

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：50103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06199

研究課題名(和文) FRP ロッド表面埋設工法によるRC部材の耐衝撃性向上法に関する研究

研究課題名(英文) Upgrading effect of FRP rod NSM strengthening method on impact resistant capacity of RC members

研究代表者

岸 徳光 (Kishi, Norimitsu)

釧路工業高等専門学校・その他・校長

研究者番号：30153076

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：既設RC部材の耐衝撃性を向上させる工法の1つとして、FRPロッド下面埋設補強工法を提案し、静載荷実験及び重錘落下衝撃実験を実施し、FRPシート接着工法を適用した場合と比較検討を行うことによってその妥当性を検証した。その結果、アラミド繊維を用いる場合には、提案の工法が優れていることが明らかになった。但し、炭素繊維を用いる場合には、材料の特性によって早期に破断する傾向にある。数値解析手法の確立に関する検討も行い、簡易な材料構成則と分散ひび割れを仮定し、コンクリート要素の引張側に破壊エネルギー等価の考え方を適用し軸方向要素長を6mm程度にすることによって、適切に解析可能であることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：In order to upgrade impact resistant capacity of the RC members, a FRP rod near-surface mounting (NSM) method was proposed. To confirm an applicability of the method, static and falling-weight impact tests of the RC beams applying the proposed method and strengthening with bonding FRP sheet were conducted. From these tests, it is seen that: 1) in the case of applying Aramid FRP material, the impact resistant capacity of the RC beams applying the proposed NSM method prefers to that applying FRP sheet bonding one; and 2) however, in the case of applying Carbon FRP material, the rods tend to be ruptured at the smaller level of input impact energy due to material characteristics.

Development of the numerical analysis method for RC beams strengthened applying NSM method under falling-weight impact loading was tried.

研究分野：構造動力学

キーワード：RC 梁 FRP ロッド下面埋設曲げ補強 FRP シート接着曲げ補強 耐衝撃性 重錘落下衝撃実験 弾塑性
衝撃応答解析 破壊エネルギー等価

1. 研究開始当初の背景

近年、地球温暖化に起因する異常気象の発生に伴い、集中豪雨や強風・竜巻等による災害が多数発生している。このような状況下で、国土交通省では「新たなステージに対応した防災・減災のあり方に関する懇談会」を立ち上げ、災害対策の見直しを推進している。また、土木学会では、落石防護構造物や砂防ダムのあり方の他、これらの合理的な耐衝撃設計法の確立に向けた検討を行っている。これより、自然災害発生時に突発的な荷重が作用する場合に対しても国民の安全安心を確保するためには、耐衝撃用途構造物の性能向上を図ることが重要な課題の一つであるものと判断される。

特に鉄筋コンクリート (RC) 構造物に限定して考えると、その耐衝撃性向上法には、緩衝材を設置して衝撃荷重をより低減させる方法と、補強等によって構造物の耐衝撃性を向上させる方法がある。本研究では、後者でかつ新素材繊維補強 (FRP) 材を用いる補強法に着目して検討を行うこととした。

FRP 補強材を用いる場合には、通常シート接着工法が用いられるが、衝撃荷重が作用する場合には単位幅当たりの軸剛性が小さいことにより早期に剥離あるいは破断に至る欠点が指摘される。一方で、ロッドを下面埋設する場合にはロッドの軸剛性がシートの単位幅当たりのそれよりも大きくひび割れ発生時における破断抵抗性が向上するものと判断される。

このような観点から、RC 部材の耐衝撃性はロッド下面埋設補強を施すことによってシート接着時よりも効率的に向上可能であることが推察される。図-1には両補強法及び FRP ロッドの外観を示している。

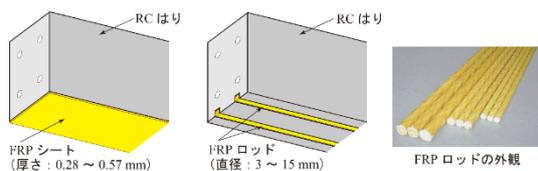


図-1 FRP シート接着工法とロッド下面埋設工法及び FRP ロッドの外観

2. 研究の目的

本研究では、FRP シート接着工法を改良した補強法として、FRP ロッド下面埋設工法を提案し、1) 繊維補強量が一定の条件下において、アラミド繊維 (AFRP) 材を用いた両工法による RC 梁の耐衝撃性向上効果や補強材の破断抵抗性を重錘落下衝撃実験を実施して比較検討を行う。また、静的荷重作用時と衝撃荷重作用時における耐荷性状を把握するために、静載荷実験も実施する。; 2) 耐衝撃性向上効果に及

