

CFT および FRC を用いた自己圧着型耐震補強ブレース工法の研究

京都大学工学研究科 正会員 ○小田 衛

京都大学工学研究科 正会員 河野 進

京都大学工学研究科 正会員 渡邊 史夫

1. はじめに

1995年の阪神・淡路大震災以後、既存建物に対する耐震補強需要が増加するが、従来の補強工法は、耐震補強部材と既存建物とを一体化させるために行われるあと施工アンカー工事が必要となる場合が多い。その場合、工程が増えるだけでなく震動や騒音等、工事の際に大きな障害となるため、施工面・経済面での合理化が求められてきた。

そこで、2001年度から、本研究グループは、プレキャスト高強度鉄筋コンクリートX型ブレースを用いた新耐震補強工法の開発に関する研究を行ってきた^{[1],[2],[3]}。本工法では、圧着力を利用して周辺骨組との一体化を図るため、既存骨組との接続工程をあと施工アンカーを用いることなく大幅に簡素化することが可能となる。また、地震応答時においてブレースが外れることを防ぐため、どちらのブレースにも常に圧縮力が作用するように、ブレース端部に数センチのストロークを有する多層パネを組み込んでいるのも大きな特徴である。

2001年度の研究^[1]では、縮尺1/2の1層1スパンRC骨組に、設計破壊形式の異なる2種類のX型RCブレース（柱端または梁端におけるパンチング破壊型とブレースの面外座屈破壊型の2種類）を組み込んだ補強試験体について水平加力実験を行った。この実験ではRCブレースによる大きな補強効果が確認されたが、2体ともに設計とは異なる破壊形式であるブレース圧壊で終局状態に至った。また、ブレース圧壊によって架構の耐力の急激な低下が見られた。

そこで2006年度は、最大耐力後の変形性能の向上を目的とし、角型鋼管にグラウトを注入することで、鋼とコンクリートの欠点を補い合い、圧縮強度の大幅な向上と非常に粘り強い性質を示すCFT(Concrete Filled Tube)及び、コンクリートにステンレス繊維を練り込むことで、普通コンクリートに比べて圧縮強度以降の脆性的な応力軟化を緩和するFRC(Fiber Reinforced Concrete)を自己圧着ブレース部材として用い実験を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体詳細

本実験で用いる試験体は、2001年度の宮崎らの研究^[1]において設計された試験体と同様、フレームは一層1スパンで、縮尺は1/2とし、既存建物を想定した

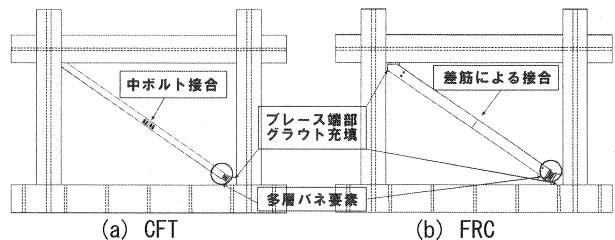


図-1 試験体モデル

柱・梁からなるフレーム部分と、ブレース中央部で2分割して作られたブレースピース及びブレース下端部の多層パネ要素からなる。図-1に試験体全体図モデルを示す。図-2にフレーム部分、図-3にブレース断面を示す。コンクリート及び鉄筋・鋼管の材料特性は、表-1および表-2に示す。

柱と梁を両端に塑性ヒンジパネを有する部材にモデル化し、これらの部材からなる骨組モデルに長期軸力を導入後、水平力を単調増加させ、梁両端降伏後に柱脚が降伏し、全体崩壊形が形成される時の解析値は212kNとなり、これに図-3で示すブレースを組み込み、4章に示す方法によって算定したブレースの座屈により終局状態を迎える時の架構全体の水平耐力解析値は、CFT試験体は335kN、FRC試験体は585kNとなった。この時の書く試験体の層間変形角はCFTで0.28%、FRCで0.25%であった。表-3にフレーム各部の予想耐力とブレース座屈時入力せん断力を示す。

