

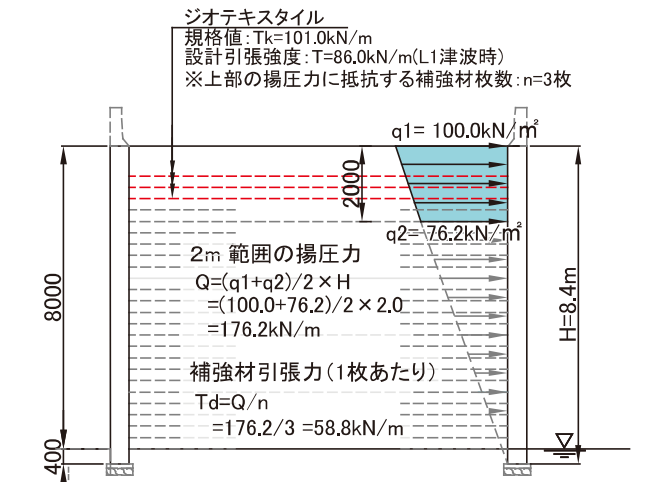


図-10 津波越流時における補強材の損傷の照査の概要図

(4) 支持地盤の侵食に伴う盛土体照査

津波越流時にセメント改良礫土スラブの支持地盤が侵食された際には、スラブは片持ち梁として盛土荷重を支えることで盛土体の安定性を維持する必要がある。過去の越流実験⁹⁾によると、壁高の15%程度の越流水深に対して壁体からの洗掘位置は壁高の1.2倍程度と離れており、越流実験に比べ実地盤は道路や宅地(家屋、樹木)など侵食されにくい地盤で構成されることが多いことから、実際には補強土擁壁直下の支持地盤まで侵食が進行しにくいと考えられるが、壁高の20%の長さに対応する1.5m分が侵食された場合を想定し照査を実施した(図-11)。

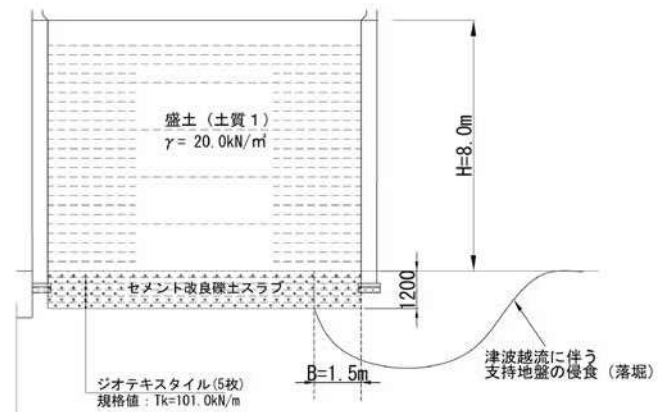


図-11 支持地盤の侵食に伴う盛土体の照査の概要図

スラブに働く曲げモーメントは、支持地盤の侵食範囲の端部をヒンジ部としてスラブに作用する盛土荷重にヒンジ部から作用中心までの距離を乗じることで算定する。スラブの耐力は、鉄道総研で実施した過去の曲げ試験から、ヒンジ部からの距離とジオテキスタイルの設計引張強度を乗じた値を耐力として設定することで安全側に設定できることが確認されている⁷⁾。算定結果は図-12に示すとおりであり、スラブ厚1200mm、鉛直間隔200mmで5枚のジオテキスタイル(Tk=101kN/m)を配置することで照査を満足する結果となった。

なお、津波越流を考慮しない場合、または、越流による壁体前面の支持地盤の侵食対策が別途実施される場合は、セメント改良礫土スラブの構築は不要であり「支持地盤の侵食に伴う盛土体照査」も不要である。

【編集委員会名簿】

委員長：佐藤靖彦(西松建設㈱) 委員：神田隆真(前田建設工業㈱)・田中翔太(㈱クラレ)・西村淳(前田工繊産資㈱)・小阪拓哉(㈱複合技術研究所) 事務局：田村幸彦・川上美子(㈱複合技術研究所)

