

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 30 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360192

研究課題名(和文)動的荷重を受けるコンクリート構造物の破壊進展機構の解明

研究課題名(英文)Fracture progress mechanism of concrete structures under dynamic loading

研究代表者

岩波 光保 (IWANAMI, Mitsuyasu)

東京工業大学・理工学研究科・教授

研究者番号：90359232

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,900,000円、(間接経費) 4,470,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、動的荷重を受けるコンクリート構造物の破壊進展機構の解明を目的として、主に3つの検討を行った。動的全視野計測の検討では、作用する応力の速度変化が破壊性状に及ぼす影響を調べるため、光学的全視野計測技術を活用した動的計測手法を開発した。動的荷重を受ける数値解析手法の検討では、局部損傷を考慮した構成則や破壊条件を検討し、版の累積損傷を数値解析的に評価する手法を考案した。最終的に、部材の動的性能に及ぼす材料劣化の影響評価に関する知見を総合して、「耐衝撃性に優れた防波堤ケーソンの設計マニュアル」を作成して、繰返し衝突荷重を受けるケーソンの局部破壊に適用し、その有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：In this study, to make clear the failure mechanism of concrete structures suffering dynamic forces, the following three investigations were conducted. In investigation of dynamic full-field measurement of strain, a new measuring method was developed utilizing the optical full-field measurement technique in order to examine the effect of stress velocity on failure behavior of concrete. In investigation of numerical methods of concrete structures subjected to dynamic loading, a novel method was proposed to evaluate cumulative damages in reinforced concrete slabs, by integrating the constitutive laws and failure criteria of concrete members in consideration of localized failure of concrete. At last, by summarizing the knowledge obtained from this study about effects of materials deterioration on dynamic structural performance of concrete members, the design manual of concrete caissons for breakwaters with high resistance against repeated impact loads was formulated.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学 - 土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：動的荷重 コンクリート 破壊進展機構 動的全視野計測 材料劣化 数値解析 繰返し衝撃荷重 ケーソン

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 土木構造物では、設計では想定されていない衝撃力が作用する場合があります。これらによって損傷に至る事例がある。例えば、港湾構造物では波力や、消波ブロック、船舶、漂流物の衝突のような衝撃力が作用することで構成部材が損傷するケースが報告されている。

(2) RC 構造物の動的問題としては、衝撃や疲労が挙げられる。これらは既往の研究でも多くの成果があり、設計・照査手法も提案されている。しかし、メカニズムに基づいた設計・照査手法が十分に確立されているとは言えず、必ずしも合理的ではない。また、衝撃荷重が繰り返し作用する問題については研究例がほとんど無く、設計・照査手法が確立されていない。

(3) 海洋環境下にある RC 構造物は鉄筋腐食によりその性能が低下することが知られている。しかし、鉄筋腐食が RC 構造物の動的性能に及ぼす影響に関しては研究例がほとんど無い。よって、鉄筋腐食を含む材料劣化が生じた RC 構造物の動的性能も適切に評価する必要がある。

(4) 上記の課題を統一的に解明するためには、動的荷重を受けるコンクリート構造物の破壊進展機構を明らかにし、それに立脚した設計・照査手法の構築が不可欠である。

## 2. 研究の目的

上記の背景を踏まえて、本研究課題では、動的荷重を受けるコンクリート構造物の合理的な設計・照査手法の構築に資するため、実験や数値解析を用いて動的荷重を受けるコンクリート構造物の破壊進展機構を明らかにし、動的荷重を受けるコンクリート構造物の損傷モデルを提案することとした。

## 3. 研究の方法

上記の目的を達成するため、次の3つの研究テーマを設定し、研究を進めた。

- (1) 動的荷重を受ける RC 部材の破壊進展過程の動的全視野計測
- (2) 材料劣化が RC 部材の動的性能に及ぼす影響度の評価
- (3) 破壊の局所化を考慮した累積損傷モデルの構築による動的荷重を受ける RC 部材の破壊進展過程のシミュレーション