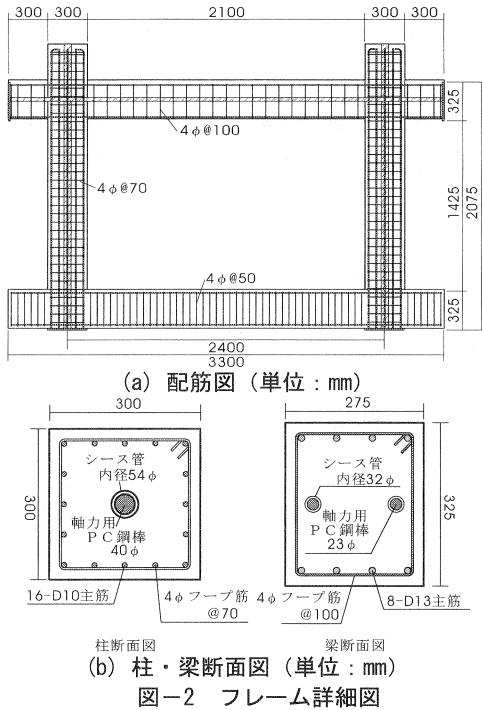


表-2 鉄筋及び鋼管の材料特性

鉄筋種類	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)
D13	358	512	181
D10	371	527	179
D6	415	531	179
φ4	522	579	202
鋼管	338	448	221

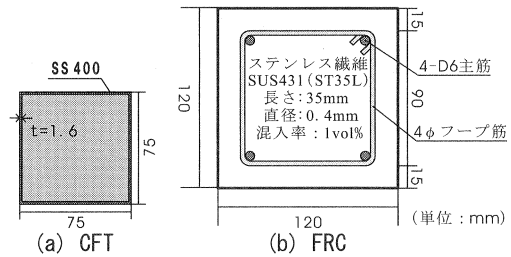


図-3 プレース断面図

表-1 コンクリートの材料特性

試験体	適用	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	引張強度 (MPa)
CFT	フレーム	29.6	25.1	2.91
	プレース	62.7	20.8	4.04
FRC	フレーム	30.3	26.3	3.05
	プレース	77.6	34.9	6.00

表-3 フレーム各部耐力

試験体	せん断耐力 (kN)	バンチング耐力 (kN)	
		プレース座屈時入力せん断耐力(kN)	
CFT	柱	142	472
	梁	104	468
	接合部	628	182
FRC	柱	143	512
	梁	105	453
	接合部	639	183

*接合部せん断耐力については、十字型を仮定して靱性保証型指針^[1]を適用。せん断耐力についても靱性保証型指針^[1]を適用。

表-4 導入自己圧着力

試験体	予定導入プレストレス力(kN)	プレース圧着力(kN)
CFT	32.5	42.1
FRC	32.5	25.9

2.2 自己圧着力

皿パネによる圧縮力の大きさについては、プレースが初期状態から伸びを受けて長くなっても、フレームから外れない程度の圧着力を確保し、かつプレースへの負担が大きくなりすぎないような範囲となるよう 32.5kN を目標値として、導入作業を行った。プレース軸力は、プレース表面に貼付した歪ゲージから得た値と材料試験の結果を用いて算出し、表-4 にプレース定着後の軸力(圧着力)を示す。

2.3 載荷

図-4 に本実験の載荷装置を示す。梁には引張による軸降伏防止のため、梁に $0.28f_c bD=450\text{kN}$ のプレストレス力を導入した。各柱には $0.20f_c bD=324\text{kN}$ の一定軸力を作用させた。

載荷において、南方向への載荷を正方向と定義し、南北の水平ジャッキによる押し引きの加力を同じ値にして、試験体全体の層間変形角(%)を制御する。層間変形角(%)は試験体フレームに取り付けた複数の変位計により、架構の曲げ変形(ϕ)とせん断変形(γ)を求め、この2つの合計値として求めた(方法 A)。なお、柱梁接合部中央と基礎の相対変位も併せて測定し、層間変形角を算定(方法 B)したが、0.20%以下の小変形時の層間変形角は先述の方法が精度よく測定できた。さらにまた、0.20%以上の変形では両者はほぼ同じ値を示し、本論文では方法 A を用いた。以上の制御のもと、負側載荷でフレームに大きな損傷が生じないように、層間変形角が+0.05%、-0.01%、+0.20%、-0.02%…と層間変形角が正負で5:1となるよう、図-5 に示す載荷ルールのもと繰返し載荷を行う。

