

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 5月16日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760528

研究課題名（和文）コンクリート充填鋼管柱のせん断破壊性状に関する基礎的研究

研究課題名（英文）Basic Investigation for shearing failure of concrete filled steel tubular column

研究代表者

中原 浩之（NAKAHARA HIROYUKI）

九州大学・人間環境学研究院・准教授

研究者番号：60315398

研究成果の概要（和文）：

1997年に発行され、2008年に改訂された「コンクリート充填鋼管（CFT）構造設計施工指針」では、CFT柱の中心圧縮および曲げ耐力の算定精度の検討にあたり、400以上の実験データが参照されているが、せん断耐力の算定精度の検討には、わずか12の実験データのみが参照されている。また、これらは断面形状がすべて正方形であり、円形CFT短柱のせん断破壊に関する参照データは無く、実験的検証は不十分である。本研究では、せん断スパン長さ a と柱せい D の比 a/D （せん断スパン比）が小さい極短柱（ $a/D=0.5, 0.75$ ）の円形CFT試験体を16体作成し、一定軸力下における繰返しせん断力を載荷する実験を実施した。実験では、14体の試験体において、せん断破壊が先行した。その履歴特性は、安定した紡錘形の荷重-変形関係が得られた。また、実験のせん断耐力は、CFT指針の耐力算定式によって、およそ30%程度安全側に評価できることが分かった。

研究成果の概要（英文）：

“Recommendations for Design and Construction of Concrete Filled Steel Tubular (CFT) Structures” was published in 1997 and revised in 2008 in Japan. The calculating methods for axial strength and flexural strength of CFT columns were established on the bases of the experimental results of total of more than 400 specimens, however the test results of the columns which fail in shear were referred to only twelve specimens in the Recommendations. It is necessary to accumulate the experimental data of shearing strength and behavior of CFT columns. Tests were carried out on sixteen specimens of the circular CFT columns with shear span ratio of 0.5 and 0.75. The diameter to thickness ratio of the steel tube was around 30. They were subjected to cyclic lateral force under constant axial force. Fourteen specimens failed in shear before flexural yielding. The shearing capacities were underestimated around 30% by the calculating method of the CFT Recommendations in Japan.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：建築構造

科研費の分科・細目：5301

キーワード：せん断スパン比、CFT指針、履歴性状

1. 研究開始当初の背景

通常のプロポーシヨンのコンクリート充填鋼管（CFT）柱は、せん断耐力が大きい

曲げ破壊することが多い。このため、CFT柱のせん断破壊に関する研究はほとんど行われていないのが現状である。しかしながら、柱

のせん断スパン長さ a と柱せい D の比 a/D (せん断スパン比) が小さい極短柱 ($a/D=1.0$ 以下) では、曲げ耐力に達することなく破壊する現象が、崎野らの研究 (日本建築学会構造系論文報告集, 353 号, 1985. 7.) によって実験的に示されている。この実験研究の対象は、角形断面のCFT短柱である。

2008年に改訂された「コンクリート充填鋼管構造設計施工指針」(現行CFT指針)では、数多くの実験データが参照されているが、円形CFT短柱のせん断破壊に関する参照データは無く、実験的検証は不十分である。CFT構造研究の一貫性をかんがみると、円形CFT柱のせん断性状についての研究のみが欠落していることは、CFT構造の設計自由度を制限することにもなりかねず、これを実験的に検討することは重要であると考えられる。

2. 研究の目的

コンクリート充填鋼管 (CFT) 構造の短柱のせん断破壊実験を実施して、これの荷重-変形関係を明らかにし、CFT短柱のせん断設計法を確立する。また、このCFT短柱を履歴ダンパーとして用いた構造形式を提案して、これの地震応答性状について調べる。

3. 研究の方法

本研究は、実験研究と解析研究よりなる。実験は、試験体に一定軸力下で繰返し水平力を載荷するもので、柱の構造実験としては一般的なものである。試験体は、せん断破壊するように設計し、このときの荷重-変形関係を得る。荷重-変形関係に基づき、耐力と変形性能の評価法を提案する。

解析研究では、CFT短柱を建物に組み込んだ場合の地震応答解析を実施する。

本実験研究では、図1に示す円形CFT試験体を16体作製し、一定の軸力と繰返し水平力の載荷実験を行った。本実験において、16体の試験体のうち14体の試験体をせん断破壊させることに成功した。せん断破壊に成功した14体の試験体の一覧を表1に示す。