【協会事務局】

〒160-0004 東京都四谷1-23-6 協立四谷ビル5F ㈱複合技術研究所内
TEL:03-5368-4103 FAX:03-5368-4105 ホームページ <https://www.rrr-sys.gr.jp>

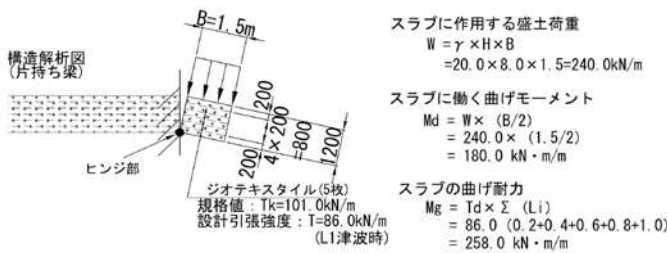


図-12 セメント改良礫土スラブに働く荷重及び耐力

(5) 耐津波性に対する照査結果のまとめ

本設計例における耐津波性に対する照査結果は表-5に示すとおりであり、すべての照査項目で照査を満足した。

表-5 本設計例における耐津波性に対する照査結果

照査項目	照査指標	設計応答値 I_{Rd}	設計限界値 I_{Ld}	構造物係数 γ_i	照査値 $\gamma_i \cdot I_{Rd} / I_{Ld}$	判定
盛土体の安定	底面摩擦力	544.4 kN/m	1342.5 kN/m	1.0	0.406 < 1.0	OK
壁体の損傷	モーメント	271.3 kN・m/m	302.7 kN・m/m	1.0	0.896 < 1.0	OK
	せん断力	217.2 kN/m	1638.1 kN/m	1.0	0.133 < 1.0	OK
補強材の損傷	破断	58.8 kN/m	86.0 kN/m	1.0	0.684 < 1.0	OK
支持地盤の侵食	モーメント	180.0 kN・m/m	258.0 kN・m/m	1.0	0.698 < 1.0	OK

5.終わりに

本文では令和6年11月に作成したRRR-D工法の設計計算例の内容について説明した。設計計算例として想定したRRR-D工法の構造仕様は、多種多様な構造仕様案の一例であり、実際の設計においては、必要とされる耐津波性能や周辺環境、施工性、経済性等に留意し、適切に選定されることが望まれる。設計計算例の付属資料には、構造仕様の例と構造の選定フローを記載しているため、構造仕様を決める上での参考としていただければ幸いである。上記のほか紙面の都合上、記載できていない内容は多くあるため、詳細については設計計算例¹⁾を参照されたい。RRR-D工法の施工実績は決して多くない状況であるが、設計計算例および本文を通し、海岸や河川沿いの擁壁として本構造が採用されることに繋がれば幸いである。

【参考文献】

- 1) RRR工法協会:RRR-D工法(水際防災補強盛土工法)設計計算例, 令和6年11月
- 2) 日本港湾協会:港湾の施設の技術上の基準・同解説, 平成30年5月
- 3) RRR工法協会:「RRR工法 材料マニュアル」, 令和6年11月
- 4) 鉄道総合技術研究所編 鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物,丸善出版,平成16年4月
- 5) 日本道路協会:「道路橋示方書・同解説 IV下部構造編」, 平成29年1月
- 6) 有川太郎他:越流による直立型堤防背後の洗堀量に関する研究,土木学会論文集B2(海岸工学),Vol.70,No.2,2014
- 7) 渡邊健治:セメント改良礫土を用いた軟弱地盤上への盛土構築方法, 土木施工,Vol.50,No.7,pp.17-21,2009

