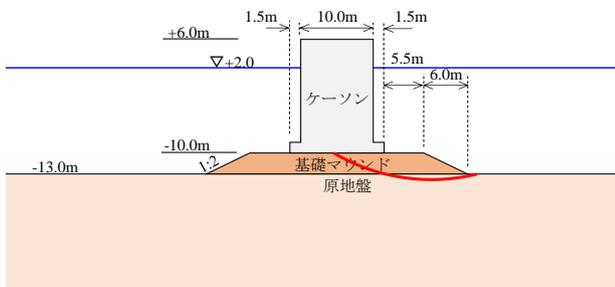


図-B.3 すべり面発生位置【Case1-3】

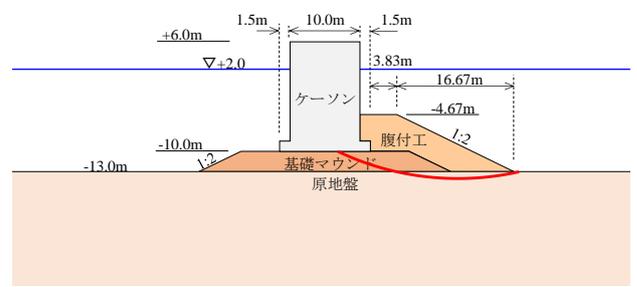


図-B.7 すべり面発生位置【Case2-3】

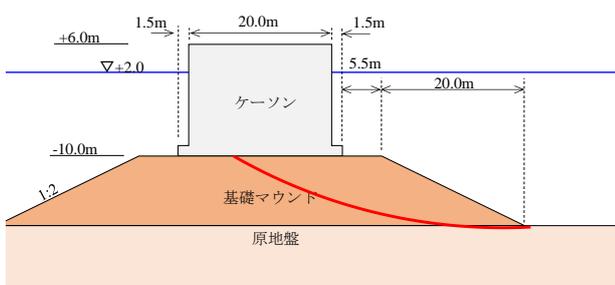


図-B.4 すべり面発生位置【Case1-4】

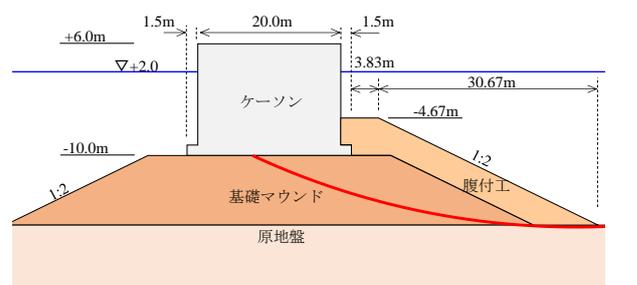


図-B.8 すべり面発生位置【Case2-4】

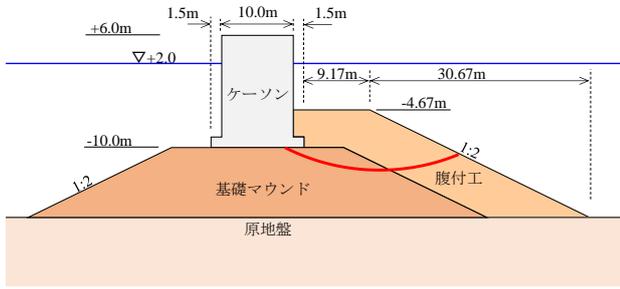


図-B.9 すべり面発生位置【Case3-1】

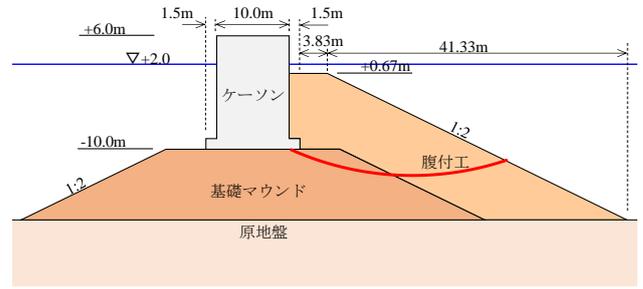


図-B.13 すべり面発生位置【Case3-5】

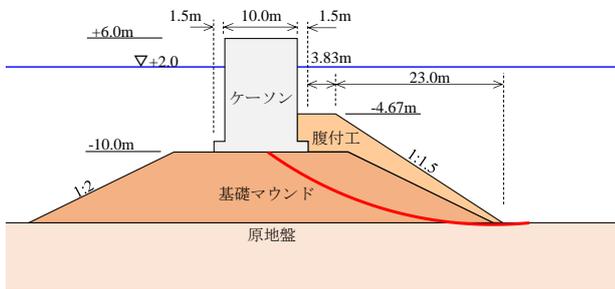


図-B.10 すべり面発生位置【Case3-2】

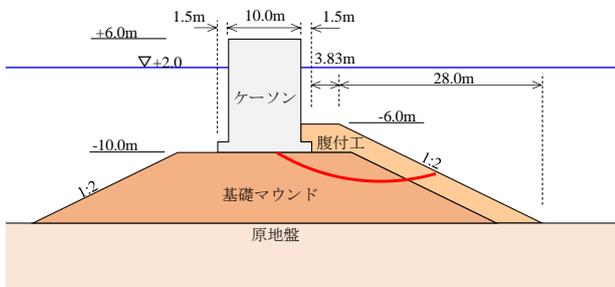


図-B.11 すべり面発生位置【Case3-3】

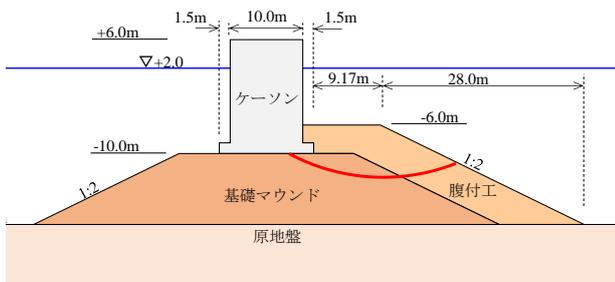


図-B.12 すべり面発生位置【Case3-4】

3. 支持力検討結果（提案法で浸透流を考慮した場合）

表-B.16 提案法により浸透流を考慮した

支持力検討結果【Case1-1】

	定義	記号	単位	値
堤体	堤体天端幅	B'	m	10.00
	堤体前面における水深	hc	m	12.00
	フーチング幅	b_F	m	1.50
	フーチング高	h_F	m	1.50
	腹付工の高さ	a	m	0.00
	堤体単位体積重量（気中）	γ_C	kN/m ³	21.00
	摩擦係数（摩擦増大マット）	f		0.75
	堤体気中重量	W	kN/m	3,454.50
	堤体底面幅	B	m	13.00
	波圧	静水面上の前面津波高さ	η_f	m
静水面上の背面津波高さ		η_r	m	0.00
堤体の前面における水深		h'	m	12.00
海水の単位体積重量		$\rho_0 g$	kN/m ³	10.10
静水面から直立壁天端面までの高さ		h_C	m	4.00
係数		a_1		1.05
係数		a_{1B}		0.90
静水面における前面波圧強度		p_1	kN/m ³	186.94
堤体上端部における前面波圧強度		p_2	kN/m ³	17.19
静水面における背面波圧強度		p_3	kN/m ³	109.13
フーチング上面における波圧（前面）	p'_1	kN/m ³	171.03	
フーチング上面における波圧（背面）	p'_3	kN/m ³	95.49	
合力	前面波力	P_1	kN/m	1,633
	背面波力	P_B	kN/m	655
	浮力	P_B	kN/m	1,662
	堤体重量	W	kN/m	3,455
	前側フーチング上面波力	P'_f	kN/m	257
	後側フーチング上面波力	P'_r	kN/m	143
	壁面摩擦による荷重	P_v	kN/m	0
腹付工の滑動抵抗力	R_s	kN/m	0	
モーメント	前面波力モーメント	M_{P1}	kN/m	9,443
	背面波力モーメント	M_{PB}	kN/m	2,619
	浮力合力モーメント	M_{PU}	kN/m	10,804
	堤体重量モーメント	M_W	kN/m	22,454
	前側フーチング上面波力モーメント	M_{Pf}	kN/m	3,143
	後側フーチング上面波力モーメント	M_{Pr}	kN/m	107
	壁面摩擦による荷重モーメント	M_{Pv}	kN/m	0
腹付工の滑動抵抗力によるモーメント	M_{Rs}	kN/m	0	
支持力	荷重分担比	r		1.0
	基礎マウンドに作用する水平荷重	Pa	kN/m	978
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	0
	腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	0
	判定			O.K.
	分割細片に作用する上載荷重	q	kN/m ²	298
	載荷幅	$2b'$	m	7.36
	基礎マウンドに作用する水平荷重	H	kN/m	978
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	0
	腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	0
耐力作用比（許容値）			1.128	
耐力作用比（計算値）	R/S		1.128	

表-B.17 提案法により浸透流を考慮した

支持力検討結果【Case1-2】

	定義	記号	単位	値
堤体	堤体天端幅	B'	m	10.00
	堤体前面における水深	hc	m	12.00
	フーチング幅	b_F	m	1.50
	フーチング高	h_F	m	1.50
	腹付工の高さ	a	m	0.00
	堤体単位体積重量（気中）	γ_C	kN/m ³	21.00
	摩擦係数（摩擦増大マット）	f		0.75
	堤体気中重量	W	kN/m	3,034.50
	堤体底面幅	B	m	13.00
	波圧	静水面上の前面津波高さ	η_f	m
静水面上の背面津波高さ		η_r	m	0.00
堤体の前面における水深		h'	m	10.00
海水の単位体積重量		$\rho_0 g$	kN/m ³	10.10
静水面から直立壁天端面までの高さ		h_C	m	4.00
係数		a_1		1.05
係数		a_{1B}		0.90
静水面における前面波圧強度		p_1	kN/m ³	168.69
堤体上端部における前面波圧強度		p_2	kN/m ³	20.16
静水面における背面波圧強度		p_3	kN/m ³	90.94
フーチング上面における波圧（前面）	p'_1	kN/m ³	152.78	
フーチング上面における波圧（背面）	p'_3	kN/m ³	77.30	
合力	前面波力	P_1	kN/m	1,322
	背面波力	P_B	kN/m	455
	浮力	P_B	kN/m	1,460
	堤体重量	W	kN/m	3,035
	前側フーチング上面波力	P'_f	kN/m	229
	後側フーチング上面波力	P'_r	kN/m	116
	壁面摩擦による荷重	P_v	kN/m	0
腹付工の滑動抵抗力	R_s	kN/m	0	
モーメント	前面波力モーメント	M_{P1}	kN/m	8,918
	背面波力モーメント	M_{PB}	kN/m	2,183
	浮力合力モーメント	M_{PU}	kN/m	9,490
	堤体重量モーメント	M_W	kN/m	19,724
	前側フーチング上面波力モーメント	M_{Pf}	kN/m	2,807
	後側フーチング上面波力モーメント	M_{Pr}	kN/m	87
	壁面摩擦による荷重モーメント	M_{Pv}	kN/m	0
腹付工の滑動抵抗力によるモーメント	M_{Rs}	kN/m	0	
支持力	荷重分担比	r		1.0
	基礎マウンドに作用する水平荷重	Pa	kN/m	867
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	0
	腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	0
	判定			O.K.
	分割細片に作用する上載荷重	q	kN/m ²	288
	載荷幅	$2b'$	m	6.66
	基礎マウンドに作用する水平荷重	H	kN/m	867
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	0
	腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	0
耐力作用比（許容値）			1.144	
耐力作用比（計算値）	R/S		1.144	

