

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 20 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360174

研究課題名(和文)長大無筋コンクリート構造物の防災機能にリンクした劣化度指標の設定に関する研究

研究課題名(英文) Determinaion of damage index on long un-reinforced concrete structures relating to disaster prevention

研究代表者

横田 弘(YOKOTA, Hiroshi)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50344312

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,000,000円

研究成果の概要(和文)： 海岸域に建設される長大無筋コンクリート構造物を対象に、防災機能とリンクさせつつ、構造物に生じた劣化・変状に基づく総合劣化度指標の設定について検討した。構造物に発生した変状としてひび割れに着目し、その幅、深さ、発生位置を類型化した解析モデルを構築した。また、ひび割れ面における応力伝達を評価する力学モデルを開発し、解析モデルに組み込んだ。最後にこれらを総括して、劣化・変状を有する構造物をモデル化した解析により、残存性能および防災機能とリンクした総合劣化度指標を提案した。その結果、同構造物の維持管理の効率化に貢献できる成果を導いた。

研究成果の概要(英文)： This research focused on how the comprehensive damage grading system is established for a long un-reinforced concrete structure along coastlines from the viewpoints of structural performance and functions of disaster prevention. Major damage induced in this type of structure is concrete cracking due to shrinkage of concrete and differential settlement of the structural body; accordingly, crack width, depth and position are categorized and modeled into the structural analysis tool. Moreover, shear transfer behavior between the crack surfaces was experimentally made clear. Finally, structural analysis taking into account the above behavior was carried out to quantify remaining structural performance of damaged structures. In conclusion, new criteria for damage evaluation have been proposed to access the function and performance of cracked un-reinforced concrete structures. These results may contribute to realize more effective and objective maintenance work.

研究分野：維持管理工学

キーワード：維持管理 無筋コンクリート構造物 ひび割れ 防災機能 劣化度 耐力 点検診断

1. 研究開始当初の背景

無筋コンクリート構造物は、海岸における堤防の胸壁や波返し構造等に多用され、防災上、国土保全上非常に重要な機能を担っている。しかし、種々の要因により供用中に性能の低下が生じ、十分に機能を果たせなくなることも少なくない。

コンクリート構造物に生じる変状が性能に与える影響については、塩分の侵透によって生じる鉄筋コンクリート内部の鉄筋の腐食(塩害)等の代表的な変状に対して多くの知見が得られている。しかし、無筋コンクリート構造物の変状が性能に与える影響については、その知見がほとんど蓄積されていない。このような構造物に生じる主要な変状は、収縮や不同沈下等により生じるひび割れと材料の劣化である。ひび割れの幅や深さの増加に伴い性能や防災上の機能が徐々に失われていくため、ひび割れの状態を定量的に扱うことで、耐力等の性能を推定することが可能であると考えられる。

特に、海岸構造物について着目してみると、通常の点検診断で判定される劣化度と性能や防災上の機能との関係が不明で、劣化度の設定根拠が希薄である。構造物の局所の変状が構造物全体の性能を低下させ、必要な機能が喪失する。津波(波浪)とそれによる構造物の応答が海岸全域の複合スケールでの災害に与える影響を検討するためにも、構造物の性能を精度よく評価する必要がある。

このようなことに対し、材料・構造的知見と海岸工学の知見を融合し、他の構造物にも応用できるような最先端の解析モデルを構築し、構造物の局所的な変状を精緻に反映した総合劣化度指標を提案することが学術的にも実務的にも大変有用である。また、長大な構造物の局所的な劣化・変状に伴う総合的な構造物の性能・機能評価や背後陸域の災害脆弱性を合理的に指標化する必要がある。

2. 研究の目的

本研究は、内部に鋼材が配置されていない無筋コンクリート構造物の客観的かつ実用的な総合劣化度指標を、構造物の性能とリンクさせて提案するものである。研究では、コンクリート工学、構造工学、海岸工学の知見を融合し、性能の低下に伴う防災上の機能の喪失を数値的に取り扱い、客観的な劣化度診断を実現するための新たな総合劣化度指標および機能維持のための劣化度指標の限界値を検討する。そのために、次の3項目を主な研究の目的とした。

