

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 1 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2008～2012

課題番号：20246091

研究課題名（和文） 中低層 RC 造建物に対する震前・震後の簡便な耐震補強技術の研究開発

研究課題名（英文） Convenient Seismic Retrofit Techniques of Existing Low to Mid-rise RC Buildings before/after Earthquake Attack

研究代表者

山川 哲雄 (YAMAKAWA TETSUO)

琉球大学・名誉教授

研究者番号：50142352

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、旧耐震設計法で設計された既存中低層 RC 造建築物の耐震性能を引き上げるために必要な耐震補強技術を提案することにある。本研究では、コンクリートを高横拘束すれば、強度と靱性が改善されるという基本的アイデアを地震被災後の損傷 RC 柱、および地震被災前の RC 柱、耐震壁、柱梁接合部や枠付き鉄骨ブレースに応用し、耐震性能の大幅な改善を実験的に明らかにした。次いで、横拘束した鉄筋の付着強度の実験による定式化と、鉄骨ブレースの合成接合条件が座屈強度に及ぼす影響を解析的な数値計算を通して明らかにした。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to propose a new seismic retrofit technique for low to mid-rise RC buildings based on the fundamental ideas of lateral confinement. This idea is applied to columns before/after damage, shear walls, column-beam connections, steel braced frames and bond strength of reinforcement. As a result, great improvement in seismic performance is clarified experimentally. Next, buckling strength of steel braced frame on hybrid connection is proposed through analysis and calculation in this research.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	15,700,000	4,710,000	20,410,000
2009 年度	6,900,000	2,070,000	8,970,000
2010 年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
2011 年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2012 年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
総計	35,600,000	10,680,000	46,280,000

研究分野：建築構造学

科研費の分科・細目：建築学，建築構造学・材料

キーワード：耐震補強，緊急補強，柱梁接合部，せん断強度，付着強度，PC 鋼棒，座屈，ブレース，合成接合

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 山川研究室では山川を中心に平成 7 年 1 月の阪神・淡路大震災を契機に平成 7 年 4 月から、耐震性能に欠けた中低層 RC 造建築物を対象に、震前・震後の耐震補強技術の研究

開発に着手した。平成 13 年度から平成 19 年度までに連続して科研基盤 B が 3 件採択され、柱から壁の一部までの耐震補強技術を提案してきた。本耐震補強技術の特徴はコンクリートを鋼板や緊結ボルトで高横拘束すれば、

強度と靱性が顕著に改善されるという一般的な原理を極脆性柱、腰壁付き柱、袖壁付き柱、無開口・有開口耐震壁、コンクリートブロック壁、合成無筋壁、枠付き鉄骨ブレースなどに応用し、耐震性能の顕著な改善にある。

(2) 上記の研究段階では柱関係の研究が先行し、壁や鉄骨ブレース関係の研究が十分ではなかった。しかし、中低層 RC 造建築物では強度補強として壁や鉄骨ブレースは重要な耐震補強要素である。そこで、中低層 RC 造建築物の耐震補強要素としてその技術を確立することを目的に科研基盤 A に応募したところ、科研基盤 B に引き続き採択された次第である。

(3) 柱梁接合部の耐震補強法、高横拘束下における鉄筋の付着強度、そして鉄骨ブレースの支持条件が座屈強度に及ぼす影響に関する検討を今までの柱を中心とした実験的研究に追加した。次いで、それぞれの分野の研究者に研究分担者や協力研究者として参加していただき、山川を中心とした研究グループを沖縄と九州で組織化して、本研究に着手した。

## 2. 研究の目的

(1) 高横拘束の原理を用いて既存中低層 RC 造建築物の耐震性能向上を目的に、柱、柱梁接合部から壁、鉄骨ブレースに至るまでの新規の耐震補強技術を提案する。

(2) 横拘束下における RC 柱のせん断強度、鉄筋の付着強度を実験から定式化するとともに、鉄骨ブレースが接合された状態が座屈強度に及ぼす影響を解析的に明らかにする。

(3) 地震被災後の損傷した RC 短柱の応急補強技術の提案と、その基礎研究として横拘束された RC 柱のせん断強度の解明、そして極低強度コンクリートを用いた耐震補強性能の解明。

## 3. 研究の方法

(1) 柱、柱梁接合部、付着強度、壁、ブレース関係に関しては小型縮小試験体による実験がその基本となる。補強した各耐震要素の耐震性能を実験で検証し、設計式を提案する。

