

## 寒冷沿岸域チーム

### はじめに

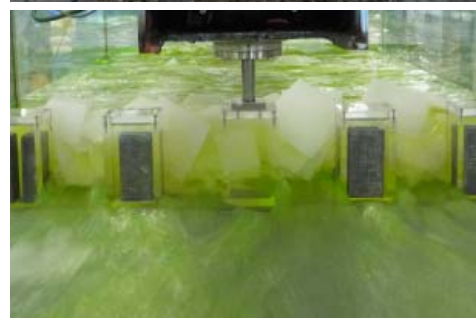
寒冷沿岸域チームは、北海道開発局開発土木研究所の港湾研究室であったが、平成 13 年 4 月の独立行政法人化を経て、平成 18 年 4 月に現在の名称となり今日に至っている。積雪寒冷地である北海道の沿岸は、冬季の流水来襲や港内凍結など、他の地域とは異なった特性を持っている。また、近年、高潮・高波による沿岸施設被害や、大地震とそれに伴う津波による被害が発生しており、今後もこのような自然災害が懸念される。さらに、河口周辺の沿岸域においては河川流域全体の土砂動態に起因する安全・利用上の課題への対応も求められている。当チームでは、寒冷な気候、流水、津波、高波、高潮といった脅威に対して沿岸域の安全性を高め、また、海域の自然環境にも配慮しながら寒冷地の港や海岸を持続的、効率的、効果的、経済的に整備、利用するための研究を行っている。以下に、最近の主要な研究について紹介する。

### 研究概要

#### (1) 寒冷沿岸域における津波減災技術に関する研究

北極海やオホーツク海など結氷板や流水等の海水で覆われる氷海域において発生した津波は、通常の津波よりも被害を拡大する可能性がある。現実には、過去に海氷を伴う津波により家屋や橋脚等が被災した事例がある。2011 年の東北地方太平洋沖地震で発生した津波でも、国後島で海氷が遡上し、軽微な被害を及ぼした他、我が国でも、海氷の遡上や、河川氷の水門への衝突やアイスジャム（閉塞）発生による水位上昇等、津波による何らかの氷の挙動が確認された（写真－1）。

前中期計画の研究では、氷海域での津波発生や被害事例等を整理しそのリスクを検討することを皮切りに、中規模実験と数値計算による海氷の衝突力や破壊機構、水理模型実験に基づく海氷を伴う津波遡上特性の解明等といった基礎的な研究を行ってきた。更に、海氷の離散体特有の挙動が考慮できる津波と氷の陸上遡上シミュレーション法を開発し、ハザードマップ作成、構造物の安全性や配置計画、避難行動計画等を検討する上で有用なツールのひとつを構築した。今中長期計画の研究では、避難施設や危険物施設等の特に重要と思われる構造物のより具体的な設計法や対策法の構築に主眼を置き、津波と海氷あるいは漂流物からなる混相流体のより複雑な相互作用モードに対応できる手法を確立し、総じて、大量の海氷や漂流物を伴う津波による被害リスクの予測や防災・減災技術の早期確立に向けた研究を行っている。



写真－1 津波による海氷の遡上例（上）とアイスジャム形成の模型実験（下）

#### (2) 海面上昇に伴って激化する外力に対応した沿岸域のリスク評価と対策に関する研究

将来的な地球温暖化に伴い、沿岸域では、海面水位の上昇や極端な高波、高潮による護岸や防波堤などの沿岸施設の被災リスクの増加が懸念されている（写真－2）。海面水位が上昇した場合、多くの砂浜が消失するため、波が護岸を越えて道路や家屋にまで及ぶ可能性が高まる。また、防波堤などの水中に設置された構造物は、浮力が増加し、さらに、波力の作用位置が現状よりも高くなるため、滑動や転倒する危険性が高まる。本

研究では、北海道沿岸部の将来的な海面水位の上昇や極端な高波・高潮の発生に対する被災リスクの評価および低減策の提案を目的として、海象観測データの解析や過去の被災事例の分析、高波・高潮予測モデルの構築を進めている。