## 4. 研究成果

(1) 動的荷重を受ける RC 部材の破壊進展過程の動的全視野計測

コンクリートに作用する力の速度が変形挙動に及ぼす影響に関して、光学的全視野計測技術の適用を試みた。採用した光学的全視野計測技術は、CMOS タイプのエリアセンサで取り込んだ光学情報を対象としたデジタ

ル画像相関法である。

実験に用いた供試体はコンクリート角柱である。寸法については、断面を 100×100mm とし、高さを 100, 200, 400mm の 3 水準とした。水セメント比 (W/C) は、40%, 50%, 60% の 3 水準、養生方法として 20 - 60%RH の気中養生ならびに 20 水中養生の 2 水準、養生期間として材齢 4 週と 52 週間以上の 2 水準とした。載荷方法については、供試体端部が鉛直方向となるように行った。光学計測の対象面は、平滑で材料が均質に分布している供試体打設時の底面とした。デジタル画像相関法によるひずみ分布計測を行うことから、最低限の画素数を確保可能で準高速撮影 (100 コマ / 秒程度) が可能な性能を有する撮影機器を採用した。同機器の画素数は、最大約 400 万画素 (2048×2048 pixel)、撮影速度は最大 90 フレーム / 秒である。撮影画像は、256 階調のグレースケール (8 ビット) とした。供試体表面のコントラストを高めるために、サンドペーパーによる研磨の後、黒ならびに黄色のペイントによってランダムパターンを付与した。準高速撮影時における明度低下を抑制するため、供試体表面周辺の照度を 700 ルーメン以上となるように環境設定を行った。載荷条件は、載荷装置の特性を鑑み、静的載荷、動的載荷 (0.4mm/sec) の 2 水準とした。なお、比較検討を目的として、鉛直方向の長さ変化計測用の変位計ならびに軸方向にひずみゲージを貼付した。

デジタル画像相関法については、供試体に対して、最大 100×200mm の撮影画角を対象に適用した。1 画素当たりの長さを 0.1mm/pixel とし、25pixel ごとに水平方向 (X 軸) を 37 分割、鉛直方向 (Y 軸) を 77 分割した。各分割点における変位量をもとにロゼット解析を実施し、軸方向および軸直角方向長さ変化、ならびに、最大主ひずみ、最小主ひずみ、最大せん断ひずみを算出した。なお、初期画像については、撮影時に生じるノイズを低減させるために、無載荷時に複数の画像を取得し、同一座標に位置する各画像の階調度を平均化して解析に用いた。

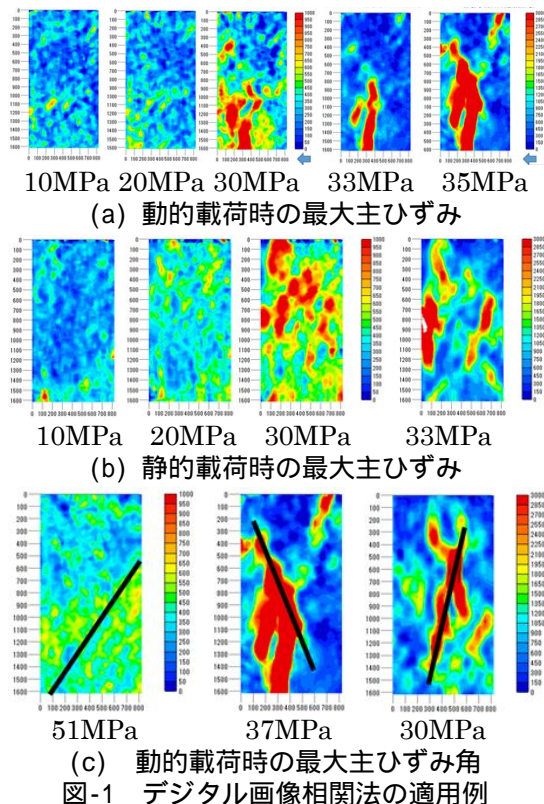
静的載荷前に実施した安定性照査では、コンクリート用ひずみゲージ (60mm 相当) に対して、デジタル画像相関法により長さ変化を算出したところ、複数の画像間における長さ変化量のばらつきが  $20 \times 10^{-6} \sim 50 \times 10^{-6}$  となった。静的載荷時ならびに動的載荷時における同一区間のひずみゲージとデジタル画像相関法の長さ変化量の相違は、概ね  $\pm 20\%$  以内であった。以上より、本実験条件下では、動的載荷時の平面的な長さ変化をデジタル画像相関法により推定可能であると結論付けた。