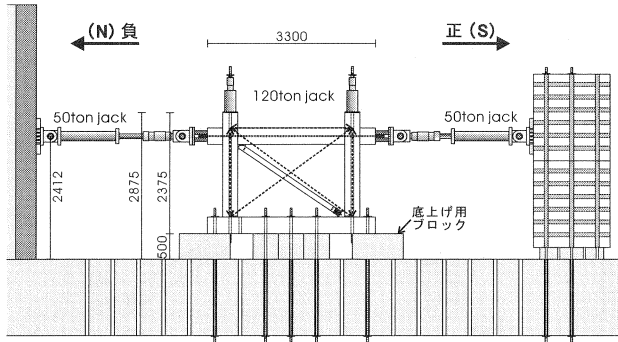


図-4 荷重装置図

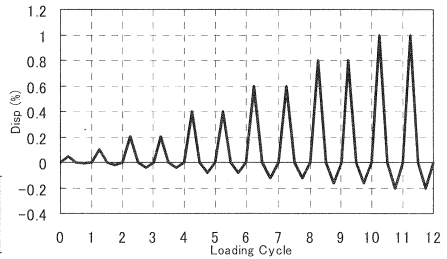


図-5 荷重履歴サイクル

3. 実験結果

図-6 に+0.80%サイクル終了時の各試験体のひび割れ図を、図-7 に水平荷重一層間変形角（以後 R とする）関係を示す。点線は補強骨組負担水平荷重、実線は柱負担水平荷重を示す。補強骨組負担水平荷重はブレース及び柱の負担水平荷重の和と考え、補強骨組の水平荷重から 2.2 に示す方法で算出したブレース軸力の水平方向成分であるブレース負担水平荷重を差し引いた値を柱負担水平荷重とした。また、図-8 に各試験体のブレース軸力一層間変形角関係を示す。ただし、圧縮を正とする。過去の骨組実験^{[1],[3]}同様、繰返し荷重を行っても両ブレースとも常に圧縮力が作用し、補強骨組から外れることなく安定した挙動を示した。

3.1 CFT ブレース試験体

図-7 (a) に示すとおり、R=0.20%付近で北側柱・梁接合部および南側梁端にフレーム最初のひび割れが観測され、これにより剛性が低下した。R=0.40%付近からフレーム各接合部でひび割れが急増したが、ひび割れ幅は、0.10mm 未満とフレームの損傷は非常に小さく、耐力の著しい増加は見られなかった。また、この時点で、図-8 (a) から明らかなように、ブレース軸力はピークに達した。従って、CFT ブレースは R=0.40%（水平荷重 415kN）において、座屈耐力に達したと考えられ、架構全体においても、二度目の剛性低下がみられた。さらに R=0.60%付近でブレース中央部全体がはらみだし、最大水平耐力は頭打ちとなった。また、補強効果として、2001 年度の実験^[1]では R=0.40%で最大耐力となり、以降急激に耐力が低下したが、CFT ブレース試験体では、R=0.60%まで耐力上昇がみられた。以降の耐力低下も緩やかで、R=0.60%時はブレースが座屈して大きく変形した。ただし、座屈しても FRC 等で補強しない PCa ブレースの圧壊時のような急激な耐力劣化はなく、変形とともに徐々に耐力が劣化した。柱負担水平荷重の最大耐力は実験値で 240kN となり、計算値(212kN)に比較的近い値を示した。

3.2 FRC ブレース試験体

図-7 (b) に示すとおり、R=0.20%付近で北側柱・梁接合部にフレーム最初のひび割れが観測され、剛性が低下した。R=0.60%付近から耐力は頭打ちとなり、ブレース・柱接合部の支承面に幅 1.0mm のひび割れ A が入り、ブレースがめり込み始める様子が観測された。R=0.80%で、ブレース中央接合部において軸方向のひび割れが観測されたが、図-8 (b) より、R=1.00%以降においても大きな耐力低下はみられず、ブレースの損傷は中央接合部の小さな圧壊のみだった。この時点で、北側柱・梁接合部の隅角部から進展したひび割れ A の幅は 2.0mm に達し、このため剛性が低下したと考えられる。柱負担水平荷重については、R=0.40%までは CFT 試験体と同様の挙動をしたが、以降ブレースが柱にめり込むことによって、骨組の水平抵抗機構が劣化し、柱水平負担が頭打ちとなり、耐力の向上が見られなかった。

