

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04244

研究課題名（和文）大損傷RC柱のローテク・ローコスト・スモールチェンジな新規耐震補強法の開発

研究課題名（英文）Development of a new low-tech, low-cost, small-change seismic retrofit technique for severely damaged RC columns

研究代表者

金田 一男（KANEDA, KAZUO）

琉球大学・工学部・客員研究員

研究者番号：50793907

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、大地震で損傷したRC柱の応急兼恒久耐震補強を、PC鋼棒で緊結した鋼板サンドイッチ工法によって施すことにより、余震によるRC造ピロティ建物の損傷拡大防止、損傷したRC柱の耐力回復及び耐震性能向上を同時に実現できる応急兼恒久耐震補強工法を構築するものである。この工法は、施工の簡便さと高い経済性を有し、RC造ピロティ建物の使用性への影響は少ない。実験的及び解析的研究を通して、この工法は大地震で大きく損傷したRC柱の耐震補強に適用でき、補強した損傷RC柱は優れた耐震性能を有し、大地震後の応急補強と恒久耐震補強が同時に実現できる工法であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、PC鋼棒で緊結した鋼板サンドイッチ工法を用いて、大地震で大きく損傷したRC柱の耐震性能向上を示し、応急補強と恒久補強法としての適性を示した。この工法は施工の簡便さ（ローテク）・高い経済性（ローコスト）・ピロティ建物の使用性への影響が少ない（スモールチェンジ）特性を有し、新しい耐震補強法として、大地震で大きく損傷したRC柱の応急兼恒久耐震補強に適用できることは社会的影響が大きいと思われる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study was to develop a permanent and emergency seismic retrofit technique that simultaneously prevents from the expansion of damages in the pilotis-type RC buildings due to the aftershocks, restores the strength of damaged RC columns, and improves their seismic performance. In this technique, the steel plate is used to sandwich the damaged columns, while the PC bars actively bond them. It is a low-tech and low-cost seismic retrofit technique that has insignificant impact on the usability of RC piloti buildings. Through the experimental and analytical studies, it was observed that this technique can be applied to retrofit the damaged RC columns after a major earthquake. Consequently, the damaged columns reach excellent seismic performance after seismic retrofit. This technique can be used as the emergency and permanent seismic technique on damaged RC buildings after a major earthquake.

研究分野：工学-建築学-建築構造・材料

キーワード：ピロティRC造建物 既存RC柱 応急耐震補強 恒久耐震補強 鋼板 PC鋼棒 面内方向 面外方向

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1)わが国は世界有数の地震国であり、近い将来で首都直下型地震や南海トラフ地震などの大地震の発生確率が大きく、既存建物の地震被害が避けられないものとする。大地震で損傷した建物が、大地震後の余震で一回目の地震である程度損傷した RC 建物が更に被害が広がり、倒壊・崩壊になった事例が確認されている。現行の耐震設計基準は建物が大地震を複数回受けることは想定していないため、連続に襲来する複数の大地震（例えば、熊本地震）や大きい余震によって災害が大きくなることが考えられる。また、建設材料費の高騰や人手不足などにより、近年では地震後に建物を継続的に使用する傾向が高まっている。大地震の連続発生や、本震後の余震における被災建物の損傷進行の阻止、大地震後の建物の構造安全性の確保は我が国に直面する重要課題である。

(2)今までは大地震で損傷した RC 柱の応急補強法の研究がなされているが、いずれも応急補強工法に限定している。本研究は応急と恒久耐震補強を同時に実現させることにより、被災した RC 造ピロティ建物の更生工法（耐震性能復活向上工法）として開発する意義が深い。

(3)応募者らは、「PC 鋼棒で緊結した鋼板サンドイッチ工法、以降：鋼板サンドイッチ工法」を既存 RC 造ピロティ建物の RC 柱の震前耐震補強に適用し、その耐震性能及び当該工法で補強した既存 RC 柱の曲げ強度評価式を提案している。この工法を大地震で損傷した RC 柱の応急補強に応用でき、かつ恒久耐震補強を兼ねることを期待でき、大地震で損傷した既存 RC 造ピロティ建物の更生工法として独創的である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、大地震で大きく損傷した RC 造ピロティ建物の RC 柱の耐震補強を、鋼板サンドイッチ工法によって経済的・迅速的に施すことにより、余震による建物の損傷拡大防止及び損傷された RC 柱の耐力回復及び向上を同時に実現できる応急兼恒久耐震補強工法を構築するものである。