(1) 構造物に生じた劣化・変状の数値化と類型化

無筋コンクリート構造物の性能・機能の低下は、コンクリートに生じた初期ひび割れ等の変状に起因するため、まず、現地調査によりひび割れおよび材料劣化の分析および類型化を行う。

(2) 劣化・変状を有する構造物の残存性能評価

(1)で得られた変状の分析結果およびモデルに基づき、構造体の力学的構成則および変状モデルを構築し、数値シミュレーションによって性能および防災上の機能の低下を数値化する。また、空間的変動を示す劣化・変状の発生を確率的に取り扱い、数値シミュレーションの結果と融合させることを目指す。

(3) 防災機能とリンクした変状限界の検討

構造物が部分的に損傷した場合の防災上の機能の低下を定量化し、構造全体の総合劣化度指標と機能の低下を定量的に関連付ける。さらに、(1)および(2)の成果に基づき、防災上の機能の維持のための劣化度指標の限界値を明らかにし、客観的で効率的な維持管理を実現する手法を提示する。

このように、最終的には、長大無筋コンクリート構造物の総合劣化度指標を維持管理指針類へ反映させることで、海岸防災施設を始め、類似構造物のより合理的な予防保全による維持管理の実現を目指し、社会へと貢献することを目的とする。

3. 研究の方法

研究の目的を効率的に達成するために、上述の3つの研究項目を連携させて研究を進めた。研究項目ごとの研究方法を以下に示す。

(1) 構造物に生じた劣化・変状の数値化と類型化

長大無筋コンクリート構造物を対象に現地調査を行い、劣化・変状の形態を分析し、類型化を試みた。多様な設置環境を考慮するため、稚内港海岸、歯舞漁港海岸、銭函海岸および富岸海岸(北海道)、波崎漁港海岸(茨城県)、銚子漁港海岸(千葉県)、三崎漁港海岸(神奈川県)、筒石漁港海岸および能生漁港海岸(新潟県)、新湊海岸(富山県)、津松坂港海岸(三重県)寄島漁港海岸(岡山県)、下関港海岸(山口県)、別府港海岸(大分県)の14海岸に設置された防波堤、護岸、堤防の胸壁を調査対象とした。調査項目は、ひび割れの発生位置、幅、深さ、長さ、およびコンクリートの弾性波伝播速度である。これらの調査結果を部材の大きさに関連付けて極値統計等を実施し、ひび割れに代表される構造物の劣化・変状の形態を分析し、類型化した。この結果に基づいて代表的な変状形態に対する解析モデルを作成して、項目(2)および(3)に引き渡した。

(2) 劣化・変状を有する構造物の残存性能評価

初期ひび割れ等の変状を劣化要因として考慮した構造解析モデルを確立し、数値解析コードに導入するための検討を行った。その際、(1)で類型化した初期ひび割れを解析モデルに導入するために、既存の材料構成則を

拡張する方法を試みた。解析モデルの妥当性の確認のため、小型模型を対象とした载荷実験を行った。载荷実験では、小型の無筋コンクリート試験体にひび割れ幅と深さを模擬した欠陥をあらかじめ導入し、水圧や波力に相当する荷重を作用させることで構造的応答を調べた。

