

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 13 日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560615

研究課題名(和文) 海岸鉄道の異常海象に対するオペレーション技術の高度化に関する研究

研究課題名(英文) Operation systems of coastal railways due to storm waves and tsunami

研究代表者

木村 克俊 (KIMURA, Katsutoshi)

室蘭工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70322873

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：海岸鉄道は我が国の物流や生活を支える重要な施設である。本研究では、高波による海岸鉄道の盛土および道床の変形を実験的に再現し、被害の発生メカニズムを明らかにした。さらに、鉄道の安全運行の障害となる越波飛沫の飛散特性や脱線の原因となる越波による道床バラストの移動特性に基づいて、現地で適用可能な具体的な対策を提案した。また津波に対しては鉄道の橋梁や車両に働く津波力の算定法を示すことにより、軌道の設置条件に応じた危険度の評価を可能とした。

研究成果の概要(英文)：Coastal railways are important facilities that support logistics and living in Japan. This study experimentally reproduced the deformation of the embankment and track bed of coastal railways due to high waves to reveal the mechanism for causing damage. Specific measures that can be adopted on-site were also presented based on the spraying characteristics of splash overtopping that hinders the safe railway operation and the movement characteristics of the track bed ballast due to wave overtopping that may cause derailment. The study also enabled evaluation of the hazard level depending on the track installation conditions by presenting a method for calculating the tsunami force that acts on railway bridges and cars.

研究分野：工学

キーワード：海岸鉄道 津波 高波 運行規制 オペレーション 対策工

1. 研究開始当初の背景

近年、我が国においては、海岸環境の変化に伴い護岸前面の砂浜の消失が発生し、波浪の影響を直接受ける海岸鉄道が増大している。とくに北海道においては、苫小牧市と様似町を結ぶ日高本線が高波により運行障害が多発し、その対策の検討が求められている。一方、海岸鉄道は沿線の景観を楽しむことができるため人気が高く、青森県五所川原町と秋田県能代市の東能代を結ぶ五能線は、日本で最も人気のある路線に選定されている。しかしながら、海岸線近くを通るこの路線は越波に対して脆弱であり、青森県深浦町広戸駅付近の海岸では1972年12月に、高波により線路が流失したところに列車が侵入し、車両が海中に転落する事故が発生している。このため高波時において列車の安全を確保するための手法について、ハードおよびソフトの両面からの検討が求められてきた。

2004年12月26日に発生したスマトラ沖地震では、スリランカのカハワ地区に停車中の列車に津波が来襲し、乗客および列車内に避難した周辺住民ら合計1,500名が死亡した。また2011年3月11日に発生した東日本大震災では多くの鉄道が津波被害を受けた。地震発生時には、駅間あるいは駅に停車中の列車が27本存在したが、このうち5本が津波により脱線し漂流した。幸いにして乗務員、駅員、司令員らの連携により、列車乗客には死傷者が発生しなかったが、今後の鉄道線路の復旧においては、津波に対する鉄道の安全度評価が重要となっている。

研究開始時においては、以上示したような海岸鉄道を取り巻く状況を背景として、高波や津波による異常海象に対して総合的なオペレーション手法を提案し、利用者の安全・安心をもたらすことを目的として本研究を開始した。

2. 研究の目的

(1) 高波に対する検討

海岸鉄道の多くは護岸背後の盛土の上で道床が設置されている。このため護岸を越える波による盛土の侵食を防止するとともに、道床を形成する砕石バラストの安定を確保し、軌道の維持を図ることが求められる。これまで海岸工学の分野では、護岸背後施設の高波時の安全性は越波流量で評価されてきたが、こうした盛土や砕石バラストの変状を評価する手法が確立していないため、本研究においては大規模な水理模型実験による変状の再現を試みた。

また、海岸線からある程度離れた線路においても越波飛沫が飛散し、それがレールに付着することによって制動障害が発生することがある。越波飛沫の飛散現象については、すでに海岸道路を対象とした研究によりモデル化が進んでおり、これを海岸鉄道に適用することにより、効果的な対策を提案することを目指した。

(2) 津波に対する検討

既往の研究により直立壁に作用する津波力の算定法はほぼ確立している。本研究では、護岸上に位置する鉄道を対象として、軌道の高さが異なる条件での車両に働く津波力について実験的な検討を行った。さらに橋梁に働く津波力についても系統的な実験を行い、将来的に橋上駅舎を津波シェルターとして活用する場合の基礎データを得ることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 高波に関する水理模型実験