ぼす新素材繊維材料の影響を実験的に明らかにするために、AFRP 材の他炭素繊維 (CFRP) 材料についても同様の実験を実施し比較検討を行う。; 3) 合理的な耐衝撃設計法の確立のために、実験結果との比較の下に数値解析的手法の確立に向けた研究も推進する。

3. 研究の方法

(1) 実験的研究:

断面寸法が 200×250 mm (幅×高さ)、純スパンが 3 m の RC 梁を製作し、基準の試験体となる無補強試験体を 2 体の他、厚さ 0.574 mm で幅 200 mm の AFRP シートを下面接着した試験体を 5 体、AFRP シートと全体の引張軸剛性がほぼ等しくなるように直径 11 mm の 2 本のロッドを下面埋設した試験体を 8 体製作した。

実験は、300 kg の鋼製重錘を用い、過去の実験結果を参考に落下高さを 1.0、2.0、2.5、3.0 m と変化させた単一落下法に基づいた実験を行った。なお、ロッド補強の場合には詳細に検討を行うために、0.5、1.5、3.5 m の場合についても実施している。無補強試験体の場合には、2.5 m 落下のみに限定した。また、静載荷実験は、重錘落下衝撃荷重載荷実験と同様に 3 点曲げ載荷法に基づいて行っている。CFRP 材を用いる場合については、AFRP シート接着補強を施す場合と同様のケースについて実験を行っている。

測定項目は、ロードセルによる重錘衝撃力と全支点反力 (以後、単に支点反力)、レーザー式非接触型変位計を用いたスパン中央点変位 (以後、単に変位) 波形及び FRP 材の軸方向ひずみ分布を時系列に計測している。また、載荷点部に限定して秒速 2,000 コマの高速度ビデオ撮影を行い、ひび割れ発生状況や補強材の剥離・破断状況を観測している。最後に残留変位を求め、ひび割れ分布もスケッチしている。

図-2には、重錘落下衝撃実験風景を示している。



図-2 重錘落下衝撃実験風景

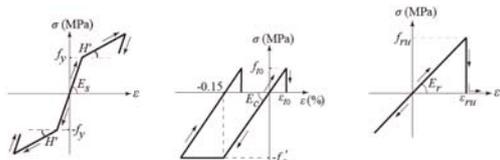
(2) 数値解析的研究:

数値解析的手法の確立に関する検討は、主に AFRP ロッド下面埋設 RC 梁の重錘落下衝撃実験に限定して検討を行った。実験結果によれば、ロッドとコンクリート界面

との付着強度はコンクリートの引張強度よりも大きいことにより、ロッド剥離時にはかぶりコンクリートと共に剥落することが明らかになっている。そのため、数値解析ではロッドとコンクリート界面は完全付着を仮定した。また、コンクリートのひび割れモデルは簡略化するために分散ひび割れを採用することとした。その結果、コンクリート要素の軸方向要素長を無補強 RC 梁で最適であるとされている 25 mm を設定する場合には、ひび割れ発生時にロッド剥離に類似した性状を示し補強効果が期待できないことが明らかになった。

その結果、ひび割れ幅は実挙動と同程度に模擬することが必要であることが示された。本研究では、この問題を解決するために、コンクリート要素に対して引張破壊エネルギー等価 (G_f) の概念¹⁾を応用して換算引張強度を設定し、要素長を無補強時よりも小さくして妥当性を検討することとした。