(2) 鉄骨ブレースの接合条件が座屈強度に及ぼす影響に関しては理論的研究を行い、その成果を設計式に反映させる。

## 4. 研究成果

(1) 高横拘束下の単独 RC 柱のせん断強度に関して、一定軸力下の正負繰り返し水平加力実験を行い、測定実験データを用いてトラス・アーチ理論を対

比させ、実験と理論の両面からせん断強度の機構を明らかにしつつある。

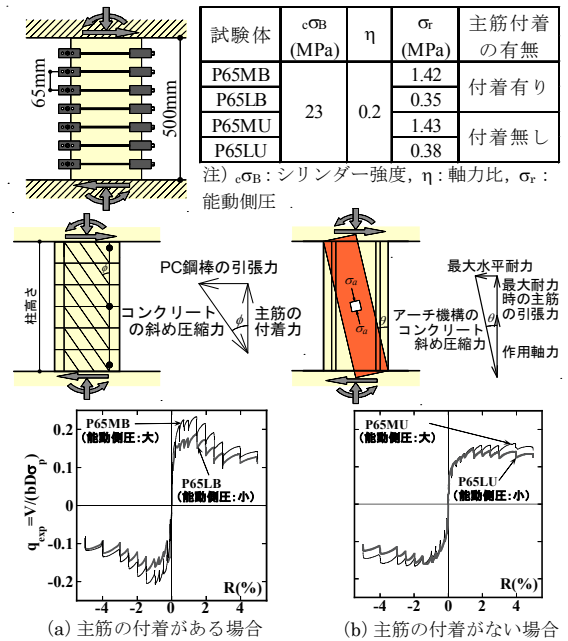


図1 せん断破壊実験の結果

(2) 極低強度コンクリートを用いた一定軸力下の正負繰り返し水平加力実験を行った。その結果、柱周辺に配置したコーナピースを介して、PC 鋼棒に緊張力を導入して高横拘束することにより、せん断強度が顕著に増大することを実験的に明らかにした。

試験体	P41LS	P41LL	P41LA	P82MS
立面図				
シリンダー強度	4.5MPa			
PC鋼棒	5.4φ@41mm			
緊張ひずみ	1176μ	1215μ	1150μ	2405μ
能動側圧	1.1MPa			
鋼板	t=3.2mm	t=1.2mm	-	t=3.2mm
共通事項	主筋: 12-D10, Hoop: 3.7φ@105, 軸力: 300kN, 軸力比: 1.07			

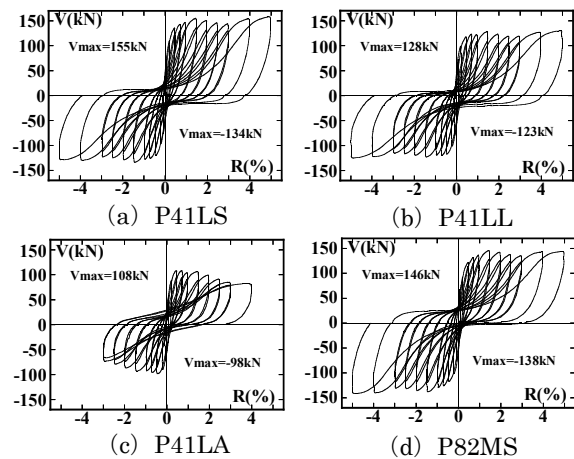


図2 極低強度コンクリート RC 柱の実験結果例

(3) 地震被災後の応急補強法として、せん断損傷したRC短柱にアラミド繊維ベルトを巻き立て、緊張力を導入すれば、軸力を支え、曲げせん断性能が大幅に回復することを実験的に明らかにした。



写真 応急補強手順例

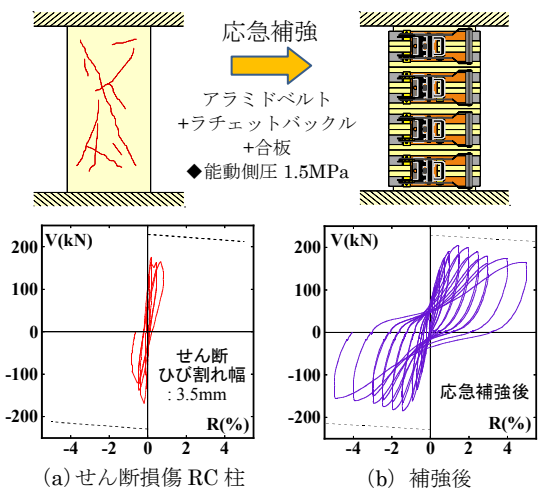


図3 応急補強実験の結果

(4) コンクリートブロック (CB) 壁の片面だけでも柱幅面までコンクリートを増し打ちし、緊結ボルト (PC 鋼棒) で側柱にも巻き立てられた鋼板を圧着すると、RC 造耐震壁レベルまでせん断耐力が増大するとともに、靱性も大幅に改善されることが実証された。