表1 試験体一覧

試験体	D (mm)	t (mm)	D/t	a/D	充填コンクリート	N/N ₀	焼鈍
CC05-60-0N	166.3	4.89	34.0	0.5	Fc=60	0	無し
CC05-60-3N						0.3	
CC05-40-1N						0.1	
CC05-40-2N	165.2	5.00	33.0	0.5	Fc=40	0.2	無し
CC05-40-4N						0.4	
CC05-40-3A						0.3	
CC075-40-1N	165.7	4.87	34.0	0.75	Fc=40	0.1	無し
CC075-40-2N						0.2	
CC075-40-3N						0.3	
CC075-40-4N	165.7	4.87	34.0	0.75	Fc=40	0.4	有り
CC075-40-1A						0.1	
CC075-40-2A						0.2	
CC075-40-3A						0.3	
CC075-40-4A						0.4	

試験体は $a/D=0.5$ のものが6体、 $a/D=0.75$ のものが8体で、実験変数は軸力比 N/N_0 (N_0 : 中

心圧縮耐力)で0.1, 0.2, 0.3, 0.4の4通りと焼鈍の有無の2通りである。試験体に用いた材料の力学的性質を表2に示す。

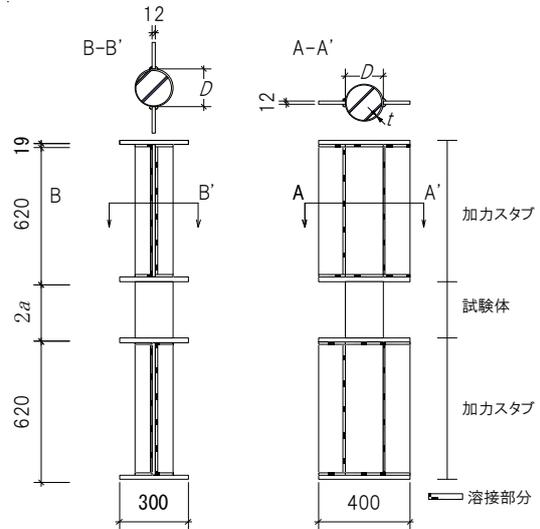


図1 試験体の形状

載荷プログラムを図2に示す。縦軸 R は柱の水平方向変位を柱の内法高さで除した部材角である。載荷は変位制御で行い、変位振幅を部材角で $\pm 1/100\text{rad}$ 、 $\pm 4/100\text{rad}$ 、まで増加させ、同一振幅で3サイクルずつ、計12サイクルの繰返し載荷を行った。しか

表2 材料の力学的性質

(上: 充填コンクリート, 下: 鋼管)

試験体	呼び強度 (MPa)	スランブ又はスランブフロー (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	最大圧縮ひずみ (%)
CC05-60-N	52	50	1.7	64.4	36.8	0.82
CC05-40-N	40	20	5.9	48.5	33.7	0.22
CC05-40-A	40	23	4.8	50.9	31.2	0.75

試験体	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	降伏比	ヤング係数 (GPa)	伸び (%)
CC05-60-N	543	578	0.92	209	25.7
CC05-40-N	542	585	0.93	215	25.2
CC05-40-A	472	551	0.86	212	26.4
CC075-40-N	531	612	0.87	201	21.0
CC075-40-A	507	592	0.86	201	26.3

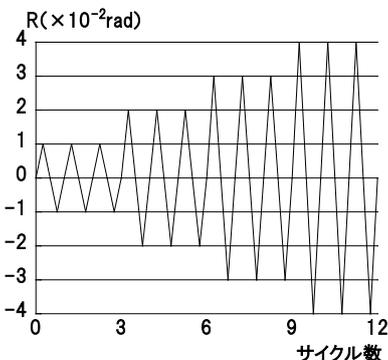


図2 載荷プログラム

し、 $a/D=0.75$ の試験体は、荷重に伴い耐力が増加し、 $R=\pm 4/100\text{rad}$ までの荷重で最大せん断力が観測されなかったものもある。そこで図 2 に追加して、CC075-N 試験体は $R=\pm 8/100\text{rad}$ まで、CC075-A 試験体は $R=\pm 6/100\text{rad}$ までの荷重を 1 サイクル行った。なお、処女荷重の方向を正側荷重、その反対を負側荷重と呼ぶことにする。