図-3には各材料の材料構成則、図-4には数値解析のための要素分割状況、図-5にはひび割れ分布に関する要素分割の影響について示している。



(a) 鋼材 (b) コンクリート (c) AFRP 材

図-3 各材料の応力-ひずみ関係

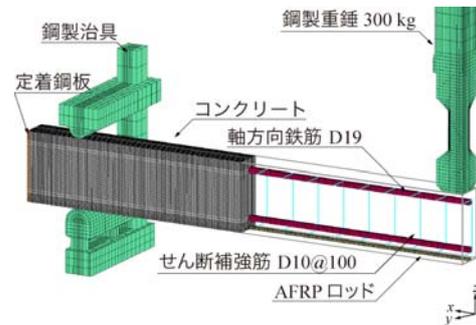


図-4 要素分割状況

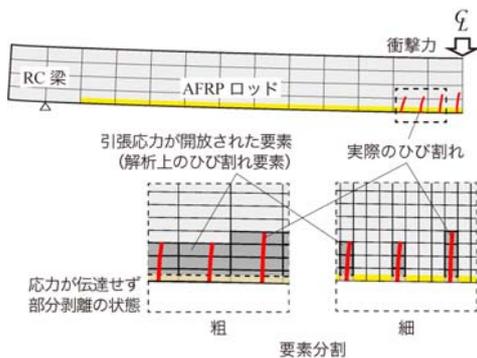


図-5 ひび割れ幅に関する要素長の影響

4. 研究成果

(1) 静荷重時の実験結果

図-6には、静荷重時におけるスパン中央点変位と荷重の関係を示している。図中 N、AS、AR はそれぞれ無補強試験体、AFRP シート接着補強試験体、AFRP ロッド下面埋設補強試験体を意味している。

図より、1) AFRP シート接着あるいはロッド埋設補強を施すことによって、梁の静的耐力は飛躍的に向上することが分かる。2) 鉄筋降伏後には、ロッド埋設補強の場合よりもシート接着補強の場合が多少耐力が向上する傾向にある。これは、ロッド埋設補強の場合には有効幅と同様の効果によって、ロッドの補強効果が梁幅全体に作用しないことによるものと推察される。3) いずれも剥離によって終局に至っている。

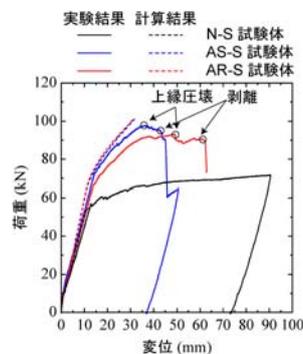


図-6 静荷重時における荷重-変位関係

(2) 衝撃荷重実験結果

① 衝撃応答波形分布

図-7には、無補強試験体の他、AFRP シート接着補強を施した場合とロッド下面埋設補強を施した場合の試験体について、重錘衝撃力波形、支点反力波形、変位波形を比較して示している。

図より、1) 重錘衝撃力波形の場合には、補強の有無にかかわらずいずれの場合も類似の波形を示していることが分かる。主波動継続時間は、ほぼ 1 ms 程度である。但し、落下高さの増加に対応して衝撃力もほぼ線形に増加する傾向を示している。

2) 支点反力波形分布は、落下高さや梁の劣化の程度にかかわらず類似の性状を示している。但し、落下高さの増加や劣化の進行に対応して主波動継続時間は延びる傾向にある。シート接着補強とロッド埋設補強の場合で比較すると、衝撃荷重時時にはシートが剥離する場合も含めて類似した波形分布を示すことが分かる。落下高さが 2.5 m の場合において、補強試験体の場合には無補強試験体の場合に比較して主波動継続時間が短く、AFRP 材による補強効果を確認できる。

3) 変位波形分布は、シート剥離を示す落

下高さ 3.0 m の場合を除き、AFRP 材で補強する場合には両者類似の波形分布を示すことが分かる。シートが剥離する場合においても、最大変位到達後までは類似の波形を示していることより、シートは最大変位発生後に剥離することが窺われる。