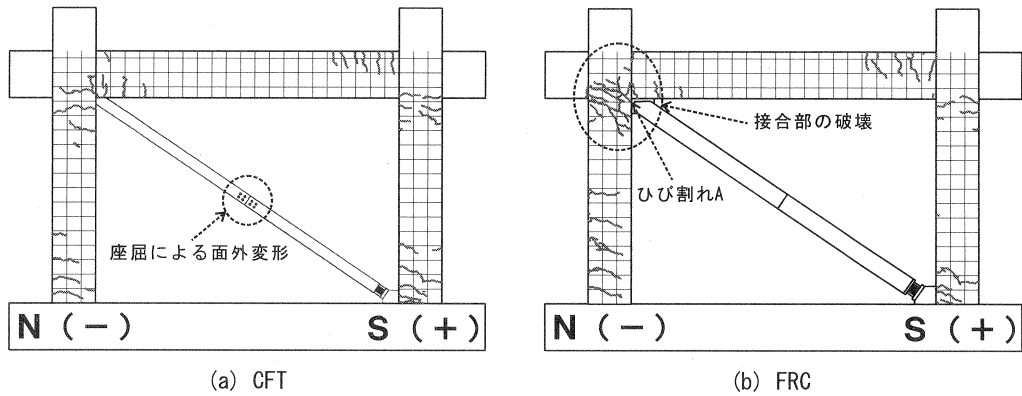


図-6 ひび割れ図

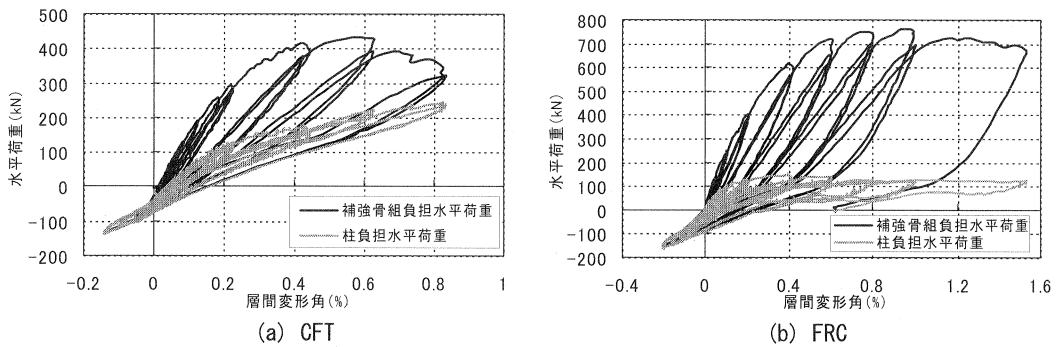


図-7 水平荷重-層間変形角関係

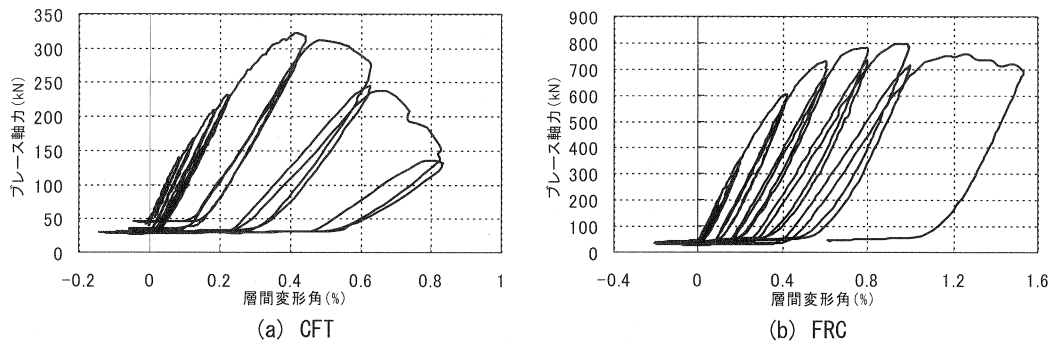


図-8 ブレース軸力-層間変形角関係

4. ブレース軸耐力の考察

自己圧着ブレース設置において、ある程度の初期不整は避けられない。そこで、過去に行われたX型プレキャストコンクリートブレースの研究^[1]において、偏心曲げモーメントおよびブレース材の長さによるブレースの軸圧縮耐力の低下を考慮するため、仮想面外力による曲げモーメントと初期不整による偏心曲げモーメントを加算した曲げモーメントに対する、長柱効果を考慮した場合のブレース圧縮軸耐力 N_{bu} の算定式^[5]が実験結果から提案されている。

