

水工学シリーズ 22-B-3

海岸工学での地盤にまつわる事象について

港湾空港技術研究所 沿岸水工研究領域 領域長

鈴木 高二朗

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2022年9月

海岸工学での地盤にまつわる事象について

Phenomena Related to Seabed in Coastal Engineering

鈴木 高二朗

Kojiro SUZUKI

1. はじめに

海岸工学での地盤にまつわる現象にはさまざまなものがある。波が進行する際の波の減衰に及ぼす地盤の影響や広域な海岸侵食など多種多様である。今回はこのうち構造物周りの比較的狭い範囲の現象を対象として記載したいと思う。まず、構造物の影響を受けない平坦な海底地盤を対象とした現象（地盤表層の漂砂現象、深層部までいたる波による地盤の液状化）について述べる。次に、防波堤周囲の洗掘現象（混成堤前面のL-Type洗掘、消波ブロックや捨石構造物下部の洗掘）、津波による防波堤開口部と防波堤背後の洗掘、護岸背後の地盤の吸い出し現象、着床式洋上風力発電周囲の洗掘現象について述べた後、洗掘、吸い出し防止工について述べる。

2. 平坦な海底地盤の挙動

2.1 地盤表層の漂砂移動

波浪によって平坦な海底（水平で周囲に物体のない海底）では押し波と引き波に対応する往復流（振動流）が発生し、その往復流によって砂の移動が発生する。往復流の大きさによって図-2.1のように砂の移動状況が変化し、往復流が大きくなるにつれて、砂の平坦床での掃流移動、砂漣(Rolling-grain Ripples)上の掃流移動、砂漣(Vortex Ripples)上の浮遊移動、シートフロー(Sheet Flow)のように移動状況が変化する。合田(2008)¹⁾はこのような移動状況に関する研究の経緯を概説している。また、これらの現象は本間・堀川(1985)²⁾に詳細にとりまとめられている。

往復流の流速が小さいうちは、砂が平坦床をコロコロと移動しており掃流移動 (Bed-load) と呼ばれている。往復流が大きくなると砂漣が発生しはじめ、流速が大きくなるにつれて徐々に大きくなっていく。

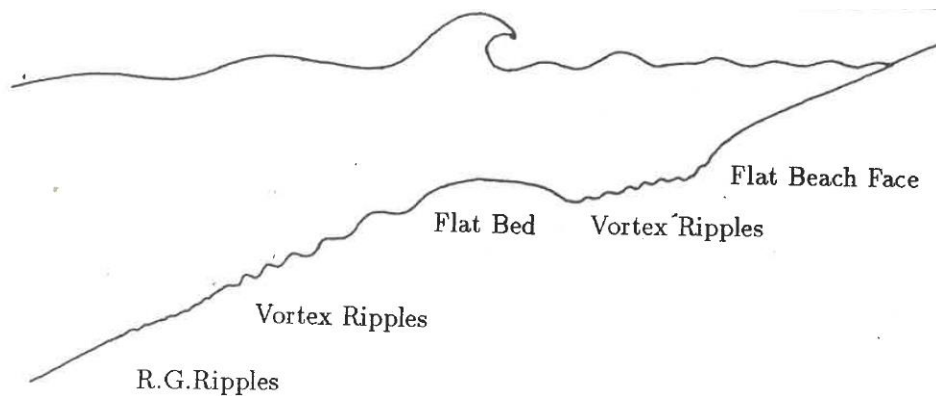


図-2.1 平坦床での地盤表層の砂の動き（掃流移動からシートフローまで）

砂漣が大きくなると砂漣の頂部で剥離渦が発生し、砂漣上を動いた砂の一部はこの渦に巻き込まれて浮遊する。砂はこの渦に巻き込まれたまま往復流によって運ばれる。このような砂漣はVortex Rippleと呼ばれている。波が大きくなると図-2.2のように押し波の時間と引き波の時間が非対称になり、押し波の最大流速は絶対値が大きく継続時間が短くなり、引き波の最大流速の絶対値は小さくなり継続時間は長くなる。砂は押し波の速い流速で渦に巻き込まれ、その渦が引き波で沖に運ばれるため、長時間で平均すると沖向きに砂の移動量（沖向き漂砂量）が卓越する。このような平均的な漂砂量はネット(Net)の漂砂量と呼ばれている。さらに往復流の流速が大きくなると砂漣がその形状を維持できなくなり、再び平坦床となって砂が層状に激しく移動するようになる。この状態はシートフロー（Sheet Flow）と呼ばれている。

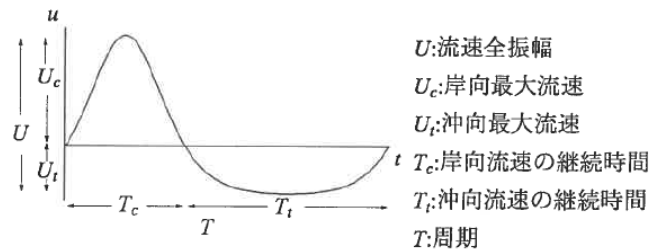


図-2.2 海底面での流速の非対称性

これらの現象を分類する際のパラメーターとして、一般的にシールズ数が用いられる。シールズ数は砂粒に働く流れによるせん断力と揚力を外力とし、抵抗力を摩擦力としてその比をとったものであり、式-2.1で表現され、砂の初期移動を表現するものである。一般にシールズ数が0.04~0.06程度で砂が動き始め、0.1以上になると砂漣上で浮遊し始め、0.5以上になるとシートフローになる。

$$\psi = \frac{fu^2}{2sgd} \quad s = \rho_s / (\rho_s - \rho_w) \quad (2.1)$$

2.2 砂地盤の波浪による液状化

波による地盤の液状化には残留過剰間隙水圧を伴う液状化現象と変動過剰間隙水圧による液状化現象の2種類の現象がある。

(1) 残留過剰間隙水圧をともなう液状化（Residual Liquefaction）

残留過剰間隙水圧をともなう液状化は、緩く堆積した地盤に波浪が作用すると発生する現象である。地盤の上に波が来ると、地盤内部ではせん断力、圧縮力（膨張力）が働く。このとき砂粒が緩く堆積していると砂粒どうしのかみ合わせが外れて大きく動く。地盤内部の全応力は地盤骨格が受け持つ有効応力と間隙水が受け持つ間隙水圧の和で表現される。もともと地盤は図-2.3に示すようにその上にある地盤層の重さを

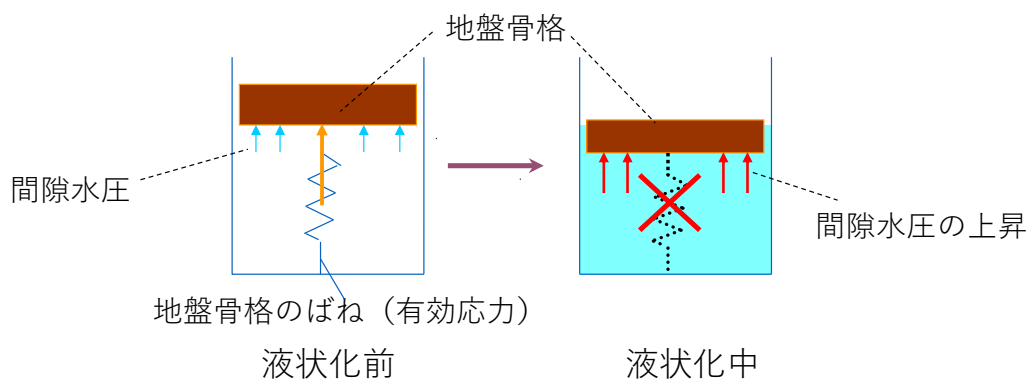


図-2.3 液状化時の間隙水圧上昇の模式図⁴⁾

地盤骨格のバネ（有効応力）と水のバネ（間隙水圧）で支えているのだが、砂粒同士のかみ合わせが外れると地盤骨格のバネ（有効応力）が壊れて、その骨格よりも上にある地盤の重さを間隙水が受け持つことになる。そのため波の作用で地盤骨格が壊れると（砂粒どうしのかみ合わせが外れると）、その上の砂地盤層の重さを受け持つために図-2.4のように間隙水圧が上昇する。この水圧の上昇分は残留過剰間隙水圧

（Residual Excess Pore Pressure）と呼ばれている。Sumer & Fredsoe(2002)³⁾はこのような残留過剰間隙水圧をとまなう液状化をResidual Liquefactionと呼称している。

かみ合わせの外れた砂粒は水中に浮いたような状態になり、波が作用している状況では砂地盤が重たい流体となって図-2.5のように大きく波打つようになる。残留過剰間隙水圧として地盤内の水圧が高くなっていくため、図-2.6のように地盤下層の水が表層に噴き上げる噴砂が発生する。その後、水が地盤層から抜けていくと徐々に地盤が締め固まっていくようになる。残留過剰間隙水圧は下から上に向けて上昇するため、地盤下層の方が先に締め固まり、最終的に表層まで地盤が締め固まっていくようになる。

なお、砂の透水性によって液状化の継続時間が異なってくる。透水係数が大きいと間隙水が速く地盤表層に抜けていくため、液状化が持続しない。透水係数が小さい場合はその逆であり、多くの研究はシルトあるいはシルトと砂の混合した材料で行われてきた。例えば実験レベルで0.5 mm程度の粗砂ならば、液状化がすぐに終了する。一方で、0.08 mm程度のシルトと砂の混合したような砂の場合には、液状化が長時間継続する。スケール効果もあり、より大きな実験や現地のように砂地盤が厚い場合には、残留過剰間隙水圧の消散に時間がかかるため、砂の粒径が多少大きくても液状化が継続する。

