

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420566

研究課題名(和文) 偶発作用を受けるRCやS造骨組の動的応答と部材損傷評価に関する研究

研究課題名(英文) A simple evaluation method for dynamic response characteristics of structural members under impact loading

研究代表者

小室 雅人 (KOMURO, Masato)

室蘭工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10270183

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：衝撃荷重を受ける構造物の動的挙動特性や部材損傷レベルの簡易評価手法を確立するために、ファイバー要素を用いた有限要素解析手法に着目し、2種類の断面寸法を有する小型の鉄筋コンクリート(RC)梁やスパン長の異なるH形鋼(S)梁を対象に衝撃応答解析を実施し、実験結果との比較によってその適用性を検討した。その結果、要素分割長を梁高の半分程度とすることによって、荷重作用位置における応答変位をほぼ適切に再現可能であることを明らかにし、ファイバー要素を用いた解析手法は実務レベルにおいて部材の損傷評価手法として十分に適用可能であることを確認した。

研究成果の概要(英文)：In this study, in order to establish a simple and engineered analysis method for appropriately evaluating the dynamic response characteristics of steel and/or reinforced concrete (RC) beams under impact loading, impact response analysis method based on a fiber element approach was proposed. An applicability of the proposed method was discussed comparing with the experimental results of small-scale H-shaped steel and RC beams having different impact velocities of impact striker. From this study, the following results were obtained: (1) applying the proposed method, the deflection behavior of the beams can be appropriately predicted; and (2) the method may be able to use as a tool for evaluation of the dynamic response characteristics of the steel and/or RC beams under the impact loading.

研究分野：構造工学

キーワード：建築構造 偶発作用 部材損傷評価 ファイバーモデル

1. 研究開始当初の背景

2001年に発生した米国同時多発テロでは、世界貿易センター(WTC)に航空機が衝突・炎上し、鋼構造であるWTCビル2棟と近接の高層ビルが完全に崩落した。また、我が国においてもJR福知山脱線事故(2007年6月)や2011年3月に起きた福島第1原発3号機原子炉建屋の水素爆発など、近年では爆発や衝突等の偶発作用による事故が多数報告されている。

一方で我が国の構造物は、このような偶発作用を考慮した設計がなされていない。都市化や社会情勢の変化によって、爆発や衝撃のリスクが顕在しつつある中、偶発作用を第3の荷重と捉え、新たな視点で構造物の安全・安心を確保するための設計法が必要とされている。

この設計法を確立するためには、幾つかの課題の克服が必要とされているが、本研究では、その中で衝撃荷重による部材(構造物)の動的挙動と損傷評価に着目して検討を行うものである。

2. 研究の目的

偶発作用の一つである突発衝撃荷重作用時における構造物の動的挙動特性や部材損傷レベルを実験的・数値解析的側面から把握し、強靱性やリダンダンシーをもつ安全・安心な構造物の設計法確立に向けた検討を行う。ここでは、特に構造物の動的挙動と損傷評価を簡易な手法(実務設計レベル)で適切に行うために、地震応答解析などで広く使用されているファイバー要素を用いた比較的簡易な解析手法を、精緻な解が得られる高度な有限要素法および日本建築学会で示されている最も単純な1自由度モデルに代わる第3の手法として着目し、梁部材や骨組構造を対象に重錘落下衝撃実験結果との比較によって、その適用性について検討を行った。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するために、以下の項目について研究を実施した。

(1) 鉄筋コンクリート梁への適用性検討

断面寸法の異なる2種類の鉄筋コンクリート(RC)梁へのファイバー要素を用いた衝撃応答解析を実施し、既往の研究で実施した重錘落下衝撃実験結果との比較によってその適用性に関する検討を行った。図1および表1に対象としたRC梁の形状寸法および解析対象の重錘落下衝撃実験の条件を示す。また、図2に要素分割状況を示す。なお、紙面の都合上、1/2モデルとなっているが、本解析ではフルモデルで検討している。また、使用要素はTimoshenkoはり要素(各要素の曲率は一定)を用いた。なお、断面方向の分割に関しては梁幅および梁高をそれぞれ10分割とした。コンクリートには、東京大学コンクリート研究室で開発されたコンクリートの除荷・再載荷を含む経路依存型の構成則モデル