表-B.18 提案法により浸透流を考慮した

支持力検討結果【Case1-3】

	定義	記号	単位	値
堤体	堤体天端幅	B'	m	10.00
	堤体前面における水深	hc	m	12.00
	フーチング幅	b_F	m	1.50
	フーチング高	h_F	m	1.50
	腹付工の高さ	a	m	0.00
	堤体単位体積重量 (気中)	γ_C	kN/m ³	21.00
	摩擦係数 (摩擦増大マット)	f		0.75
	堤体気中重量	W	kN/m	3,454.50
	堤体底面幅	B	m	13.00
	波圧	静水面上の前面津波高さ	η_f	m
静水面上の背面津波高さ		η_r	m	0.00
堤体の前面における水深		h'	m	12.00
海水の単位体積重量		$\rho_0 g$	kN/m ³	10.10
静水面から直立壁天端面までの高さ		h_C	m	4.00
係数		a_1		1.05
係数		a_{1B}		0.90
静水面における前面波圧強度		p_1	kN/m ³	182.48
堤体上端部における前面波圧強度		p_2	kN/m ³	12.73
静水面における背面波圧強度		p_3	kN/m ³	109.13
合力	前面波力	P_1	kN/m	1,562
	背面波力	P_B	kN/m	655
	浮力	P_B	kN/m	1,662
	堤体重量	W	kN/m	3,455
	前側フーチング上面波力	P'_f	kN/m	250
	後側フーチング上面波力	P'_r	kN/m	143
	壁面摩擦による荷重	P_v	kN/m	0
	腹付工の滑動抵抗力	R_s	kN/m	0
モーメント	前面波力モーメント	M_{P1}	kN/m	8,872
	背面波力モーメント	M_{PB}	kN/m	2,619
	浮力合力モーメント	M_{PU}	kN/m	10,804
	堤体重量モーメント	M_W	kN/m	22,454
	前側フーチング上面波力モーメント	M_{Pf}	kN/m	3,061
	後側フーチング上面波力モーメント	M_{Pr}	kN/m	107
	壁面摩擦による荷重モーメント	M_{Pv}	kN/m	0
	腹付工の滑動抵抗力によるモーメント	M_{Rs}	kN/m	0
支持力	荷重分担比	r		1.0
	基礎マウンドに作用する水平荷重	Pa	kN/m	907
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	0
	腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	0
	判定			O.K.
	分割細片に作用する上載荷重	q	kN/m ²	279
	載荷幅	$2b'$	m	7.84
	基礎マウンドに作用する水平荷重	H	kN/m	907
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	0
	腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	0
耐力作用比 (許容値)			1.144	
耐力作用比 (計算値)	R/S		1.146	

表-B.19 提案法により浸透流を考慮した

支持力検討結果【Case1-4】

	定義	記号	単位	値
堤体	堤体天端幅	B'	m	20.00
	堤体前面における水深	hc	m	12.00
	フーチング幅	b_F	m	1.50
	フーチング高	h_F	m	1.50
	腹付工の高さ	a	m	0.00
	堤体単位体積重量 (気中)	γ_C	kN/m ³	21.00
	摩擦係数 (摩擦増大マット)	f		0.75
	堤体気中重量	W	kN/m	6,814.50
	堤体底面幅	B	m	23.00
	波圧	静水面上の前面津波高さ	η_f	m
静水面上の背面津波高さ		η_r	m	0.00
堤体の前面における水深		h'	m	12.00
海水の単位体積重量		$\rho_0 g$	kN/m ³	10.10
静水面から直立壁天端面までの高さ		h_C	m	4.00
係数		a_1		1.05
係数		a_{1B}		0.90
静水面における前面波圧強度		p_1	kN/m ³	237.76
堤体上端部における前面波圧強度		p_2	kN/m ³	68.01
静水面における背面波圧強度		p_3	kN/m ³	109.13
合力	前面波力	P_1	kN/m	2,446
	背面波力	P_B	kN/m	655
	浮力	P_B	kN/m	3,279
	堤体重量	W	kN/m	6,815
	前側フーチング上面波力	P'_f	kN/m	333
	後側フーチング上面波力	P'_r	kN/m	143
	壁面摩擦による荷重	P_v	kN/m	0
	腹付工の滑動抵抗力	R_s	kN/m	0
モーメント	前面波力モーメント	M_{P1}	kN/m	15,948
	背面波力モーメント	M_{PB}	kN/m	2,619
	浮力合力モーメント	M_{PU}	kN/m	37,707
	堤体重量モーメント	M_W	kN/m	78,367
	前側フーチング上面波力モーメント	M_{Pf}	kN/m	7,404
	後側フーチング上面波力モーメント	M_{Pr}	kN/m	107
	壁面摩擦による荷重モーメント	M_{Pv}	kN/m	0
	腹付工の滑動抵抗力によるモーメント	M_{Rs}	kN/m	0
支持力	荷重分担比	r		1.0
	基礎マウンドに作用する水平荷重	Pa	kN/m	1,791
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	0
	腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	0
	判定			O.K.
	分割細片に作用する上載荷重	q	kN/m ²	231
	載荷幅	$2b'$	m	17.38
	基礎マウンドに作用する水平荷重	H	kN/m	1,791
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	0
	腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	0
耐力作用比 (許容値)			1.268	
耐力作用比 (計算値)	R/S		1.267	

表-B.20 提案法により浸透流を考慮した

支持力検討結果【Case2-1】

	定義	記号	単位	値	
堤体	堤体天端幅	B'	m	10.00	
	堤体前面における水深	hc	m	12.00	
	フーチング幅	b_F	m	1.50	
	フーチング高	h_F	m	1.50	
	腹付工の高さ	a	m	5.33	
	堤体単位体積重量 (気中)	γ_C	kN/m ³	21.00	
	摩擦係数 (摩擦増大マット)	f		0.75	
	堤体気中重量	W	kN/m	3,454.50	
	堤体底面幅	B	m	13.00	
	波圧	静水面上の前面津波高さ	η_f	m	8.50
静水面上の背面津波高さ		η_r	m	0.00	
堤体の前面における水深		h'	m	12.00	
海水の単位体積重量		$\rho_0 g$	kN/m ³	10.10	
静水面から直立壁天端面までの高さ		h_C	m	4.00	
係数		a_1		1.05	
係数		a_{1B}		0.90	
静水面における前面波圧強度		p_1	kN/m ³	217.50	
堤体上端部における前面波圧強度		p_2	kN/m ³	47.74	
静水面における背面波圧強度		p_3	kN/m ³	109.13	
合力	前面波力	P_1	kN/m	2,122	
	背面波力	P_B	kN/m	655	
	浮力	P_B	kN/m	1,662	
	堤体重量	W	kN/m	3,455	
	前側フーチング上面波力	P'_f	kN/m	302	
	後側フーチング上面波力	P'_r	kN/m	143	
	壁面摩擦による荷重	P_v	kN/m	206	
	腹付工の滑動抵抗力	R_s	kN/m	770	
	モーメント	前面波力モーメント	M_{P1}	kN/m	13,354
		背面波力モーメント	M_{PB}	kN/m	2,619
浮力合力モーメント		M_{PU}	kN/m	10,804	
堤体重量モーメント		M_W	kN/m	22,454	
前側フーチング上面波力モーメント		M_{Pf}	kN/m	3,704	
後側フーチング上面波力モーメント		M_{Pr}	kN/m	107	
壁面摩擦による荷重モーメント		M_{Pv}	kN/m	0	
支持力	腹付工の滑動抵抗力によるモーメント	M_{Rs}	kN/m	1,368	
	荷重分担比	r		0.50	
	基礎マウンドに作用する水平荷重	Pa	kN/m	734	
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	734	
	腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	197	
	判定			O.K.	
	分割細片に作用する上載荷重	q	kN/m ²	346	
	載荷幅	$2b'$	m	5.90	
	基礎マウンドに作用する水平荷重	H	kN/m	734	
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	734	
腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	197		
耐力作用比 (許容値)			1.200		
耐力作用比 (計算値)	R/S		1.199		