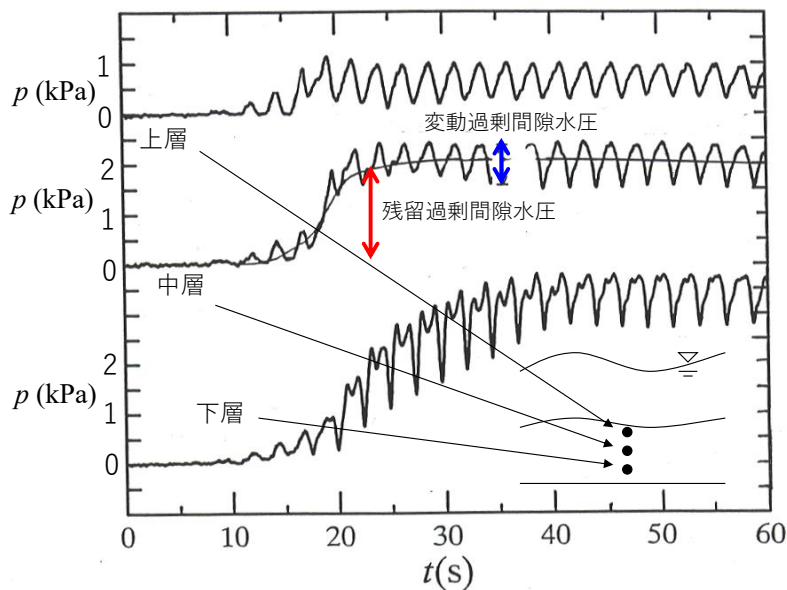


図-2.4 波による液状化発生時の残留過剰間隙水圧と変動過剰間隙水圧⁴⁾

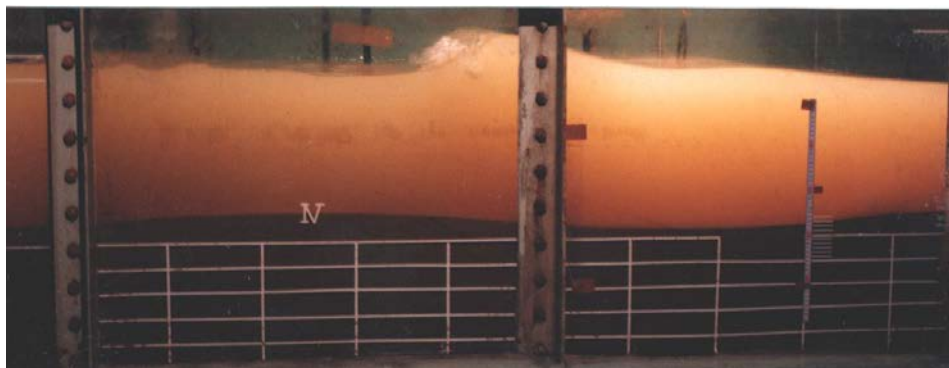


図-2.5 液状化した地盤が波打つ状況⁴⁾

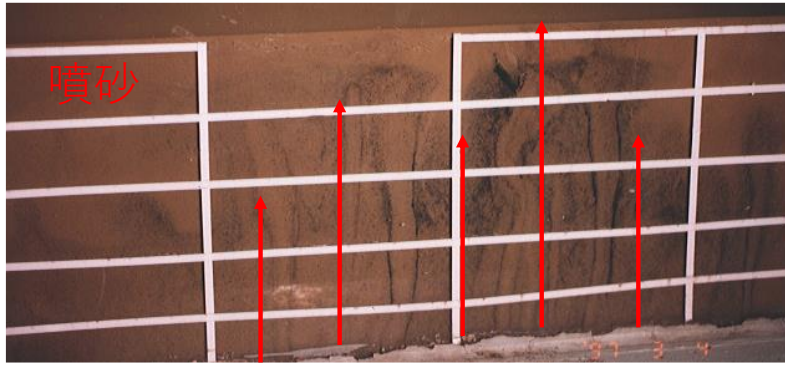


図-2.6 液状化中に発生した噴砂の状況⁴⁾

以上述べたように、残留過剰間隙水圧をともなう現象は地震による地盤の液状化とほぼ同じメカニズムで発生している。ただし、作用する波の数が圧倒的に多いため、大きな波が作用する場所では海底地盤が十分に締め固められている。

(2) 変動過剰間隙水圧による液状化 (Momentary Liquefaction)

図-2.7は変動過剰間隙水圧による液状化を模式的に示したものである。引き波の作用中、地盤表層よりも地盤内部の間隙水圧が高くなる時間帯があり、この時に上向き浸透流が発生して地盤が液状化する現象である。海底地盤が水で完全に飽和されている場合には、表層と地盤内部の間隙水圧に位相差が生じないのに対し、間隙水の中に気体が含まれていると位相差が生じて地盤内部の間隙水圧が表層よりも大きくなり、その動水勾配が限界動水勾配よりも大きくなると液状化する⁵⁾。海底地盤内部の生物の活動などにより地盤内部に気体が含まれ、その影響によって変動過剰間隙水圧による液状化が発生するとも考えられている。

ただし、変動過剰間隙水圧による液状化は波動場の実験スケールでは観測が難しい。後述する筆者らが行った大規模実験でも液状化は観測されなかった。今後、そのメカニズムをさらに調べようとする場合には、より大きな圧力を発生できる要素試験や現地での調査が必要だと考えられる。

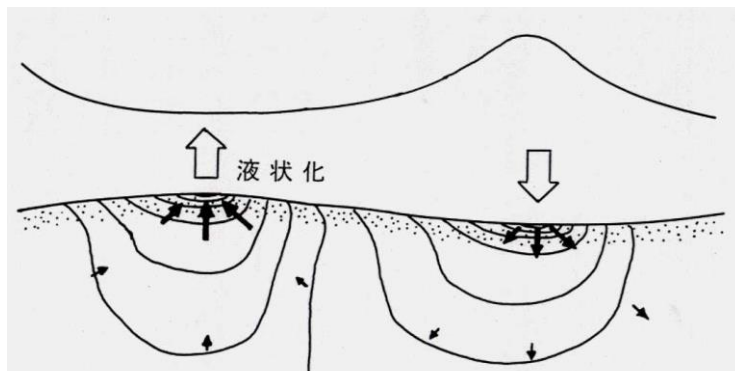


図-2.7 変動過剰間隙水圧による液状化の模式図

(3) 波による地盤の液状化に関する大型実験

鈴木ら(2003)⁶⁾は港湾空港技術研究所の大規模波動地盤総合水路において波による地盤の液状化に関する実験を行った。大規模波動地盤総合水路には4 mの砂地盤層があり、その下に浸透流を発生させる装置があった。この浸透流発生装置により砂地盤を液状化させて緩く堆積した砂地盤を構築することが可能だった。前述したように緩く堆積した地盤に波が来襲すると地盤内部にせん断力が作用し、地盤骨格が壊れて液状化する。

図-2.8は実験状況であり、砂地盤が大きく波打ち、地盤表層の位置が上下していることが分かる。液状化

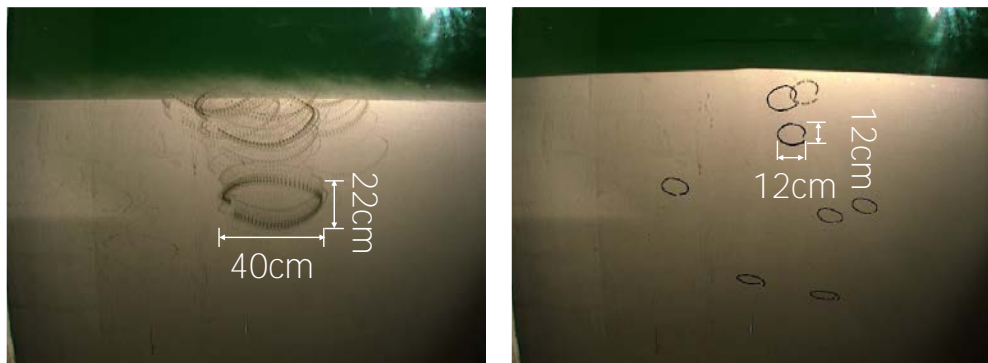
した地盤は重い流体となって波動運動をなし、**図-2.9**のように楕円運動を描いていることが分かる。**図-2.9**は砂地盤内に含ませた黒いトレーサーの軌道であり、画像内部で輝度が最低となるピクセルを1周期の画像から抽出して描いている。また、**図-2.10**はPIVによる地盤表層から0.15 m下の砂粒子の流速であり、水平方向には0.3 m/s以上の流速で動いているのが分かる。

前述したように液状化すると内部に**図-2.4**のような残留過剰間隙水圧が発生し、深層部の間隙水が徐々に地盤表層から抜け出していき、地盤が締め固まっていた。残留過剰間隙水圧が消散して地盤が表層まで締め固まると、地盤表層に砂澱ができて始め、砂が浮遊し始めた。液状化している場合には、砂地盤表層と水粒子と一緒に動いており、その相対的な動きの量が小さく（相対速度が小さく）、砂地盤表層に強いせん断力が働いていない。一方、液状化が終了して砂が締め固まると、相対速度が大きくなってせん断力が大きくなり、砂澱とそれとともに浮遊砂が発生するようになる。過去には地盤が液状化することで漂砂量が増大するのではないかという議論があったのだが、このような締め固まりと砂澱の発生を考慮すると残留過剰間隙水圧をとまなうような液状化が発生している状況では一般的な浮遊漂砂は発生しておらず、残留過剰間隙水圧をとまなう液状化が漂砂量を増加させることはないのではないかと考えられる。