図-1 に、静的載荷ならびに動的載荷時におけるデジタル画像相関法の適用例を示す。(a), (b) は、動的載荷ならびに静的載荷条件下における破壊直前までの荷重の増加ともなう最大主ひずみの分布を示す。(a) の動

的荷重では、供試体左下の部分で変形が卓越している。一方、(b)では全体的に変形量が大きい。動的荷重と静的荷重の比較ケースは4種類と少ないものの、動的荷重時では静的荷重よりも局所的に変形が卓越した箇所が発生しやすい傾向がみられた。(c)は、最大主ひずみ方向と荷重方向がなす角度と、コンクリートの圧縮強度の関係を示す。圧縮強度が大きいほど、この角度が大きい傾向がみられた。

今回の検討では、実験ケースが少ないことから、確実性の高い知見を得るためには、供試体間のばらつきや荷重条件などを変更した場合における再現性の検証などが必要であり、現在も検討を継続中である。

本研究テーマに関するまとめとしては、今回試行した撮影手法ならびにデジタル画像相関法の適用によって、動的荷重時におけるコンクリート表面の変形を平面的に表現可能な手法をもとに、動的荷重時におけるコンクリート表面の変形挙動を可視化することに成功した。今後は、荷重速度をさらに大きくするとともに、複数のカメラを用いた3次元撮影を行い、より高速度で衝撃力が作用した場合のコンクリートの変形挙動の解明を試みることを考えたい。



## (2) 材料劣化がRC部材の動的性能に及ぼす影響度の評価

材料劣化の進展がRC部材の動的性能に及ぼす影響を調べるための手法として、(1)で検討を行った動的全視野計測手法を準用した。図-2に、動的荷重を受けるRCはりのせん断スパンにおけるひずみ分布の変化を示す。こ

れより、動的全視野計測で得られたひずみ分布は、荷重試験後のコンクリートのひび割れ分布と一致し、かつひび割れが確認されていない荷重においてもひずみの局所化が生じていることが示された。本計測手法を用いて、動的荷重を受けるRCはりのせん断破壊進行過程を可視化、追跡することができ、また、静的荷重を受けるRCとの破壊進行過程の違いを明らかにできることが分かった。

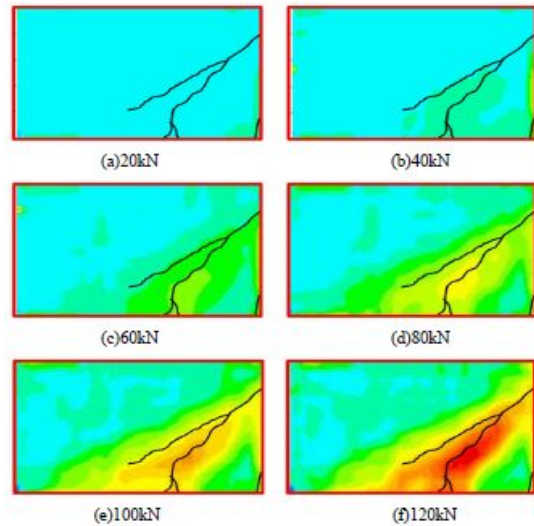


図-2 動的荷重を受けるはりのひずみ分布

次に、繰返し衝撃荷重を受けるRC版について、局部破壊に対する安全性について実験的に検討を行い、その照査の流れを図-3の通り提案した。照査は、RC版が局部破壊を生じるまでの破壊衝突回数を算出し、破壊衝突回数の限界値と比較することにより行うものである。