表-B.21 提案法により浸透流を考慮した

支持力検討結果【Case2-2】

	定義	記号	単位	値	
堤体	堤体天端幅	B'	m	10.00	
	堤体前面における水深	hc	m	12.00	
	フーチング幅	b_F	m	1.50	
	フーチング高	h_F	m	1.50	
	腹付工の高さ	a	m	5.33	
	堤体単位体積重量 (気中)	γ_C	kN/m ³	21.00	
	摩擦係数 (摩擦増大マット)	f		0.75	
	堤体気中重量	W	kN/m	3,034.50	
	堤体底面幅	B	m	13.00	
	波圧	静水面上の前面津波高さ	η_f	m	8.80
静水面上の背面津波高さ		η_r	m	0.00	
堤体の前面における水深		h'	m	10.00	
海水の単位体積重量		$\rho_0 g$	kN/m ³	10.10	
静水面から直立壁天端面までの高さ		h_C	m	4.00	
係数		a_1		1.05	
係数		a_{1B}		0.90	
静水面における前面波圧強度		p_1	kN/m ³	199.46	
堤体上端部における前面波圧強度		p_2	kN/m ³	50.93	
静水面における背面波圧強度		p_3	kN/m ³	90.94	
合力	前面波力	P_1	kN/m	1,753	
	背面波力	P_B	kN/m	455	
	浮力	P_B	kN/m	1,460	
	堤体重量	W	kN/m	3,035	
	前側フーチング上面波力	P'_f	kN/m	275	
	後側フーチング上面波力	P'_r	kN/m	116	
	壁面摩擦による荷重	P_v	kN/m	206	
	腹付工の滑動抵抗力	R_s	kN/m	770	
	モーメント	前面波力モーメント	M_{P1}	kN/m	12,856
		背面波力モーメント	M_{PB}	kN/m	2,183
浮力合力モーメント		M_{PU}	kN/m	9,490	
堤体重量モーメント		M_W	kN/m	19,724	
前側フーチング上面波力モーメント		M_{Pf}	kN/m	3,373	
後側フーチング上面波力モーメント		M_{Pr}	kN/m	87	
壁面摩擦による荷重モーメント		M_{Pv}	kN/m	0	
支持力	腹付工の滑動抵抗力によるモーメント	M_{Rs}	kN/m	1,368	
	荷重分担比	r		0.50	
	基礎マウンドに作用する水平荷重	Pa	kN/m	649	
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	649	
	腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	174	
	判定			O.K.	
	分割細片に作用する上載荷重	q	kN/m ²	385	
	載荷幅	$2b'$	m	4.66	
	基礎マウンドに作用する水平荷重	H	kN/m	649	
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	649	
腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	174		
耐力作用比 (許容値)			1.216		
耐力作用比 (計算値)	R/S		1.216		

表-B.22 提案法により浸透流を考慮した
支持力検討結果【Case2-3】

	定義	記号	単位	値	
堤体	堤体天端幅	B'	m	10.00	
	堤体前面における水深	hc	m	12.00	
	フーチング幅	b_F	m	1.50	
	フーチング高	h_F	m	1.50	
	腹付工の高さ	a	m	5.33	
	堤体単位体積重量(気中)	γ_C	kN/m ³	21.00	
	摩擦係数(摩擦増大マット)	f		0.75	
	堤体気中重量	W	kN/m	3,454.50	
	堤体底面幅	B	m	13.00	
	波圧	静水面上の前面津波高さ	η_f	m	8.08
静水面上の背面津波高さ		η_r	m	0.00	
堤体の前面における水深		h'	m	12.00	
海水の単位体積重量		$\rho_0 g$	kN/m ³	10.10	
静水面から直立壁天端面までの高さ		h_C	m	4.00	
係数		a_1		1.05	
係数		a_{1B}		0.90	
静水面における前面波圧強度		p_1	kN/m ³	213.04	
堤体上端部における前面波圧強度		p_2	kN/m ³	43.29	
静水面における背面波圧強度		p_3	kN/m ³	109.13	
合力	前面波力	P_1	kN/m	2,051	
	背面波力	P_B	kN/m	655	
	浮力	P_B	kN/m	1,662	
	堤体重量	W	kN/m	3,455	
	前側フーチング上面波力	P'_f	kN/m	296	
	後側フーチング上面波力	P'_r	kN/m	143	
	壁面摩擦による荷重	P_v	kN/m	206	
	腹付工の滑動抵抗力	R_s	kN/m	770	
	モーメント	前面波力モーメント	M_{P1}	kN/m	12,783
		背面波力モーメント	M_{PB}	kN/m	2,619
浮力合力モーメント		M_{PU}	kN/m	10,804	
堤体重量モーメント		M_W	kN/m	22,454	
前側フーチング上面波力モーメント		M_{Pf}	kN/m	3,622	
後側フーチング上面波力モーメント		M_{Pr}	kN/m	107	
壁面摩擦による荷重モーメント		M_{Pv}	kN/m	0	
支持力	腹付工の滑動抵抗力によるモーメント	M_{Rs}	kN/m	1,368	
	荷重分担比	r		0.5	
	基礎マウンドに作用する水平荷重	Pa	kN/m	698	
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	698	
	腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	187	
	判定			O.K.	
	分割細片に作用する上載荷重	q	kN/m ²	323	
	載荷幅	$2b'$	m	6.32	
	基礎マウンドに作用する水平荷重	H	kN/m	698	
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	698	
腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	187		
耐力作用比(許容値)			1.220		
耐力作用比(計算値)	R/S		1.218		