この大型実験では、液状化が発生せずとも地盤が締め固まることが観測され、締め固まる過程を**図-2.11**のように3種類に分類した。(1)波が大きく深層部まで液状化して締め固まる過程、(2)小さな波がまず作用して表層のみが締め固まった場合に、さらに大きな波が作用すると深層部を含めて再度液状化して締め固まる過程、および、(3)小さな波で表層のみが締め固まった後、より大きな波で液状化を伴わずに徐々に深層が締め固まる過程である。外洋に面した海底ではこのように地盤が締め固まっているものと考えられる。ある港で堆積した砂を浚渫しようとした際に浚渫できないほど地盤が固くなっていたという事例があった。



図-2.8 液状化中の砂地盤の動き⁶⁾



$T=7.0(s)$ 、 $H=1.5(m)$

$T=3.0(s)$ 、 $H=1.5(m)$

図-2.9 液状化中の砂粒子の楕円運動⁶⁾

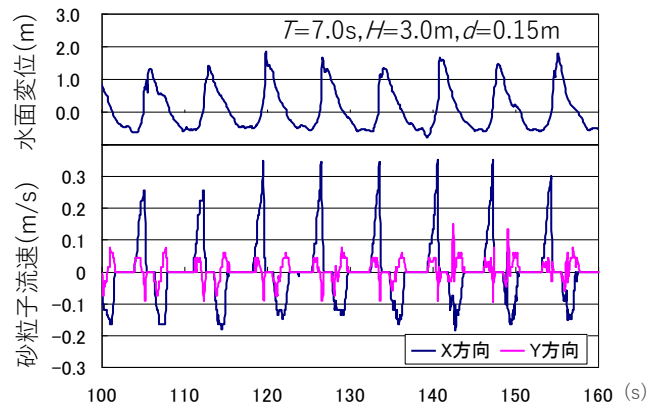


図-2.10 PIVで計測された地盤内部の砂粒子の流速⁶⁾

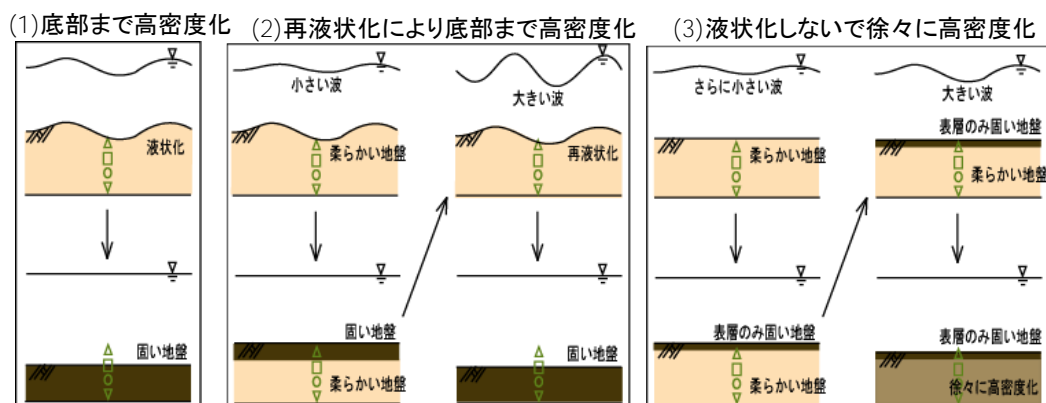


図-2.11 地盤の締め固まり（高密度化）過程の分類⁶⁾

2.3 砂漣とシートフロー

図-2.12は砂漣内部に発生している間隙水圧の動きを示すものである。砂漣頂部では流速が速くなるため、ベルヌーイの定理に示されるように周囲よりも水圧が低くなる。そのため、砂漣内部には水圧の低い部分に向けて浸透流が発生するようになり、染料を砂漣内部に入れておくと図-2.12のような曲線を描く。この頂部での圧力低下と上向き浸透流により瞬間的な液状化（Momentary Liquefaction）が発生している可能性がある。前述したように往復流の流速が速くなると、漂砂形態が砂漣からシートフローに変化するが、このような浸透流が砂漣の形状を保てなくしている可能性がある(鈴木, 2001)⁷⁾。ただし、この上向き浸透流の流速は砂の透水係数程度と考えられ、地盤表層を流れる水塊の流速とオーダーが異なっており、砂漣は流れによる強いせん断力で壊されているだけなのかもしれない。せん断と浸透流による液状化がどのようにシートフローの遷移に影響しているのか、今後の微視的な研究で明らかになっていくものと考えられる。



図-2.12 砂漣内部での上向き浸透流の挙動⁷⁾

3. 構造物周囲の洗掘現象

構造物の近傍では局所的に速い流れや大規模な渦が発生して激しい浮遊漂砂が発生し、大規模な砂地盤の洗掘や堆積が生じる。

3.1 混成防波堤前面の洗掘（L-Type洗掘）

混成防波堤は砂地盤の上に数10～数100 kgの石（基礎マウンド）を設置し、その上に大型のケーソンを設置して築造される。防波堤の前面では入射波と反射波が重なり合って重複波が発生し、重複波の腹では水塊が鉛直方向に動き、節では水塊が水平方向に動く。そのため、水平方向の流速の速い節では砂が大きく移動するのに対し、水平方向の流速が小さい腹では砂の巻き上げ量が小さい。一般に、砂は巻き上げられた場所から、比較的流れの弱い場所に堆積する傾向があるので、重複波の節部分が洗掘される。入江ら⁸⁾はこの洗掘現象をL-Type洗掘と名付けた。

重複波の節が図-3.1のようにマウンドの法先と一致すると、洗掘によって法先の石が沈下し、ときにはケーソンの近くまでマウンドが沈下する場合がある。このような法先洗掘を防ぐため、入江らはマウンドの後先を保護するグラベルマットを提案した。グラベルマットは旧第一港湾建設局で主に使用されてきた。このほか、アスファルトマットも法先洗掘を防止するものであり、厚さ5 cm以上のマットが使用されている。

一方、田中(1974)⁹⁾は、防波堤前面の洗掘深と水深との関係を調べ、洗掘深が最大になる箇所が沿岸砂州の存在しているところと相当していると述べている。波崎海洋研究施設での長期間の砂浜の地形観測（栗山, 2010）¹⁰⁾によると、バー（沿岸砂州）とトラフが入れ替わり、5 mに及ぶ地形変化があることが明らかになっている。このようにL-Type洗掘だけでなく、より広範囲な地形の変化も洗掘に影響を与えているのではないかと考えられる。

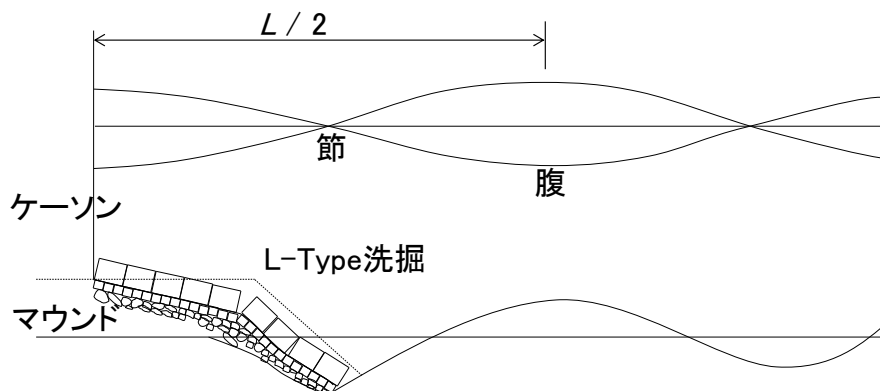


図-3.1 L-Type洗掘（入江ら, 1984）⁸⁾

3.2 捨石や消波ブロック下部での洗掘

消波ブロック被覆堤（混成防波堤前面に消波ブロックを被覆した断面）や離岸堤の消波ブロックが、設置直後から沈下してしまうという現象がある。図-3.2はブロックの沈下状況であり、ブロック据付後に台風が来襲し、大きくブロックが沈下してしまった例である¹²⁾。また、図-3.3は新潟西海岸の離岸堤の沈下事例であり、海底地盤の中に地盤表層よりも上にあるブロックよりも多くの数のブロックが沈み込んだことが孔間弾性波探査法により明らかになったものである¹³⁾。また、図-3.4は高知港の事例であり、沈下した消波ブロックを撤去したところ、マウンドが大きく沈下していたことが分かったものである。これらの事例は消波ブロックの下で砂地盤が洗掘されて発生したものである。通常、消波ブロックはハドソン式などの所要質量算定式を用いて波の高さをもとに設計されている。しかし、消波ブロック下部の砂地盤が洗掘されてしまうと、たとえ十分な質量があってもブロックが沈下してしまう。

図-3.5は大規模波動地盤総合水路で実施した消波ブロック被覆堤の現地の1/4スケールの実験前後の断面図

である。砂地盤が洗掘を受けて、消波ブロックが1.4 mほど沈下していることが分かる。波が来襲すると消波ブロックの内部やマウンド内部でも往復流が発生し、この往復流によって捨石内部に速い流れが発生して石の周りに激しい渦が発生する。このような流れや渦によって石の下の砂が巻き上げられて浮遊している。