4. 研究成果

4 体の試験体を抜粋して、実験より得られたせん断力 Q -部材角 R 関係を図 3 に示す。図 3 には $R=\pm 4/100\text{rad}$ までの荷重-変形関係を載せている。図中の○点は鋼管がせん断降伏した点を表している。鋼管の降伏判定には、以下の von Mises の降伏条件式を用いた。

$$\frac{1}{2} \left\{ ({}_s\sigma_\theta - {}_s\sigma_z)^2 + {}_s\sigma_\theta^2 + {}_s\sigma_z^2 + 6{}_s\tau_{\theta z}^2 \right\} = \sigma_e^2$$

ここで、 ${}_s\sigma_\theta$: 鋼管の周方向応力、 ${}_s\sigma_z$: 鋼管の軸方向応力、 ${}_s\tau_{\theta z}$: 鋼管のせん断応力、 σ_e : 相当応力である。相当応力 σ_e が鋼管の降伏応力に達した時点で鋼管がせん断降伏したと判定した。

$a/D=0.5$ の試験体、CC05-40-2N と CC05-40-4N は $R=1/100\text{rad}$ の正側 1 回目の荷重中に鋼管がせん断降伏し、 $R=2/100\text{rad}$ で最大せん断力に達したのち、その耐力をほぼ維持して最大変形に至った。 $a/D=0.75$ の試験体 CC075-40-2N は、 $R=2/100\text{rad}$ の 1 回目の荷重中に鋼管がせん断降伏し、その後変位の増大に伴い試験体が負担するせん断力も増えていった。CC075-40-4N 試験体は $R=1/100\text{rad}$ の 1 回目の荷重中に鋼管がせん断降伏し、 $R=3/100\text{rad}$ で最大せん断力に達した。その後も急激な耐力低下は見られず、最大変位に至った。いずれの試験体においても実験の荷重-変形関係は、軸力比によらず安定した紡錘形の履歴性状を示した。

CC05-60-0N および CC075-40-1N 試験体の充填コンクリートの破壊状況を写真 1 に、CC05-40-4N および CC075-40-4N 試験体の実験終了後の最終破壊状況を写真 2 に示す。写真 1 において、ひび割れを黒線で示している。両試験体とも斜め方向にひび割れが生じていることから、本試験体はせん断破壊したものと想定される。また、写真 2 から、試験体が全体的に大きく膨らんでいることが分かる。このような最終破壊状況は軸力比が 0.2 以上の試験体においても同様に見られた。

以下に実験より得られた試験体の最大せん断力と CFT 指針により求められる円形 CFT 柱の終局耐力との比較検討を行う。実験の最大せん断力 Q_{max} をせん断力 Q -軸力 N の相間曲線上にプロットしたものを図 4 に示す。 Q_{max} は、正側と負側の絶対値の平均とした。

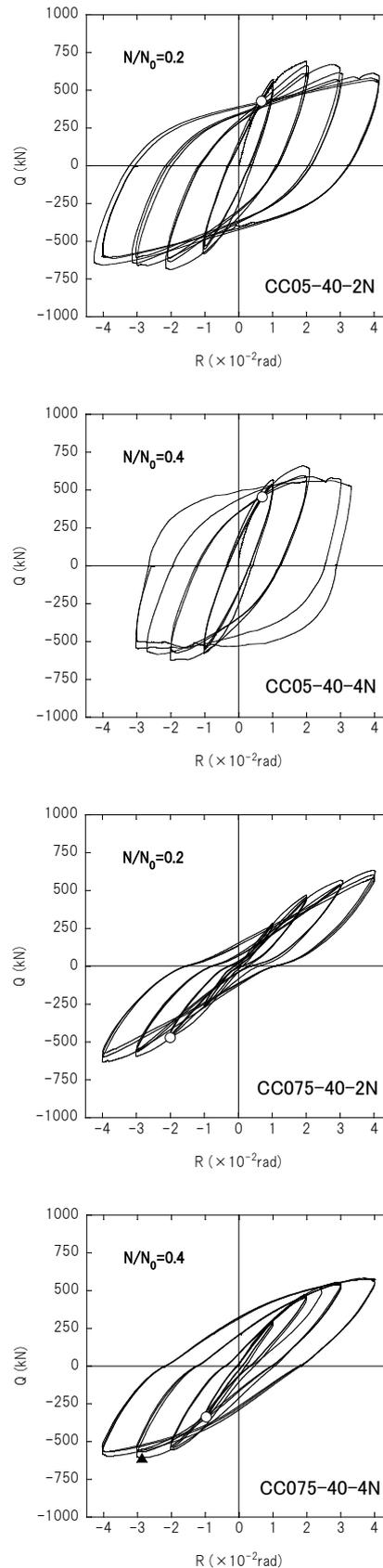


図 3 荷重-変形関係

図4の実線および点線は、それぞれCFT指針を参照して計算した終局せん断耐力 Q_{su} および終局曲げ耐力時のせん断耐力 Q_{bu} である。図中の●点は Q_{max} を表しており、 Q_{max} は実線と点線の間プロットされていることがわかる。