RRR工法協会だより

Reinforced Road with Rigid Facing Construction System

No.56 2025.9

『RRR-D工法 (水際防災補強盛土工法) 設計計算例』の概要 株式会社 複合技術研究所 山田 康裕

1.はじめに

RRR-D工法(水際防災補強盛土工法)は、盛土を面状補強材で補強し、補強材と連結した剛な壁面工を構築した洪水・波浪・津波に対して粘り強く抵抗するRRR盛土補強土擁壁工法である。河岸や海岸における護岸擁壁としては、従来形式の擁壁が用いられることが一般的であるが、支持地盤の洗掘により擁壁が転倒し、背面の盛土が流出することで大きな侵食・崩壊が発生することがある。一方で、RRR-D工法はRC壁面が補強材を介して背面盛土と結合しているため、擁壁の洗掘に対して高い安定性を発揮し、侵食・崩壊を防ぐことができる。また、盛土天端の被覆や地盤改良等による支持地盤の対策を行うことで津波の越流による侵食に対しても抵抗することが可能である。現時点ではRRR-D工法の施工実績は少ないが、波浪・津波に対する性能が評価され東日本大震災の津波により甚大な被害が発生した三陸鉄道北リアス線の島越駅付近の橋梁および高架橋の復旧として本工法が採用されたほか、平成19年9月に上陸した台風9号の波浪・越波により被災した国道1号西湘バイパス(自動車専用道路)の海岸擁壁の復旧として約1km区間にわたり、本工法が採用された(写真-1)。当協会ではRRR-D工法のさらなる普及を目指し、西湘バイパスの復旧工法として採用された設計事例を参考にし、RRR-D工法の設計計算例¹⁾を令和6年11月に発行した。本文では、RRR-D工法設計計算例の概要を紹介する。

2.RRR-D工法の設計の概要

RRR-D工法の用途は大きく分けて2つあり、津波や高潮から陸地を守ることを目的に築造する防潮堤タイプと海岸に面した耐波浪・耐津波機能を持たせた道路や鉄道に適用する擁壁タイプである。当面は、海岸に面した擁壁タイプの適用が想定されるため、擁壁タイプの設計について計算例を作成した。擁壁タイプはRRR-B(剛壁面盛土補強土擁壁)工法を水際での利用に特化させたものであることから、RRR-B工法の設計フローに図-1に示す青字で記載した下記の項目を追加した内容で実施する。

- 「耐津波性能」: 津波に対する新たな要求性能のランクであり(表-1)、要求性能に応じた設計ができるようにした。
- 「耐津波性の照査」: 水際特有の外力(津波)に対する照査であり具体的には図-2に示す4種類である。
- 「津波高さ・安全係数」: 耐津波性の照査を実施するための外力(津波高さ)の設定および照査で適用する安全係数の設定である。