既往の海象観測データによると、近年、北海道沿岸部の海面水位は日本海側の一部の海域を除いて上昇傾向を示している。また、波高に関しては、最大有義波高など、比較的高い波高を抽出して経年変化を評価すると、波高は増加傾向を示している。国道通行規制情報（図-1）によると、地形が複雑な岩礁地帯に建設された日本海側と太平洋西部の海岸道路において、高波による通行止めが比較的多く発生している。今後、北海道沿岸部の海象や沿岸施設の状態をより詳細に把握し、さらに、高波・高潮予測モデルを用いることにより、最悪の事態を想定した沿岸施設の被災リスクの評価と低減策の提案を目指している。

### （3）構造物固有の凍害・複合劣化のメンテナンス技術に関する研究

積雪寒冷地の構造物は、厳しい環境作用等によりその健全性が著しく低下している事例が多く（写真-3）、その要因の一つとして挙げられる凍害との複合劣化（作用）への対策は未整備であり、構造物の安全性確保、性能保持や長寿命化に向けて、その対策を講じることが喫緊の課題である。積雪寒冷地の沿岸構造物においては、低温環境や海水作用などの寒冷海域特有の特性を考慮した構造物の劣化対策・防食工法やメンテナンスサイクルの確立が求められている。前中期計画ではこれまで、主に鋼構造物を対象とし、海水や低温環境による劣化損傷機構の解明と対策工法構築のための研究を行ってきた。特に金属材料と海水のすべり摩擦による損耗に着目し、凝着摩耗、アブレシブ摩耗（エロージョン）といった摩耗現象の他、腐食（コロージョン）も同時に発生する場合の損耗特性等を明らかにするとともに、通常海域で使用される防食工法の氷海域での適用性とその代替案について検討してきた。今中長期計画の研究では、コンクリート構造物にも対象を広げ、海水、海水、凍結、砂などによる気象・化学・物理的作用による幅広い複合劣化機構の解明並びに、合理的な補修・対策工法の開発とその実証試験等を予定している。本研究は総じて、寒冷海域特有の劣化損傷特性を考慮した沿岸構造物の合理的なマネジメントシステム構築に寄与し、さらには、北極海や亜極地等における鉱物・石油天然ガス等の海底資源採掘等のための各種氷海施設の設計・維持管理といった幅広い分野への応用・普及を目指した国際的・学際的な研究を行っている。

### （4）河口・沿岸域における土砂動態のモニタリング技術と予測システムの開発

我が国では、ダム堆砂や河川での砂利採取、海岸構造物による沿岸漂砂の遮断などの影響により、年間約 160ha もの砂浜が消失し、さらに、気候変動に伴う海面上昇によつ



写真-2 海岸護岸の被災状況  
(平成 27 年 8 月新ひだか町)

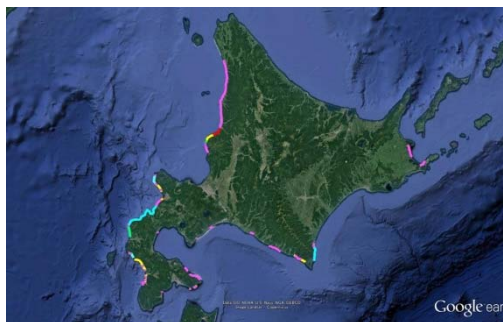


図-1 昭和 47 年以降に通行止めが行われた沿岸地域  
(北海道開発局道路維持課提供)



写真-3 オホーツク海に面した構造物の損傷例



て、将来的にさらに多くの砂浜が消失すると予測されている。砂浜は、背後に控える生活・産業活動の場を波浪から守る役割を担うのみならず、豊かな生態環境と海岸景観を創造する場として機能している。周囲を海で囲まれた我が国においては、砂浜が有する役割・機能の重要性は高く評価されており、砂浜の維持・回復が強く求められている。砂浜の維持・回復策を検討する際には、河川、河口を經由して海域へ供給される土砂の量と質（粒径分布）を明らかにする必要があるが、このような評価を可能とするモニタリング技術は確立されていない。加えて現状では、数年に1回程度（多くとも年1回程度）行われる公共測量や底質サンプリングなどの結果から、海域への土砂の供給量と移動過程の評価・予測が行われているため、その精度の低さが問題となっている。本研究は、河川から海域へ供給される土砂の量と質（粒径分布）の時空間変動と海域における土砂の移動過程を定量的に評価可能なモニタリング技術と予測システムを開発することを目的とする。平成30年以降3か年に渡り、北海道沙流川（図-2）の融雪出水期、夏季出水期を対象として、ナローマルチビームソナー測深システムや粒径粒度分布計測装置などを用いることにより、河川流出土砂量と波浪による土砂の移動量を粒径ごとに把握する。また、得られたデータをもとに、河口域の土砂動態を予測可能な数値モデルの構築を目指している。