表3に各試験体の Q_{su} と Q_{bu} 、 Q_{max} を示す。今回実験を行った試験体の最大せん断耐力（最大耐力）はすべて曲げ耐力値に達しておらず、各試験体はせん断破壊により最大耐力が決定したと考えられる。これは、試験体の内部コンクリートに斜めひび割れが観測されたこととも一致する。せん断余裕度 Q_{su}/Q_{bu} は、 $a/D=0.5$ の試験体では0.55、 $a/D=0.75$ の試験体では0.7となっている。また、表3には Q_{max} を Q_{su} で除した値も載せてある。この比は1.05-1.35の範囲に分布しており、全体的に過小評価ではあるが、ばらつき自体は小さく実験結果を評価できている。

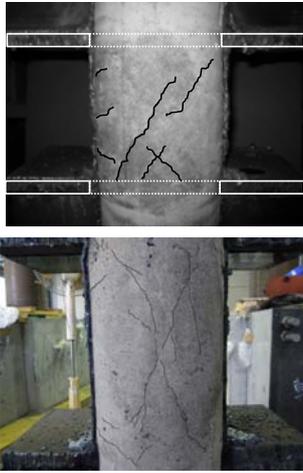


写真1 充填コンクリートの破壊状況



写真2 最終破壊状況

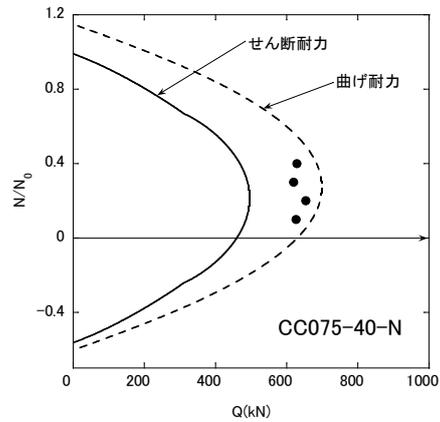
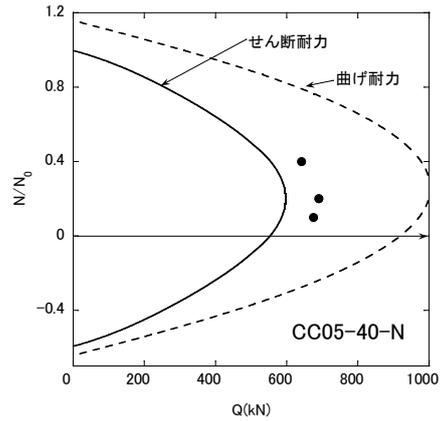


図4 せん断力 Q —軸力比 N/N_0 関係

表3 実験最大耐力と計算値

試験体	実験最大せん断力	終局せん断耐力	終局曲げ耐力時のせん断力	Q_{max}/Q_{su}	Q_{max}/Q_{bu}	Q_{su}/Q_{bu}
	Q_{max} (kN)	Q_{su} (kN)	Q_{bu} (kN)			
CC05-60-0N	686.1	593.6	1034	1.16	0.66	0.57
CC05-60-3N	761.4	665.7	1173	1.05	0.60	0.57
CC05-40-1N	675.4	606.6	1092	1.11	0.62	0.56
CC05-40-2N	690.1	618.2	1123	1.12	0.61	0.55
CC05-40-4N	641.8	574.4	1098	1.12	0.58	0.52
CC05-40-3A	754.0	558.6	1013	1.35	0.74	0.55
CC075-40-1N	654.8	509.9	706.0	1.28	0.93	0.72
CC075-40-2N	671.8	532.3	728.2	1.26	0.92	0.73
CC075-40-3N	649.3	517.3	731.5	1.26	0.89	0.71
CC075-40-4N	595.8	483.8	715.8	1.23	0.83	0.68
CC075-40-1A	626.5	490.5	677.4	1.28	0.92	0.72
CC075-40-2A	653.8	512.9	700.0	1.27	0.93	0.73
CC075-40-3A	619.5	500.7	704.1	1.24	0.88	0.71
CC075-40-4A	628.5	469.1	689.6	1.34	0.91	0.68