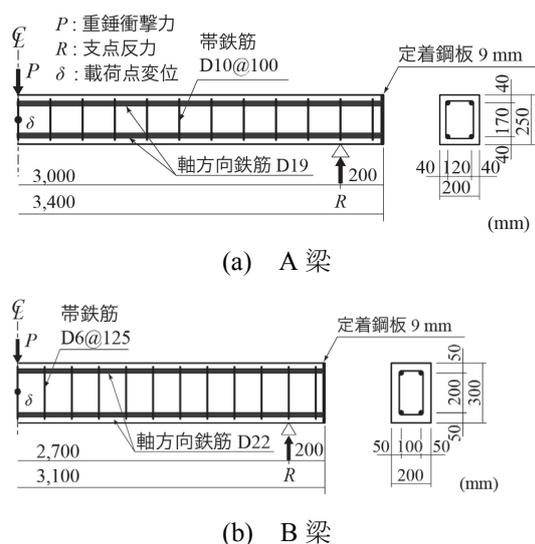


図1 RC梁の形状寸法

表1 実験ケース (RC梁)

梁	質量	衝突速度
A	300kg	4, 5, 6, 7m/s
B	500kg	3.1, 4.2, 5.1, 5.8, 6.2, 7m/s

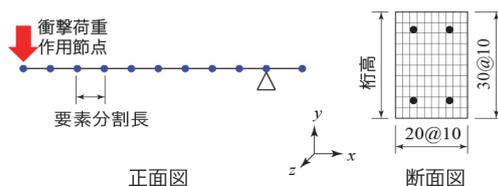


図2 ファイバー要素の分割状況 (B梁)

を用いた。一方、鉄筋に関しては、降伏後の塑性硬化係数を考慮したバイリニア型の等方弾塑性体モデルを採用した。

衝撃荷重の載荷方法に関しては、実験結果より得られた重錘衝撃力波形をスパン中央の節点に作用させることによって再現した。

(2) 小型H形鋼梁の重錘落下衝撃実験

鋼部材の耐衝撃挙動に関する基礎資料の収集や簡易解析手法の妥当性を検討するための実験データ取得を目的として、純スパン長の異なる小型H形鋼を用いた梁部材を対象に重錘落下衝撃実験を実施した。図3に実験で使用したH形鋼梁(鋼種:SS400)の形状寸法を示す。純スパン長の異なる3種類(2, 3, 4m)である。なお、梁材の断面寸法に関しては、H194×150×6×9のH形鋼を使用した。また、支点部近傍の局部座屈を抑制するために、端部より200mmの位置に板厚6mmの鉛直補剛材を溶接した。なお、載荷点直下部には鉛直補剛材を配置していない。

写真1に重錘落下衝撃実験状況を示す。写真に示すように、両支点部の上・下縁では鋼製治具を用いて試験体を拘束し、重錘衝突による試験体の跳ね上がりを防止している。なお、治具全体は回転を許容し、ピン支持に近い状態となっている。また、重錘落下を受け

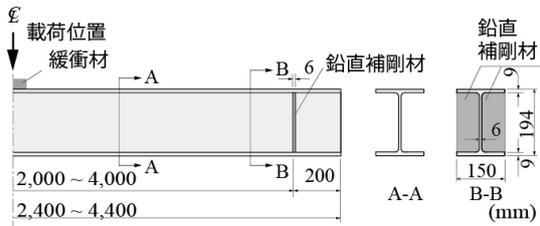


図3 小型H形鋼梁の形状寸法

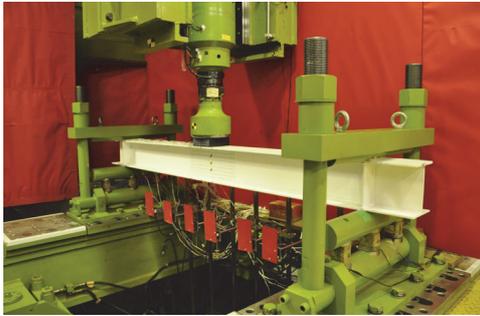


写真1 重錘落下衝撃実験状況
(純スパン長2mの場合)