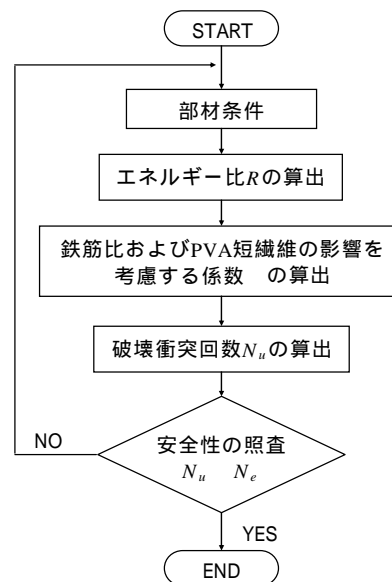


図-3 局部破壊に対する安全性照査

この照査フローに従って、RC版の耐衝撃性の改善法として、数種類の方法を考案し、

その改善効果について実験的に検証した。その結果、短繊維補強コンクリートの使用、鉄筋比の増加は RC 版の耐繰返し衝撃性を大幅に改善できることを示した(図-4)。また、衝突速度によっては、部材厚の増加も十分な効果があった。これは、コンクリートの局部破壊面の面積の増加によるものと考えられる。

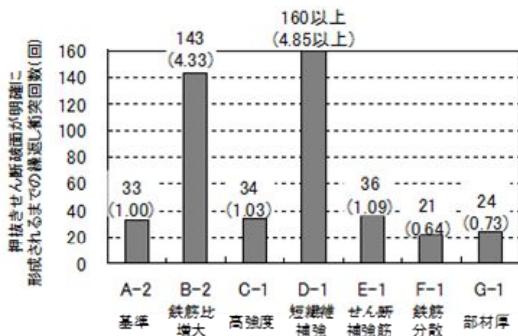


図-4 RC版の耐衝撃対策とその効果

この手法の有効性について、実構造物レベルで確認するため、消波ブロックの衝突により繰返し衝撃荷重が作用する防波堤ケーソンを対象に次の検討を行った。すなわち、対象施設として実際に側壁で局部破壊が発生した防波堤を2施設選定し、鉄筋比の増加(予防対策ケース1)、版厚の増加(予防対策ケース2)、短繊維の混入(予防対策ケース3)を実施した場合に必要な事前対策費用と、対策を行わない場合に側壁が局部破壊した場合の補修費用を比較した。補修では、局部破壊後の3種類の補修シナリオを想定した。すなわち、消波ブロック撤去後に隔壁にコンクリートを充填する補修シナリオ(補修シナリオA)、局部破壊後に上部コンクリート撤去後に隔壁にコンクリートを充填するシナリオ(補修シナリオB)、局部破壊に伴って滑動したケーソンの中詰材を除去して再度据付後、隔壁にコンクリートを充填するシナリオ(補修シナリオC)である。

本研究では、各補修シナリオの補修費用と予防対策に必要な費用を比較し、LCC縮減の観点から予防対策が有利となる局部破壊の発生率を算定した。ここで、発生率の設定には波浪条件等を考慮した上で設定すべきであるが、現状ではその設定法は構築されていない。したがって、実務では、対象防波堤の過去の事例や類似の防波堤の事例から発生率を設定することが望ましい。

対象防波堤のケーソンn函のうち、防波堤の局部破壊を生じる関数は、n函に発生率Ptを乗じることで求めることができる。すなわち、局部破壊の発生関数はnPtである。局部破壊の発生関数に補修費用Cccを乗じることで、対象防波堤に生じる補修費用はnPtCccとなる。したがって、発生率を考慮した防波堤の総補修費用を期待補修費用と定義する