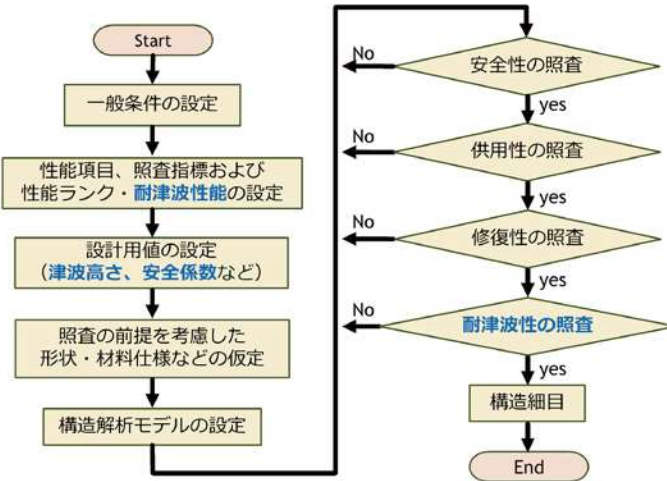


図-1 RRR-D工法の設計のフロー

表-1 耐津波性能

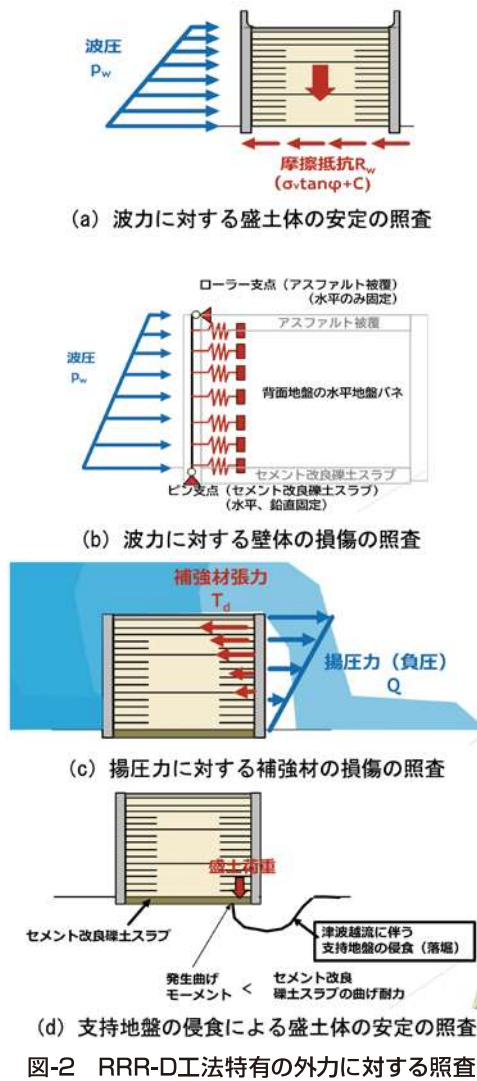
	耐津波性能Ⅰ	耐津波性能Ⅱ	耐津波性能Ⅲ
要求性能 の水準	Ⅰ津波に対しても過大な 変形が生じない性能を有 する擁壁	Ⅰ津波に対しても壊滅的 な破壊には至らない性能 を有する擁壁	津波による変形に対 して性能を規定しない 擁壁
適用の例	例えば、Ⅰ津波による直 接的な堤体の侵食は許容 しないが、支持地盤侵食 に伴う間接的な影響(堤 体の不安定化等)を許容 する擁壁	例えば、Ⅰ津波による直 接的な堤体の侵食は許容 しないが、支持地盤侵食 に伴う間接的な影響(堤 体の不安定化等)を許容 する擁壁	例えば、津波の到達 地域外に構築される 土構造物



(a) 被災時の様子(出典: 横浜国道事務所 WEB サイトより)



(b) 施工時の様子(東京理科大学福岡文夫教授撮影)
写真-1 国道1号西湘バイパスの海岸擁壁の採用事例



3.設計計算例の設計条件

RRR-D工法の設計の特徴である耐津波性の照査に必要な設計条件を以降に記載する。

(1)構造仕様

設計計算例では高さ8m幅10mの海岸に面した高速自動車国道を支持する盛土補強土擁壁とし、支持地盤はN値20相当の液状化発生を想定しない砂礫層、性能ランクおよび耐津波性能はどちらもランクI、盛土材は最も良質な材料である土質1、盛土天端はアスファルト舗装およびコンクリート被覆し、支持地盤は越流による洗堀対策としてセメント改良礫土スラブとした(図-3)。なお、RRR-D工法の構造選定フローは、図-4に示すとおりであり、本設計計算例では赤矢印に示す選択により被覆構造や支持地盤対策を設定した。