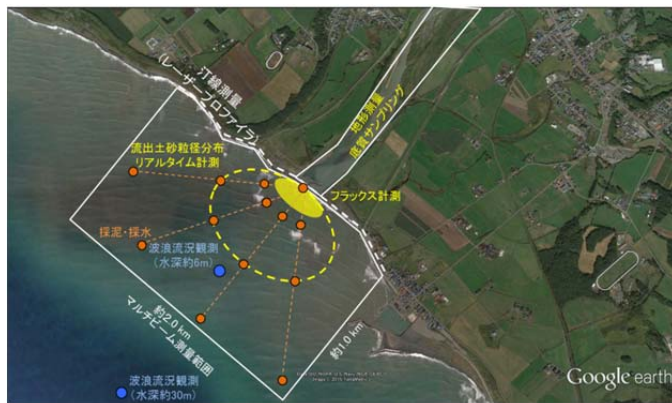


図-2 北海道沙流川河口の様子

### （5）河口導流堤の損耗・劣化メカニズム解明に関する研究

導流堤は河川流の方向や速度を一定に保ち、河口閉塞を防ぐために設置された構造物である。導流堤の多くが鋼製矢板やコンクリートブロックで造られている。鋼製矢板で建設された導流堤の中には、腐食対策が行われていたにもかかわらず、耐用年数よりも前に損耗・劣化が進行したものが多くあり、中には倒壊に至った事例も報告されている。また、コンクリートブロックで建設された導流堤では、地盤付近の構造体が削られて、鉄筋が露出した事例が報告されている。損耗・劣化が進んだ導流堤がある河口域では、河川から流出した砂礫が堆積し、それらが波浪や河川流によって繰り返し導流堤に衝突することにより、部材の損耗・劣化が当初の想定よりも進行していると考えられており、今後、対策工を検討するうえでも、砂礫の衝突による導流堤の損耗・劣化メカニズムを明らかにする必要がある。本研究は、現地観測と室内実験を行い、砂礫の衝突による河口導流堤の損耗・劣化メカニズムを明らかにすることを目的とする。

現在、道南地方における矢板式・コンクリートブロック式導流堤の実態調査を実施し、導流堤の損耗・劣化量、導流堤付近の流速と土砂の粒径分布に関するデータベースを構築している。また、水中マイクロフォンや面的圧力センサーを用いることにより、砂礫が導流堤に衝突する回数・強さを計測している（図-3）。今後、更なる現地調査と水理実験を行うことにより、導流堤の損耗・劣化メカニズムの解明を目指している。



図-3 水中マイクロフォンと面的圧力センサーを用いた砂礫の衝突音と衝突力計測システムのイメージ

## (6) 海岸護岸の防波フェンスへの作用波力に関する研究

外海に面した護岸背後にある道路や建物などは、これまでも高波時に通行障害や破損被害がしばしば発生している。道路交通に対しては消波ブロックの設置や防波フェンスの設置により安全性を確保することが一般的に行われている。しかしながら、汀線付近に設置した消波護岸の越波量および防波フェンスへの作用波力が過小評価されることがあり、施設の破損被害が発生している。これは、堤脚水深、周期、海底勾配など一定の条件下においては防波フェンスの設計法が提案されているが、その他の条件に対しては設計法が確立されていないことによる。また、現場によっては消波ブロックの設置が困難であり、経年的に消波工が沈下・飛散などして十分な機能が得られていない状況もあり、その場合の防波フェンスに作用する波力が明らかでない。本研究では、海岸護岸において、堤脚水深、波高、周期、海底勾配、消波工の有無などの多様な条件下における防波フェンスの設計法の提案を目指す。なお、本成果は、越波による通行障害が発生している海岸護岸背後道路の越波対策に適用されている。主な研究成果は、下記のとおりである。

消波護岸において、静水面からの護岸天端高と設計波高との比である  $Z^*$  ( $Z/H_{max}$ ) をパラメータとした条件下において、 $B_0$  (消波ブロック天端幅) と  $h_c$  (フェンス天端高) の違いによる波圧の変化傾向を確認した (図-4)。消波護岸天端高の違いによる波力特性について明らかにした。消波工が変状している事例を収集、被災パターンを確認し、模型実験により、消波工の変状メカニズムを解明し、消波ブロックの変状を生じさせないための対策工を提案する。また、直立護岸の模型実験により、作用する波圧が計算値を上回る条件を確認し、水深、波高、周期を変化させた系統的な検討を行い、波力算定法の提案を目指している。

