

報告 圧縮抵抗型 CFT ブレースによる耐震補強法の実用例に関する報告

赤松 直^{*1}・中原 浩之^{*2}・尾宮 洋一^{*3}・佐藤 竜彦^{*4}

要旨：著者らは圧縮抵抗型の CFT ブレースによる耐震補強法を提案し、その実験的、解析的研究を進めてきた。提案補強法は、簡易施工可能であることが特徴であり、1/3 縮小試験体においても、1/1 実大試験体においても、その優れた施工性が確認されている。本報告では、福岡県福岡市の N 大学に適用された耐震補強工事記録をまとめ、実際の施工性能について検討した。工事記録の結果から、工期は約 1 カ月、コストは従来の補強法と比較して約 50% 減となり高い施工性、経済性を示した。

キーワード：学校建築，耐震補強，コスト比較

1. はじめに

著者らは、コンクリート充填鋼管(CFT)を耐震補強の斜材としてを使用することを提案し、その具体的な補強法に関して実験および解析的に研究を進めてきた¹⁾。本補強法は軸剛性の高いCFTブレースを圧縮のみに抵抗させることで、従来の枠付き鉄骨ブレースなどで必要とされる多量のスタッド、アンカーが最小限で済み、工期の短縮、コストの削減等、施工性能の向上を図ることが可能と考えられる。しかしながら、実験室内における縮小試験体では、その施工性能の向上を定量的に評価するこ

とは難しかった。

このような状況の中、著者らは、九州大学キャンパスの移転に伴い撤去される予定であった六本松キャンパス内の実在建物を対象とし、本補強法を適用して、その施工性を確認した²⁾。ただし、この施工実験においては、作業の大部を学生らで構成したチームによる手作業で行ったため、他の耐震補強実例とコスト等を比較するには適当でない部分があった。

本報告では、本補強法が実際の耐震補強として採用された N 大学（福岡県福岡市）の耐震補強について補強設計と工事記録をまとめた。補強建物の 1 階平面図を図 - 1 に、補強構面の軸組図を図 - 2 に示す。図 - 1 の破線部はエキスパンションジョイントとなっており、補強対象は J-L 間の建物である。補強建物は図 - 2 に示すように 5 階建てであるが、3-8 スパンの K-J 間は 3 階以上が存在せず、建物の重心は L 通り側に偏在すると考えられる。以上のことを踏まえ、主な補強構面は図 - 1 に示すように、補強建物 L 通りの 1 層 2 層 2-8 スパンの室外側となった。耐震診断による補強効果を表 - 1 に示す。本補強では I_s 値 0.7 となるように、1 階と 2 階の補強設計を行った。なおこの I_s 値は本報告における補強箇所だけでなく、図 - 1 に示す他の 2 か所の補強効果も含んでいる。