3. 研究の方法

(1)有明工業高等専門学校での研究

本研究は、図 1 に示す加力装置を用いて、図 2 に示す実物の 1/3 モデルに相当するキャッチレップ試験体（高×幅×せい=488×175×175mm）を加力装置に取り付け、一定軸力を作用させた上に過大な水平力を与え、試験体に損傷（損傷度：II～V）を与えた。その後損傷試験体を取り外し、図 3 に示すように、鋼板サンドイッチ工法で補強し、再び図 1 に示す加力装置に取り付け載荷実験を行い、補強損傷試験体の耐震性能等を検証した。補強用鋼板は $t=2.3\text{mm}$ の平鋼、PC 鋼棒は $\phi 9.2\text{mm}$ の市販品を用いた。また、補強損傷試験体を載荷実験する直前にすべての PC 鋼棒に約 1000μ のひずみを導入した。補強試験体の袖壁長さ比を $\beta=0.50, 0.75$ の 2 ケースとした。

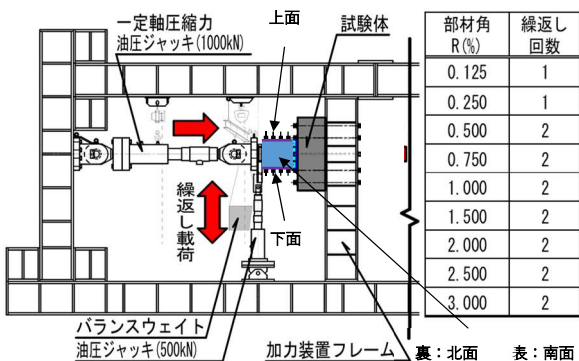


図 1 加力装置 (有明高専)

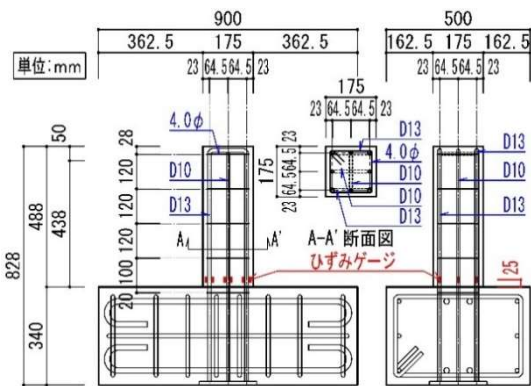


図 2 補強前の健全試験体

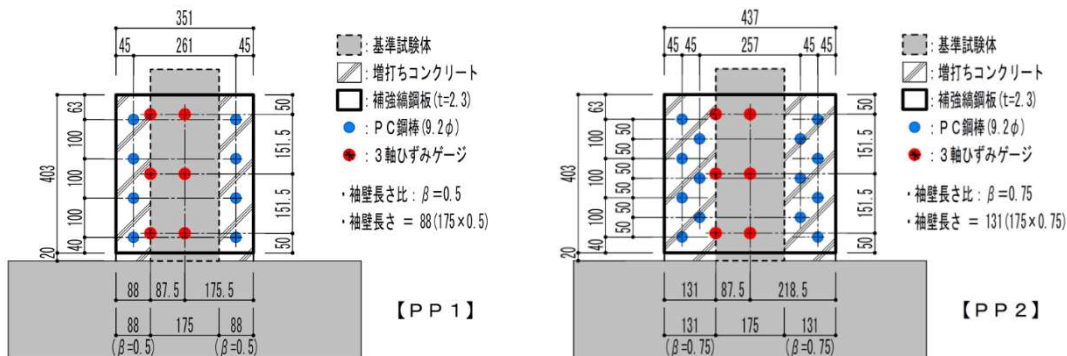


図 3 損傷試験体に対する補強試験体の詳細 (有明高専で実施)