護岸の越波に関する水理模型実験は、2次元造波水路を用いて一般的な手法により縮尺1/40で実施した。鉄道の道床バラストを構成する石材は現地で直径5cm程度であり、これを縮尺模型で再現することは困難となる。本研究では、越波による水流を上部タンクからの落水で表現する手法を新たに開発した。図-1は装置の概要を示しており、上部タンクのゲートを急開することにより発生した流れを、縮尺1/4で再現した道床(レール、まくら木、バラスト)に作用させた。

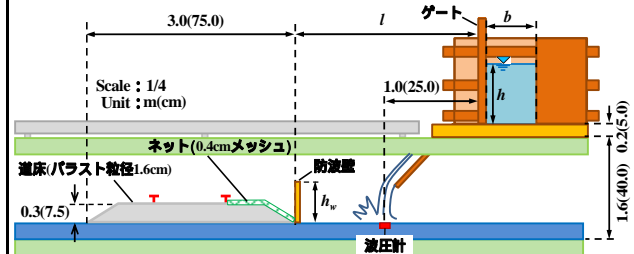


図-1 落水実験装置の概要

なお、盛土の侵食実験においても同じ装置を使用し、模型土壌にセメントを付加することにより盛土強度を調整し、水流による侵食を再現した。

(2) 津波に関する水理模型実験

津波に関しては、図-2に示すように、水路の端部に貯水槽を設置し、その前面に設けたゲートを急開することによりダムブレイク型の段波を作用させた。

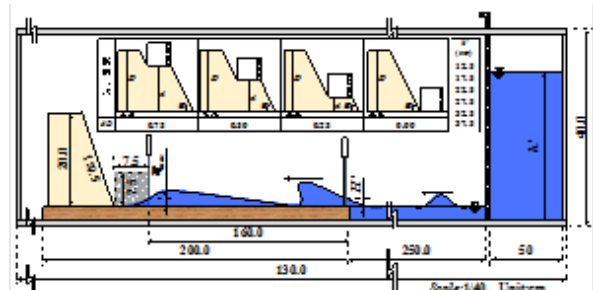


図-2 津波実験における段波の発生状況

4. 研究成果

(1) 越波飛沫による運行障害とその対策

2006年11月、海岸鉄道H線のK駅付近では寒冷前線を伴った低気圧が通過した影響により線路が波をかぶり、車両が停車位置を210m行き過ぎるオーバーラン事故が発生した。当該区間は護岸から線路までの距離は15m程度であり、塩分を多く含んだ海水が越波飛沫となってレールに付着したことによる制動障害が原因と推定された。

本研究では、現地における護岸を再現した水理模型実験を行い、越波流量および越波飛沫の飛散特性を調べた。図-3に周期 $T=12s$ における越波飛沫の軌跡を示す。消波ブロックに波面が衝突した際に越波飛沫が発生し、その始点や打ち出し角度は波高レベルによって異なる傾向がある。また実験で得られた軌跡は曲線で示した計算値とほぼ一致しており、従来からのモデルの適用性を確認した。さらに流木を含む越波に関して実験を行ってその特性を明らかにした。

当該区間に対しては、同図の下側に示すように、護岸から9m離れた位置に高さ3.5mの防波フェンスを設置した場合の越波飛沫の抑止効果を評価した。さらに10年確率波に相当する波高6mの条件に対して道床バラストの安定にも寄与することを目的として、防波フェンスの下部2段を不透過構造に、上部2段を透過構造とすることを提案した。

(2) 高波による盛土被害の分析

2004年7月、海岸鉄道H線のO駅付近で、列車の運転士が護岸からの越波による鉄道の盛土侵食を発見し、以後の列車が運休となった。盛土侵食被害の発生時には、有義波高 $H_{1/3} = 3.09m$ 、有義波周期 $T_{1/3} = 14.2s$ および潮位 $h = 1.55m$ を記録した。盛土侵食は潮位がピークとなる合計4時間の間に進行したものと推定された。図-4は、大規模な被害が発生した地点から30m程度離れた地点の盛土の侵食状況を示している。本研究では当該地点を対象として、越波による盛土侵食の再現実験を行った。

図-5は、護岸における越波の打ち上げ状況を示している。水塊が高く打ち上げられ、落水後は薄くて早い水脈が盛土に作用することになる。こうした水流の時間変化を縮尺1/4の大型実験で再現した。その結果、図-6のような波の作用による盛土侵食のプロセスが明らかになり、侵食の規模は前出の図-4に示した現地の状況とほぼ一致した。