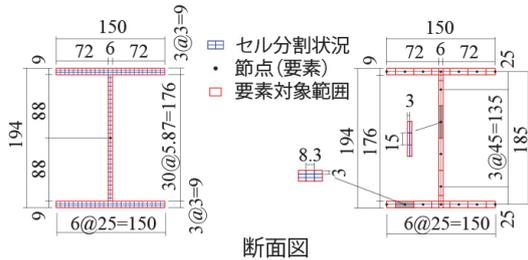
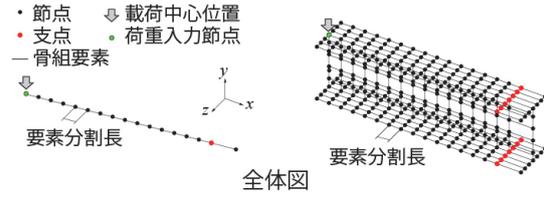
る上フランジ部には、緩衝材として天然ゴム(150×150×50mm)を両面テープで接着している。

スパン長の異なる各5体の試験体を対象に、①静载荷実験、②質量300kgの重錘を用いて初期入力エネルギーおよび増分入力エネルギーを1.5kJとし、それらを漸増させて繰り返し载荷する漸増繰り返し衝撃荷重载荷実験、および③繰り返し衝撃荷重载荷実験における最終入力エネルギーと同一条件で一度だけ重錘を落下させる単一衝撃荷重载荷実験を実施した。また、③の単一衝撃荷重载荷実験に関しては、最終入力エネルギーおよびその条件下での入力運動量が等価となるように重錘質量を500kgに変更し衝突速度を変化させた2種類の実験も実施した。

(3) 小型H形鋼梁への解析手法の適用性検討

(2)で得られた小型H形鋼梁の衝撃荷重载荷実験結果を用いて、提案のファイバー要素による簡易解析手法の妥当性を検討した。図4には、数値解析に用いた骨組モデルの軸方向および断面方向の要素分割状況を示している。ここでは、2種類の解析モデルについて検討を行っている。すなわち、①H形鋼を棒部材でモデル化した2Dモデル(a図)、および②フランジとウェブを忠実に反映させた3Dモデル(b図)である。前者はより簡易なモデルにおける動的挙動の再現性を、後者はフランジやウェブをモデル化することにより各部の局所変形を含めた挙動の再現性を検討する目的で実施した。なお、RC梁の場合と同様、解析はフルモデルで実施している。

支点の境界条件に関しては、2Dモデルの場合には、支点位置に相当する節点にz軸回りの回転を許容することによって支点部の



(a) 2Dモデル (b) 3Dモデル

図4 ファイバー要素モデル(S梁)



写真2 重錘落下衝撃実験状況
(鋼骨組構造, 重錘質量500kg)

挙動を再現することとした。一方、3Dモデルでは支点位置に相当する上下フランジの節点のうち、片側支点の下フランジ中央の節点のみをx, y, z軸の3方向を固定とし、残りの節点はy方向のみ固定とした。衝撃荷重の入力方法は、緩衝ゴムを設置した実験結果より得られた重錘衝撃力波形をスパン中央の節点に作用させることによって再現した。

(4) 鋼骨組構造への適用性検討

写真2に示す鋼骨組構造への提案解析手法の適用性を検討した。ここでは、柱梁接合部に剛域を考慮する場合としない場合の2種類について解析を実施し、既往の実験結果と比較を行った。

4. 研究成果

一連の研究において得られた結果を整理すると次のとおりである。

(1) RC梁への適用性検討

図5には、A, B梁における最大変位と要素長の関係について、縦軸に解析結果と実験結果との比を取って整理している。図より、A, B梁ともに実験結果との誤差を1割以内にするためには、要素長は桁高と同程度以下にする必要がある。なお、本数値解析の範囲では要素長を桁高の半分とすることで実験結果を精度よく再現できることが分かる。