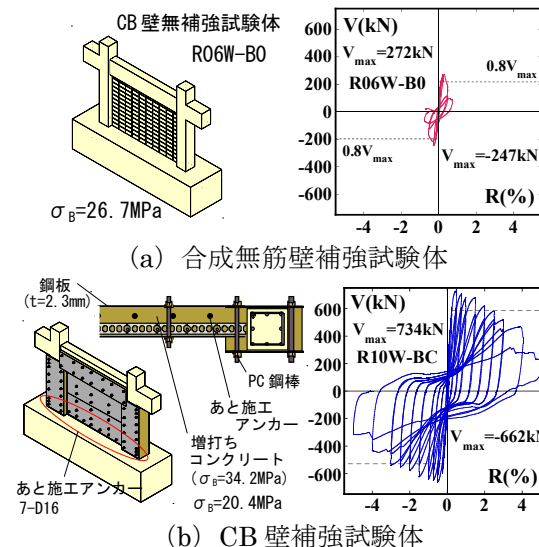


図4 CB壁耐震補強

(5) 合成無筋壁の壁板厚さも柱幅の半分を超える程度であれば、耐震性能を十分発揮できることが実験結果としてわかった。

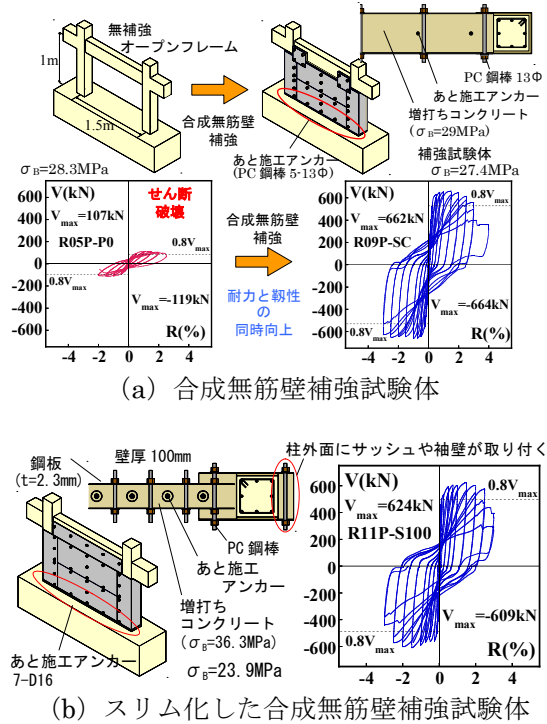


図5 合成無筋壁耐震補強

(6) RC 造有開口耐震壁も片面にコンクリートを柱幅まで打設し、薄鋼板と緊結ボルトで高横拘束すれば、補強前の有開口耐震壁 (開口周比  $\eta = 0.36$ ) に比較して格段に耐震性能が改善されることが実験結果によりわかった。