図5には円形CFT柱の終局せん断耐力式の耐力推定精度を示している。 $a/D=0.75$ の試験体の最大耐力は $a/D=0.5$ のものより右側にプロットされていることが分かる。これは、せん断スパン比が大きくなると、せん断の影響が小さくなっていくことに対応していると考えられる。また、一部の試験体を除いて、実験最大せん断力は、軸力比によらずCFT指針により同程度の誤差で安全側に評価されることが分かる。

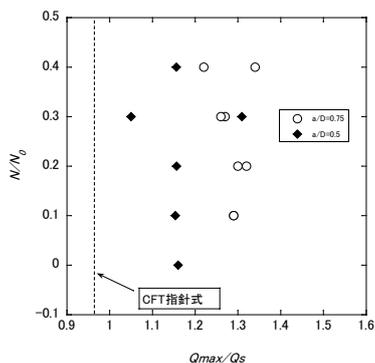


図5 終局せん断耐力式の耐力推定精度

本研究では、円形 CFT 柱をせん断破壊させることに成功し、その履歴性状は、曲げ破壊する通常のプロポーシヨンの CFT 柱と同等の優れた履歴性状を示すことが分かった。また、せん断破壊した円形 CFT 柱の最大せん断力は、現行の CFT 指針により 30% 程度安全側に評価できることが分かった。

解析研究では、大型商業施設、工場、倉庫などの中低層で大スパンの建物を想定し、円形 CFT 短柱を履歴ダンパーとして用いる構造を採用した建物の耐震性能について静的解析と動的解析により調べた。

解析対象の建物の立面図を図 6 に示す。解析モデルは、ブレース架構における円形 CFT 短柱部をせん断破壊させ、エネルギー吸収要素として活用する Model-1 と、ブレース座屈を先行させる Model-2 の 2 種類とする。

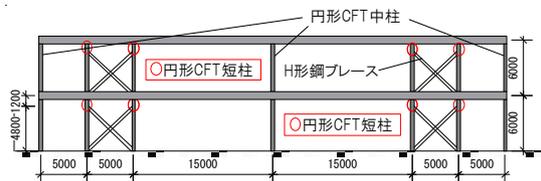


図6 建物立面

静的解析において、地震層せん断力は図 7 に示す三角形型の外力分布を仮定した。解析は柱一本の鉛直荷重を一定に保ったまま、層間変形角 $R = \pm 2/100 \text{ rad}$ まで漸増载荷させ、変位制御で実行した。静的解析における荷重—変形関係を図 8 に示す。静的解析の結果、Model-2 では、1 層部分のブレース座屈により水平耐力が低下する荷重—変形関係となったが、Model-1 では、最大耐力発揮以降も耐力低下することなく、安定した変形性能を示す荷重—変形関係が得られた。

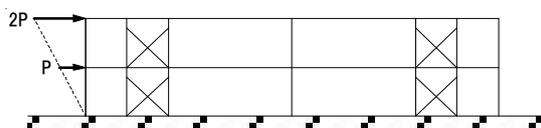


図7 外力分布

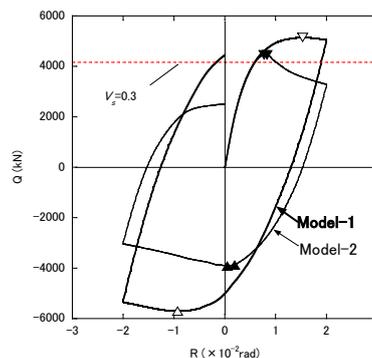


図8 静的解析における荷重—変形関係

動的解析においては、Newmark の β 法を用いて時刻歴解析を行った。入力波は、El Centro の NS 成分、Taft の EW 成分、八戸の NS 成分の観測波 3 波および、模擬波である BCJ-L2 波を使用し、これの最大速度を 100kine に増幅して用いて解析を行った。図 9 に El Centro 波に対する応答結果を示す。図の縦軸は頂点水平変位を建物高さで除した平均層間変形角で、横軸は応答時間である。静的解析の結果から、エネルギー吸収性能に優れている Model-1 の方が Model-2 よりも小さい応答変位を示すと考えられたが、4 波とも両モデルの間に最大応答変位の大きな差は見られなかった。これについては今後の課題としたい。