また、ひび割れ間の力の伝達、荷重によるひび割れの進展の再現性に着目して構築したモデルを用いた構造解析を行い、ひび割れによる性能の低下について検討した。

(3) 防災機能とリンクした変状限界の検討

津波（波浪）に対する長大無筋コンクリート構造物全体の防災上の機能および背後域の災害脆弱性を、AMR 津波遡上シミュレータを適用して評価した。海岸、陸域の高解像地形データと構造物形状を初期地形として与え、数百 km の波源スケールから構造物を記述する 1m スケールオーダーの重合津波変動スケールを同時に計算し、詳細な浸水域、遡上高さ、そして局所水位差に応じた構造物に作用する外力分布を取得した。精細シミュレーションモデルに対しては、局所的な長大構造物の変状が浸水を通して誘発される連動型構造物崩壊の物理メカニズムの解明だけではなく、崩壊後の浸水を低減する構造物全体の性能、避難時間を確保するための耐性そして浸水領域から推定できる陸域被害について総合的に数値的指標化を行った。

最後に、研究項目(2)の結果も用いて新たな総合劣化度指標の設定を試みた。また、予防保全の限界とすべき総合劣化度指標の限界値を検討し、新たな劣化度指標の限界値を提案した。

4. 研究成果

(1) 構造物に生じた劣化・変状の数値化と類型化

① ひび割れの発生状況とひび割れ幅の確率分布

コンクリート胸壁の鉛直方向に発生したひび割れ幅の調査結果から、ひび割れの幅および深さ、発生本数、発生位置についての統計解析を行い、ひび割れ状況を類型化した。

構造物の1スパン（目地と目地に挟まれた区間）に発生した鉛直ひび割れの本数は、Poisson 分布で近似できることが今回の調査で新たにわかった。1スパンに発生していたひび割れ本数は 0~2 本を中心に分布し、ひび割れの発生本数には、構造物毎にある程度の差異は見られるものの大きな違いは見られなかった。1スパンに発生する鉛直ひび割れ本数の平均値は 1.46 本となり、鉛直ひび割れが 1 本以上発生している可能性は約 80%、またひび割れが 2 本以上発生している可能性は約 43%と推測できた。

構造物に生じるひび割れ幅の極値分布の形状を決定するために、分布パラメータの同定を行った。図-1 に、一例として、ひび割れ

幅の極値データの度数分布および各分布での確率密度関数 $f(x)$ を示す。極値解析データの形状は左側に集中し、右側に裾が長い分布であることが確認できた。また、データの Gumbel 分布、Frechet 分布および Weibull 分布への適合性を評価した。その結果、データの各分布への適合度は、Gumbel 分布を仮定した際に最も高いことがわかった。

ひび割れ幅が大きい鉛直ひび割れは、そのひび割れが構造物断面を貫通している傾向が認められた。つまり、構造的な性能に大きな影響を与えると考えられるひび割れの貫通の可能性は、ひび割れ幅が大きくなるに従い高くなると推察される。そのため、構造物全体（全スパン）に発生していると考えられるひび割れ幅の最大値を推定することが重要である。ひび割れ幅の確率分布が特定できたため、極値統計手法により最大ひび割れ幅の推定誤差について検討した。海岸構造物は長大であり、構造物のすべてを点検することは容易ではない。そこで、点検の簡略化の方法について合わせて検討した。図-2 にサンプリング率（ひび割れ調査を実施したスパン数を全スパン数で除したもの）と推定相対誤差（真値を推定値で除したもの）との関係を示す。Gumbel 分布および Weibull 分布を仮定したとき、サンプリング率が 0.2 を超える時点で相対誤差が概ね収束し、1.2 以下に収まる傾向が見られた。これらより、Gumbel 分布および Weibull 分布を用いた予測式を用いることで、高い精度で最大ひび割れ幅を推定することが可能であることが提案できた。