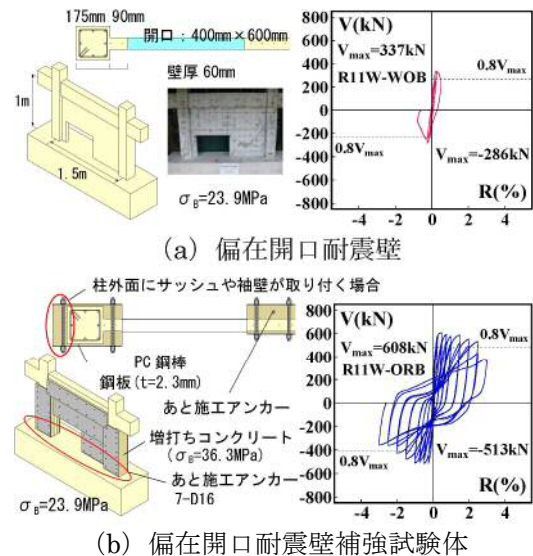
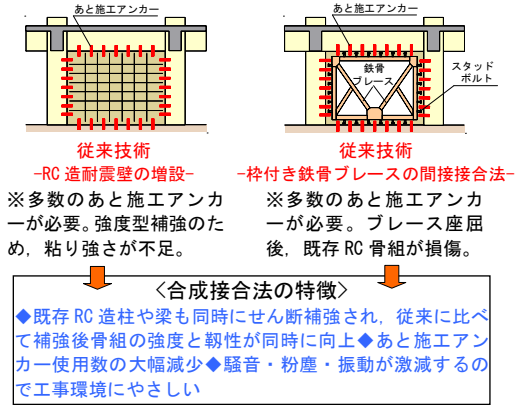
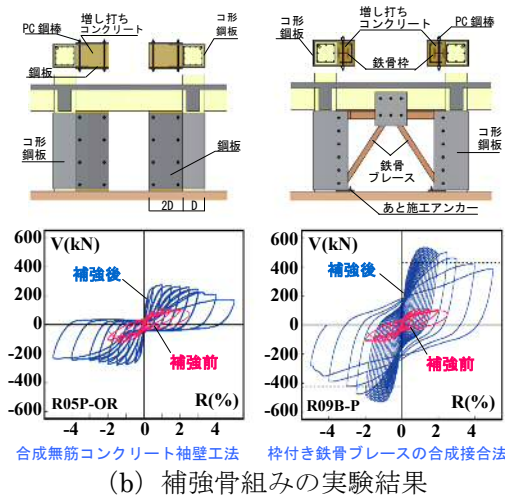


図6 偏在開口耐震壁への合成無筋壁補強

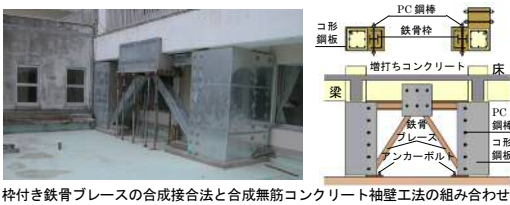
(7) 鋼板と緊結ボルトを用いた合成接合に基づく新しい門形枠付き鉄骨ブレース補強法を提案した。あと施工アンカーが激減し、現場での工事作業の簡便さが期待できるとともに、薄鋼板で巻き立てられた側柱のせん断補強効果と軸耐力増大効果も期待できる。



(a) 合成接合法の特徴

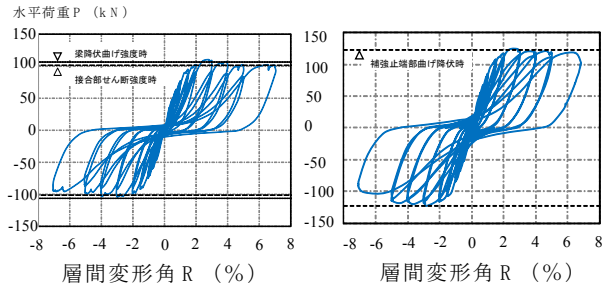
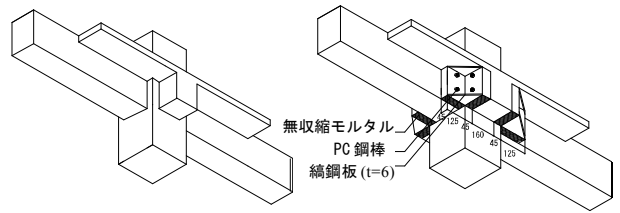


(b) 補強骨組みの実験結果



枠付き鉄骨ブレースの合成接合法と合成無筋コンクリート袖壁工法の組み合わせ  
(c) 沖縄県内の某病院における施工事例  
図 7 合成接合による鉄骨ブレース補強

(8) 柱梁接合部も、梁端部を水平ハンチ状にコンクリートを増し打ちし、鋼板とPC鋼棒で緊結すると、大変形に至るまで接合部の損傷を防止でき、履歴性状も改善できることを、実験に基づき示した。



(a) 試験体 No.1 (補強なし)  
(b) 試験体 No.2 (水平ハンチ状補強)

図 8 水平ハンチ状の耐震補強の実験結果

(9) 既存RC柱に対する震前の補強法開発の一環として、補強柱の付着割裂破壊時せん断力について実験的に検討した。その結果、かぶりコンクリートの応力負担により主筋の付着力が緩和される効果を靱性保証型耐震設計指針式に適用して下界定理に基づく同式をより真の強度に近い評価を与えるように上方修正すれば、計算値は最大荷重実験値の約80%の強度を与えることを示した。