(2) 琉球大学での研究

図4は補強しない健全試験体(高×幅×せい=750×250×250mm)及び損傷後に補強した試験体の詳細を示す。まず、健全試験体を図5に示す建研式加力装置に取り付け、一定軸力を作用させた上で水平力を与え、健全試験体にせん断ひび割れを与えた(損傷度 III~V 程度)。損傷試験体の補強に、コ字型の鋼板($t=3.2\text{mm}$)と PC 鋼棒($\phi 13\text{mm}$)を用いた(図4参照)。その後、補強した損傷試験体を図5に示す加力装置に取り付け、載荷実験を行った。補強損傷試験体の載荷実験直前にすべての PC 鋼棒に約 1000μ のひずみを導入した。なお、補強試験体の袖壁長さを $\beta D=0.55D, 0.75D$ の2ケースとした。

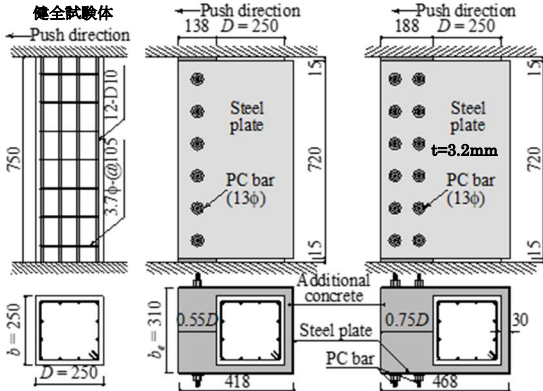


図4 健全試験体と補強損傷試験体

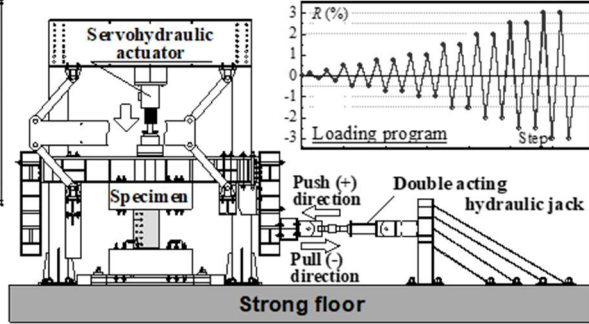


図5 加力装置及び加力プログラム(琉球大学)

4. 研究成果

(1) 有明工業高等専門学校での研究成果

研究成果の詳細は発表論文等を参照されたいが、ここではその一部を例として示す。

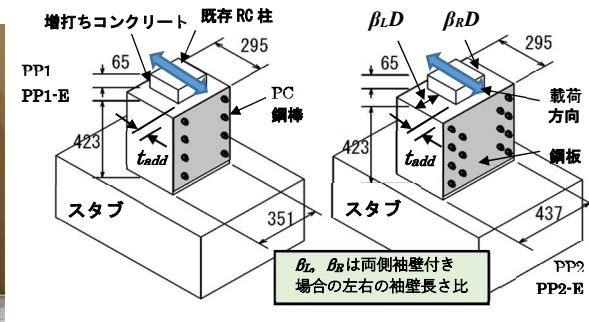
R5年度では、過年度の実験結果を取りまとめ、「鋼板サンドイッチ工法で補強した健全及び損傷 RC 柱の耐震性能、コンクリート工学年次論文集、Vol. 45、No. 2、2023」の査読論文を発表した。本研究対象の損傷試験体を写真1に示す。日本建築防災協会：震災建築物の被災区分判定基準および復旧技術指針に基づいて、これら RC 柱は最もランクの高い損傷度 V と判断した。図6は、鋼板サンドイッチ工法で補強した試験体の詳細及び載荷方向を示す。この研究では、補強鋼板と既存 RC 柱表面からの距離を $t_{add}=60\text{mm}$ とした。補強損傷試験体と補強健全試験体との比較検討を行った。その結果、補強試験体の耐力は補強していない基準試験体より 1.8~2.2 倍大きくなっており、補強した損傷 RC 柱と健全 RC 柱の耐震性能がほぼ同等であることが分かった。また、鋼板サンドイッチ工法で補強した損傷試験体の面内方向(補強試験体の袖壁ある方向)だけではなく、面外方向(面内方向と直行する方向)においても耐力が向上できることも分かった。