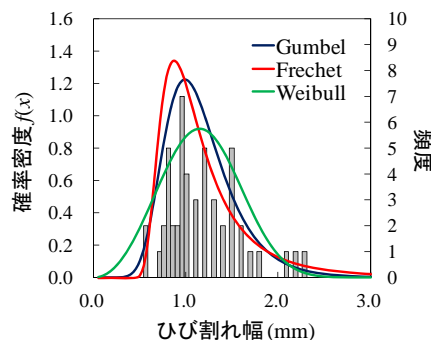


図-1 ひび割れ幅の確率密度関数

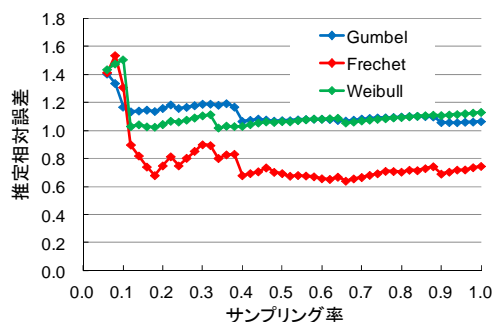


図-2 サンプリング率と誤差の関係

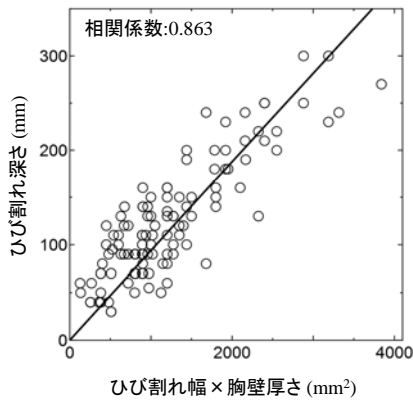


図-3 ひび割れ幅×胸壁厚さとひび割れ深さの関係

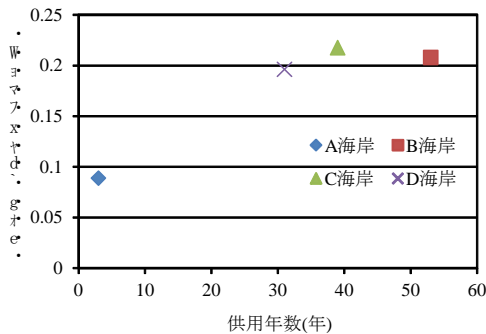


図-4 弾性波伝播速度と供用年数の関係

本手法を用いて施設全体の最大ひび割れ幅を推定する際には、施設全体のスパン数の20%程度を調査し、調査データをGumbel分布で仮定し推定値を算出した後、算出された推定値に推定相対誤差である1.2を乗じることによって、高精度で真値を推定できることがわかった。これは、研究開始当初には想定していなかった新しい知見である。

②ひび割れ深さの推定

ひび割れ幅とひび割れ深さの調査結果によると、ひび割れ幅とひび割れ深さにはおおむね線形の関係が認められ、その相関係数は0.679であった。ひび割れ深さを測定しようとすると、特別な装置と技術が必要であり、簡便には行えない。そのため、ひび割れ深さをひび割れ幅などの容易に測定できるパラメータで推定することができれば、実務上非常に有意義であると考えられる。

ひび割れ深さの推定に関して、構造物の大きさを考慮してひび割れ幅から推定する手法を検討した。解析の結果、ひび割れ幅×胸壁厚さ（胸壁の上辺厚さと下辺厚さの平均値）とひび割れ深さとの関係が最も高い相関係数を示すことが明らかとなった。その結果は、図-3に示すように、相関係数が0.863の線形関係であった。つまり、ひび割れ深さの推定には、ひび割れ幅のみでなく、構造物の寸法の影響が大きいことが確認され、構造物の厚さを指標として用い、ひび割れ幅からひび割れ深さを推定する式を提案した。