図6には、各種時刻歴応答波形の一例として、A梁における衝突速度5m/sの場合の実験

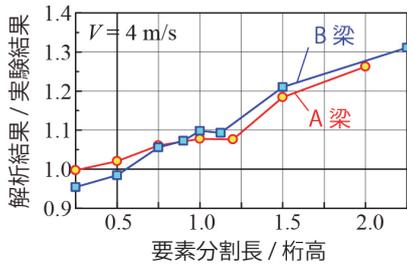


図5 要素分割長と解析精度の比較 (RC梁)

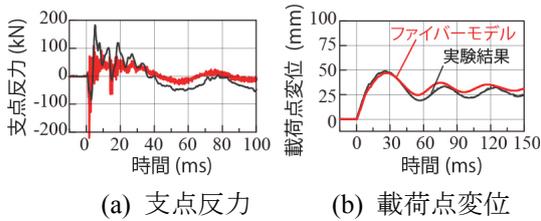


図6 各種応答波形 (A梁, $V=5\text{m/s}$)

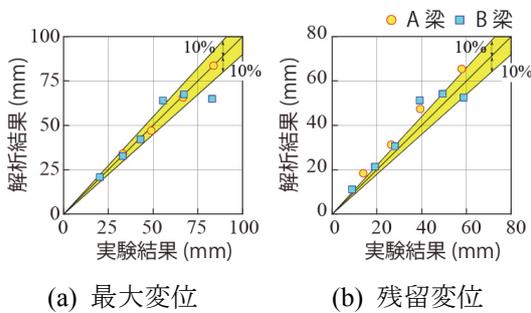


図7 解析結果と実験結果の比較

結果と数値解析結果を比較する形で示している。解析結果における支点反力波形 (a 図) に着目すると、最大支点反力は実験結果よりも小さく評価されているものの、反力の作用継続時間は両者でほぼ一致している。(b) 図に示す応答変位波形について数値解析結果と実験結果を比較すると、解析結果は初期勾配や最大変位、残留変位等の実験結果を精度よく再現できている。また、最大変位発生後の減衰自由振動状態の波形性状に関しても大略再現できることが分かる。

図7には、最大変位および残留変位について、解析結果と実験結果をそれぞれ縦軸および横軸に取って整理している。なお、図中の45°勾配を有する実線は解析結果と実験結果が一致していることを、網掛の部分はそれに対する誤差幅10%を意味している。図より最大変位に関する解析結果と実験結果の関係を見ると、その誤差は形状寸法や衝突速度にかかわらずほぼ10%以内の領域に分布しており、解析結果は実験結果によく対応している。また、残留変位に関しては、解析結果は実験結果を若干過大に評価する傾向にあるものの、最大変位と同様にその誤差はほぼ10%以内であることが分かる。

(2) 小型H形鋼梁の衝撃荷重実験

図8には、純スパン長3mにおける繰り返し衝撃荷重実験および単一衝撃荷重実験

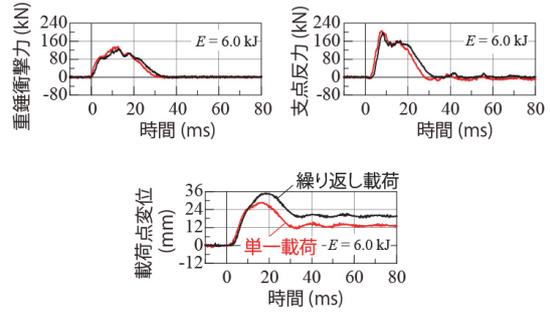


図8 繰り返し载荷および単一载荷における各種時刻歴応答波形 (重錘質量: 300 kg)