海岸鉄道には、自然海浜に近接した位置に線路が敷設されている事例も少なくない。前浜の減少や海面上昇の影響を受けて、こうした箇所においては、高波による危険性が增大すると考えられる。本研究においては、比較的事例の多い海岸道路を対象として、自然海浜に近接した盛土の侵食事例を分析した。その結果、汀線と盛土までの距離ごとに、盛土侵食が発生する水脈厚や流速の大きさについて、具体的な目安を明らかにした。

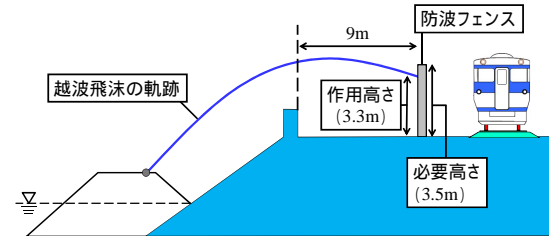
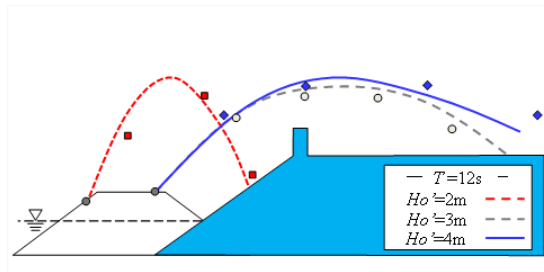


図-3 越波飛沫のパターンとその対策

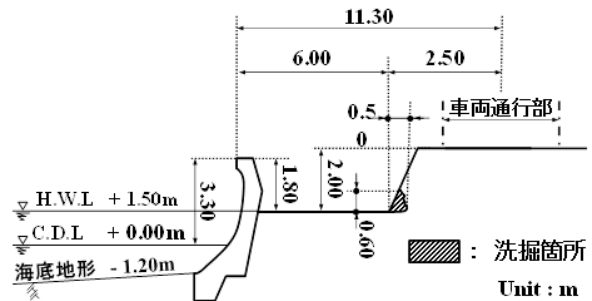


図-4 盛土被害が発生した護岸の断面形状

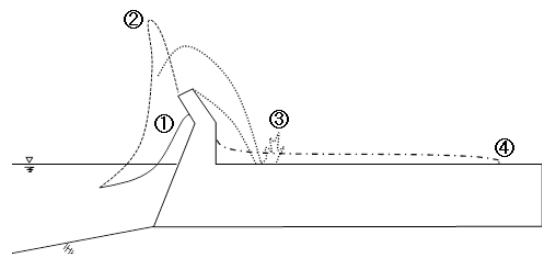


図-5 護岸における波の打ち上げパターン

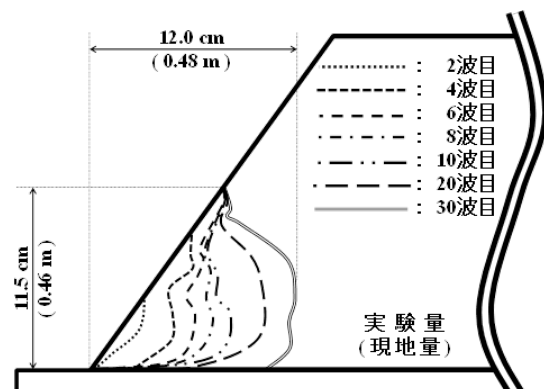


図-6 大型実験で再現された盛土侵食

(3) 越波による道床被害とその対策

海岸鉄道G線のH駅付近では、図-7に示すように護岸直背後に線路が位置している。ここでは冬季風浪による越波が線路を直撃し、年間平均180本程度の運休が発生し、地域住民に大きな影響を与えてきた。とくに2008年は高波の出現頻度が高く、1年間で合計435本の運休が発生したことから、その対策が急務となっていた。

抜本的な対策は護岸自体の改良であり、越波実験結果に基づいて、消波工の拡幅によって運休日数を約70%減少できることを明らかにした。一方、陸上側の施設で講じることのできる対策として、防波壁設置の効果について検討した。その結果に基づいて、図-8に示すように防波壁の位置と高さを変化させた場合の道床被害率を明らかにした。また当該路線においては、隣接する道路との間に余裕があることから、この部分に鉄道を移設することも有効である。

さらに、道床の海側をネットで被覆することの効果を検証したところ、図-9に示すように道床被害率の減少が顕著となり、置石に相当する現象の発生を抑えることができた。こうしたネットについては、すでに現地において対策として採用され、運休する列車の本数の減少に効果を上げている。