表-B.23 提案法により浸透流を考慮した
支持力検討結果【Case2-4】

	定義	記号	単位	値	
堤体	堤体天端幅	B'	m	20.00	
	堤体前面における水深	hc	m	12.00	
	フーチング幅	b_F	m	1.50	
	フーチング高	h_F	m	1.50	
	腹付工の高さ	a	m	5.33	
	堤体単位体積重量(気中)	γ_C	kN/m ³	21.00	
	摩擦係数(摩擦増大マット)	f		0.75	
	堤体気中重量	W	kN/m	6,814.50	
	堤体底面幅	B	m	23.00	
	波圧	静水面上の前面津波高さ	η_f	m	13.50
静水面上の背面津波高さ		η_r	m	0.00	
堤体の前面における水深		h'	m	12.00	
海水の単位体積重量		$\rho_0 g$	kN/m ³	10.10	
静水面から直立壁天端面までの高さ		h_C	m	4.00	
係数		a_1		1.05	
係数		a_{1B}		0.90	
静水面における前面波圧強度		p_1	kN/m ³	270.54	
堤体上端部における前面波圧強度		p_2	kN/m ³	100.79	
静水面における背面波圧強度		p_3	kN/m ³	109.13	
合力	前面波力	P_1	kN/m	2,971	
	背面波力	P_B	kN/m	655	
	浮力	P_B	kN/m	3,279	
	堤体重量	W	kN/m	6,815	
	前側フーチング上面波力	P'_f	kN/m	382	
	後側フーチング上面波力	P'_r	kN/m	143	
	壁面摩擦による荷重	P_v	kN/m	206	
	腹付工の滑動抵抗力	R_s	kN/m	770	
	モーメント	前面波力モーメント	M_{P1}	kN/m	20,144
		背面波力モーメント	M_{PB}	kN/m	2,619
浮力合力モーメント		M_{PU}	kN/m	37,707	
堤体重量モーメント		M_W	kN/m	78,367	
前側フーチング上面波力モーメント		M_{Pf}	kN/m	8,498	
後側フーチング上面波力モーメント		M_{Pr}	kN/m	107	
壁面摩擦による荷重モーメント		M_{Pv}	kN/m	0	
支持力	腹付工の滑動抵抗力によるモーメント	M_{Rs}	kN/m	1,368	
	荷重分担比	r		0.67	
	基礎マウンドに作用する水平荷重	Pa	kN/m	1,552	
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	764	
	腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	205	
	判定			O.K.	
	分割細片に作用する上載荷重	q	kN/m ²	225	
	載荷幅	$2b'$	m	17.16	
	基礎マウンドに作用する水平荷重	H	kN/m	1,552	
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	764	
腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	205		
耐力作用比(許容値)			1.356		
耐力作用比(計算値)	R/S		1.355		

表-B. 24 提案法により浸透流を考慮した

支持力検討結果【Case3-1】

	定義	記号	単位	値
堤体	堤体天端幅	B'	m	10.00
	堤体前面における水深	hc	m	12.00
	フーチング幅	b_F	m	1.50
	フーチング高	h_F	m	1.50
	腹付工の高さ	a	m	5.33
	堤体単位体積重量 (気中)	γ_C	kN/m ³	21.00
	摩擦係数 (摩擦増大マット)	f		0.75
	堤体気中重量	W	kN/m	3,454.50
	堤体底面幅	B	m	13.00
	波圧	静水面上の前面津波高さ	η_f	m
静水面上の背面津波高さ		η_r	m	0.00
堤体の前面における水深		h'	m	12.00
海水の単位体積重量		$\rho_0 g$	kN/m ³	10.10
静水面から直立壁天端面までの高さ		h_C	m	4.00
係数		a_1		1.05
係数		a_{IB}		0.90
静水面における前面波圧強度		p_1	kN/m ³	232.14
堤体上端部における前面波圧強度		p_2	kN/m ³	62.38
静水面における背面波圧強度		p_3	kN/m ³	109.13
フーチング上面における波圧 (前面)		p'_1	kN/m ³	216.22
フーチング上面における波圧 (背面)		p'_3	kN/m ³	95.49
合力	前面波力	P_1	kN/m	2,356
	背面波力	P_B	kN/m	655
	浮力	P_B	kN/m	1,662
	堤体重量	W	kN/m	3,455
	前側フーチング上面波力	P'_f	kN/m	324
	後側フーチング上面波力	P'_r	kN/m	143
	壁面摩擦による荷重	P_v	kN/m	303
腹付工の滑動抵抗力	R_s	kN/m	1,130	
モーメント	前面波力モーメント	M_{P1}	kN/m	15,228
	背面波力モーメント	M_{PB}	kN/m	2,619
	浮力合力モーメント	M_{PU}	kN/m	10,804
	堤体重量モーメント	M_W	kN/m	22,454
	前側フーチング上面波力モーメント	M_{Pf}	kN/m	3,973
	後側フーチング上面波力モーメント	M_{Pr}	kN/m	107
	壁面摩擦による荷重モーメント	M_{Pv}	kN/m	0
腹付工の滑動抵抗力によるモーメント	M_{Rs}	kN/m	2,008	
支持力	荷重分担比	r		0.5
	基礎マウンドに作用する水平荷重	Pa	kN/m	851
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	851
	腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	228
	判定			O.K.
	分割細片に作用する上載荷重	q	kN/m ²	446
	載荷幅	$2b'$	m	4.56
	基礎マウンドに作用する水平荷重	H	kN/m	851
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	851
	腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	228
	耐力作用比 (許容値)			1.236
耐力作用比 (計算値)	R/S		1.239	