(2)照査項目

耐津波性に応じた照査の実施項目の目安は、表-2に示すとおりであり、本設計計算例では耐津波性能Iを選択しているため、耐津波性のすべての照査を実施する。

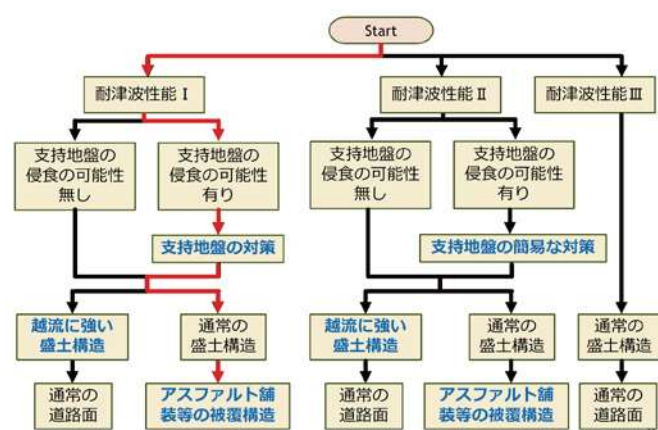
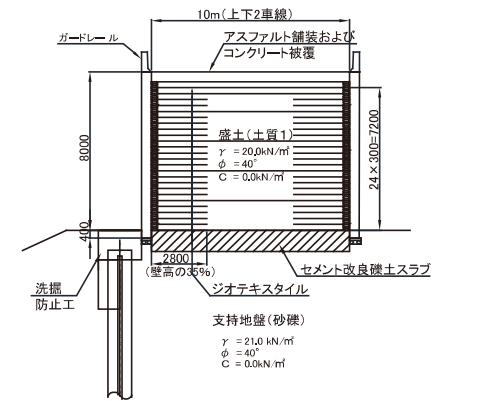


図-4 本設計計算例の構造選定フロー

表-2 耐津波性能に対する実施項目

要求性能	性能項目	照査指標	主たる作用	耐津波性能		
耐津波性	盛土体の安定	力	常時作用 +津波作用 (L1津波時)	I	II	III
	壁体の損傷	曲げモーメント せん断力		◎	◎	—
	補強材の損傷	引抜け 破断		◎	◎	—
	支持地盤の侵食に伴う盛土体の安定	カ・モーメント		◎	△	—
				◎	△	—

◎：必ず実施、○：基本的に実施、△：必要に応じて実施、—：一般的には不要

(3)作用条件

耐津波性の照査においては、表-3に示すとおり津波波力(波圧)および越流時に発生する揚圧力と死荷重を考慮する。

表-3 作用組合せおよび作用係数

要求性能	性能項目	照査指標	作用の種類			
			常時作用		偶発作用	
			壁体荷重	盛土荷重	波力(波圧)	揚圧力
耐津波性	盛土体の安定	底面摩擦力	1.0	1.0	1.0	—
	壁体の損傷	曲げモーメント せん断力	1.0	1.0	1.0	—
	補強材	引抜け・破断	—	1.0	—	1.0
	支持地盤の侵食に伴う盛土体の安定	セメント改良礫土スラブの耐力	—	1.0	—	—
			—	1.0	—	—

津波波力(波圧)の算定は、建設を予定している箇所の設計津波の高さ(水位)を設定したうえで、「港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成30年5月 日本港湾協会」(以降、港湾基準²⁾と呼ぶ)に準拠して算定する。津波高さは、「最大クラスの津波(L2津波)」と「発生頻度の高い津波(L1津波)」の2種類があり、L2津波は住民避難や防災対策の計画を行う上で用いられる他、発電施設など極めて重要度が高い施設を守る構造物の設計に用いられる。L1津波は一般的な港湾施設等の設計に用いられるものであり、本擁壁の設計ではL1津波を想定して設計津波高さを設定する。設計津波の高さ(水位)の設定方法は、「設計津波の水位の設定方法等について農林水産省、国土交通省、2011.7.8」により、痕跡高や歴史記録・文献等の歴史資料調査で判明した過去の津波の実績と、必要に応じて行うシミュレーションに基づくデータを用いて、一定頻度(数十年から百数十年に一度程度)で発生する津波の水位を算出することで設定が可能である。農林水産省及び国土交通省は「設計津波の水位の設定方法等」を、海岸管理部局に通知し各自治体で堤防等の設計に用いることができるように整備を進めているので、実際の設計に際しては自治体に確認することで設計津波高さを得られる可能性が高いと考えられる。なお、本設計計算例においては越流することを想定して設計津波高さは10.0mとし、港湾基準に示される算定式により静水压を1.134(α_1)倍して波力($P=544.4\text{ kN/m}$)を算定した(図-5)。