(4) 護岸上の車両に働く流体力の算定

鉄道車両のように下部にクリアランスを有する場合の流体力に関して、系統的な実験を行った。なお、実験では構造的に鉄道車両と似ている大型バス車両を対象として、水平方向の作用波力を検討した。その結果、図-10に示すように、クリアランスと作用波力の関係を双曲線関数で近似することができた。さらに、車両の質量を変化させた滑動実験により、近似式の妥当性を確認している。

直立壁に作用する津波力に関しては朝倉らの式が一般的であり、底面での波力強度と作用高さを津波波高の関数として表されている。一方、鉄道護岸は傾斜壁である場合が多く、そこを遡上した津波が車両に作用することになる。本研究では、水理模型実験を実施して、鉄道の軌道高さを考慮した車両に働く津波力を検討した。その結果、図-11に示すように、津波力を無次元で表示することが可能となり、鉄道を高所に移設する場合の津波危険度の評価が可能となった。

(5) 橋梁に働く津波力の算定

東日本大震災の津波により被災した橋梁に関する事例を参考にして、橋桁に働く津波力に関する実験を行った。その結果に基づいて、津波力をクリアランスおよび桁高をパラメータとして定式化した。さらに、橋台との摩擦係数を変化させて滑動実験を行い、算定式の妥当性を確認している。

これらの算定式は海岸鉄道の橋上駅舎の形状に対しても適用可能であり、津波時の緊急避難場所として橋上駅舎を活用することを想定した検討に適用可能である。

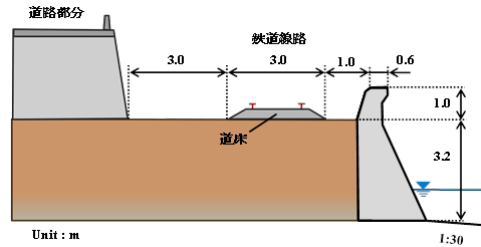


図-7 護岸直背後に位置する線路の状況

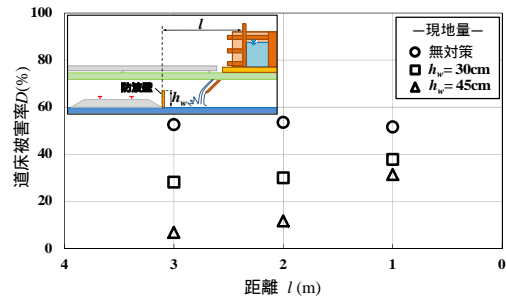


図-8 防波壁の効果

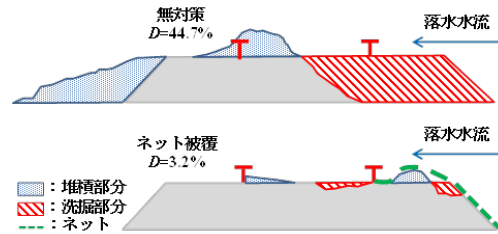


図-9 ネットの効果

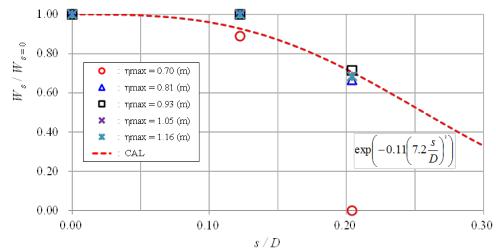


図-10 車両のクリアランスの影響

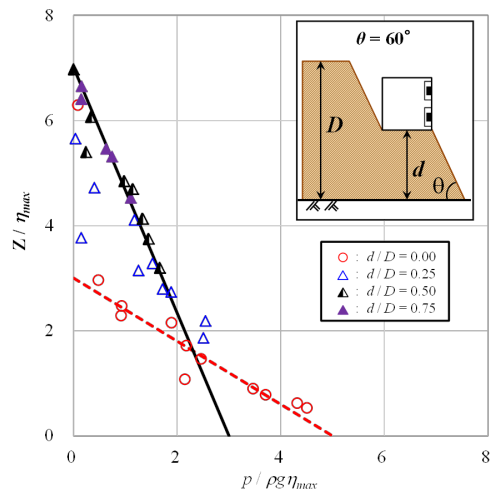


図-11 津波力に及ぼす軌道高さの影響

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 10 件)

越智聖志, 木村克俊, 山本泰司, 上久保勝美, 名越隆雄: 護岸上の車両に働く越波力と滑動特性に関する検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 査読有, Vol.71, 2015 年 11 月.

橋本茂樹, 木村克俊: 寒冷地域における津波対策に関する研究, 海と港, 寒地港湾技術研究センター, 査読無, No.33, 2015 年 9 月.