表-B. 25 提案法により浸透流を考慮した

支持力検討結果【Case3-2】

	定義	記号	単位	値
堤体	堤体天端幅	B'	m	10.00
	堤体前面における水深	hc	m	12.00
	フーチング幅	b_F	m	1.50
	フーチング高	h_F	m	1.50
	腹付工の高さ	a	m	5.33
	堤体単位体積重量 (気中)	γ_C	kN/m ³	21.00
	摩擦係数 (摩擦増大マット)	f		0.75
	堤体気中重量	W	kN/m	3,454.50
	堤体底面幅	B	m	13.00
	波圧	静水面上の前面津波高さ	η_f	m
静水面上の背面津波高さ		η_r	m	0.00
堤体の前面における水深		h'	m	12.00
海水の単位体積重量		$\rho_0 g$	kN/m ³	10.10
静水面から直立壁天端面までの高さ		h_C	m	4.00
係数		a_1		1.05
係数		a_{IB}		0.90
静水面における前面波圧強度		p_1	kN/m ³	202.64
堤体上端部における前面波圧強度		p_2	kN/m ³	32.89
静水面における背面波圧強度		p_3	kN/m ³	109.13
フーチング上面における波圧 (前面)		p'_1	kN/m ³	186.73
フーチング上面における波圧 (背面)		p'_3	kN/m ³	95.49
合力	前面波力	P_1	kN/m	1,884
	背面波力	P_B	kN/m	655
	浮力	P_B	kN/m	1,662
	堤体重量	W	kN/m	3,455
	前側フーチング上面波力	P'_f	kN/m	280
	後側フーチング上面波力	P'_r	kN/m	143
	壁面摩擦による荷重	P_v	kN/m	171
腹付工の滑動抵抗力	R_s	kN/m	640	
モーメント	前面波力モーメント	M_{P1}	kN/m	11,453
	背面波力モーメント	M_{PB}	kN/m	2,619
	浮力合力モーメント	M_{PU}	kN/m	10,804
	堤体重量モーメント	M_W	kN/m	22,454
	前側フーチング上面波力モーメント	M_{Pf}	kN/m	3,431
	後側フーチング上面波力モーメント	M_{Pr}	kN/m	107
	壁面摩擦による荷重モーメント	M_{Pv}	kN/m	0
腹付工の滑動抵抗力によるモーメント	M_{Rs}	kN/m	1,137	
支持力	荷重分担比	r		0.5
	基礎マウンドに作用する水平荷重	Pa	kN/m	615
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	615
	腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	165
	判定			O.K.
	分割細片に作用する上載荷重	q	kN/m ²	282
	載荷幅	$2b'$	m	7.26
	基礎マウンドに作用する水平荷重	H	kN/m	615
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	615
	腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	165
	耐力作用比 (許容値)			1.172
耐力作用比 (計算値)	R/S		1.174	

表-B. 26 提案法により浸透流を考慮した
支持力検討結果【Case3-3】

	定義	記号	単位	値
堤体	堤体天端幅	B'	m	10.00
	堤体前面における水深	hc	m	12.00
	フーチング幅	b_F	m	1.50
	フーチング高	h_F	m	1.50
	腹付工の高さ	a	m	4.00
	堤体単位体積重量 (気中)	γ_C	kN/m ³	21.00
	摩擦係数 (摩擦増大マット)	f		0.75
	堤体気中重量	W	kN/m	3,454.50
	堤体底面幅	B	m	13.00
	波圧	静水面上の前面津波高さ	η_f	m
静水面上の背面津波高さ		η_r	m	0.00
堤体の前面における水深		h'	m	12.00
海水の単位体積重量		$\rho_0 g$	kN/m ³	10.10
静水面から直立壁天端面までの高さ		h_C	m	4.00
係数		a_1		1.05
係数		a_{1B}		0.90
静水面における前面波圧強度		p_1	kN/m ³	207.95
堤体上端部における前面波圧強度		p_2	kN/m ³	38.19
静水面における背面波圧強度		p_3	kN/m ³	109.13
合力	前面波力	P_1	kN/m	1,969
	背面波力	P_B	kN/m	655
	浮力	P_B	kN/m	1,662
	堤体重量	W	kN/m	3,455
	前側フーチング上面波力	P'_f	kN/m	288
	後側フーチング上面波力	P'_r	kN/m	143
	壁面摩擦による荷重	P_v	kN/m	147
モーメント	腹付工の滑動抵抗力	R_s	kN/m	550
	前面波力モーメント	M_{P1}	kN/m	12,132
	背面波力モーメント	M_{PB}	kN/m	2,619
	浮力合力モーメント	M_{PU}	kN/m	10,804
	堤体重量モーメント	M_W	kN/m	22,454
	前側フーチング上面波力モーメント	M_{Pf}	kN/m	3,529
	後側フーチング上面波力モーメント	M_{Pr}	kN/m	107
支持力	壁面摩擦による荷重モーメント	M_{Pv}	kN/m	0
	腹付工の滑動抵抗力によるモーメント	M_{Rs}	kN/m	733
	荷重分担比	r		0.59
	基礎マウンドに作用する水平荷重	Pa	kN/m	775
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	539
	腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	144
	判定			O.K.
	分割細片に作用する上載荷重	q	kN/m ²	333
	載荷幅	$2b'$	m	6.24
	基礎マウンドに作用する水平荷重	H	kN/m	775
腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	539	
腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	144	
耐力作用比 (許容値)			1.180	
耐力作用比 (計算値)	R/S		1.175	

表-B. 27 提案法により浸透流を考慮した
支持力検討結果【Case3-4】

	定義	記号	単位	値
堤体	堤体天端幅	B'	m	10.00
	堤体前面における水深	hc	m	12.00
	フーチング幅	b_F	m	1.50
	フーチング高	h_F	m	1.50
	腹付工の高さ	a	m	4.00
	堤体単位体積重量 (気中)	γ_C	kN/m ³	21.00
	摩擦係数 (摩擦増大マット)	f		0.75
	堤体気中重量	W	kN/m	3,454.50
	堤体底面幅	B	m	13.00
	波圧	静水面上の前面津波高さ	η_f	m
静水面上の背面津波高さ		η_r	m	0.00
堤体の前面における水深		h'	m	12.00
海水の単位体積重量		$\rho_0 g$	kN/m ³	10.10
静水面から直立壁天端面までの高さ		h_C	m	4.00
係数		a_1		1.05
係数		a_{1B}		0.90
静水面における前面波圧強度		p_1	kN/m ³	223.86
堤体上端部における前面波圧強度		p_2	kN/m ³	54.11
静水面における背面波圧強度		p_3	kN/m ³	109.13
合力	フーチング上面における波圧 (前面)	p'_1	kN/m ³	207.95
	フーチング上面における波圧 (背面)	p'_3	kN/m ³	95.49
	前面波力	P_1	kN/m	2,224
	背面波力	P_B	kN/m	655
	浮力	P_B	kN/m	1,662
	堤体重量	W	kN/m	3,455
	前側フーチング上面波力	P'_f	kN/m	312
モーメント	後側フーチング上面波力	P'_r	kN/m	143
	壁面摩擦による荷重	P_v	kN/m	228
	腹付工の滑動抵抗力	R_s	kN/m	850
	前面波力モーメント	M_{P1}	kN/m	14,169
	背面波力モーメント	M_{PB}	kN/m	2,619
	浮力合力モーメント	M_{PU}	kN/m	10,804
	堤体重量モーメント	M_W	kN/m	22,454
支持力	前側フーチング上面波力モーメント	M_{Pf}	kN/m	3,821
	後側フーチング上面波力モーメント	M_{Pr}	kN/m	107
	壁面摩擦による荷重モーメント	M_{Pv}	kN/m	0
	腹付工の滑動抵抗力によるモーメント	M_{Rs}	kN/m	1,133
	荷重分担比	r		0.5
	基礎マウンドに作用する水平荷重	Pa	kN/m	784
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	784
	腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	210
	判定			O.K.
	分割細片に作用する上載荷重	q	kN/m ²	409
載荷幅	$2b'$	m	4.98	
基礎マウンドに作用する水平荷重	H	kN/m	784	
腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	784	
腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	210	
耐力作用比 (許容値)			1.208	
耐力作用比 (計算値)	R/S		1.207	