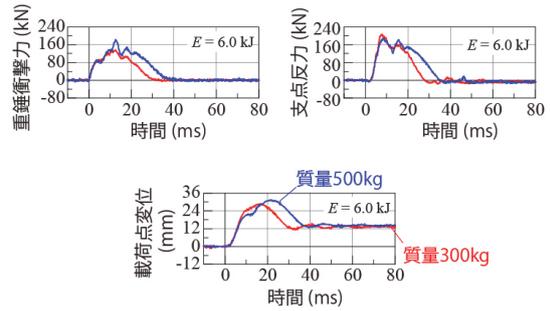


図9 エネルギー等価载荷における重錘質量の影響

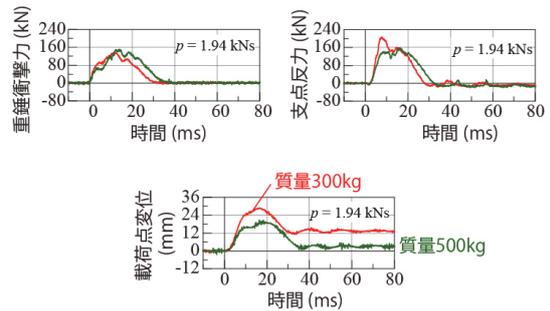


図10 入力運動量等価载荷における重錘質量の影響

荷実験結果より得られた重錘衝撃力、支点反力、载荷点変位の時刻歴応答波形を示しており、図中のエネルギーEは目標入力エネルギーを示している。

衝撃力波形について繰り返し载荷と単一载荷を比較すると、その波形性状はほぼ一致しているものの、衝撃力の継続時間は単一载荷の方が若干短い。この両者の差は载荷履歴の影響によるものであり、繰り返し载荷の場合には载荷点近傍部における上フランジの面外変形などによる断面剛性の低下が影響しているものと推察される。

支点反力波形について両者を比較すると、支点反力波形は最大値に至るまではほぼ等しいものの、継続時間は重錘衝撃力と同様に単一载荷の場合が短い。また、载荷点変位波形についても両者を比較すると、繰り返し载荷履歴の影響のない単一载荷の場合が最大

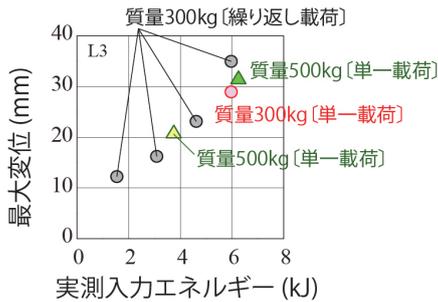
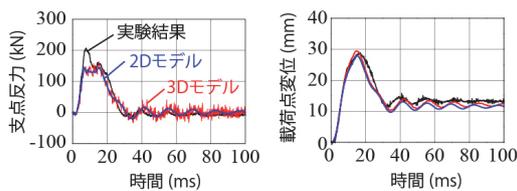
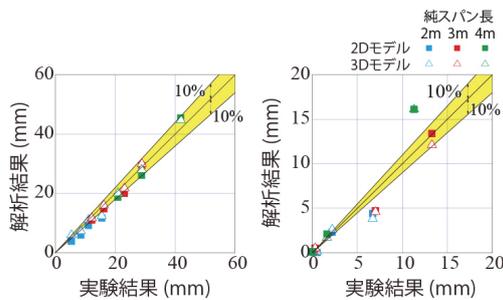


図 11 入力エネルギーと最大応答変位の関係



(a) 支点反力 (b) 荷点変位
図 12 各種応答波形 (E=6kJ)



(a) 最大変位 (b) 残留変位
図 13 解析結果と実験結果の比較 (鋼梁)

変位および残留変位ともに小さくなっていることが確認される。

図 9 および 10 には、エネルギー等価荷重および入力運動量等価荷重における各種応答波形を比較して示している。両図より、エネルギー等価荷重の場合には、最大重錘衝撃力において差異が見られるものの、最大支点反力や最大変位に関してはほぼ等しい値を示している。一方、入力運動量等価荷重の場合には、最大重錘衝撃力はほぼ等しいものの、最大支点反力や最大変位に関しては大きな差異が生じることが分かる。

図 11 には、入力エネルギーと実験結果から得られた最大変位の関係を示している。図より、入力エネルギーと最大荷点変位にはほぼ線形の関係が成立することが分かる。

(3) 小型 H 形鋼梁への解析手法の適用性検討

図 12 には、ファイバー要素を用いた解析結果の一例として、スパン長 3m、入力エネルギー 6kJ における解析結果 (2D および 3D モデル) を実験結果と比較して示している。