と、期待補修費用は  $C_c = nPtC_{cc}$  で求めることができる。

対象防波堤の耐衝撃性向上のための事前対策費用については、対象ケーソンn函全てに対して予防対策を講じることを前提とする。予防対策を行った側壁は供用期間中に破壊しないと考えると、対象ケーソンn函と事前対策費用Cpcの積から、全事前対策費用  $C_p = nC_{pc}$  が求められる。

対象防波堤にある発生率Ptを与えたとき、全対策費用Cpが期待補修費用Ccを下回る場合、予防対策がLCC縮減の観点から有利になる。したがって、全事前対策費用Cpが期待補修費用Ccを下回る発生率Ptを求めることで、LCC縮減の観点から予防対策が有利な条件が得られる。

その結果、予防対策のうち最も安価なのは鉄筋比の増加(予防対策ケース1)であり、版厚の増加(予防対策ケース2)と短繊維の混入(予防対策ケース3)はほぼ同等の費用であった。防波堤ケーソンにおける局部破壊の発生率と全事前対策費用/期待補修費用の関係を明らかにすることで、LCC縮減の観点から予防対策が有利となる発生率を算定した(図-5)。

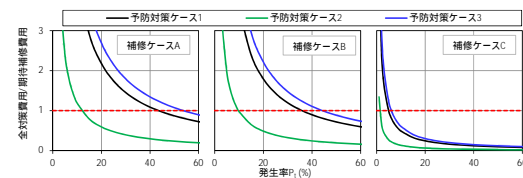


図-5 局部破壊の発生率とLCCの関係

(3) 破壊の局所化を考慮した累積損傷モデルの構築による動的荷重を受けるRC部材の破壊進展過程のシミュレーション

ここでは、まず、コンクリートの圧壊による剛性低下や強度低下を再現可能な局所損傷を考慮した繰返し衝突解析手法を検討した。衝突部近傍のコンクリートでは、圧縮破壊が生じることで局部的に剛性や強度が低下すると考えられる。これを数値解析において再現するため、本研究では、圧縮力の卓越により生じる局所損傷の損傷度をDと定義し、そのDを降伏条件式ならびに弾塑性構成式に導入することで、剛性や強度の低下を再現した。局所損傷の損傷進展則は、繰返し衝突実験を実施してコンクリートの衝突部近傍の累積塑性ひずみ分布の推移から適切に決定する必要があるが、本研究では、Lemaitreの損傷理論を援用し、さらに、3軸圧縮応力下にあるコンクリートは静水圧応力(圧縮を正とする)が60MPa以下の場合には弾性的な挙動を示すことから、静水圧応力が60MPa以上の時のみ損傷度Dが増加すると仮定した。なお、解析を安定させるためにDの上限値を0.6とした。このように算出された損傷度Dを塑性と連成することでvon Misesの降伏条件式および弾塑性構成式内に

局所損傷の影響を考慮し、繰返し衝突に起因して生じる圧壊による剛性低下や強度低下の再現を試みた。

続いて、提案手法の妥当性検証のために、版厚の異なるコンクリート版を対象に、局所損傷モデルを考慮する場合と考慮しない場合で繰返し衝突解析を実施し、両者の比較により局所損傷モデルの妥当性および適用可能性を検討した。その結果、局所損傷モデルを考慮した場合の方が、衝突回数が増えるにつれて、発生衝撃力のピーク値が小さく周期は長くなる、また、衝突部の最大変位が大きくなるなどの衝突部近傍の剛性低下や強度低下に起因する傾向を再現可能であることが確認できた。さらに、提案手法では、衝突が繰り返されることで、衝突部近傍に生じていた損傷が版下面にまで進展する様子が確認でき、損傷度 D に応じて要素除去等を行うことでコンクリート版に穴があくといった不連続現象を再現できる可能性があることが分かった(図-6)。