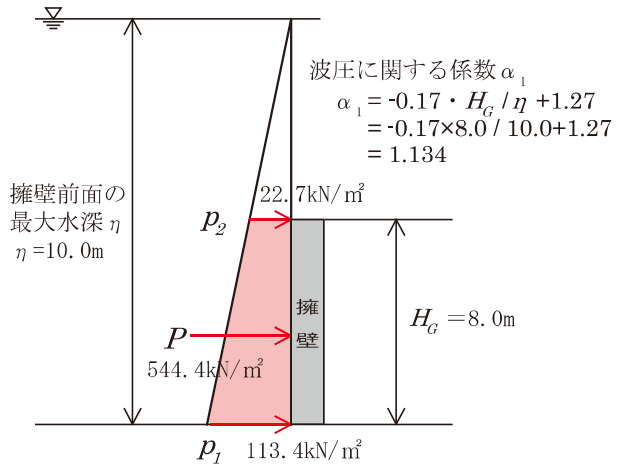


図-5 本設計計算例で想定した波圧および波力

揚圧力については、津波が越流する際にどの程度発生するかは未解明な部分が多く、明確になっていない。そこで、設計計算例においては最大でも大気圧(100 kN/m²)程度と想定し、図-6の分布の揚圧力を考慮する。

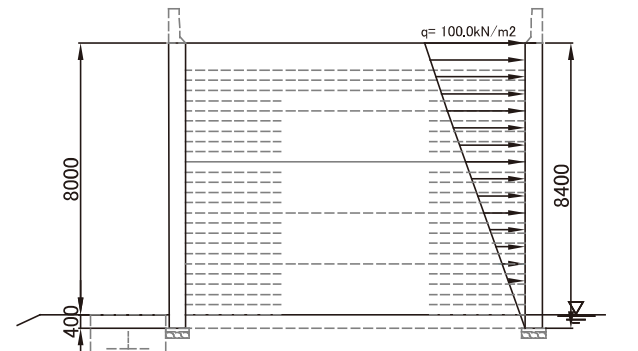


図-6 本設計計算例で想定した揚圧力分布

(4)安全係数

港湾基準²⁾では、永続状態(自重や土圧など)、変動状態(L1地震動、波浪など)、偶発状態(L2地震動、設計津波など)の3種類に分類されており、設計津波はL2地震動と同じ偶発状態に分類される作用であるため、耐津波性の照査に用いる安全係数はL2地震動の設計に用いる値と同じものを適用する。

(5)ジオテキスタイルの設計用値

津波の作用方向は壁に対して直交する方向から作用するとは限らず、主方向以外にも張力が働く可能性があるため、【材料マニュアル³⁾4.1.1】に示すとおり「二軸同一強度」のジオテキスタイル($T_k=51.0\text{ kN/m}$ 、 $T_k=101.0\text{ kN/m}$)を用いる(表-4)。

表-4 本設計計算例で設定したジオテキスタイルの設計用値

限界状態の種類	耐津波性	
	L1津波時	
引張強度の規格値 T_k	51.0 kN/m	101.0 kN/m
材料修正係数 ρ_s	1.0	1.0
引張強度の特性値 T_s	51.0 kN/m	101.0 kN/m
材料係数 f_{sg}	0.85	0.85
設計引張強度 (kN/m)	43	86
壁面応力計算用のバネ係数 K_s (kN/m)	480	980

4.耐津波性に対する照査結果

(1)津波波力による盛土体の安定に対する照査

盛土体の安定に対する照査は、擁壁の側面に作用する波圧を設計応答値とし、盛土体底面および擁壁底面の支持地盤との摩擦抵抗力を設計限界値として、滑動安定に対する照査を行うものである。なお、設計計算例においては安全側に擁壁底面の摩擦力は考慮せずに、盛土体底面のみの摩擦抵抗力を設計限界値として設定して実施した(図-7)。