橋田雅也, 木村克俊, 越智聖志, 宮武誠, 高橋幹夫, 浜口正志: 越波水の打ち込みによる海岸鉄道の道床被害とその対策の検討, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 査読有, Vol.71, 2015 年 6 月.

本間大輔, 山本泰司, 宮武誠, 木村克俊: 高波による海岸道路の盛土被害の発生条件と対策の検討, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 査読有, Vol.71, 2015 年 6 月.

越智聖志, 木村克俊, 宮武誠, 上久保勝美: 護岸背後への越波による盛土被害の再現実験, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 査読有, Vol.70, No.2, pp.241-246, 2014 年 6 月.

越智聖志, 木村克俊, 平野夕焼, 上久保勝美, 山本泰司, 名越隆雄, 清水敏明, 袖野宏樹: 海岸道路に併設された船揚場斜路における越波が通行車両に及ぼす影響について, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 査読有, Vol.69, No.2, pp.756-760, 2013 年 11 月.

宮武誠, 阿部翔太, 木村克俊, 越智聖志: 底質粒径による飽和・不飽和浸透流が波打ち帯の漂砂移動に及ぼす影響, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 査読有, Vol.69, No.2, pp.76-80, 2013 年 11 月.

平野夕焼, 木村克俊, 越智聖志, 高橋幹夫, 浜口正志: 海岸鉄道の高波による運行障害事例とその対策に関する検討, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 査読有, Vol.69, No.2, pp.688-693, 2013 年 6 月.

宮武誠, 木村克俊, 越智聖志: 不飽和特性を考慮した前浜浸透流が波打ち帯の漂砂移動に及ぼす影響, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 査読有, Vol.68, No.2, pp.86-90, 2012 年 11 月.

越智聖志, 木村克俊, 宮武誠, 上久保勝美: 国道 238 号猿払海岸道路における路肩部の高波被害とその復旧, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 査読有, Vol.68, No.2, pp.876-881, 2012 年 6 月.

[学会発表](計 9 件)

M. Ochi, K. Kimura: Hydraulic and

Numerical Experiments on a Damaged Vehicles due to Wave Overtopping at a Slipway Adjoining a Coastal Road, JSED2015, 2015 年 3 月 13 日~14 日, 蓬萊殿(北海道, 室蘭市).

橋田雅也, 木村克俊, 越智聖志: 海岸鉄道用護岸の高波被害の再現実験, 土木学会北海道支部論文報告集第 71 巻, 2015 年 1 月 31 日~2 月 1 日, 室蘭工業大学(北海道, 室蘭市).

横山雄司, 木村克俊, 越智聖志: 緩傾斜護岸における高波による流木の打上げ特性について, 土木学会北海道支部論文報告集第 71 巻, 2015 年 1 月 31 日~2 月 1 日, 室蘭工業大学(北海道, 室蘭市).

M. Ochi, M. Miyatake, K. Kimura: Characteristics of Sediment Transport in Swash Zone due to Saturated-Unsaturated Sloped Beach, ICCE2014, 2014 年 6 月 16 日~20 日, K-Seoul Hotel(韓国, ソウル).

Y. Yokoyama, M. Ochi, K. Kimura: Wave Force Acting on Vehicles Running on Coastal Roads behind Gently Sloping Seawalls, JSED2014, 2014 年 3 月 7 日, 室蘭工業大学(北海道, 室蘭市).

横山雄司, 越智聖志, 木村克俊: 緩傾斜護岸における越波が背後の道路に及ぼす影響について, 土木学会北海道支部論文報告集第 70 巻, 2014 年 2 月 1 日~2 日, 札幌コンベンションセンター(北海道, 札幌市).

齊藤将久, 越智聖志, 木村克俊: 越波水の打ち込みによる海岸鉄道の道床被害の再現実験, 土木学会北海道支部論文報告集第 70 巻, 2014 年 2 月 1 日~2 日, 札幌コンベンションセンター(北海道, 札幌市).

M. Ochi, K. Kimura, T. Tochimaru, K. Kamikubo: Hydraulic Model Experiments to Determine Tsunami Forces Acting on a Shore Bridge, JSED2013, 2013 年 3 月 8 日, 室蘭工業大学(北海道, 室蘭市).

平野夕焼, 木村克俊: 越波に連行された流木が海岸鉄道に及ぼす影響に関する検討, 土木学会北海道支部論文報告集第 69 巻, 2013 年 2 月 2 日~3 日, 函館工業高等専門学校(北海道, 函館市).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木村 克俊(KIMURA, Katsutoshi)
室蘭工業大学・工学研究科・教授
研究者番号: 7 0 3 2 2 8 7 3