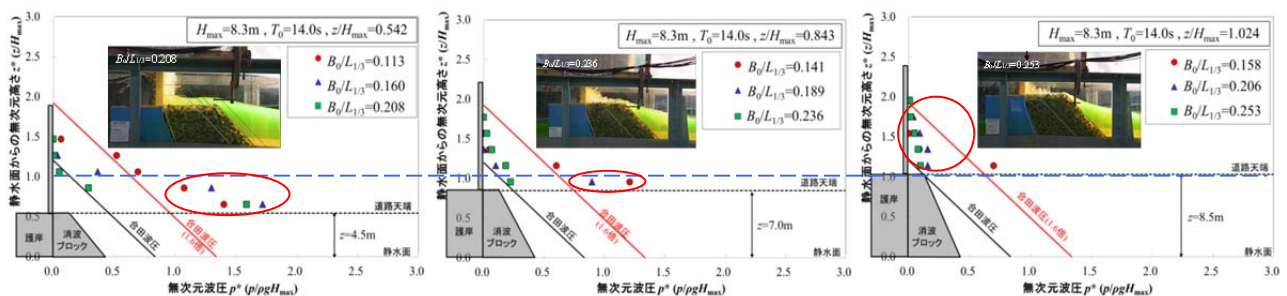


図-4 海岸消波護岸の構造条件の違いによる防波フェンスへの作用波力

## (7) 沿岸域における高波避難に関する高度警戒システムの開発

北海道沿岸の主要な沿岸道路は、背後圏の物流や地域住民の生活を支える唯一の生命線となっている場合が多い。高波被災 (写真-4) への対策として道路の再配置などが考えられるが、沿岸道路の延長スケールを考えると、このような恒久対策には膨大な時間とコストを要する。このため、パトロールによる現況確認と交通規制などのソフト対策によるのが実態である。また、利用者の多い港湾・海岸の親水性施設においても利用規制の明確な基準がなく、一般的な気象・海象予報や施設巡回に基づき、その都度対応しているのが実態である。特に、視認性の低い親水性施設においては利用者が高波に気づきにくいという危険性もはらんでいる。このような背景から、本研究では、高波時に利用者へ危険を知らせる警戒システムの開発を進めている。



写真-4 沿岸道路の越波状況



## (8) 前中期計画に終了した主な研究

### ①積雪寒冷地の河口域海岸の形成機構解明と保全に関する研究(H23～H27)

本研究では北海道の鵡川(図-5)を対象として、河口地形の変動傾向と変動要因を明らかにし、河口地形の安定的な保全策の提案を目的としたものである。主な研究成果は、下記のとおりである。

1970年代から90年代の急速な汀線後退は河道掘削に伴う海域への土砂供給量の減少と漁港建設に伴う沿岸漂砂の遮断、さらに、大きな出水が比較的少なかったことが影響したと考えられる。1998年以降では、河道掘削の禁止と大規模な出水、さらに、漁港の堆積土砂を用いた継続的な養浜の影響により汀線の大きな後退は生じていない。しかしながら、漁港で遮断している沿岸漂砂量と比べて養浜量はかなり少なく、さらに2006年以降、大規模な出水は生じていないため、河口東側の比較的浅い領域が侵食されるようになった。鵡川では1998年以降、河道地形が回復傾向を示しているため、今後、この状況が続き、河川の流下能力の維持・向上等を目的とした河道掘削を行う際には、掘削土砂を河口の侵食域へ輸送することが地形の安定化に必要であることを示唆した。