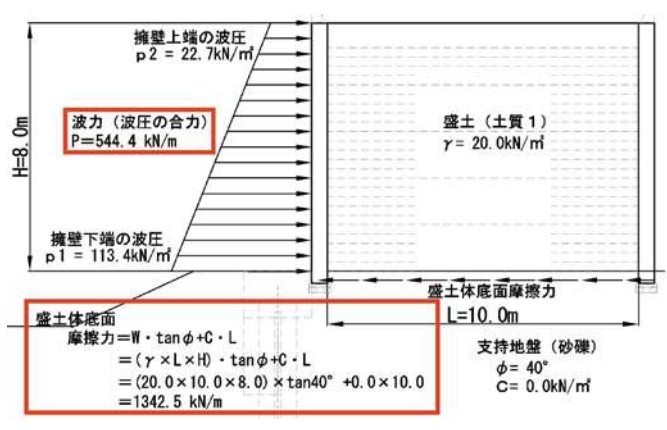


図-7 津波波力による盛土体の安定の概略図

(2)津波波力による壁体の損傷に対する照査

壁体を梁要素、背面盛土を地盤ばねとしたモデルに対して、津波による波圧を外力として作用させることで壁体に発生する発生断面力を設計応答値として、コンクリート標準⁴⁾に準拠して設計限界値を算定して照査を実施する。設計計算例では、盛土天端部にアスファルトおよびコンクリート被覆を、根入れ部にはセメント改良礫土スラブを想定していることから、上端部と下端部は、図-8に示す支点条件で実施した。なお、地盤ばねについては、道路橋示方書下部構造編⁵⁾に準拠してばね定数およびばねの上限値を設定した。壁体に発生する断面力および必要となる壁厚および鉛直鉄筋の仕様は、図-9に示すとおりであり、背面側の曲げモーメントが卓越することに伴いD25@250mmの軸方向鉄筋が必要となった。

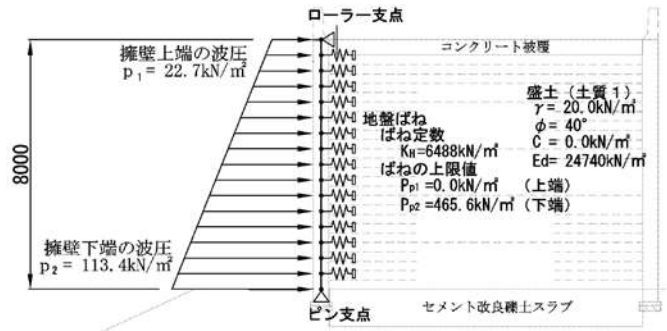


図-8 津波波力による壁体の損傷の検討モデル図

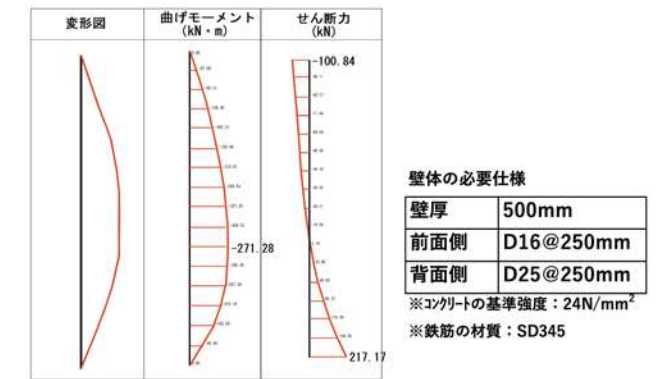


図-9 津波波力による壁体の断面力図、壁体の必要仕様

(3)津波越流時における補強材の損傷に対する照査

津波越流時に発生する揚圧力により、補強材に張力が発生するため、補強材張力を設計応答値、補強材の引き抜け抵抗力または設計引張強度を設計限界値として照査を実施する。なお、計算例においては、図-10に示すとおり上部に長尺の補強材を3枚配置しているため、上部2mの範囲に発生する揚圧力に対して3枚の補強材で抵抗する想定で実施した。また、補強材は対面側の擁壁に固定されているため、引き抜けは発生しない想定とした。