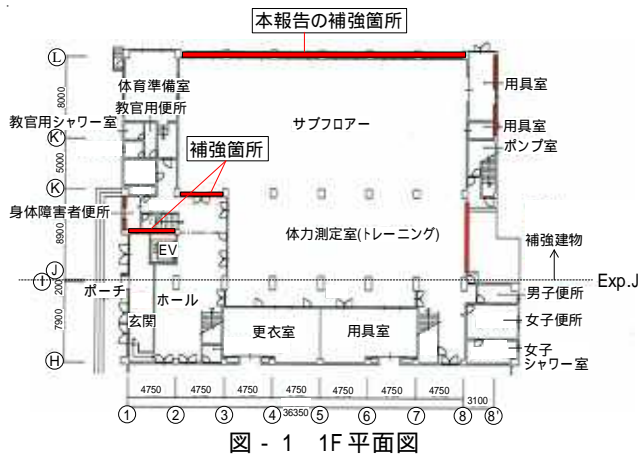


図 - 1 1F 平面図

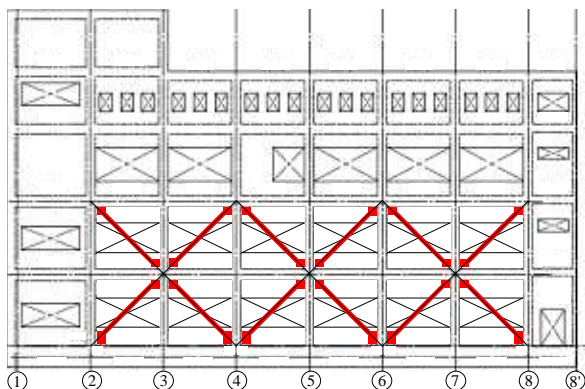


図 - 2 L 通り軸組図

2. 補強法

ブレースの詳細図を図 - 3 に示す。本工事でブレースは $-300 \times 300 \times 12$ の角形鋼管 (BCR295) を使用し、これを室外側に取付けた。補強対象建物は、1 階と 2 階の柱と、3 階の梁形が、腰壁より 300mm 以上外側に出張っ

表 - 1 補強効果

階	補強前の耐震性能		→	補強後の耐震性能	
	I_s	$Ctu \cdot Sd$		I_s	$Ctu \cdot Sd$
5	1.18	1.24		1.2	1.26
4	1.01	1.07		1.03	1.08
3	0.88	0.92		0.89	0.93
2	0.44	0.46		0.8	0.85
1	0.31	0.32		0.73	0.77

*1 九州大学大学院人間環境学府 大学院生

*2 九州大学大学院人間環境学研究院 准教授

*3 鹿島

*4 竹中工務店 (九州大学元大学院生)

(正会員)

(正会員)

工修

工修

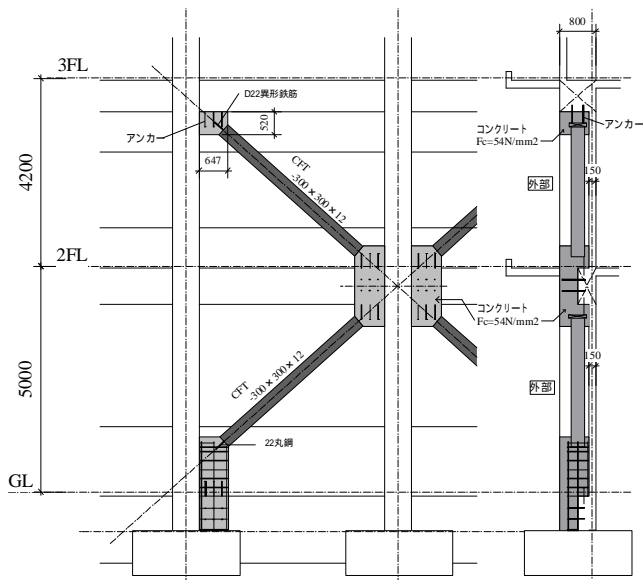


図 - 3 補強ブレース詳細図

ているため、これを枠材として利用しており、柱や梁のコンクリートの増し打ち作業やサッシの撤去を行うことなく、ブレースの設置が可能であった。

ブレースは、柱梁交差部分に設けた台形のコンクリート接合部で躯体と一体化される。本補強法では、ブレースに大きな圧縮力が作用するため、接合部部分に発生する偶力モーメントが当該部分を破壊することが懸念される。これを解消するために、接合部部分の大きさを調整することで、1階と2階のブレース材軸を合わせている。

3. コンクリート

この工法では、ブレースと接合部にコンクリートを打設する必要がある。コンクリート打設は、3回に分けて行った。まず、1階下側接合部にコンクリートを打設する。次に、1階の鋼管ブレースの内部と1階上側接合部と2階下側接合部に同時に打設する。最後に2階の鋼管ブレースの内部と2階上側接合部に打設する。2階上部の接合部と補強架構の接合面においてはグラウト工を行い、隙間を埋めている。