表-B. 28 提案法により浸透流を考慮した
支持力検討結果【Case3-5】

	定義	記号	単位	値
堤体	堤体天端幅	B'	m	10.00
	堤体前面における水深	hc	m	12.00
	フーチング幅	b_F	m	1.50
	フーチング高	h_F	m	1.50
	腹付工の高さ	a	m	10.67
	堤体単位体積重量（気中）	γ_C	kN/m ³	21.00
	摩擦係数（摩擦増大マット）	f		0.75
	堤体気中重量	W	kN/m	3,454.50
	堤体底面幅	B	m	13.00
波圧	静水面上の前面津波高さ	η_f	m	11.90
	静水面上の背面津波高さ	η_r	m	0.00
	堤体の前面における水深	h'	m	12.00
	海水の単位体積重量	ρ_{0g}	kN/m ³	10.10
	静水面から直立壁天端面までの高さ	h_C	m	4.00
	係数	a_1		1.05
	係数	a_{1B}		0.90
	静水面における前面波圧強度	p_1	kN/m ³	253.57
	堤体上端部における前面波圧強度	p_2	kN/m ³	83.82
	静水面における背面波圧強度	p_3	kN/m ³	109.13
	フーチング上面における波圧（前面）	p'_1	kN/m ³	237.65
フーチング上面における波圧（背面）	p'_3	kN/m ³	95.49	
合力	前面波力	P_1	kN/m	2,699
	背面波力	P_B	kN/m	655
	浮力	P_B	kN/m	1,662
	堤体重量	W	kN/m	3,455
	前側フーチング上面波力	P'_f	kN/m	356
	後側フーチング上面波力	P'_r	kN/m	143
	壁面摩擦による荷重	P_v	kN/m	520
腹付工の滑動抵抗力	R_s	kN/m	1,940	
モーメント	前面波力モーメント	M_{P1}	kN/m	17,971
	背面波力モーメント	M_{PB}	kN/m	2,619
	浮力合力モーメント	M_{PU}	kN/m	10,804
	堤体重量モーメント	M_W	kN/m	22,454
	前側フーチング上面波力モーメント	$M_{P'f}$	kN/m	4,367
	後側フーチング上面波力モーメント	$M_{P'r}$	kN/m	107
	壁面摩擦による荷重モーメント	$M_{P'r}$	kN/m	0
腹付工の滑動抵抗力によるモーメント	M_{R_s}	kN/m	6,900	
支持力	荷重分担比	r		0.5
	基礎マウンドに作用する水平荷重	Pa	kN/m	1,022
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	1,022
	腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	274
	判定			O.K.
	分割細片に作用する上載荷重	q	kN/m ²	463
	載荷幅	$2b'$	m	4.36
	基礎マウンドに作用する水平荷重	H	kN/m	1,022
	腹付工に作用する水平荷重	Pb	kN/m	1,022
	腹付工に作用する鉛直荷重	Pv	kN/m	274
	耐力作用比（許容値）			1.320
耐力作用比（計算値）	RS		1.314	