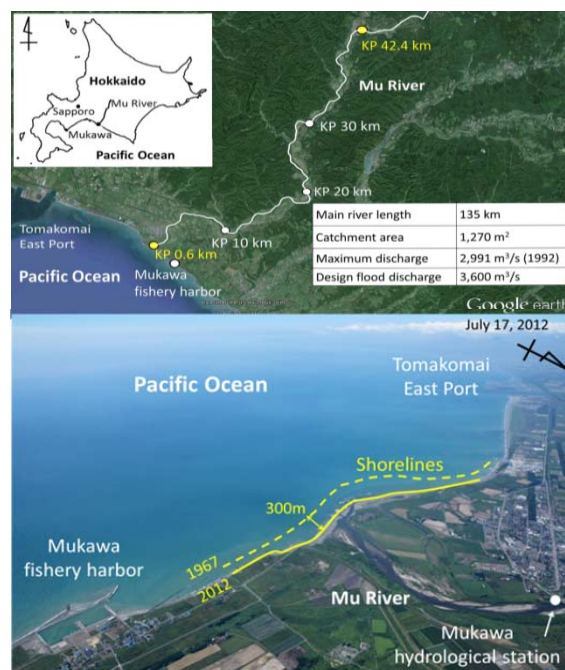


図-5 北海道鵡川の位置図

### ②海水作用や低温環境に起因する構造物劣化・損傷機構の解明と対策に関する研究(H23～H27)

本研究は、海水の作用や低温環境にさらされる沿岸構造物のうち、特に鋼構造物の劣化機構を解明し、劣化現象を踏まえた合理的劣化対策を提案することにより、積雪寒冷地の沿岸構造物の長寿命化を図ることを目的としたものである。主な研究成果は、下記のとおりである。

現地調査により、海氷に砂等の固形分が含まれていること、その混入プロセスを明らかにするとともに、すべり摩擦摩耗試験によりこれが大きな損耗現象をもたらす一要因であることを実証した。固形分が含まれなくても、海氷による繰り返しの腐食生成物の除去により、腐食が促進される可能性があることを示すなど、海水作用を受ける現象のうち、大きな損耗要因となり得るメカニズムを明らかにした。さらに、現地暴露試験、水質調査ならびに理論的検討より、海水作用あるいは海水作用以外の低温(水温)環境により、通常海域に比べ氷海域における材料劣化が進行する可能性があることを示した。また防食対策として多く使用される幾つかの防食工法の氷海域における暴露試験より、その耐氷性に問題があることを明らかにした。その代替案として、安価な犠牲鋼板による補修/対策法(写真-5)、海水の作用力を軽減するため配置と形状に工夫した新たな陽極を提案し、現地暴露試験等により、その有望性を確認した。以上より、海水作用による種々の材料の損耗プロセスと損耗率の概略的な推定が可能となり、氷海域において、新たに提案した工



写真-5 犠牲鋼板暴露試験体の状況(3年目、2016年流水離岸後)

法を含め、適切な構造形式・防食法の導入・設計、適切な補修・更新時期等の維持管理計画に資する研究成果を得た。

### ③津波による流水群の陸上来襲に備えた沿岸防災に関する研究(H23～H27)

本研究は、海氷を伴う津波による被害リスクの予測や防災・減災技術の確立に向けた知見を得る事を目的としたものである。主な研究成果は、下記のとおりである。

津波による海氷の漂流・陸上遡上シミュレーション手法として広域を対象とする連続体モデルと局所領域を対象とする離散体モデルを開発した。このうち離散体モデルについて、氷などの離散体特有のアーチアクション(arch action)やジャム(jam)、パイルアップ(pile-up)などが考慮できる準3次元個別要素法(DEM)を開発した。この手法を用いて、北海道東部の漁港を例に、仮想津波による海氷の遡上計算および被害想定等のデモンストレーションを行った結果、ハザードマップ作成のほか、構造物の安全性や配置計画、避難行動計画等を検討する上でも、本手法が有用であることを確認した(図-6、7)。また、海氷の衝突破壊および衝突荷重推定のため、3次元のDEMおよび動的弾塑性有限要素法(FEM)の数値モデルを開発し、中規模衝突実験によりそれらの妥当性を示した。破壊性状や衝突波形を対象とする場合には、DEMを用い、最大衝突力や継続時間の概算推定であれば、計算コストの安いFEMを用いる事により合理的な検討手法を提案した。さらに、海氷と衝突過程にある構造物の動的応答解析も可能とした実用的で総合的なシミュレーション手法を開発し、その構造設計、性能評価や安全性の視覚的な理解と確認ができる設計支援ツールを整備した。最後に市街地の津波氾濫を想定した水理模型実験により、海氷と海水の混相流体が及ぼすリスクなどを明らかにし、津波防災上の留意事項等を提案した。以上より、事例検討、理論、数値計算、物理実験など多角的な研究手法により、海氷を含む津波のリスク想定とその備えに必要な知識とツールを得た。