表1は R3 年度に実施した実験結果であり、計4体の試験体(R21-1~R21-4)に損傷度 II~V の損傷を与えた。その後、鋼板サンドイッチ工法で補強し、補強損傷試験体の一定軸力(軸力比: $\eta=0.2$) 下の正負繰返し載荷実験を行った。実験で得られたせん断力 V -部材角 R 関係を表2に示す。表2中の赤い破線は、補強しない無損傷試験体の V - R 関係であり、黒い破線は表3に示す曲げ耐力 M_u の提案式を用いて算出した曲げ耐力時のせん断耐力である。

表2からわかるように、①補強していない基準試験体と比較し、袖壁長さ比 $\beta=0.50$ の補強試験体の最大せん断力は約2.5倍、 $\beta=0.75$ の補強試験体の最大せん断力は約3倍の増大が確認できた。②袖壁長さ比 $\beta=0.75$ 、損傷度 IV の補強試験体 R21-1-PP2 と損傷度 V の R21-3-PP2 の最大せん断力及び最大せん断力後の耐力低下はほぼ同じであり、損傷度による違いは確認できなかった。③袖壁長さ比 $\beta=0.50$ 、損傷度 IV の補強試験体 R21-2-PP1 と損傷度 II の R21-4-PP1 の最大せん断力を比較すると、損傷度 II の最大せん断力が 10%程度大きくなっている。損傷度の違いによる影響は確認された。④提案した補強損傷試験体の曲げ耐力の評価式は、実験結果を精度よく評価できることがわかった。表2に示す実験結果を総合的に評価し、鋼板サンドイッチ工法で補強した大きく損傷した RC 柱の耐震性能が大きく向上できることがわかった。



(a) 損傷 RC 柱 1 (b) 損傷 RC 柱 2
写真1 損傷 RC 柱の状況写真



(a) PP1 シリーズ($\beta_L=\beta_R=0.50$) (b) PP2 シリーズ($\beta_L=\beta_R=0.75$)
図6 補強試験体の詳細と載荷方向(⇔)

表1 損傷試験体の状況写真と損傷度

	R21-1	R21-2
損傷状況写真		
損傷度	損傷度：IV ひび割れは多数発生している。局部的に被りコンクリートの剥落が確認される。	損傷度：IV ひび割れは多数発生している。局部的に被りコンクリートの剥落が確認される。
	R21-3	R21-4
損傷状況写真		
損傷度	損傷度：V 個別主筋の座屈。局部的に内部のコンクリートも部分的に剥落している。	損傷度：II 幅2mm以下のひび割れが多数発生している。