4. すべり面発生位置（提案法で浸透流を考慮した場合）

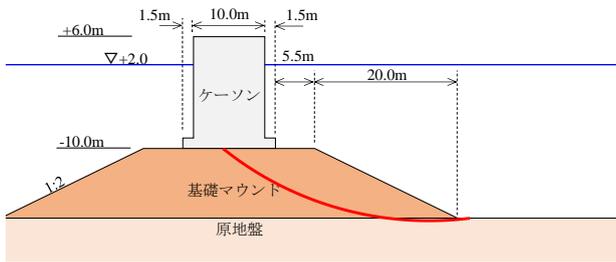


図-B.14 すべり面発生位置【Case1-1】（提案法）

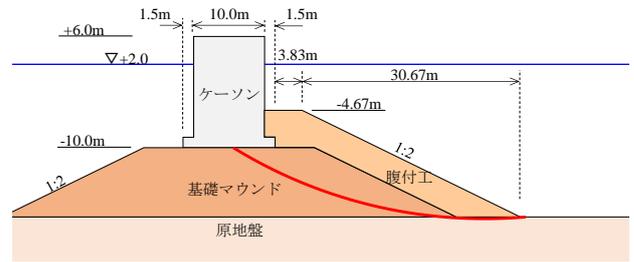


図-B.18 すべり面発生位置【Case2-1】（提案法）

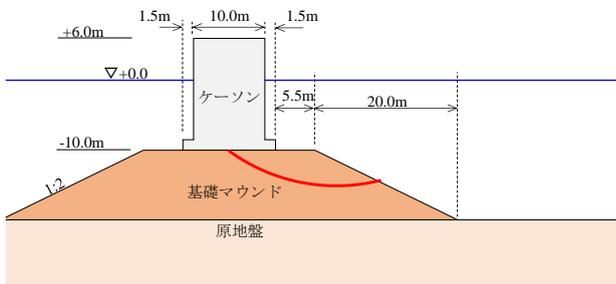


図-B.15 すべり面発生位置【Case1-2】（提案法）

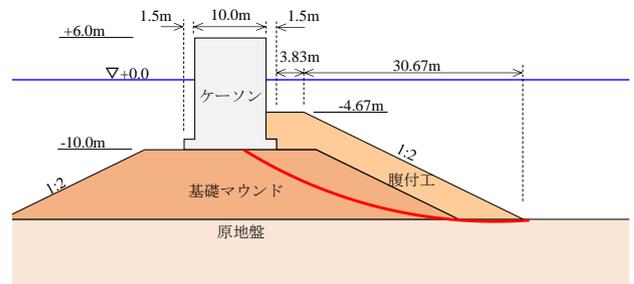


図-B.19 すべり面発生位置【Case2-2】（提案法）

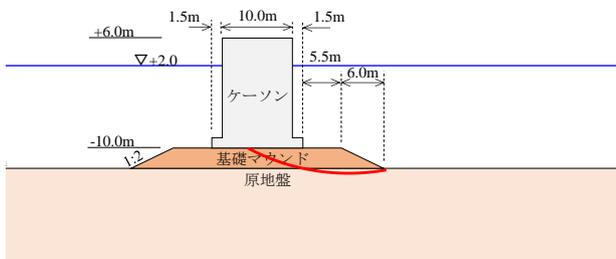


図-B.16 すべり面発生位置【Case1-3】（提案法）

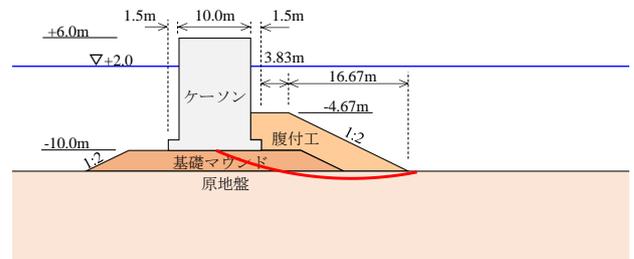


図-B.20 すべり面発生位置【Case2-3】（提案法）

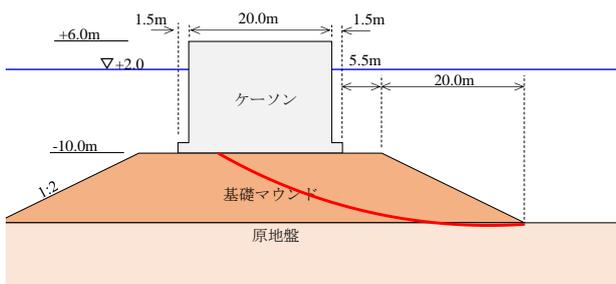


図-B.17 すべり面発生位置【Case1-4】（提案法）

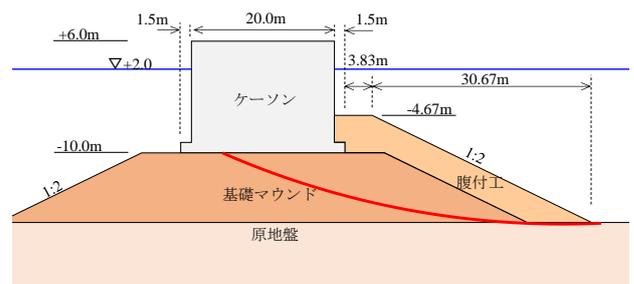


図-B.21 すべり面発生位置【Case2-4】（提案法）

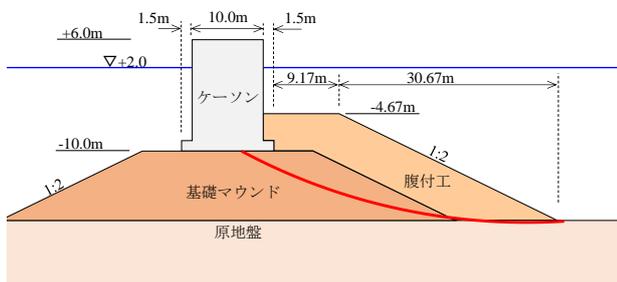


図-B.22 すべり面発生位置【Case3-1】（提案法）

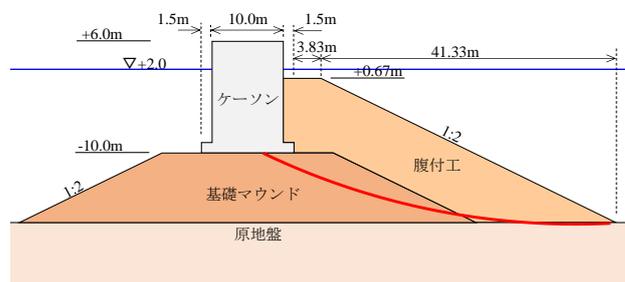


図-B.26 すべり面発生位置【Case3-5】（提案法）

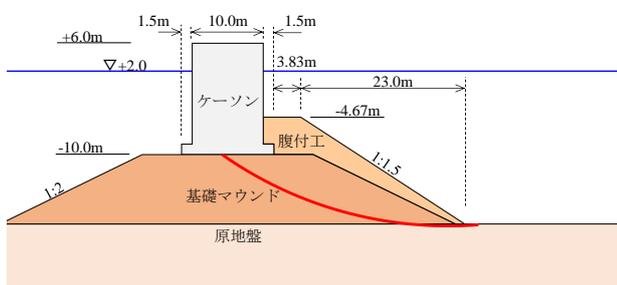


図-B.23 すべり面発生位置【Case3-2】（提案法）

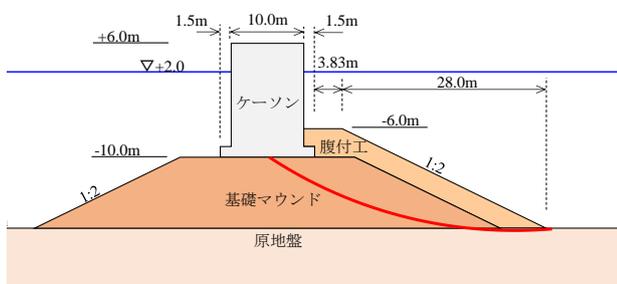


図-B.24 すべり面発生位置【Case3-3】（提案法）

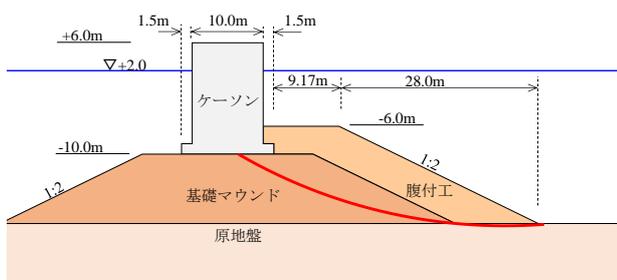


図-B.25 すべり面発生位置【Case3-4】（提案法）

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 994 October 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