③弾性波伝播速度

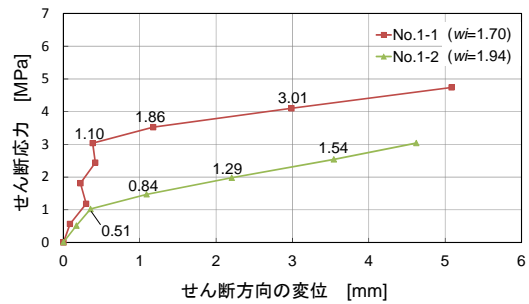


図-5 せん断応力-せん断方向の変位

コンクリート構造物中を伝わる弾性波速度は、圧縮強度と相関があることがわかっている。しかし、コンクリートの状態によって測定結果にばらつきが生じることがある。そのため、施設の諸元や状態によって弾性波速度のばらつきを類型化できないか検討した。図-4に代表的構造物の供用年数と弾性波伝播速度の変動係数の関係を示す。弾性波伝播速度は、供用年数が長くなるにつれてばらつきが大きくなる傾向がみられた。これは、コンクリートの劣化が均一に生じないことに起因するものと考えられる。したがって、供用年数に応じて弾性波速度を修正することによって、コンクリートの劣化の程度が定量化できる可能性があることがわかった。

(2) 劣化・変状を有する構造物の残存性能評価

①ひび割れにおけるせん断伝達挙動の解明

ひび割れの生じた無筋コンクリート構造物の残存性能を評価するには、ひび割れ間での力の伝達をモデル化する必要がある。鉄筋コンクリートと異なり、無筋コンクリートではひび割れ開口の拘束程度が異なるため、新たな検討が必要である。そこで、ひび割れ間でのせん断伝達力を評価するために小型のコンクリート模型試験体を用いてせん断載荷試験を実施した。

試験結果の一例を図-5に示す。この図は、せん断方向の変位、すなわちひび割れ幅の増加とひび割れ間でのせん断伝達応力を示すもので、図中の数字は拘束応力（単位はMPa）を表し、初期ひび割れ幅を w_i （単位はmm）として示している。ひび割れ幅の開口に対する拘束の程度が高い場合（No. 1-1）に拘束応力は増加しやすく、せん断応力は大きくなった。また、拘束の程度によらず、せん断方向の変位が0.4mmを超えると、せん断応力の増加量はほぼ一定になることがわかった。また、図には示していないが、拘束の程度が小さくなるとせん断応力は小さくなり、拘束応力が概ね1.1~1.2MPaに達した後、せん断剛性は拘束条件によらず一定となった。さらに、拘束の程度が大きいほどせん断応力は大きくなり、最終的なせん断方向の変位は小さくなる傾向が見られた。せん断方向の変位とひび割れ直交方向の変位は、拘束条件に関わらずほぼ同様に増加することがわかった。

このように、ひび割れ面では、拘束力が大きくなるにつれてせん断伝達応力も大きくなった。しかし、必ずしもその傾向が現れない場合もあり、初期のひび割れ幅がせん断挙動に大きく影響を与えている。つまり、初期ひび割れ幅とその拡大に対する拘束の程度に応じてせん断伝達力が評価できることを示し、せん断伝達力とひび割れに沿った変位との関係を明らかにできた。

②ひび割れを有する無筋コンクリート構造物の残存性能評価

①で得られたせん断伝達挙動を再現するモデルを、ひび割れを有する海岸構造物の解析モデルに組み込み、ひび割れの発生状況から構造物の性能を推定した。

ひび割れは、ひび割れ発生位置に①で構築したひび割れ要素を挿入することで表現し、要素の深さを変化させることでひび割れ深さの変化を再現した。载荷中に新たに発生するコンクリートのひび割れの進展については、分散ひび割れモデルにより表現した。

解析の一例として不同沈下作用を模擬した面分布荷重を構造解析モデル底面に下向きに与えた場合の荷重-変位曲線を図-6に示す。解析の境界条件は、モデルの片側側面を固定としている。これより、ひび割れ要素深さが600mmまではピーク荷重の低下が見られなかった。その後、600mmを超えた時点からピーク荷重の低下が見られ、1000mmの場合ではピーク荷重が0mm（ひび割れ無）の場合と比較して50%以上低下した。また、ひび割れの要素深さが増加するに従い剛性が低下することがわかった。ひび割れが2本入っている場合は、ピーク荷重および剛性の低下が大きく、ひび割れ本数が構造的な性能に与える影響が大きいことがわかった。