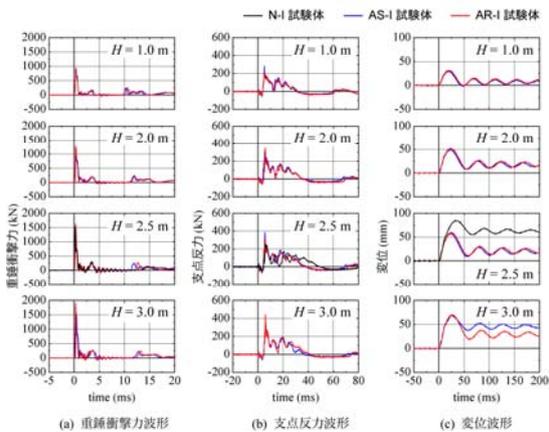


図-7 応答波形分布の比較

② 補強材ひずみ分布とひび割れ分布の時間的な推移状況

図-8には、3.0 m 落下時における AFRP シート剥離近傍における AFRP 補強材のひずみ分布とひび割れ分布の時間的な推移状況について示している。

図より、 $t = 15$ ms 時点において、シート接着補強の場合にはロッド埋設補強の場合に比較して斜めひび割れが広く分布し、斜めひび割れ先端部がシートを下面に押し出すピーリング作用が顕在化していることが分かる。これに対して、ロッド埋設補強の場合には、斜めひび割れが均等に分布しピーリング作用が顕在化していない。これは、ロッドがひび割れに対して等曲げに類似した性状を示していることによるものと推察される。その後、シート接着補強の場合には、時間の経過と共にシートが剥離する傾向を示し、 $t = 30$ ms 時点で完全に剥離に至っている。一方、ロッド埋設補強の場合には、最外端の斜めひび割れの開口が多少大きいものの、剥離に至らずリバウンドの傾向を示している。

ひずみ分布に関しては、 $t = 15$ ms 時点において両者類似の分布を示している。その後シート接着補強の場合には時間の経過と共にひずみも増加し、やがて $t = 30$ ms 時点で剥離に至ることによりひずみも解放されている。一方、ロッド埋設補強の場合には、 $t = 20$ ms 以降も剥離の傾向を示さずスパン中央部で類似のひずみ分布を示し、等曲げの傾向にあることが分かる。

③ 実験終了後におけるひび割れ分布

図-9には、実験終了後におけるひび割れ分布を比較して示している。図より、無補強試験体の場合には、載荷点を中心に角折れ状態に至っていることが分かる。これに

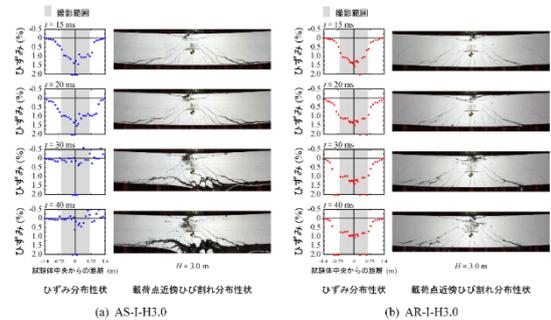


図-8 載荷点近傍における AFRP 補強材のひずみ分布とひび割れ分布性状

対して、シート接着補強あるいはロッド埋設補強の場合には、補強材の補強効果によってシート剥離の有無にかかわらず角折れの状態には至っていないことが分かる。

ひび割れ分布性状を比較すると、無補強試験体も含めて載荷点近傍部には斜めひび割れが発生し、周辺部は下縁と上縁から曲げひび割れの発生を確認できる。また、補強試験体と比較すると、斜めひび割れはシート接着補強の場合がロッド埋設補強の場合より広く分布する傾向を示している。

補強試験体において、前述のようにシート接着補強の場合には落下高さが 3.0 m の場合においてシート剥離に至っている。一方、ロッド埋設補強の場合には、落下高さが 3.5 m の時点でロッドが剥離している。これより、ロッド埋設補強の場合がシート接着補強の場合に比較して耐衝撃性向上効果の大きいことが明らかになった。また、剥離時には、いずれの場合においてもシートあるいはロッドはかぶりコンクリートが付着した状態で剥離に至っていることが確認された。

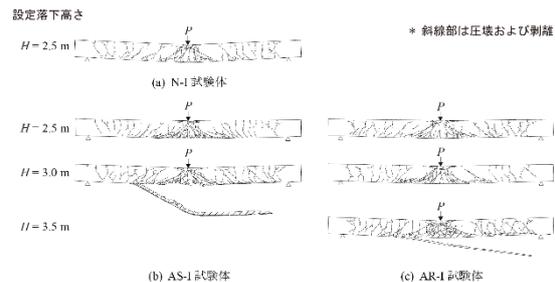


図-9 実験終了後におけるひび割れ分布

④ CFRP 材との耐衝撃性向上効果の比較

CFRP シート接着補強工法とロッド下面埋設補強工法を適用した場合について、AFRP 材を用いた場合と同様の実験を実施した。

その結果、静載荷時には、いずれの場合にも同程度の補強効果を示し、剥離破壊型で終局に至ることが明らかになった。一方、重錘落下衝撃実験の場合において、CFRP シート接着補強法の場合には AFRP シート接着時と同等の耐衝撃性向上効果のあることが明らかになった。