図-3.6のようにブロックの斜面では波が碎波しており、これにともなって捨石内部に沖向きの流れの継続時間が岸向きの流れの継続時間よりも長い状態が発生する。そのため巻き上げられた浮遊砂が沖に運び出されることで砂地盤の洗掘が進み、その上の石と消波ブロックが徐々に沈下していく。巻き上げられた砂の一部は越波によって防波堤の港内側に運ばれて堆積する。現地でも防波堤背後に砂が堆積している事例がある。

このように砂地盤を石で被覆していても石の中では速い流れが発生しており、石が大きいほど流れが速くなり洗掘が発生しやすく、消波ブロックを砂地盤の上に直接置いた場合には、さらに激しい洗掘とブロックの沈下が発生することになる。かつては砂地盤の上に直接消波ブロックを設置したことで、激しいブロックの沈下が見られた例も多く見られた。

また、消波ブロック被覆堤だけでなく、ブロックで被覆されていない混成堤のケーソンの下部でも洗掘が発生する。多くの場合、ケーソン前方の方が後方よりも洗掘量が多いため、ケーソンが沖側に拝むように傾いている防波堤が多くみられる。森平ら(1978)¹⁴⁾は昭和51年に発生した新潟西港の防波堤の被災においてケーソンが大きく沖側に傾いたこと、水路模型実験で被災が再現されたことを示している。この新潟西港の被災は規模が大きく、善(1993)は残留過剰間隙水圧の発生が影響した可能性を指摘している。また、宮崎港の南防波堤のように粘土層の圧密沈下が影響して変形した防波堤の事例もある(鈴木ら, 2004)¹¹⁾。

なお、鈴木・高橋(2012)¹⁵⁾は実験結果をもとに消波ブロック被覆堤下部の洗掘量の推定式を提案し、推定式は平成30年版の港湾基準¹⁶⁾にも記載されている。



図-3.2 消波ブロックの沈下事例¹²⁾

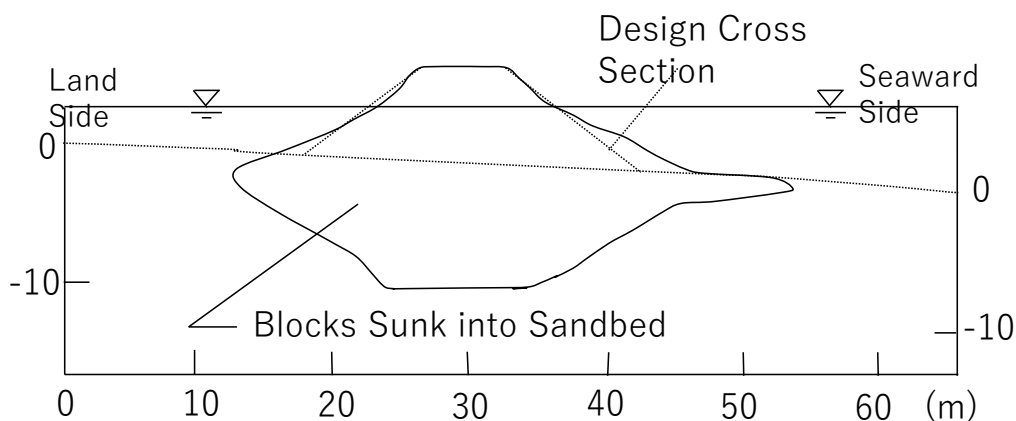


図-3.3 孔間弾性波探査法によって計測された離岸堤の消波ブロックの沈下事例(西田ら, 1985)¹³⁾

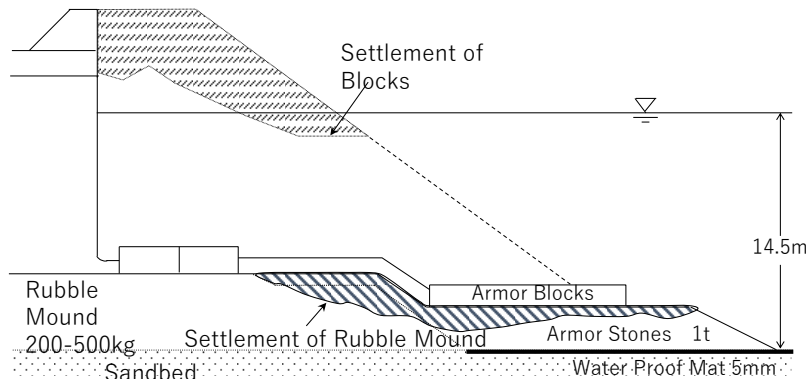


図-3.4 高知港で計測された防波堤前面のマウンドと消波ブロックの沈下事例¹²⁾

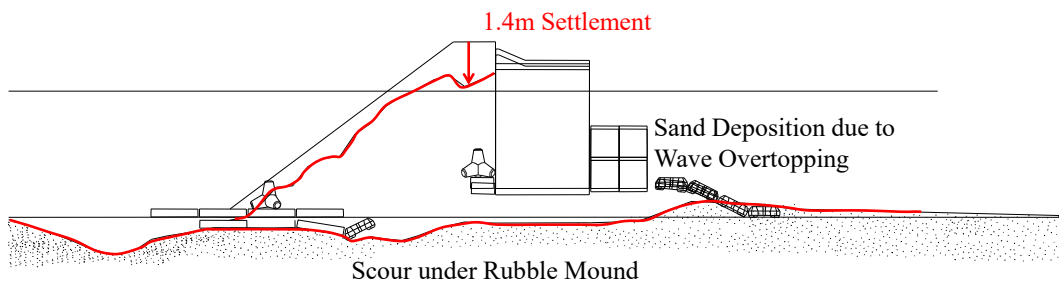


図-3.5 大規模波動地盤総合水路で実施した消波ブロック被覆堤の実験前後の断面図¹²⁾

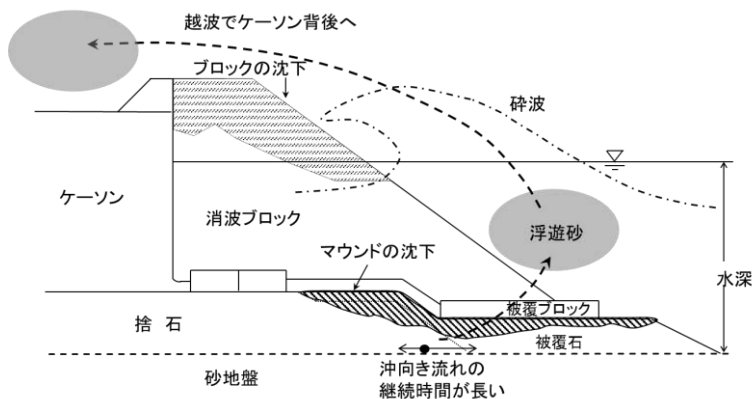


図-3.6 消波ブロック被覆堤の洗掘の模式図¹⁶⁾

4. 津波による洗掘

4.1 防波堤開口部、護岸隅角部での洗掘

(1) 八戸港での洗掘

東日本大震災では防波堤や護岸が数多く倒壊したが、その原因の一つとして砂地盤の洗掘があげられる。図-4.1は八戸港で発生した洗掘の事例である。八戸港には約8mの津波が来襲したが、防波堤によって港内では3mほどまで浸水深が抑制されていた。八戸港の特徴は防波堤の開口部の狭さであり、この狭さによって津波の浸入が大きく抑制されていた。しかし、その分だけ港内外で大きな水位差ができたため、開口部では速い流れが発生して海底地盤の洗掘の要因となった。開口部では10m以上の洗掘が発生しているのが分かる。このような開口部の洗掘にともなって防波堤の堤頭部が倒壊する例が多い。また、図-4.1中の①部分は埋立地の隅角部であるが、このような隅角部でも速い流れが作用し、護岸前面が洗掘されて護岸のケーソンが倒壊する場合がある。

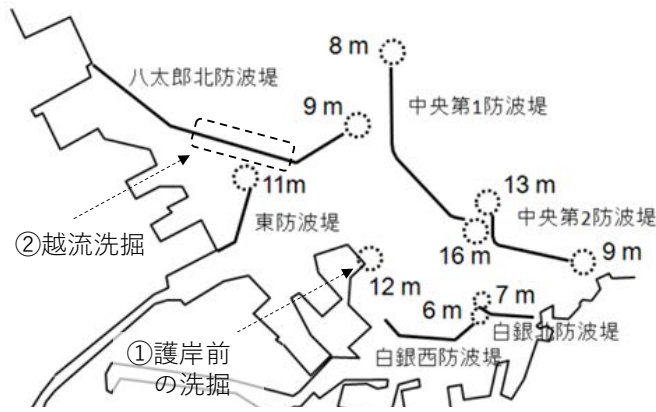


図-4.1 八戸港での洗掘状況¹⁷⁾

(2) 浦戸湾口防波堤の堤頭部の洗掘実験

四国地方整備局では現在浦戸湾に浸入する津波を抑制するため、浦戸湾の湾口に防波堤を設置している。浦戸湾は奥行き6 kmの縦長の湾であり、その湾口は幅が300 m弱と狭く、津波来襲時には湾口で10 m/sに及ぶ極めて速い流れが発生するものと想定されている。防波堤を設置した場合には、流れが縮流によって速くなるなどして、防波堤周囲の砂地盤が激しく洗掘されることが想定される。そこで、港湾空港技術研究所の幅10 m、長さ50 mの総合沿岸防災水槽で大型ポンプを用いて津波実験が実施された¹⁸⁾。実験は1/40スケールで実施され、水路内に2つの防波堤（種崎側防波堤および桂浜側防波堤）が同時に再現された。津波は発生頻度の高い津波（L1津波）と最大クラスの津波（L2津波）を対象としており、L1津波、L2津波の防波堤前面の最大水位はそれぞれ、TP+7.2 m、TP+8.6 mであり、港内側と港外側の水位差は最大でそれぞれ、6 mと8.5 mである。実験は沈降速度パラメータを相似させるようにして行われた。実験では海底面をモルタルで製作した固定床実験と砂で製作した移動床実験が実施された。固定床実験ではケーソンを含め、マウンド被覆工にも変形が発生しないことが明らかとなった。一方で、移動床実験では図-4.2のように激しい洗掘が発生し、ケーソンの堤頭部が大きく滑動するという現象が発生した。図-4.3は3次元の粒子法で堤頭部の流況を調べた結果である。堤頭部では流れが湾内に流入する際に、表層から底層に潜り込む強い流れが発生しており、このような強い流れが洗掘を強めていることが明らかになった。