支点反力に関する実験結果は、重錘衝突直後に負の値を示し、その後、正に反転し最大

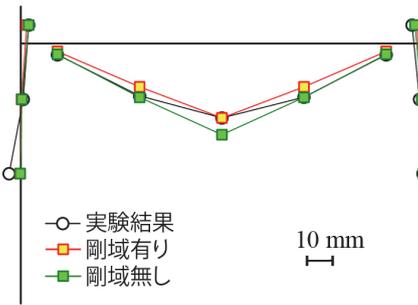


図 14 最大変位時における骨組全体の変形状況

応答値に至っている。その後は高周波の振動を伴いながら徐々に低下し自由減衰振動に移行している。一方、数値解析結果は、実験結果の最大値を過小に評価しているものの、その波形形状は大略再現していることが分かる。

荷点変位波形を見ると、実験結果は重錘衝突後 10~20ms で最大応答値に到達し、その後減衰自由振動となり残留変位が生じている。数値解析結果を見ると、実験結果の最大応答値、残留変位および応答波形ともに精度よく再現できていることが分かる。

図 13 には、鋼梁における最大変位および残留変位について、解析結果と実験結果をそれぞれ縦軸および横軸に取って整理している。図より、解析結果における最大変位は、前述の図 7 に示す RC 梁の場合と同様に、実験結果を概ね 10%以内の誤差で再現可能なが分かる。

以上より、ファイバー要素を用いた解析手法は、実務レベルにおいて衝撃荷重を受ける部材の損傷評価手法として十分に適用可能であることを確認した。

(4) 鋼骨組構造への適用性検討

図 14 には衝突速度 $V=8\text{m/s}$ における最大変位時の骨組全体の変形状況を実験結果と比較して示している。荷点における梁の鉛直変位に着目すると、剛域を考慮しない場合の方が考慮する場合よりも大きいことが分かる。これは隅角部に剛域を考慮していないことより、隅角部の剛性が過小評価され、梁から柱に断面力が適切に伝達されないことを示唆している。

以上より、鋼骨組構造を対象に提案の解析手法を適用する場合には、柱梁接合部 (隅角部) に剛域を考慮する必要があることを明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 12 件)

- ① 小室雅人, 栗橋祐介, 岸 徳光: スパン長の異なる H 形鋼梁の重錘落下衝撃実験, 構造工学論文集, 62A, 999-1010, 2016, 査読有
- ② 小室雅人, 栗橋祐介, 牛渡裕二, 鈴木健太