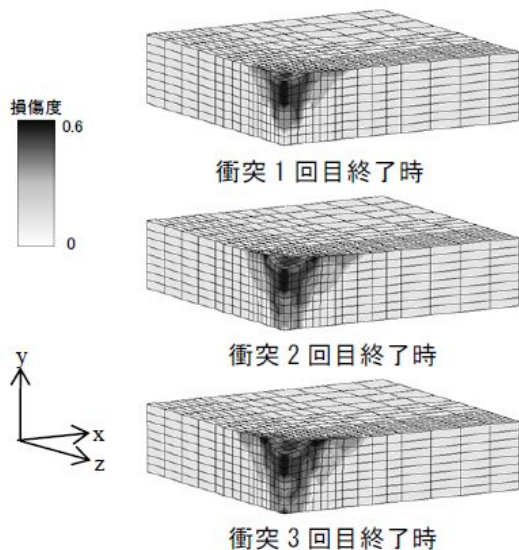


図-6 RC版の損傷度分布の進展状況

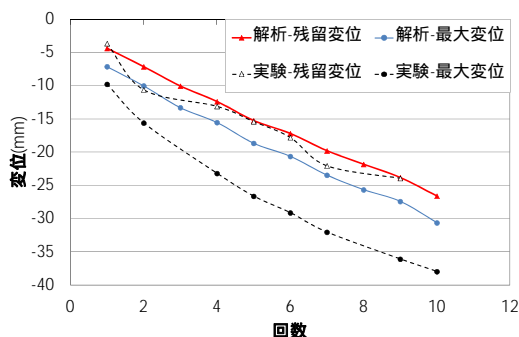


図-7 衝突回数とRC版の変位の関係

以上を踏まえて、提案手法により、RC版の繰返し衝撃実験のシミュレーションを実施したところ、発生衝撃力や残留変位の衝突回数の増加に伴う推移を精度良く再現でき

ることに成功した。ただし、版の種類など様々なケースの解析を実施していくことで提案手法をよりよいものにしていくことが今後の課題である(図-7)。

本研究テーマをまとめると、衝突部近傍の局所損傷を考慮した繰返し衝突解析手法を構築し、その妥当性検証、ならびに実現象に対する適用性の検証を実施し、一定の成果を得ることができたと言える。

#### (4) 全体とりまとめの実務への展開

これまでに述べた(1)~(3)の研究成果を総合して、「耐衝撃性に優れた防波堤ケーソンの設計マニュアル」を作成した。このマニュアルを実際に消波ブロックの衝突による繰返し衝突荷重を受けて被災し履歴のあるケーソンに適用することで、局部破壊の発生・進展の可能性を検証し、その有効性を確認した。

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計12件)

川端雄一郎, 加藤絵万, 岩波光保: 維持管理を考慮した防波堤ケーソン前壁の耐衝撃設計に関する検討, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 査読有, Vol.70, 2014, 印刷中

川端雄一郎, 加藤絵万, 岩波光保: Structural performance evaluation of heavily deteriorated RC members based on simplified inspection results, International Journal of Structural Engineering, 査読有, Vol.4, No.1/2, 2013, 75-85

川端雄一郎, 加藤絵万, 岩波光保: 維持管理を考慮した防波堤ケーソン側壁の耐衝撃設計に関する検討, 港湾空港技術研究所資料, 査読無, No.1279, 2013, 1-14

川端雄一郎: 地震動により損傷した栈橋上部工の残存耐力評価, 港湾, 査読無, Vol.90, No.3, 2013, 32-33

川端雄一郎, 岩波光保, 加藤絵万, 西田孝弘: 地震動により損傷した栈橋RC上部工の残存性能評価, 港湾空港技術研究所資料, 査読無, No.1267, 2013, 1-32

川端雄一郎, 岩波光保, 加藤絵万, 西田孝弘: 地震動により損傷した栈橋RC上部工の残存性能, 構造工学論文集, 査読有, Vol.59A, 2013, 91-103

玉井宏樹, 合屋智史, 園田佳巨: 単発および繰返し衝突が作用する二辺単純支持RC版の応答特性に関する基礎的研究, 土木構造・材料論文集, 査読有, Vol.28, 2012, 47-53