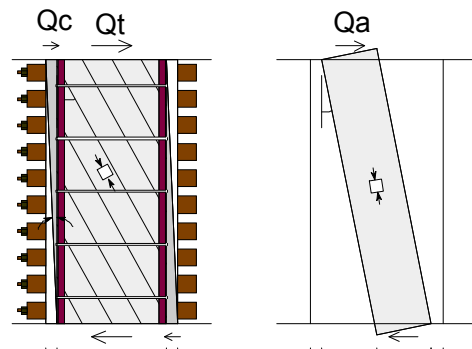


図 9 かぶりコンクリートの効果を考慮に入れたトラス・アーチ機構

(10) 応急補強後の RC 柱における主筋群の付着強度（修復付着強度）をカンチレバー型の単調引抜試験により検討した。その結果、本補強により顕著な補強効果が得られることを確認した。また、比較的高い緊張力を与えれば恒久補強にもなり得ることも示した。さらに、損傷導入载荷終了時における隅主筋自由端すべり量が付着損傷の程度を表し得ることを指摘し、そのすべり量と付着割裂ひび割れ幅との相関を示した。

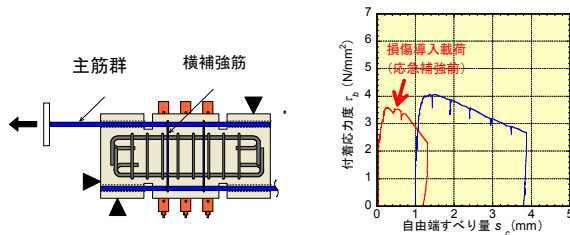


図 10 主筋群の付着実験の試験体と実験結果

(11) 合成接合による枠付き鉄骨ブレースの座屈長さ係数を、釣合微分方程式を用いて算定し、ブレース端部がコンクリートに埋め込まれた部分の埋め込み長さを考慮できる、ブレースの設計のための座屈長さ係数評価法を提案した。図 11 はコンクリート設計基準強度  $F_c$  をパラメータとし、鉄骨ブレースの座屈長さ係数  $\gamma$  とコンクリートの埋め込み長さ  $\xi_c$  の関係を示したものである。コンクリート強度  $F_c$  の影響は顕著でなく、埋め込み長さ  $\xi_c$  が 0.07 程度よりも小さい範囲で、座屈長さ係数が 1 から 0.5 まで変化し、 $\xi_c$  が 0.07 よりも大きくなると  $\gamma$  の値が 0.5 より小さくなることを示した。