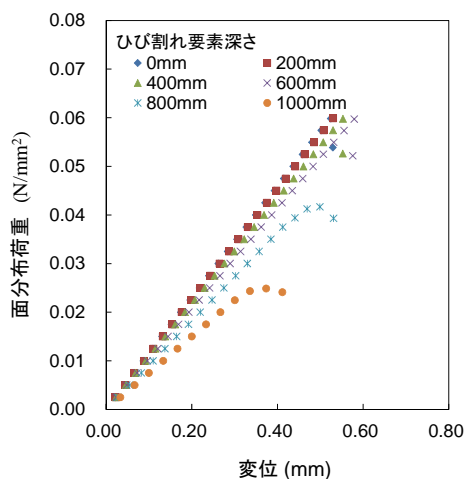


図-6 不同沈下での荷重-変位曲線

(3) 防災機能とリンクした変状限界の検討

構造物の劣化変状に依存した解析を行うための予備検討として、海岸構造物の壁体崩壊に伴う海水の運動と力学的応答についてパラメータ解析を行った。最後に、上記の成

果を踏まえつつ、当該構造物の総合劣化度指標に対する支配的な要因を分析した。

①津波を想定した構造物の被災解析

3次元数値計算結果を基に、壁体崩壊レベルに起因する越流水の流入高さ及び背後域の浸水深に応じて、越流背後域で生じる全く異なる3つの場合の流体運動を特徴化した。

・上層からの越流水が相対的に浸水レベルの低い水層に着水すると、砕波と類似した前方へ跳ね上がる2次ジェットが発達する。強い乱れが薄い水層内にパックされ、強い底面せん断流が広域に生成される特徴を持つ。この乱流による地形の浸食並びにジェットの流体力による背後建造物への力学的寄与が最も高く破壊的な流況となる（図-7）。

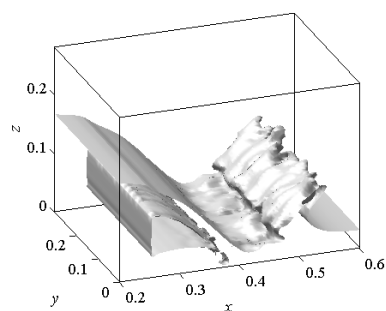


図-7 スプラッシュタイプの越流後の水面形状の数値計算結果

表-1 新たに提案した劣化度判定基準

劣化度	判定基準
d	変状なし
c	ひび割れ幅4mm未満
b	ひび割れ幅4mm以上6mm未満
	ひび割れが2本
a	ひび割れ幅6mm以上
	貫通ひび割れが発生している
	ひび割れ幅4mm以上のひび割れが2本

ひび割れは胸壁の鉛直方向に生じるものを対象

・背後の浸水レベルと崩壊位置が同等のケースでは、前述した水平ローラー渦と逆方向に回転する複数の主渦が形成され、流れと逆方向に発達する2次ジェットのバックスプラッシュがさらなる乱れを生成する。

・壁体の底部からの全層崩壊時には、2次ジェットを伴わず渦によって誘起された波のみが伝播する。流入初期には水平方向に一樣な断面2次元的な渦構造を持ち、乱れおよびせん断力は壁体近傍でのみ卓越する。

これら構造物背後への力学的影響を定量的に見積もるため、壁面崩壊レベル、浸水レベルの異なる流れを統一的に評価する水理モデルを考案した。これは被災レベルに依存する堤体背後域の浸食にかかわる底面せん断力、構造物への安定性にかかわる抗力、ジェット生成に伴う水面変動が与える波力など対象とする被害に対するパラメータを本モデルで与えた流速、水深、ジェットの指向性から与えることが可能となると言える。