表2 補強損傷試験体のV-R関係

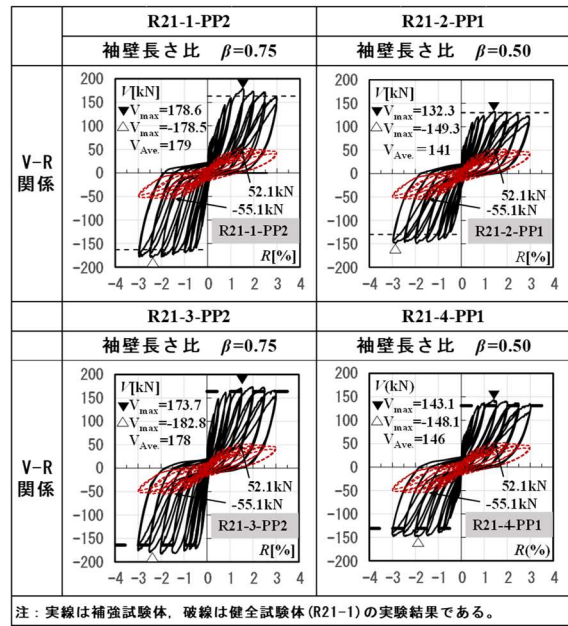


表3 補強損傷試験体のV-R関係

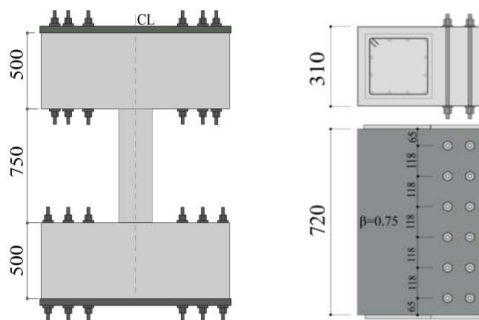
$$x_n = \frac{N + a_1\sigma_{y1} + a_2\sigma_{y2}}{k_1 k_3 b_2 F_{c,add}}$$

$$M_u = \frac{(N + a_1\sigma_{y1} + a_2\sigma_{y2})(0.5g + c + \beta D) + 0.5a_1\sigma_{y1}g}{2k_3 b_2 F_{c,add}}$$

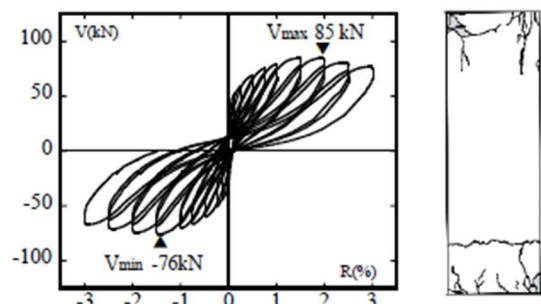
$$k_3 = 0.85 - 0.05 \frac{F_{c,add} - 2}{7}$$

(2) 琉球大学での研究成果

R5年度では、補足実験として1体の健全RC柱試験体を製作し、損傷を与えた後に補強を実施した(図7参照)。健全RC柱の断面は1辺が250mmの正方形断面で、せん断スパン比は1.5である。柱にはD10主筋を12本(主筋比は1.36%、ヤング係数は177kN/mm²、降伏強度は912N/mm²)、3.7φの帯筋を105mm間隔(帯筋比は0.08%、ヤング係数は182kN/mm²、降伏強度は318N/mm²)で配筋した主筋の付着のない試験体である。また、健全RC柱のコンクリート打設は横打ちとしている(コンクリートの圧縮強度は16.9N/mm²、ヤング係数は17.9kN/mm²)。健全RC柱のせん断損傷実験を実施する際に、柱部が大きく損傷することを防ぐためにアラミド繊維ベルト(2層1段、断面積：9.7×2=19.4mm²)を150mm間隔(計5段)配置し、カプラーによって初期緊張ひずみを導入する。初期緊張ひずみは、それぞれ250μ程度導入し、R=2.5%から150μに緩めて実験を実施した。図8は、損傷を与えるための載荷実験で得られた(a)V-R関係及び(b)最終損傷状況写真を示す。せん断損傷実験では、R=0.5%の負側加力時に柱頭・柱脚にひび割れが生じ、R=2.0%の正側加力時に最大水平耐力85kNを記録した。しかし、せん断損傷実験前に柱部にひび割れが生じていたことや、柱頭・柱脚にひび割れが入ったことによって、R=3.0%まで水平加力実験を繰り返したがせん断破壊には至らなかった。繰り返し数を考慮し、柱部の損傷度はIVと判断した。補強後の試験体の実験結果を図9に示す。R=1.0%の正側加力時に柱脚にひび割れが入った。また、R=3.0%の正側加力時に最大水平力363kNを記録した。従って、補強された損傷試験体の曲げ耐力(正負平均：353kN)は補強前の健全試験体(正負平均：81kN)と比較し、約4.36倍の耐力増加が確認された。また、補強された損傷試験体の破壊モードは曲げ破壊先行となった。