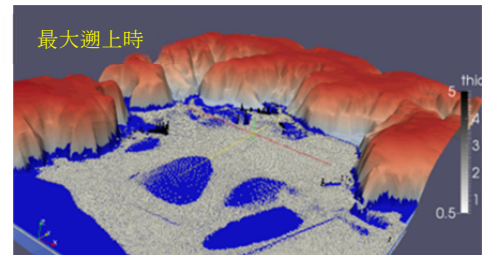


図-6 津波による海氷遡上のシミュレーション例

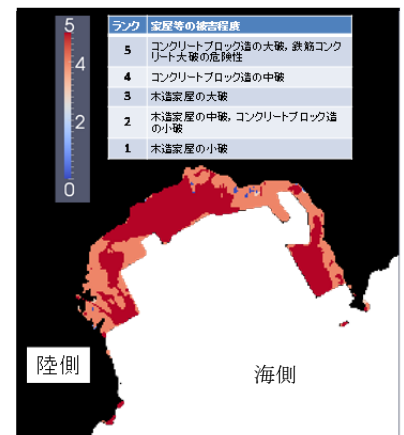


図-7 図-6の結果に対応する被害予測の例

### ④流水勢力変動に伴う沿岸防災の対策手法に関する研究(H26～H28)

本研究は、ブロック等で被覆されていない自然海岸となっている道路盛土を対象に、氷海域において今後流水減少に伴う被災リスクの増大に備えた沿岸施設の防災機能向上を図る対策手法を提案するとともに、沿岸施設の今後の維持管理施策に貢献することを目的としたものである。主な研究成果は、下記のとおりである。

自然海岸において、波の遡上により後浜盛土に被災のあった状況を水理模型実験により再現し、自然後浜盛土を欠損させる水脈厚と遡上流速の初期条件および後浜盛土の崩壊パターンを把握し、高波による地盤性状変化に応じた破壊メカニズムを解明した。また、後浜斜面の崩壊量は、相対密度と飽和度によって異なることを明らかにした。これらの結果を基に、波遡上対策案(消波堤、



写真-6 被災相当波浪作用後の状況

法面被覆)を抽出し、数値解析を行い波の遡上高および越波流量について検証した結果、高い再現性を確認した。更に、特に流氷の卓越するオホーツク海域で把握した近年にみられる流氷状況について再現した水理模型実験により、波遡上対策案(防氷柵・消波堤)の平面配置を含む効果および耐波性能の検証・評価を行った(写真-6)。以上から、有効な沿岸施設整備手法として消波堤及び法面被覆案を提案した。

### ⑤港湾・漁港における津波漂流物対策に関する研究(H25~H27)

本研究は、東日本大震災における対策施設の効果について検証するとともに、数値計算、水理模型実験等によりこれら設計上の課題を解決することを目的としたものである。主な研究成果は、下記のとおりである。

東日本大震災津波において生じた大型漂流物の実態について取りまとめるとともに、既存の対策施設の設計条件を整理することによって設計上の課題を抽出した。その上で、基礎的な水理実験を実施して杭高さおよび杭間隔が漂流物の捕捉特性に与える影響を明らかにし、対象漂流物に応じた適切な施設形状の考え方を提案するとともに(図-8)、対策施設の支柱設計の基礎となる漂流物の衝突運動について、ラグランジュ型数値解析モデルによる模型実験の再現計算を実施して、衝突運動を精度良く推定する手法を提案した。更に、えりも港をモデルケースとして、簡易なモデルを用いた漂流計算により、津波漂流物対策施設の効果を検証した。

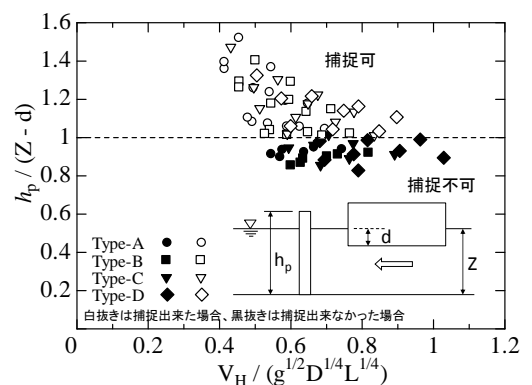


図-8 無次元杭高さが捕捉特性に与える影響