一方で、CFRP ロッド埋設補強を施す場合には、落下高さが2.5 m時点でロッドが破断に至ることが明らかになった。図-10には、落下高さ2.5 m落下時におけるロッドの破断状況を示している。図より、ロッドは脆性的な破断ではなくて、各繊維がばらけた状態で破断に至っていることが分かる。これは、除荷状態に至った時点でエポキシ樹脂によって一体化されていた繊維がばらばらに解かれ、その状態で斜めひび割れ先端部がさらに下方に押し出すことによって、各繊維が純せん断的に破断に至ったものと推察される。

以上より、FRP 材で補強された RC 梁の耐衝撃性は、AFRP ロッド下面埋設補強試験体の場合が最も優れており、次いで AFRP/CFRP シート接着補強試験体であることが明らかになった。また、CFRP ロッド下面埋設補強試験体の場合には、早期にロッド破断に至ることから、同一軸剛性で比較する場合には効率的な耐衝撃性の向上は期待できないことが明らかになった。

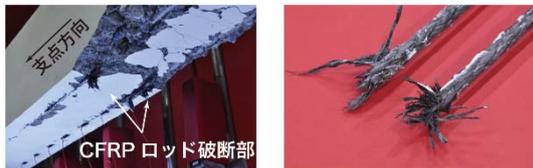


図-10 2.5 m 落下時における CFRP ロッドの破断状況

(3) 数値解析的研究

図-11には、軸方向要素長を無補強試験体に対する標準要素長である25 mmとする場合に対して、6.25 mmとする場合の G_f 考慮の有無による荷点変位波形を比較して示している。なお、要素長を6.25 mmとし G_f を考慮する場合におけるコンクリートの換算引張強度は基準強度の2倍となる。

図より、 G_f を考慮しない場合には要素長を25 mmにする場合は勿論のこと、6.25 mmにする場合においても変位波形が過大に評価されることが分かる。また、要素長を6.25 mmとし、 G_f を考慮する場合には実験結果によく対応していることが分かる。

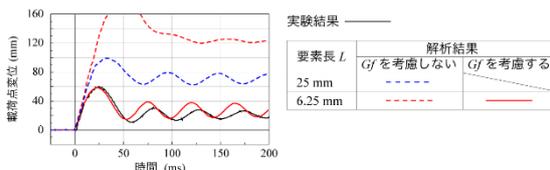


図-11 G_f 考慮の有無による変位波形分布の比較

図-12には、要素長を6.25 mmとし G_f を考慮した場合における解析結果を各落下高さ毎に実験結果と比較して示している。

図より、落下高さが2.5 mまでは重錘衝撃力、支点反力、変位波形共に実験結果とよく対応していることが分かる。なお、3.0 m落下時の場合には入力エネルギーが大きいことにより損傷度も大きくなり、解析結果は最大変位到達後も増加傾向を示し、実験結果と対応していないことが分かる。この点に関しては、今後の課題としたい。

図-13には、ひび割れ分布に関する実験結果と解析結果を比較して示している。図より、曲げひび割れと共に斜めひび割れの分布が大略実験結果と対応していることが分かる。

以上より、提案の手法を適用することによって、重錘落下衝撃荷重載荷時におけるFRP ロッド下面埋設 RC 梁の耐衝撃挙動を大略評価可能であることが明らかになった。今後は、さらに要素を細分化した場合の精度向上や補強材の剥離や破断の的確な予測評価を可能にしたいと考えている。

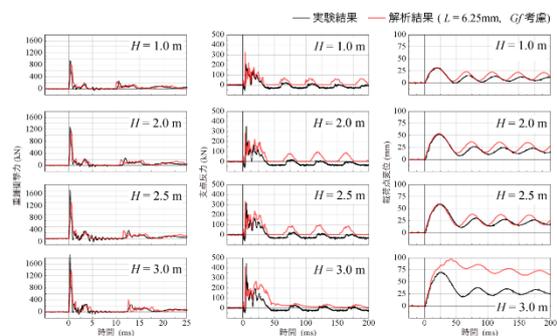


図-12 応答波形に関する実験結果と解析結果の比較 (G_f 考慮、要素長 6.25 mm)