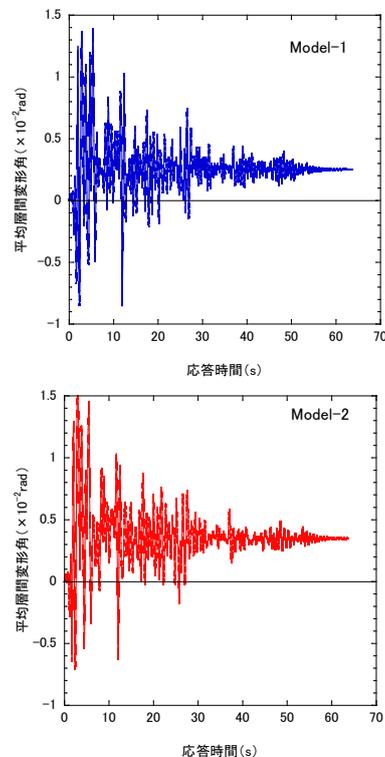


図9 El Centro 波(NS 波)による平均層間変形角の応答値

地震後の残留変形については、Taft 波を除き Model-2 より Model-1 の方が小さかった。

静的解析研究により、円形 CFT 短柱部をせん断破壊させる構造は、ブレース座屈を先行させる構造よりも安定した荷重—変形関係を示した。しかしながら、地震応答解析においては、両者の差異は顕著でなく、更なる検討を必要とすることが分かった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

(1) Hiroyuki Nakahara and Shinya Tokuda : Shearing Behavior of Circular CFT Short Columns, Proceedings of 10th ASCCS International Conference, pp.362-369, 2012.6. DOI コードおよび URL なし、査読有。

[学会発表] (計 8 件)

(1) 日根居亮佑, 津村竜次, 窪寺弘顕, 中原浩之 : a/D=0.75 の円形 CFT 柱の水平加力実験 (その 1 実験計画), 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), pp.-, 2013.8.31.(発表地: 札幌市)

(2) 津村竜次, 日根居亮佑, 窪寺弘顕, 中原浩之 : a/D=0.75 の円形 CFT 柱の水平加力実験 (その 2 実験結果と考察), 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), pp.-, 2013.8.31(発表地: 札幌市)

(3) 津村竜次, 金光一, 窪寺弘顕, 中原浩之 : 繰返し水平力を受けるコンクリート充填円形鋼管柱の弾塑性性状に関する基礎的研究 (その 1 実験概要), 日本建築学会九州支部研究報告, 第 52 号, pp.581-584, 2013.3.3. (発表地: 大分市)

(4) 金光一, 津村竜次, 窪寺弘顕, 中原浩之 : 繰返し水平力を受けるコンクリート充填円形鋼管柱の弾塑性性状に関する基礎的研究 (その 2 実験結果の考察), 日本建築学会九州支部研究報告, 第 52 号, pp.585-588, 2013.3.3. (発表地: 大分市)

(5) 津村竜次, 金光一, 窪寺弘顕, 中原浩之 : a/D=0.5 の円形 CFT 短柱の水平加力実験 (その 1 実験計画), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp.1351-1352, 2012.9.13.(発表地: 名古屋市)

(6) 金光一, 津村竜次, 窪寺弘顕, 中原浩之 : a/D=0.5 の円形 CFT 短柱の水平加力実験 (その 2 実験結果と考察), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp.1353-1354, 2012.9.13. (発表地: 名古屋市)

(7) 金光一, 徳田慎也, 窪寺弘顕, 中原浩之 : 軸方向力のもとで繰返しせん断力を受けるコンクリート充填円形鋼管短柱の弾塑性性状に関する実験的研究 (その 1 実験概要) 日本建築学会研究報告 九州支部 構造系 第 51 号・1 2012.3.4. (発表地: 北九州市)

(8) 徳田慎也, 金光一, 窪寺弘顕, 中原浩之 : 軸方向力のもとで繰返しせん断力を受けるコンクリート充填円形鋼管短柱の弾塑性性状に関する実験的研究 (その 2 実験結果の考察) 日本建築学会研究報告 九州支部 構造系 第 51 号・1 2012.3.4.(発表地: 北九州市市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中原 浩之 (NAKAHARA HIROYUKI)

九州大学大学院・人間環境学研究院・准教授

研究者番号: 60315398