水谷征治, 佐野清史, 松林卓, 岩波光保, 川端雄一郎: 既設防波堤ケーソンの側壁補強工法の実験的研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文

報告集, 査読有, Vol.12, 389-394  
松林卓, 森田浩史, 岩波光保: 既設防波堤ケーソンの耐衝撃補強方法に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.34, 2012, 679-684  
松林卓, 森田浩史, 岩波光保, 安井利彰, 水谷征治, 川端雄一郎: 既設防波堤ケーソンの耐衝撃補強工法の開発, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 査読有, Vol.68, 2012, I\_336-I\_341  
松林卓, 岩波光保, 川端雄一郎, 横田弘: 繰返し衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリート版の押抜きせん断抵抗性能評価に関する実験的研究, 構造工学論文集, 査読有, Vol.58A, 2012, 967-980  
川端雄一郎, 岩波光保, 松林卓: 繰返し衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリート版の残存押抜きせん断耐荷性能, 港湾空港技術研究所報告, 査読無, Vol.50, 2011, 43-64

[学会発表](計9件)

川端雄一郎, 岩波光保, 加藤絵万, 西田孝弘: Residual structural capacity of RC superstructure of open-type wharf damaged by earthquake motion, 10th International Conference on Urban Earthquake Engineering, 2013.3.2, 東京工業大学(東京都)

合屋智史, 玉井宏樹, 園田佳巨: RC版の衝撃応答に及ぼすコンクリートの降伏条件の影響に関する一検討, 土木学会西部支部研究発表会, 2013.3.9, 熊本大学(熊本県)

玉井宏樹, 合屋智史, 園田佳巨: A fundamental study on the repeated impact analysis of RC slab with consideration of local damage, 5th International Conference on Protection of Structures against Hazards, 2012.11.15~2012.11.16, Singapore

合屋智史, 玉井宏樹, 園田佳巨: 繰返し衝突作用による局所損傷を考慮したRC版の衝撃応答解析に関する基礎的研究, 土木学会第67回年次学術講演会, 2012.9.5~2012.9.7, 名古屋大学(愛知県)

森田浩史, 末岡英二, 松林卓, 安井利彰, 岩波光保, 川端雄一郎: 中詰材の改良厚さが既設防波堤ケーソンの耐衝撃補強効果に及ぼす影響, 土木学会第67回年次学術講演会, 2012.9.5~2012.9.7, 名古屋大学(愛知県)

岩波光保, 川端雄一郎, 松林卓, 安井利彰, 水谷征治, 佐野清史: 中詰材の改良による既設防波堤ケーソンの補強メカニズムに関する実験的検討, 土木学会第67回年次学術講演会, 2012.9.5~2012.9.7, 名古屋大学(愛知県)

合田寛基, 川端雄一郎, 内野正和, 松田

浩, 日比野誠: Application of full-field non-contact measurement technology to clarification of deterioration mechanism on constructional material, 6th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS 2012), 2012.7.8~2012.7.12, Lake Maggiore, Italy

玉井宏樹, 園田佳巨, 川端雄一郎, 篠崎誠: A numerical approach for damage evaluation of RC slab under single and repeated impact loading, International Conference on Shock & Impact Loads on Structures, 2011.11.11, 福岡国際会議場(福岡県)

川端雄一郎, 岩波光保, 加藤絵万, 合田寛基: High-speed full-field strain measurement of RC member subjected to dynamic load, International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2011, 2011.9.20, 神戸国際会議場(兵庫県)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

岩波 光保 (IWANAMI, Mitsuyasu)  
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号: 90359232

### (2)研究分担者

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

川端 雄一郎 (KAWABATA, Yuichiro)  
独立行政法人港湾空港技術研究所・構造研究領域・主任研究官  
研究者番号: 10508625

合田 寛基 (GODA, Hiroki)  
九州工業大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 20346860

玉井 宏樹 (TAMAI, Hiroki)  
九州大学・工学研究院・助教  
研究者番号: 20509632