このような洗掘を防ぐために、複数の洗掘防止工に関する実験が行われた。図-4.4は、袋詰被覆工を連結した洗掘防止工を設置した事例であり、L2津波を作用させた後の実験状況である。袋詰被覆工が洗掘孔に沈みつつも、ケーソン周囲の砂地盤を被覆して、それ以上の洗掘の進展を防ぎ、ケーソンの変形を防いでいるのが分かる。変形しつつも全体としては倒壊しない、いわゆる“粘り強い”構造となっている。



図-4.2 浦戸湾湾口防波堤の洗掘実験¹⁸⁾

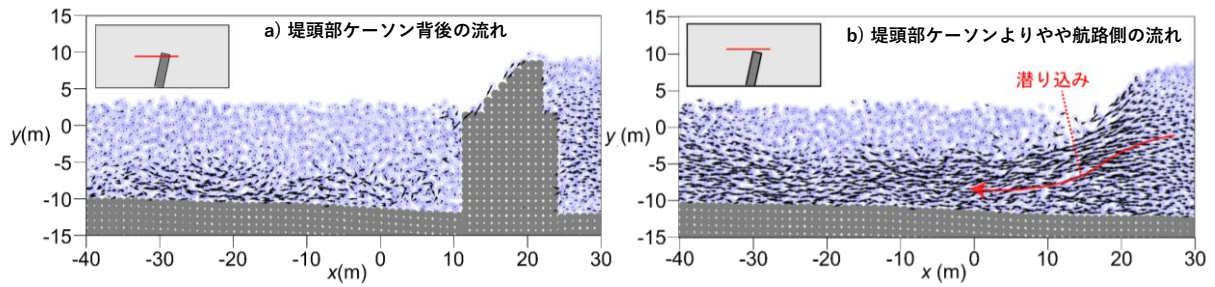


図-4.3 3次元の粒子法計算による堤頭部周りの流れの再現¹⁸⁾



図-4.4 浦戸湾湾口防波堤の袋詰め被覆工を用いた対策実験

4.2 防波堤背後の越流洗掘

東日本大震災では津波が防波堤を越流する際、ケーソン前面の水位差による津波波力が大きくなりケーソンが滑動する被害が数多く発生した。また、八戸港の北防波堤では図-4.1中の②の箇所で越流水塊が海底地盤に作用して海底地盤の洗掘を引き起こし、この洗掘によってケーソンが倒壊する被害が発生した。図-4.5はその洗掘によるケーソンの倒壊を再現した実験の状況である¹⁹⁾。鈴木・有川(2019)²⁰⁾はこの時の流れの状況や洗掘状況を調べ、時間を考慮した洗掘量推定式を提案している。図-4.6に示すようなケーソン背後に石やブロックを置くことでケーソンの滑動抵抗を高める腹付工は、このような津波波力や洗掘に抵抗する工法である。腹付工の捨石も越流で飛散しやすいため、それを保護する腹付被覆工についての研究も盛んに行われている。

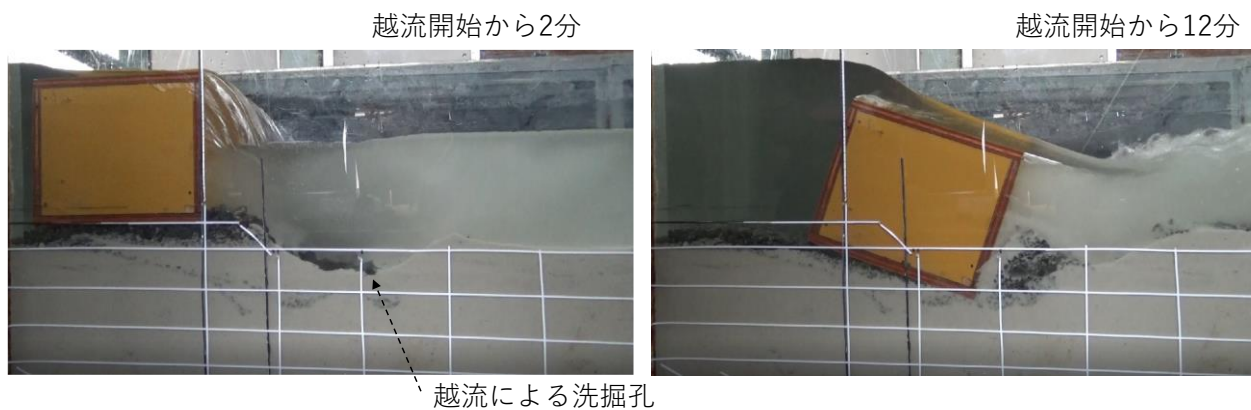


図-4.5 越流洗掘によるケーソン倒壊の再現実験¹⁹⁾

腹付工はある程度飛散してもその石が砂地盤を覆うことにより洗掘を抑制する効果がある。図-4.7はマウンド無し、マウンドのみ、および腹付工がある場合の越流による洗掘深を調べたものであり、越流水深2.5 cmで中央粒径0.2 mmの砂を用いて行った実験結果である。腹付工の石が飛散した場合でも洗掘孔を被覆し洗掘量を抑制しており、マウンド無しやマウンドのみのケースと比較して大幅に洗掘深が抑制されている。また、腹付工の石自体もその粒径が小さいと越流で動くため、7号砕石で行った実験の洗掘深の方が大きくなっている。洗掘対策工については十分に研究が進んでおらず、今後の研究が期待される。

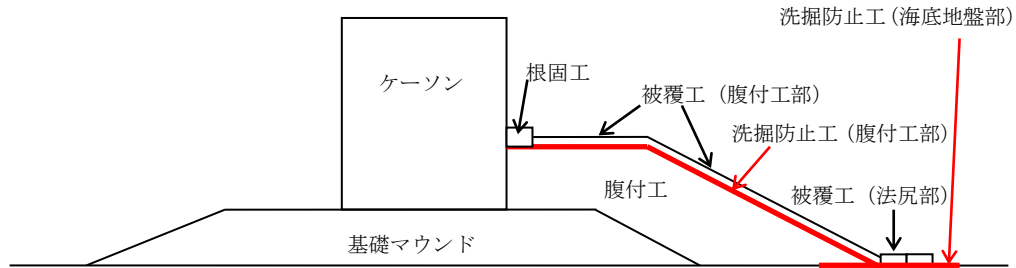


図-4.6 越流に対する腹付工とその被覆工，根固工，洗掘防止工

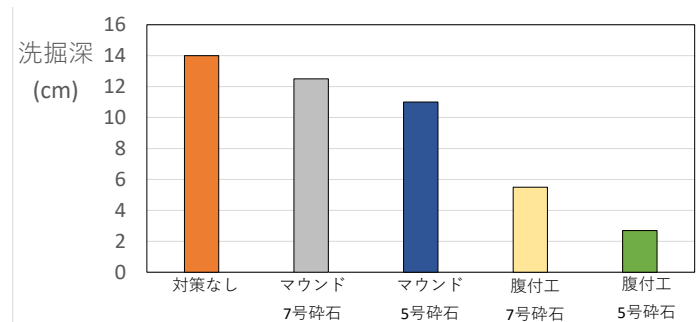


図-4.7 マウンドと腹付工が洗掘深に及ぼす影響¹⁹⁾

5. 護岸背後地盤の吸い出し現象

人工島などの埋立地を築造する場合、わが国ではケーソン式護岸や岸壁が築造される場合が多い。図-5.1はケーソン式護岸の模式図である。護岸はまず、海底地盤の上に基礎捨石（マウンド）を設置し、その上にケーソンを設置する。その後、土圧軽減用の裏込石をケーソン背後に設置した後に埋立砂を投入する。裏込石は数 cm～数10 cmの大きさがあるのに対し、埋立砂の中央粒径は1 mm弱の場合が多く、裏込石の隙間に埋立砂が漏れ出してしまふ。これを防ぐために裏込石と埋立砂の間に防砂シートとよばれる布を敷設するのだが、施工時などに防砂シートが破損し、その破損個所から埋立砂が裏込石内部に漏れ出し、図-5.2のような陥没が発生する場合がある。この現象を吸い出し現象と呼んでいる。

吸い出しは裏込石と埋立砂の間だけでなく、ケーソン間にある隙間（目地）でも発生する。この目地からも埋立砂が抜け出してしまふため、ゴムや塩ビからなる目地版が設置されている。しかし、この目地版が破損すると、その破損個所から砂が吸い出されて空洞や陥没の原因となる。2001年の大蔵海岸で発生した陥没事故は、目地版が波の繰り返し作用で破損して発生したものである。