- 郎, 岸 徳光 : H 形鋼梁の耐衝撃挙動に関するファイバーモデルの適用性検討, 構造工学論文集, 62A, 1011-1018, 2016, 査読有
- ③ 小室雅人, 牛渡裕二, 鈴木健太郎, 栗橋祐介, 岸 徳光 : ファイバー要素を用いた H 形鋼梁の衝撃応答解析, 平成 27 年度土木学会北海道支部論文報告集, 72 (CD-ROM), A-48, 2016, 査読無
- ④ 葛西勇輝, 小室雅人, 栗橋祐介, 岸 徳光 : ゴム緩衝材を設置した H 形鋼梁の耐衝撃挙動に関する実験的検討, 平成 27 年度土木学会北海道支部論文報告集, 72 (CD-ROM), A-44, 2016, 査読無
- ⑤ 保木和弘, 牛渡裕二, 小室雅人, 木村ゆき, 岸 徳光 : 重錘落下衝撃を受ける鋼門形骨組の耐衝撃挙動に関する解析的検討, 平成 27 年度土木学会北海道支部論文報告集, 72 (CD-ROM), A-40, 2016, 査読無
- ⑥ 葛西勇輝, 小室雅人, 栗橋祐介, 岸 徳光 : 重錘落下衝撃を受ける H 形鋼梁の耐衝撃挙動, 鋼構造年次論文報告集, 23, 664-670, 2015, 査読有
- ⑦ 小室雅人, 岸 徳光 : 重錘落下衝撃を受ける H 形鋼梁の衝撃応答解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 論文番号 : 20183, 2015, 査読無
- ⑧ 葛西勇輝, 小室雅人, 栗橋祐介, 岸 徳光 : H 形鋼梁の耐衝撃挙動に関する重錘落下衝撃実験, 土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集(CD-ROM), 1-289, 2015, 査読無
- ⑨ Komuro, M., Kishi, N., Ushiwatari, Y., and Takeda, M: Impact response analysis of RC beams by means of fiber element approach, 5th International Workshop on Performance, Protection & Strengthening of Structures Under Extreme Loading, 595-602, 2015, 査読有
- ⑩ 葛西勇輝, 小室雅人, 栗橋祐介, 岸 徳光 : 重錘落下衝撃を受ける H 形鋼梁の耐衝撃挙動に関する実験的検討, 平成 26 年度土木学会北海道支部論文報告集, 71 (CD-ROM), A-49, 2015, 査読無
- ⑪ 小室雅人, 牛渡裕二, 武田雅弘, 岸 徳光 : 衝撃荷重を受ける RC はりの動的応答性状に関するファイバー要素解析法の適用性, コンクリート工学年次論文集, 36(2), 529-534, 2014, 査読有
- ⑫ 小室雅人, 牛渡裕二, 武田雅弘, 岸 徳光 : ファイバー要素を用いた RC 梁の衝撃応答解析, 平成 25 年度土木学会北海道支部論文報告集, 70(CD-ROM), A-23, 2014, 査読無

[学会発表] (計 9 件)

- ① 小室雅人: ファイバー要素を用いた H 形鋼梁の衝撃応答解析, 土木学会北海道支部平成 27 年度年技術発表会, 2016.1.31, 北海道大学
- ② 葛西勇輝: ゴム緩衝材を設置した H 形鋼梁の耐衝撃挙動に関する実験的検討, 土木学

- 会北海道支部平成 27 年度年技術発表会, 2016.1.31, 北海道大学
- ③ 保木和弘: 重錘落下衝撃を受ける鋼門形骨組の耐衝撃挙動に関する解析的検討, 土木学会北海道支部平成 27 年度年技術発表会, 2016.1.31, 北海道大学
- ④ 葛西勇輝: H 形鋼梁の耐衝撃挙動に関する重錘落下衝撃実験, 土木学会第 70 回年次学術講演会, 2015.9.18, 岡山大学, 津島キャンパス
- ⑤ 小室雅人: 重錘落下衝撃を受ける H 形鋼梁の衝撃応答解析, 日本建築学会 2015 年度大会 (関東), 2015.9.6, 東海大学
- ⑥ Komuro, M.: Impact response analysis of RC beams by means of fiber element approach, 5th International Workshop on Performance, Protection & Strengthening of Structures Under Extreme Loading, 2015.6.29, East Landing, MI., USA.
- ⑦ 葛西勇輝: 重錘落下衝撃を受ける H 形鋼梁の耐衝撃挙動に関する実験的検討, 土木学会北海道支部平成 26 年度年技術発表会, 2015.2.1, 室蘭工業大学
- ⑧ 小室雅人: ファイバー要素を用いた小型 RC 梁の衝撃応答解析, 日本建築学会 2014 年度大会 (関西), 2015.9.14, 神戸大学
- ⑨ 小室雅人: ファイバー要素を用いた RC 梁の衝撃応答解析, 土木学会北海道支部平成 25 年度年技術発表会, 2014.2.1, 札幌コンベンションセンター

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小室 雅人 (KOMURO, Masato)
室蘭工業大学・工学研究科・准教授
研究者番号 : 1 0 2 7 0 1 8 3

(2) 研究分担者

岸 徳光 (KISHI, Norimitsu)
釧路工業高等専門学校・校長
研究者番号 : 3 0 1 5 3 0 7 6

栗橋 祐介 (KURIHASHI, Yusuke)
室蘭工業大学・工学研究科・講師
研究者番号 : 3 0 4 1 4 1 8 9