図-9 に、スパン $l' (= \gamma l)$ に仮想面外力 $\alpha_1 N$ が作用した場合の曲げモーメント ${}_B M$ と、軸力 N が偏心距離 $e (= \beta D)$ に作用した場合の偏心曲げモーメント ${}_e M$ の概念図を示す。力の釣り合いより、ブレースに生じるそれぞれの曲げモーメントは以下のようになる。

$${}_B M = \alpha_1 \cdot N \cdot \ell' / 4 = \alpha_1 \cdot N \cdot \gamma \cdot \ell / 4 \tag{1}$$

$${}_e M = N \cdot e = \beta \cdot D \cdot N \tag{2}$$

ここで、 ℓ : ブレースの内法支点間距離 (多層バネ要素の長さ 180mm を差し引いて、2358mm)、

D : ブレースの面外方向に対する断面せいとする。

また、鉄筋コンクリート柱の軸力と曲げモーメントの関係は、文献[6]に以下のように示されている。

$N_{max} \geq N > 0.4b \cdot D \cdot F_c$ のとき

$$M_u = \left\{ 0.8a_t \cdot \sigma_y \cdot D + 0.12b \cdot D^2 \cdot F_c \right\} \left(\frac{N_{max} - N}{N_{max} - 0.4b \cdot D \cdot F_c} \right) \tag{3}$$

$0.4b \cdot D \cdot F_c \geq N \geq 0$ のとき

$$M_u = 0.8a_t \cdot \sigma_y \cdot D + 0.5N \cdot D \left(1 - \frac{N}{b \cdot D \cdot F_c} \right) \tag{4}$$

ここで、図-9 の外力が作用した場合、

$${}_B M + {}_e M = M_u \tag{5}$$

が成り立つ。ここで、 N_{max} : ブレースを短柱と考えた場合の中心圧縮軸耐力、 b : ブレースの面外方向に対する断面幅、 F_c : ブレースコンクリートの圧縮強度、 a_t : 引張主筋断面積、 σ_y : 鉄筋の降伏強度とする。よって、式(1)～式(3)及び式(5)より長柱効果を考慮した場合のブレース圧縮軸耐力 N_{bu} が次式で導出される。

$$N_{bu} = \frac{\left\{ 0.8a_t \cdot \sigma_y \cdot D + 0.12b \cdot D^2 \cdot F_c \right\} \cdot N_{max}}{\left(N_{max} - 0.4b \cdot D \cdot F_c \right) \cdot \left(\beta \cdot D + \frac{\alpha_1 \cdot \gamma \cdot \ell}{4} \right) + \left\{ 0.8a_t \cdot \sigma_y \cdot D + 0.12b \cdot D^2 \cdot F_c \right\}} \tag{6}$$

また、式(1)、式(2)、式(4)、式(5)及び $\ell/D \leq 30$ とすると、式(4)の条件 $0.4b \cdot D \cdot F_c \geq N \geq 0$ が成立しないため、軸耐力は式(6)のみとなる。CFT ブレースについては、式(3)、式(4)の代わりに新都市ハウジング協会規準^[7]の柱の軸力と曲げモーメントの耐力相関関係を用い、式(1)、式(2)、式(5)の考え方に基づいて同様に算定した。

仮想面外力、偏心距離に関する係数については、過去の実験^[1]結果から、安全側に評価するよう、 $\alpha_1 = 0.03$ 、 $\beta = 0.075$ 、 $\gamma = 0.8$ と設定している。支点間距離に関する係数 γ は、鋼構造設計規準^[8]に示された、一端ピン・他端固定の時の座屈長さ推奨値を用いた。

この2つの曲げモーメントを考慮したブレース軸圧縮耐力の計算値 N_{bu} と実験結果 N の比較を表-5に示す。CFT ブレースについては、軸耐力について実験結果に対して安全側に精度よく評価できた。また FRC ブレースについては、座屈は観測されていないが、実験結果に対して少なくとも安全側の評価となることが確認できた。よって、片側ブレースに関しても、軸耐力を安全側に算定できた。