裏込石や目地からの吸い出しの発生原因はこのように防砂シートや防砂板の破損によるところが大きい。裏込石や目地内部に発生する波力自体が大きいこともその要因となっている²¹⁾。裏込石内部にはパスカルの原理によりケーソン前面に発生する波圧がマウンドを通してほぼ同程度の大きさで発生している。図-5.3は数値計算による再現結果であり、ケーソン前面の6割ほどの圧力が発生している²²⁾。また、目地の内部にも図-5.4のように波が浸入し、波の水面が防砂板に当たる際に激しい衝撃波力が発生し、防砂板の破損の原因となっている²¹⁾。このような吸い出し被害は全国各地で発生しており、現在でも1~2週間に1度の頻度で

陥没孔が発生していると言われている。

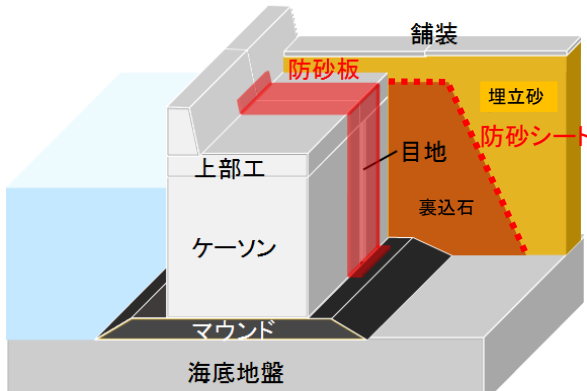


図-5.1 ケーソン式護岸の模式図



図-5.2 吸い出しによる護岸背後地盤の陥没事例

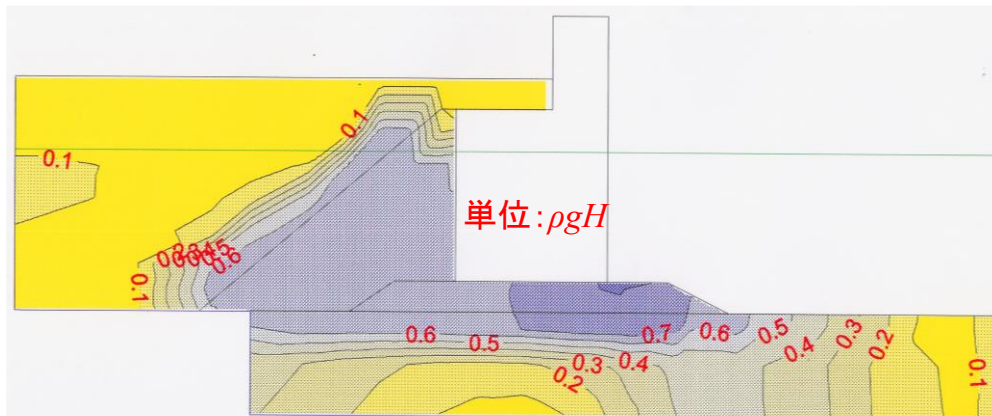


図-5.3 数値計算による護岸背後に発生する水圧の再現²²⁾

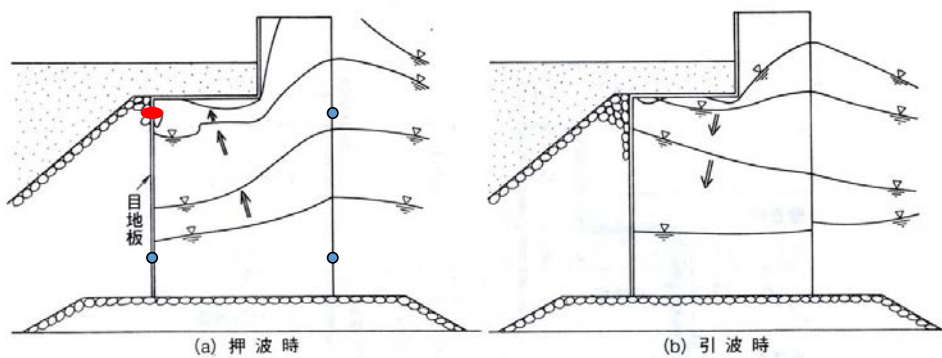


図-5.4 目地内部での波面の動き²¹⁾

6. 衝撃波力による地盤の振動

波が砕波しながら構造物に衝突すると、構造物前面に強大な波力（衝撃砕波力）が発生する。これまでも衝撃砕波力が作用したことで防波堤ケーソンが滑動する、あるいは、ケーソン壁が破損するなどの被害が発生してきた。護岸の場合には直立壁の背後に埋め立て地盤があるため、通常は衝撃砕波力が作用したとしても直立壁やケーソンが滑動するというような問題は発生しない。しかしながら、衝撃砕波力は強大であり、そのパルス的に発生する波力が直立壁に作用した際に振動が発生し、その振動が背後地域に地盤を介して伝わるという問題が発生する場合がある。山本ら²³⁾は北海道白老町においてこのような振動問題が発生し

たことを報告している。図-6.1は衝撃砕波が護岸に作用した場合の振動を再現した波圧と加速度の時系列波形である²⁴⁾。護岸前面にパルス状の波圧が作用し、護岸の直立壁にもパルスの加速度が発生している。その後、加速度が小さくなりながら、正弦的な波形となって背後地盤に振動が伝播している。これまでも、このような振動が護岸前面から150m先まで伝わる有感振動となり、震度4程度の揺れと家屋の漆喰が剥がれるなどの被害をもたらした場所がある。このような振動は地盤の深層部を通して背後に伝達するため、振動の伝達を防ぐ構造物を設置するなどしても解決が難しい。このような問題の発生を抑制するためには護岸前面に強大な衝撃砕波力が作用しないようにすることが肝心である。

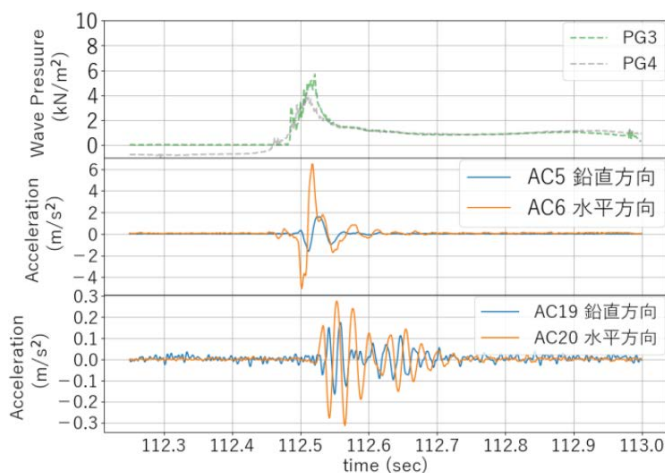


図-6.1 護岸前面に作用した衝撃波圧と直立壁および護岸背後地盤に発生した振動の時系列波形²⁴⁾

7. 着床式洋上風力発電周囲の洗掘現象

洋上風力発電は再生可能エネルギー導入の観点から近年需要が高まっており、既に各地で建設が進められている。着床式洋上風力発電は海底にパイルを設置して構築されるものであるが、海底が砂地盤の場合には波によって洗掘を受け、風車の安定性に影響を与える可能性があるため、その洗掘対策が重要となっている。円柱周りの洗掘についてはSumer & Fredsoe(2002)⁴⁾が詳細にまとめており、洋上風力発電の研究ではそこに記載されたKC数と洗掘深の関係図を参照する場合が多い。ただし、この図は比較的小型の実験で得られたデータをもとに描かれており、縮尺効果を考慮すると洗掘深が過小に見積もられているようである。実際に過小に見積もられることを指摘する研究が複数存在する。

このような円柱周りの洗掘を防ぐため、欧州では砂地盤上に捨石フィルターを設置し、それを被覆するように大型の被覆石を設置して洗掘を防止している。一方、我が国では防波堤や護岸前面の洗掘対策として、さまざまな対策工が敷設されてきており、それらを利用していくことも考えられている。袋詰め被覆工は洗掘対策工の一つであり、網の中に石を詰めて大型化して（重量を増して）波浪に対する安定性を高めるとともに、砂や小さい石を被覆して洗掘を防ぐものである。明石海峡大橋の洗掘対策として開発されたものであり²⁵⁾、風力発電施設だけでなく様々な港湾・海岸構造物の捨石被覆工として使用されている。

図-7.1は港湾空港技術研究所と(一財)沿岸技術研究センター、(株)不動テトラ、ナカダ産業(株)、前田工織(株)の共同研究で実施した実験の事例である。水深20mの位置に設置される風力発電施設の1/9スケールの実験であり、洗掘対策工（袋詰め被覆工）が無い場合とある場合とを比較して、袋詰め被覆工の効果を調べている²⁶⁾。図-7.2は透明な円柱模型内部から360度カメラで撮影した実験状況であり、洗掘防止工（袋詰め被覆工+フィルター層）の有無での洗掘状況の違いである。洗掘防止工が無い場合（図-7.2上）は激しい砂の浮遊をとまって洗掘が進行するのに対し、洗掘防止工がある場合（図-7.2下）には洗掘が抑制されているこ