(a) 健全RC柱 (b) 損傷後補強したRC柱
図7 試験体の詳細



(a) V-R関係 (b) 損傷状況
図8 損傷を与えるための載荷実験結果

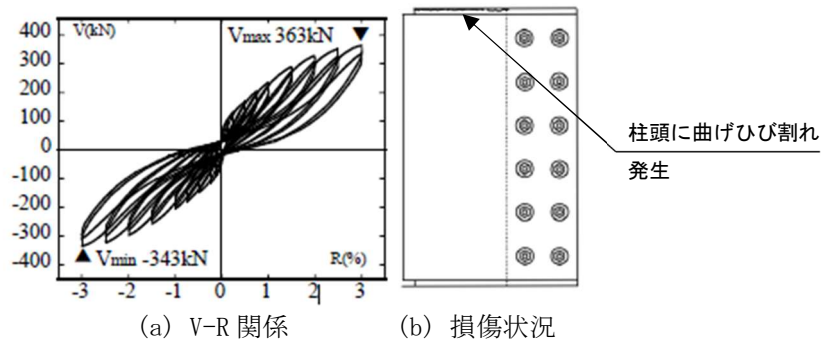


図9 補強損傷試験体のV-R関係と損傷状況

R4年度では、琉球大学工学部の実験室リニューアルのため、载荷実験は行えなかった。
 R3年度では、合計3体の試験体を製作し、一定軸力（軸力比： $\eta=0.2$ ）下の正負繰返し载荷実験を行った。まず、補強しない健全試験体を図5に示す加力装置に取り付け、正負繰返し载荷実験を行い、試験体にせん断ひび割れを与えた。図10(a)はせん断ひび割れ導入のための载荷実験で得られたV-R関係及びせん断ひび割れの発生状況を示す。せん断ひび割れ発生後のせん断耐力平均値は約139kNである。その後、損傷した試験体にコの字型鋼板及びPC鋼棒を用いて補強し（図10(b)参照）、再度加力装置に取り付け、一定軸力下の正負繰返し载荷実験を行い、得られたV-R関係及増し打ちコンクリートに発生したひび割れ状況を図10(b)に示す。その結果、袖壁長さ比が0.75の場合、補強された損傷度IVの損傷RC柱の耐力（正負平均：284kN）は、補強前の耐力（正負平均：139kN）と比較し、約2倍の耐力向上が確認された。また、耐力低下の少ない曲げの履歴性状を示した。図中破線に示すように最大水平耐力はシリンダー強度を用いて計算した曲げ耐力計算値を發揮した（引用文献①）。一方、袖壁長さ比が0.55の場合は、補強された損傷度IVの損傷RC柱の耐力増加は約1.57倍であった。これは、増し打ちコンクリートの斜めひび割れ発生に伴うと考えられる耐力低下を生じた。袖壁長さ比 β が小さいことは理由の一つであると考えられる。

本研究から、鋼板及びPC鋼棒を用いて補強したせん断破壊した試験体の耐力向上が可能であり、また、破壊モードはせん断破壊先行から曲げ破壊先行に変化させることが確認できた。