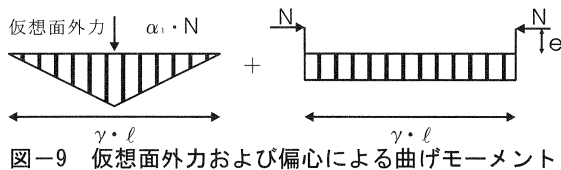


表-5 本提案式の計算値と実験結果の比較

ブレース	実験結果 N(kN)	本提案式による 計算値 Nbu(kN)	N/Nbu
CFT	321	307	1.02
FRC	※796以上	617	1.29以上

※FRCに関しては、座屈は観測されていないため、ブレースの最大軸力とした。

5. 支圧耐力の考察

FRCブレース試験体では、ブレース・柱接合部の支圧破壊と考えられる終局状態が観察された。支圧耐力 Q_B は六車式^[9]に基づいて以下の式を用いた。

$$Q_B = \alpha \cdot A_1 \cdot F_c \cdot \sqrt[2.28]{A/A_1} \quad (7)$$

ここで、 α : 強度上昇係数、 A_1 : 支圧面積、 F_c : コンクリートの圧縮強度、 A : 支承面積とする。柱の支圧面はブレース・柱接合部のブレース断面 (74mm×120mm) とし、支承面はブレース接触部の端あき寸法と柱寸法から求めた面積 (254mm×300mm) とした。また、 $\alpha=1.05$ とした。

ブレースに796kN (R=1.00%) の軸力が作用すると、644kNの支圧力がブレース・柱接合部に伝達されることとなり、式(7)による計算値725kNと比較して、支圧破壊は起こらないことになる。しかし、今回は上部目地モルタルの下部が繰返し载荷のため20mm脱落した。そこで、目地モルタル下部の脱落によって、支圧面積が当初の73%に減少したとして再計算したところ、586kNとなり実験値が支圧耐力に達し、支圧破壊が起こると考えられる。

6. 結論

本研究における結論は以下のとおりである。

- ・ 骨組に片側ブレースを配しても、ブレースには常に圧縮力が作用し、補強骨組から外れることなく安定した挙動を示した。
- ・ CFT ブレースの軸耐力後の変形能力が有効に働いていることを確認し、X型 RC ブレースの軸耐力算定の考え方 (式(1)、式(2)、式(5)) を用いると精度よく評価できた。
- ・ FRC ブレースは、ブレース・柱接合部の目地モルタル下部の脱落により、支圧力が計算上の支圧耐力を上回り、接合部の支圧破壊が生じたものの、比較的良好な変形性能が確保できた。メッシュ筋を配することなどによって、目地モルタルの脱落を防ぐことができれば、有効な補強効果を得ることが可能であった。

[謝辞]

本研究の一部は、国土交通省建設技術研究開発費補助金 (研究代表者: 渡邊史夫)、財団法人鹿島学術振興財団研究助成金 (研究代表者: 河野進) によって行われました。研究全般に渡り、(株) ダイワ、(株) 竹中工務店、ナガイ設計より貴重な助言を戴き、また、当時学部4回生の木村廣氏には多大なご協力を戴きました。ここに謝意を表します。

[参考文献]

- [1] 宮崎寛, 李日星, 谷昌典, 渡邊史夫: 自己圧着型コンクリートブレースによる耐震補強に関する研究 (その1~3), 日本建築学会大会 (北陸) 学術講演梗概集, pp. 773-778, 2002.
- [2] 谷昌典, 渡邊有香子, 奥野雄一郎, 渡邊史夫: コンクリート圧縮ブレースにより補強された RC 骨組の破壊形式に関する研究 (その 1, 2), 日本建築学会大会 (東海) 学術講演梗概集, C-2, pp. 757-760, 2003.
- [3] 村上恭平, 柴田茂樹, 松田拓己, 渡邊有香子, 渡邊史夫: 自己圧着型耐震補強コンクリートブレース工法の研究 (その 1~3), 日本建築学会大会 (近畿) 学術講演梗概集, pp. 547-552, 2005.
- [4] 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型設計指針 (案) ・同解説, 1997.
- [5] 日本建築総合試験所: 建築技術性能証明評価概要報告書, 自己圧着ブレース工法, pp. 79-83, 2003.
- [6] 日本建築センター: 2001 年度版建築物の構造関係技術基準解説書, 2001.
- [7] 新都市ハウジング協会: コンクリート充填鋼管 (CFT) 造技術基準 ・同解説の運用及び計算例等, 2002.
- [8] 日本建築学会: 鋼構造設計規準 許容応力度設計法, 2005.
- [9] 六車照, 岡本伸: 局部荷重を受けるコンクリートの支圧強度に関する研究, プレストレストコンクリート, 5-5, pp. 22-29, 1963.