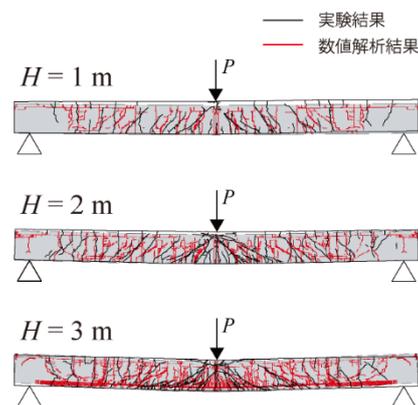


図-13 AFRP ロッド下面埋設 RC 梁のひび割れ分布に関する実験結果と解析結果の比較

<引用文献>

- ① Kishi, N. and Bhatti, A.Q. : An equivalent fracture energy concept for nonlinear dynamic response analysis of prototype RC girders subjected to falling-weight impact loading, International Journal of Impact Engineering, Vol. 37, No. 1, pp. 103-113, 2010

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 23 件)

- ① 岸 徳光、栗橋祐介、三上 浩、船木隆史、CFRP シート/ロッドを用いて曲げ補強した RC 梁の静的および衝撃荷重載荷実験、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol. 40、No. 2、2018、登載決定
- ② 瓦井智貴、小室雅人、岸 徳光、栗橋祐介、AFRP シート下面接着曲げ補強 RC 梁の衝撃応答解析、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol. 40、No. 2、2018、登載決定
- ③ 岸 徳光、小室雅人、栗橋祐介、三上 浩、船木隆史、2 種類の RC 梁下面埋設 FRP ロッドの耐衝撃性向上効果に関する実験的研究、構造工学論文集、査読有、Vol. 64A、2018、pp. 875-888
- ④ 船木隆史、岸 徳光、栗橋祐介、三上 浩、CFRP シート接着工法を用いて曲げ補強した RC 梁の衝撃荷重載荷実験、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol. 39、No. 2、2017、pp. 577-582
- ⑤ 瓦井智貴、岸 徳光、小室雅人、栗橋祐介、AFRP ロッドで曲げ補強した RC 梁の衝撃応答解析、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol. 39、No. 2、2017、pp. 583-588
- ⑥ 岸 徳光、栗橋祐介、小室雅人、三上 浩、CFRP ロッドを用いて下面埋設曲げ補強を施した RC 梁の重錘落下衝撃実験、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol. 39、No. 2、2017、pp. 1147-1152
- ⑦ 岸 徳光、小室雅人、栗橋祐介、三上 浩、船木隆史、AFRP ロッド下面埋設曲げ補強 RC 梁の耐衝撃性向上効果に関する実験的検討、構造工学論文集、査読有、Vol. 63A、2017、pp. 1188-1200
- ⑧ 岸 徳光、栗橋祐介、三上 浩、佐藤元彦、AFRP ロッド下面埋設曲げ補強 RC 梁の重錘落下衝撃実験、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol. 38、No. 2、2016、pp. 1375-1380

〔学会発表〕(計 16 件)

- ① Kishi, N.、Komuro, M. and Mikami, H.: Falling-weight impact test of FRP rods NSM beams, Proceedings of ICPS5, Poznan, Poland, Aug. 19-23, 2018、発表予定
- ② Kawarai, T.、Komuro, M.、Kishi, N. and Kurihashi, Y.: Impact response analysis of RC beams strengthened with NSM-AFRP rods, Proceedings of ICPS5, Poznan, Poland, Aug. 19-23, 2018、発表予定
- ③ Kishi, N.、Komuro, M.、Kurihashi, Y. and

Mikami, H.: Impact test of RC beams flexurally strengthened with CFRP material, ACI, Proceedings of FRPRCS-13, Anaheim, USA, Oct. 14-15, CD-ROM, 2018

- ④ Komuro, M.、Kurihashi, Y.、Kawarai, T. and Kishi, N.: Numerical simulation of AFRP rod NSM RC beams under falling-weight impact loading, ACI, Proceedings of FRPRCS-13, Anaheim, USA, Oct. 14-15, CD-ROM, 2018
- ⑤ Kishi, N.、Komuro, M.、Kurihashi, Y. and Mikami, H.: Upgrading effects of near-surface mounting of Aramid fiber reinforced polymer rods on impact resistant capacity of reinforced concrete beams, Proceedings of ROCEXS2017, Barcelona, Spain, May 22-24, pp. 149-152, CD-ROM, 2017

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

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

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