とが分かる。洗掘防止工については、現在も設置法も含めて技術開発が盛んに行われている。

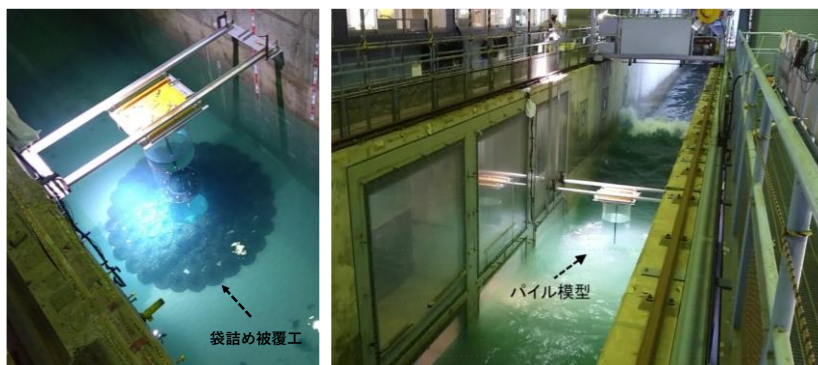


図-7.1 着床式洋上風力発電施設周囲の洗掘防止工に関する大型実験の実験状況²⁶⁾

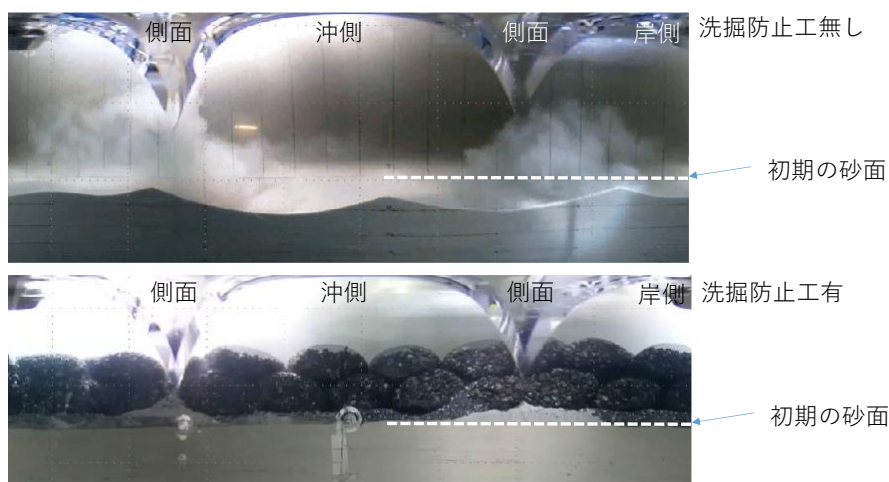


図-7.2 円柱模型内部から360度カメラで撮影した洗掘状況（上：洗掘防止工無し，下：洗掘防止工有）²⁶⁾

8. 洗掘，吸い出し防止工

ここでは、これまで述べてきた洗掘や吸い出しを防止するための対策工法について紹介する。海底地盤の洗掘は防波堤の法先洗掘（Lタイプ洗掘）のように捨石で被覆されていない箇所が洗掘される場合と、マウンドのような石やブロックの下の砂が洗掘される場合に分類される。また、吸い出しは護岸背後の地盤や堤防内部の砂が捨石の中や海中に抜け出す現象である。砕石の下の砂の洗掘を吸い出しと呼ぶ例もあるのだが、ここでは吸い出しを護岸の吸い出しのみに分類する。

8.1 捨石で被覆されていない箇所の洗掘防止工

捨石で被覆されていない地盤の洗掘対策工としては3.1節で述べた防波堤の法先洗掘対策が挙げられる。法先では洗掘対策工自体が強い波浪外力を受けるため、波浪外力に耐えられるだけの質量や剛性を備えている必要がある。防波堤前面の洗掘対策としてはこれまでにアスファルトマットや捨石が用いられている。宮崎港のように巨大な波浪が来襲する場所では、厚さが10cmにも及ぶマットが使用されている。波浪でめくれ上がらないように洗掘防止工の先端部には穴が開けてあり、マットに働く揚圧力を低減している。さらに破損を防ぐためにマットの中に芯材を入れて補強されている¹¹⁾。

また、入江ら²⁷⁾は捨石を法先に投入して洗掘を抑制する工法を提案し、この工法はグラベルマットと呼ばれている。この工法はある程度、法先の変形を許容するものであり、変形が大きい場合には捨石を再度投入して洗掘を抑制する。

8.2 石やブロック下部の洗掘防止工

砂地盤の上に石やブロックが設置される場合には3.2節で述べたように砂（1mm以下）と石やブロック（数10cm~数m）の粒径差が非常に大きいので、そのままでは、石やブロックの内部に発生する流れで砂が容易に抜け出してしまふ。そのため、防砂シート（帆布と呼ばれることもある）や比較的薄いマット、そして捨石フィルターが用いられる。古くは粗朶沈床と呼ばれる木の枝を組んだ対策工が用いられたこともある。上載荷重で洗掘防止工のめくれが防がれるため8.1節の洗掘防止法ほどには大きな質量は必要とされない。しかし、シートやシートの継ぎ目や施工時の破損箇所などから砂が抜け出さないことが求められる。そのような隙間から砂が抜け出し始めると、洗掘孔が徐々に大きくなって隙間を広げ、洗掘対策工の破損に結び付くなどして洗掘対策工としての機能を果たせなくなる。そのため、防砂シートやマットには破損を防ぐための強度が必要であるとともに、十分な長さでラップさせて施工するなどの工夫が必要である。このような隙間の問題は8.1節で述べた法先洗掘対策工にも共通する課題である。

捨石フィルターもまた古くから利用されている工法である。砂と石の中間の大きさの石を投入して洗掘を防ぐものである。ただし、その石が砂よりもだいぶ大きい場合には洗掘を抑制できず、また、その上の石よりもだいぶ小さい場合には、フィルター材自体が洗掘を受けてしまう。そのため、複数層のフィルター層が必要となる場合が多い。

8.3 護岸・岸壁背後地盤の吸い出し防止工

5章で述べた護岸・岸壁背後地盤の吸い出しは、裏込石や目地のように大きな隙間に砂が漏れ出していく現象であり、波浪外力などが無くとも重力で砂が落下していくという点で、その対策の難しさがある。一般的に裏込石への吸い出しを防ぐために防砂シートが多く使用されている。防砂シートは織布と不織布に分類されるほか、その厚さや質量、強度の違いによって多くの種類がある¹⁶⁾。しかし、防砂シートは施工中の紫外線による劣化や風や波によるフラッタリング（ばたつき）によって裏込石と摩擦するなどして破損しやすいので、敷設後、速やかに埋立砂で被覆することが重要である。特に波による裏込石との摩擦は防砂シートの破損に結び付きやすい。図-8.1は施工時に防砂シートに作用すると想定される小さな波として波高20cm、周期1.6sの波を16万波（約71時間）、港湾基準の最低規格に相当する織布に作用させた状況である²⁸⁾。

最近ではこのような防砂シートに頼らずに捨石フィルターを併用しようとする動きがあり²⁹⁾、港湾基準の2022年3月の部分改定時に、防砂シートに加えて吸出し対策としての捨石フィルターの考え方が記載された。捨石フィルターは裏込石と埋立砂の間に、その中間の粒径の捨石を設置して吸い出しを防ごうとするものである。捨石フィルターはそれ自体が粒径の小さい材料であり、施工中の波で散乱する場合もあり注意が必要である。このほか、防砂シートや捨石フィルター以外にも、地盤改良による埋立砂の固化やより強い材料であるアスファルトマットなどがあり、施工性や経済性も含めて検討されていくものと考えられる。



図-8.1 防砂シートのフラッタリングに対する耐久試験²⁸⁾

また、護岸の場合には、5章で述べた裏込石や目地内部に発生する強大な波力が問題になる。その対策として裏込石の上にさらに石を置いて埋め立て地盤の天端部まで伸ばし、裏込石内部に発生する圧力を抜く工法がある^{21),22)}。この圧抜工法は志布志の備蓄基地で初めて使われたものであり、現在では多くの場所で使われている。石を用いたこの圧抜工法は越波水の排水工としても機能する可能性があり、今後の検討が期待される。目地内部の衝撃波力対策としては、アスファルトマスティックや水中コンクリートを目地内部に充填する工法や、網材を挿入して水の動きを抑制する方法³⁰⁾がある。

8.4 フィルタールール

捨石フィルターにはフィルタールールがあり、欧州ではフィルターの研究が盛んに行われてきた。フィルタールールとしては古くからある幾何学的に安定なフィルター（Geometrically Closed Filter）と外力に応じて定まるフィルター（Geometrically Open Filter）がある³¹⁾。Closed Filterは幾何学的に砂がフィルターから抜け出さないという厳しいルールであり、ダム設計にも用いられてきた。一方、Open Filterは外力に応じてフィルターを設計するものであり、波浪の大きさによってはClosed Filterで設計するよりも砂に対して粒径の大きめの材料を使用することができる。Open Filterを設計する際の考え方としては、想定する外力までは砂の移動を抑制することができる程度にフィルター粒径を小さくする方法(De Graauw et al., 1984)³²⁾と砂地盤が受ける外力を小さくするようにフィルター層厚を大きくする方法(Hoffman, 2012)³³⁾などがある。

8.5 変形を許容する工法

多くの場合、洗掘はある程度進行すると落ち着く傾向にある。そのため、構造物が大きく変形しない範囲で洗掘を許容することも考えられる。図-8.2は3.2節の消波ブロック被覆堤のブロック下部の洗掘実験の結果である。波の作用とともに洗掘が進行するものの徐々に落ち着くのが分かる。かつては消波ブロックの沈下が各地で問題となっていたのだが、近年防波堤の築造が減少してきたこともあり、ブロックの沈下被災の事例が少なくなっている。洗掘現象が徐々に落ち着くこともその要因だと考えられる。このような現象は津波の越流洗掘や風力発電施設（円柱）まわりの洗掘にも共通するものであり、構造物によっては洗掘を許容することも工法の一つとなる可能性もある。