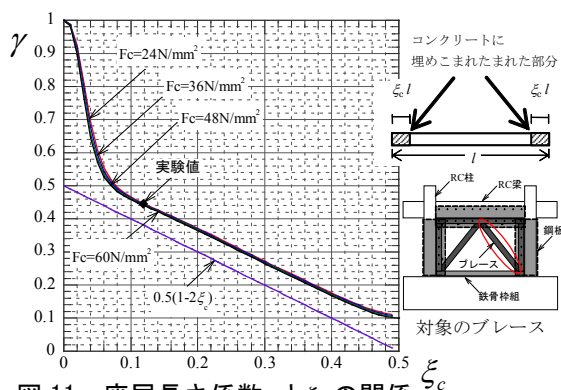


図 11 座屈長さ係数  $\gamma$  と  $\xi_c$  の関係

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 24 件）

1. 城戸将江, 津田恵吾, 山川哲雄: 合成接合による鉄骨ブレースにおける座屈長さ係数の評価法, 鋼構造年次論文報告集, 査読有, 第 20 巻, pp.704-710, 2012-11.
2. 前田興輝, 山川哲雄: 合成接合法及び間接接合法により枠付き鉄骨ブレースで補強された RC 造骨組の耐震性能の比較検証, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, No.678, pp.1299-1307, 2012-8.
3. 中田幸造, 山川哲雄, 原口貴臣, 森下陽一: ラッシングベルトで能動拘束したせん断損傷 RC 柱の水平加力実験, コンクリート工学年次論文集, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.34, No.2, pp.139-144, 2012-7.
4. 並里弥生, 中田幸造, 山川哲雄: 緊張 PC 鋼棒と鋼板で能動拘束した極低強度コンクリート RC 柱の水平加力実験, コンクリート工学年次論文集, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.33, No.2, pp.133-138, 2011-7.
5. 上原早奈恵, 中田幸造, 山川哲雄: PC 鋼棒で能動的に外部横補強された RC 柱のせん断破壊実験, コンクリート工学年次論文集, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.33, No.2, pp.697-702, 2011-7.
6. 許勝雄, 菊池健児, 黒木正幸: 外部 PC 鋼棒により応急補強された RC 柱の主筋付着強度に関する実験的研究—損傷指標の検討—, 大分大学工学部研究報告, 第 58 号, pp.1-6, 2011-2.
7. 中田幸造, 山川哲雄, 許田昇: 緊張 PC 鋼棒と鋼板による低強度コンクリート RC 柱への能動的な横拘束効果, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.32, No.2, pp.145-150, 2010-7.
8. 上原修一, 副島裕介, 砥綿祐太, 山川哲雄: 偏心した RC 造柱梁十字形接合部を鋼板と鋼製ハンチで補強した場合の耐震補強性能, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.32, No.2, pp.277-282, 2010-7.
9. 上原早奈恵, 中田幸造, 山川哲雄, 舩木裕之: 緊張 PC 鋼棒で外部横補強された RC 柱のせん断強度に関する研究, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.32, No.2, pp.649-654, 2010-7.
10. 黒木正幸, 菊池健児, 許勝雄: 外部 PC 鋼棒補強 RC 柱の付着割裂（せん断）強度に関する実験的研究—シアスパン比 1.5 の実験結果—, 大分大学工学部研究報告, 第 57 号, pp.1-6, 2010-2.

[学会発表] (計 80 件)

1. Kenji KIKUCHI, Masayuki KUROKI, Seung Woung HO, Tomomasa UCHIMURA, Tetsuo YAMAKAWA Relation between Earthquake Damage and Splitting Bond Strength in R/C Columns after Emergency Retrofit with Prestressed External Hoops, 15th World Conference on Earthquake Engineering, pp.9, Paper number 4990, 2012-9.

2. 津田恵吾, 城戸將江, 山川哲雄: 合成接合による枠付き鉄骨ブレースにおける座屈長さ係数の評価法の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), pp.1457-1458, 2012-9.

3. 竹内卓也, 上原修一, 山川哲雄: RC 造柱梁接合部の履歴性状の改善に関する研究—接合部を鋼板で補強した場合—, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp.549-550, 2011-8.

4. N. KYODA, T. YAMAKAWA, K. NAKADA, P. JAVADI, A. NAGAHAMA : Emergency Retrofit for Damaged RC Columns by Fiber Belts Prestressing and Plywoods, The 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, Beijing, China, 2010-9.

5. Koji YAMASHIRO, Tetsuo YAMAKAWA, Yoichi MORISHITA, Shinya TAKARA: Experimental Investigations of Seismic Retrofit Technique for Bare Frame and Framed RC/CB Wall Utilizing Thick-hybrid-walls, International Conference on Steel Concrete Composite and Hybrid Structures (ASCCS), 2009-7.

○出願状況 (計 1 件)

名称: コンクリート構造物の耐震補強構造

発明者: 山川哲雄

権利者: 国立大学法人 琉球大学

種類: 特許

番号: 特許第 5227815 号

出願年月日: 2009 年 1 月 19 日

登録日: 2013 年 3 月 22 日

国内外の別: 国内

取得状況 (計 1 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山川 哲雄 (YAMAKAWA TETSUO)

琉球大学名誉教授

研究者番号: 50142352

(2) 研究分担者

森下 陽一 (MORISHITA YOICHI)

琉球大学・工学部・教授

研究者番号: 90091339

(3) 研究分担者

中田 幸造 (NAKADA KOZO)

琉球大学・工学部・准教授

研究者番号: 80347129

(4) 研究分担者

津田 恵吾 (TSUDA KEIGO)

北九州市立大学・国際環境工学部・教授

研究者番号: 50112305

(5) 研究分担者

菊池 健児 (KIKUCHI KENJI)

大分大学・工学部・教授

研究者番号: 50117397

(6) 研究分担者

黒木 正幸 (KUROKI MASAYUKI)

大分大学・工学部・助教

研究者番号: 10295165

(7) 研究分担者

上原 修一 (UEHARA SHUICHI)

有明工業高等専門学校・建築学科・教授

研究者番号: 60151825

(8) 研究協力者

松井 千秋 (MATSUI CHIAKI)

九州大学 名誉教授

(9) 研究協力者

木村 潤一 (KIMURA JUNICHI)

福岡大学・工学部・教授

(10) 研究協力者

城戸 將江 (KIDO MASAE)

北九州市立大学・国際環境工学部・准教授