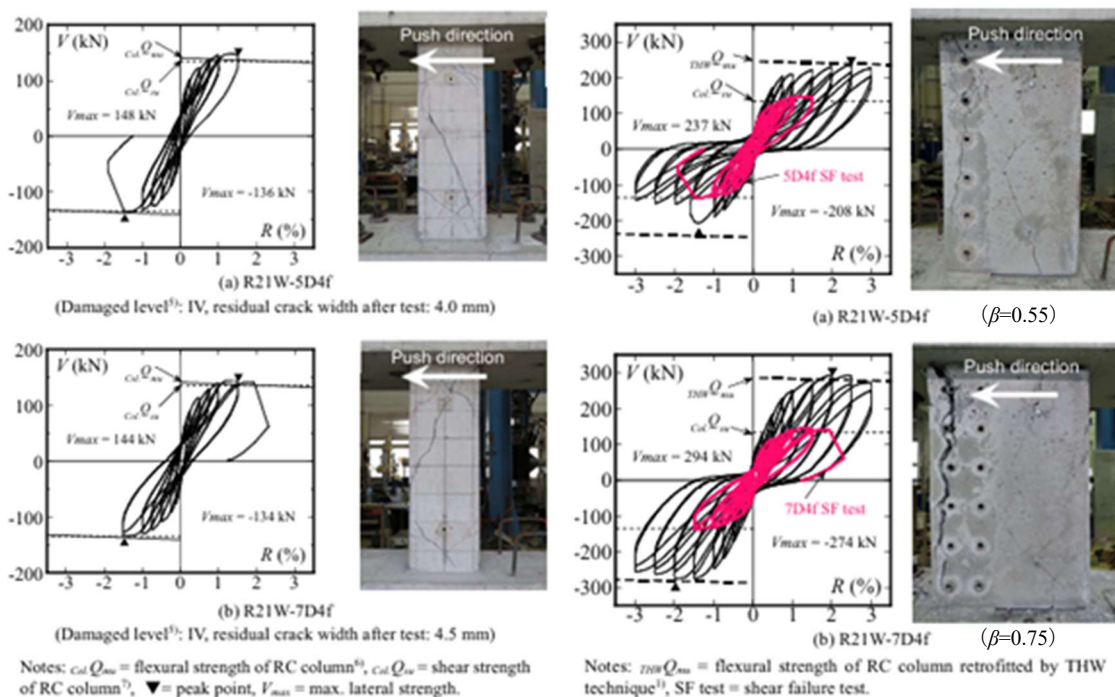


図10 補強前後の試験体のV-R関係及びコンクリートの損傷状況（琉球大学）

<引用文献>

①中田幸造、山川哲雄、JAVADI Pasha、NOORI Mohammad Zahid、**金田一男**：緊張PC鋼棒と鋼板を活用した既存RC柱の強度・靱性型耐震補強法の曲げ強度、日本建築学会構造系論文集、第85号、第767号、pp. 97-104、2020 (DOI: <https://doi.org/10.3130/aijs.85.97>)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 金田一男, 中田幸造	4. 巻 29
2. 論文標題 PC鋼棒で緊結した鋼板サンドイッチ工法により補強したRC柱の面内及び面外方向における耐震性能に関する研究	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本建築学会技術報告書	6. 最初と最後の頁 156 ~ 161
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijt.29.156	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 金田一男, 中田幸造, 山川哲雄, 下田誠也	4. 巻 Vol.44
2. 論文標題 PC 鋼棒で緊結した鋼板サンドイッチ工法により補強した損傷 RC 柱の耐震性能	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 217 ~ 222
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 田中三雄, 金田一男, 中田 幸造, 平田 裕次	4. 巻 Vol.44
2. 論文標題 PC 鋼棒で緊結した鋼板サンドイッチ工法により補強した RC 柱の中心圧縮実験	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 229 ~ 234
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 金田一男, 中田幸造	4. 巻 Vol.45
2. 論文標題 鋼板サンドイッチ工法で補強した健全及び損傷RC柱の耐震性能	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 235-240
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 黒田萌香, 金田一男, 中田幸造
2. 発表標題 PC 鋼棒で緊結した鋼板サンドイッチ工法により補強した既存 RC 柱の面外方向における耐震性能に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究報告
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 金田一男, 中田幸造, 下田誠也, 田中三雄, 平田裕次
2. 発表標題 鋼板サンドイッチ工法で補強した健全及び損傷 RC 柱の面外方向における耐震性能
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究報告
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田中三雄, 金田一男, 中田幸造, 下田誠也
2. 発表標題 PC 鋼棒で緊結した鋼板サンドイッチ工法により補強した RC 柱の中心圧縮実験 - その1 実験計画及び破壊特性 -
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究報告
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金田一男, 中田幸造, 田中三雄, 平田裕次
2. 発表標題 PC 鋼棒で緊結した鋼板サンドイッチ工法により補強した RC 柱の中心圧縮実験 - その2 実験結果および考察 -
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究報告
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 黒田萌香, 金田一男, 中田幸造
2. 発表標題 PC鋼棒で緊結した鋼板サンドイッチ工法により補強したRC柱の耐震性能に関する比較的研究
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究報告
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金田一男, 中田幸造, 田中三雄, 平田裕次
2. 発表標題 PC鋼棒で緊結した鋼板サンドイッチ工法で補強した既存RC柱の面外方向における曲げ終局強度
3. 学会等名 (一社) 沖縄県測量建設コンサルタンツ協会 技術発表会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	中田 幸造 (Nakada Kozo) (80347129)	琉球大学・工学部・教授 (18001)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------