変形した後に長期にわたって機能している構造物の例として、日本統治時代に台湾の高雄港に建設された湾口防波堤³⁴⁾について述べたい。打狗港（現在の高雄港）の湾口防波堤はマウンドを設置せずにケーソンブロックを直接砂地盤に設置した防波堤であり、ある程度の洗掘を見越して設置された防波堤である。「ケーソンブロックは、予期のおりさまさまざまな形で沈下した後、頂部コンクリート、間隙の充填、捨石による根固めが施された。出来上がりは凹凸不整であるが、もともと外観の美を誇る考えではないのであるから意に会する必要はないとしている。この防波堤は、その後は災害を被ることなく現在（昭和41年）に至るまで安定と機能とを保っている(伊藤ら, 1966)³⁵⁾」。施工直後は数mのケーソンブロックの沈下が見られたがその後は安定し、設置後100年を経過して現存しているようである。いずれかの機会にその後の維持補修の経緯を調べたいと考えている。

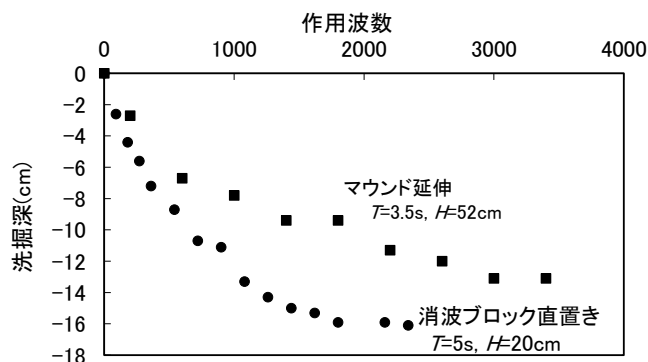


図-8.2 洗掘深の時間変化¹²⁾

9. おわりに

本稿では，“海岸工学での地盤にまつわる事象について”と題して、漂砂や波による地盤の液状化、洗掘、吸い出し、波浪による地盤の振動など、筆者がこれまで関わってきた項目について記載した。そのため、内容が偏っていることと定性的で概説にとどまっている。また、最新の研究を参照できていない部分も多い。特に洋上風力発電の洗掘や護岸の吸い出しに関する研究は世界的に精力的に実施されており、最新の研究を参照していただきたい。

謝辞

筆者の地盤に関する研究の多くは前港湾空港技術研究所理事長の高橋重雄氏の指導のもとで行われたほか、耐波研究グループや多くの共同研究者の協力のもとに行われたものである。

参考文献

- 1) 合田良實(2008):耐波工学, 鹿島出版会, 430p.
- 2) 本間仁・堀川清司(1985): 海岸環境工学, 東京大学出版会, 582p.
- 3) B. Sumer & J. Fredsoe(2002):The Mechanics of Scour in the Marine Environment, World Scientific, 536p.
- 4) K. Suzuki, S. Takahashi, K. Yoon-Koo(1998): Experimental Analysis of Wave -Induced Liquefaction in a Fine Sandbed, Proceedings of 26th ICCE, pp.3643-3654.
- 5) 善功企(1993): 海底地盤の波浪による液状化に関する研究, 港研資料, No.755, 112p.
- 6) 鈴木高二朗・多田清富・下迫健一郎・山崎浩之・姜閔求(2003): 大規模水路における波浪による地盤の液状化に関する一実験, 海岸工学論文集, pp.856-860.
- 7) 鈴木高二朗(2001): 砂漣内の浸透流について, 港研報告, Vol.40, No.1, pp.31-45.
- 8) 入江功・灘岡和夫・近藤隆道・寺崎賢次 (1984) : 重複波による防波堤前面での二次元的海底洗掘, 港研報告, Vol.23, No.1, pp.3-52.
- 9) 田中則男(1974): 砂浜港周辺における海底および海浜の変化, 昭和49年度港湾技術研究所講演会講演集, pp.1-46.
- 10) 栗山善昭(2010): 波崎海洋研究施設で観測された20年間の沿岸流と海浜断面, 土木学会水工学シリーズ, 10-B-5, 13p.
- 11) 鈴木高二朗・渡邊和重・山本悟・梅崎康浩・小澤康彦・村上俊春(2004): 防波堤基礎工における洗掘防止工の実態調査, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.726-730.
- 12) 鈴木高二朗・高橋重雄・高野忠志・下迫健一郎(2002): 砂地盤の吸い出しによる消波ブロック被覆堤のブロックの沈下被災について, 港空研報告, Vol.41, No.1, pp.51-89.
- 13) 西田仁志・山口豊・近藤豊次・清水謙吉(1985): 孔間弾性波探査法による離岸堤の埋没状況に関する考察, 海岸工学論文集, Vol.32, pp.365-369.
- 14) 森平倫生・神田勝己・国田治 (1978) : 沖合防波堤設計上の諸問題 (新潟港防波堤災害の考察) , 第25回海岸工学論文集, pp.581-584.
- 15) 鈴木高二朗・高橋重雄(2012): 消波ブロック被覆堤ブロック下部の洗掘量の推定について, 沿岸技術研究センター論文集, No.12, pp.1-3.
- 16) 港湾の施設の技術上の基準・同解説(2018): 日本港湾協会
- 17) 富田 孝史, 廉 慶善, 熊谷 兼太郎, 高川 智博, 鈴木 高二朗, 渡邊 祐二, 齊藤 節文, 佐藤 正勝(2012) : 2011年東北地方太平洋沖地震津波による八戸港の被害, 土木学会論文集B2, Vol.68, No.2, pp.I_1371-I_1375.
- 18) 鈴木高二朗・池田直太・鶴田修己・朝比翔太・久保田博貴・伊藤春樹(2021): 浦戸湾湾口における津波防波堤堤頭部の津波による洗掘について, 土木学会論文集B3, Vol.77, No.2, pp.I_139-I_144.

- 19) 中村康大・鈴木高二朗(2022): 津波の越流洗掘に対する捨石のアーミング効果に関する小型模型実験, 土木学会年次学術講演会公演概要集, in print.
- 20) 鈴木滉平・有川太郎(2019): 越流による直立型堤防背後洗掘の時系列変化についての検討, 土木学会論文集B2, Vol.75, No.2, pp.I_715-pp.I_720.
- 21) 高橋重雄・鈴木高二朗・徳淵克正・岡村知光・下迫健一郎・善功企・山崎浩之(1996): 護岸の吸い出しに関する水理模型実験, 港研報告, Vol.35, No.2, pp.3-63.
- 22) 高橋重雄・鈴木高二朗・朴佑善(2002): 護岸の裏込部への波圧伝播に関する数値計算, 海洋開発論文集, Vol.18, pp.233-238.
- 23) 山本泰司・笹島隆彦・水野雄三・長内戦治(1995): 波浪による海岸居住地の振動・騒音被害について, 海岸工学論文集, Vol.42, pp.1151-1155.
- 24) 田中敦・鈴木高二朗(2020): 直立護岸に作用する波圧と背後地盤の振動に関する一実験, 土木学会論文集B3, Vol.76, No.2, pp.I_121-I_125.
- 25) 北川信・伊藤進一郎・土谷政治・今井貫爾(1991): 急潮流下における大規模橋梁基礎の洗掘防止工に関する研究, 土木学会論文集, No.438, pp.61-70.
- 26) 小林航・関谷勇太・鈴木英樹・青田徹・松田節男・高橋武志・下迫健一郎・鈴木高二朗(2022): 袋型根固め材による洋上風力発電設備の洗掘防止効果と模型の縮尺効果に関する大規模水理模型実験, 土木学会論文集B2, in print.
- 27) 入江功・栗山善明・朝倉弘敏(1986): 重複波による防波堤前面の海底洗掘及びその対策に関する研究, 港研報告, Vol.25, No.1, pp.3-86.
- 28) 堀井一樹・鈴木高二朗・西野好生(2018): 埋立前の護岸における防砂シートの耐久性に関する検証, 土木学会論文集B2, Vol.74, No.2, pp.I_1117-I_1122.
- 29) 工代健太・佐々真志・梁順普・後藤翔矢(2019): 様々な水理外力下における地盤内の空洞形成・陥没の進行過程および吸い出し抑止法の研究, 土木学会論文集B2, Vol.75, No.2, pp.I_937-I_942.
- 30) 石坂修・佐々真志(2017): 吸い出し・陥没リスク抑制に向けた緩衝材によるケーソン目地透過波低減法と現地試験による実証, 土木学会論文集B2, Vol.73, No.2, pp.I_1477-I_1482.
- 31) G. Schiereck (1998): Filter Structures, Dikes and Revetments, A.A. Balkema, pp.177-190.
- 32) de Graauw, Arthur, Meulen, Ton, Bye, Martin(1984): Granular Filters: Design Criteria, Journal of Waterway Port and Coastal and Ocean Engineering, Vol. 110, pp. 80-96.
- 33) G. Hoffmans(2012): The Influence of Turbulence on Soil Erosion, Eburon, 248p.
- 34) 山形要助 (1919) : 打狗港けいそん, ぶろっく防波堤に就て, 土木学会誌第5巻第6号, pp.1243-1258.
- 35) 伊藤喜行・藤島睦・北谷高雄 (1966) : 防波堤の安定性に関する研究, 港研報告, Vol.5, No.14, pp.1-134.