②総合的劣化度判定基準の提案

これらの3つの研究課題を統合して、これらの成果から総合劣化度指標の設定を検討した。目視点検で簡易に測定可能なひび割れ幅と耐力低下の関係を示すことができたことより、現行の無筋コンクリート海岸構造物の劣化度判定基準が4段階評価であることを踏襲して提案する劣化度判定基準も4段階評価とした。その一例を表-1に示す。劣化度dは施設に変状が生じていない場合とし、劣化度cは不同沈下および斜め入射波力を想定した場合に耐力の低下が見られなかったひび割れ幅4mm未満とした。劣化度aは不同沈下を想定した場合にひび割れ幅が6mm程度で耐力が50%以下になり、さらにひび割れが2本においては、ひび割れ幅が4mm程度で耐力が50%を下回ることで設定した。

今後さらに解析ケースを追加して劣化度判定基準の精度をさらに上げていく必要がある、研究を自主的に継続して解析を進めている(今後論文等でこの成果は公表する予定である)。なお、平成26年3月に国土交通省他が海岸保全施設維持管理マニュアルをとりまとめ発刊したが、その内容の一部にこの本研究の中間成果が含まれている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 9件)

- ① H. Yokota, Practical application of life-cycle management system for shore protection facilities, Life-Cycle of Structural Systems, 査読有, 2014, pp.109-114
- ② K. Furuya, H. Yokota, S. Komatsu, K. Hashimoto and E. Kato, Prediction of extreme crack width of concrete coastal facilities based on extreme statistics, Life-Cycle of Structural Systems, 査読有, 2014, pp.1466-1471
- ③ 渡部 靖憲, 佐藤 駿一, 三戸部 佑太, 横田 弘, 壁体崩壊に伴う越流背後の流体運動と力学的応答, 土木学会論文集 B2, 査読有, Vol. 69, No. 2, 2013, pp. I_176-I_180, 2013
- ④ 古谷 宏一, 横田 弘, 橋本 勝文, 加藤 絵万, 小松 周平, 無筋コンクリート海岸保全施設の現地調査結果の統計解析に基づく検討, 土木学会論文集 B3, 査読有, Vol. 69, No. 2, 2013, pp. I_251-I_256
- ⑤ 渡部 靖憲, 堀井 正輝, 遡上波中の流れ構造とせん断力分布の遷移, 土木学会論文集 B2, 査読有, Vol. 68, 2012, pp. 56-60

[学会発表] (計 9件)

- ① 中村 美紗子, 無筋コンクリートのひび割れ面におけるせん断伝達に関する基礎研究, 平成 26 年度土木学会北海道支

部年次技術発表会, 2015年1月31日, 室蘭工業大学(北海道室蘭市)

- ② Y. Watanabe, Splash, vortices and turbulent shears in partial dam-break flows -Splash model of wave-breaking and overtopping-, 34th International Conference on Coastal Engineering, ICCE2014, 16 June 2014, Seoul (Korea)
- ③ 一家 優太, 海岸コンクリート構造物の健全度調査結果の統計解析, 平成 25 年度土木学会北海道支部年次技術研究発表会, 2014年2月2日, 札幌コンベンションセンター(北海道札幌市)
- ④ 横田 弘, 海岸保全施設の維持管理に望むこと, 第17回海岸シンポジウム, 2013年11月29日, 新宿明治安田生命ホール(東京都新宿区)
- ⑤ 古谷 宏一, 無筋コンクリート防波堤胸壁のひび割れ深さ推定に関する統計解析, 土木学会第 67 回年次学術講演会, 2012年9月5日, 名古屋大学(愛知県名古屋市)

[その他]

ホームページ等

<http://www.eng.hokudai.ac.jp/labo/lifetime/research.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

横田 弘 (YOKOTA, Hiroshi)
北海道大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 50344312

(2)研究分担者

渡部 靖憲 (WATANABE, Yasunori)
北海道大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 20292055

佐藤 靖彦 (SATO, Yasuhiko)
北海道大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 60261327

加藤 絵万 (KATO, Ema)
独立行政法人港湾空港技術研究所・構造研究チーム・チームリーダー
研究者番号: 90371765

(3)連携研究者

橋本 勝文 (HASHIMOTO, Katsufumi)
北海道大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号: 30609748