上記のコンクリート工事に関しては、特に2回目の打設において、優れた充填性が必要となる。そのため高流動コンクリートを採用し、通常の管理のもと打設した。

コンクリートの諸元を表 - 2 に、コンクリートの調査表を表 - 3 に示す。十分な強度、流動性を確保するため、本工事では呼び強度 64N/mm^2 、スランプフロー 60cm 、粗骨材最大寸法 20mm の高強度・高流動コンクリートを用いた。呼び強度 64N/mm^2 は設計基準強度の 54N/mm^2 に夏期配合の補正值 10N/mm^2 を加えている。混和材にはフライアッシュ、混和剤には高性能 AE 減水剤を使用した。

表 - 4 にコンクリート試験の検査項目、試験方法、管理値を示す。表 - 4 に基づき、打設時のフレッシュコンクリートの性状と、4週強度を管理した。

表 - 5 に経時変化によるフレッシュコンクリートの性状を示す。スランプフローは設計値の 60cm ほどを超えており、かつ誤差は 10cm 以内になっている。優れた流動性

表 - 2 コンクリートの諸元

呼び強度 (N/mm ²)	設計基準強度 (N/mm ²)	スランプフロー (cm)
64	54	60
空気量 (%)	粗骨材の最大寸法 (mm)	
3.0	20	

表 - 3 コンクリートの調査表

単位重量 (kg/m ³)					
水	セメント	細骨材	粗骨材	混和材	混和剤
170	474	697	889	120	3.79
水セメント比 (%)			細骨材率 (%)		
35.9			49.4		

表 - 4 検査項目、試験方法、管理値

検査項目	試験方法	管理値
コンクリートの性状	目視	良好であること
スランプフロー	JIS A 1101	$60 \pm 10(\text{cm})$
空気量	JIS A 1128	$3 \pm 1.5(\%)$
コンクリート温度	棒状温度計	$5 \sim 35()$
塩化物含有量	JASS 5T-502	$0.30(\text{kg/m}^3)$ 以下
ブリーディング量	JIS A 1123	$0.1\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下
沈降量	JASS 5T-503 (ダイヤルゲージ)	2mm以下
圧縮強度 (高強度コンクリート)	JIS A 1108 JIS A 1132	F F ₂₈ F ₂₈ :28日標準養生圧縮強度 F:調合強度

表 - 5 フレッシュ性状

経時変化	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度()
1バッチ目 0分	63.5×62.5	2.9	26
30分	64.5×62.0	2.7	25
60分	61.5×60.5	2.5	24
90分	60.0×58.5	2.3	22
2バッチ目 0分	65.0×62.0	2.8	25
経時変化	塩化物量 (kg/m ³)	50cm通過時間(秒)	フロー停止時間(秒)
1バッチ目 0分	0.074	4.15	25.96
30分	—	4.87	29.74
60分	—	5.76	31.07
90分	—	6.33	26.76
2バッチ目 0分	—	3.97	25.13

表 - 6 4週強度

打設箇所	試験体番号	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	質量 (kg)	圧縮強度 (N/mm ²)
2階ブレース	1	63.0×63.0	2.0	3.79	87.5
	2		2.0	3.80	85.8
	3		2.0	3.80	83.9
1階ブレース	1	55.5×54.0	1.6	3.75	74.5
	2		1.6	3.74	72.4
	3		1.6	3.74	75.1
1階下側接合部	1	58.0×56.0	2.2	3.78	79.7
	2		2.2	3.78	80.7
	3		2.2	3.78	80.1

が確保されていることが分かる。また、空気量と温度も表 - 4 の基準を満たしている。

表 - 6 に4週強度を示す。3回に分けて打設した全てのコンクリートにおいて圧縮強度は、十分に設計基準強度を超えており、ブレース鋼管内部および接合部における十分な強度が確保されたものと考えられる。

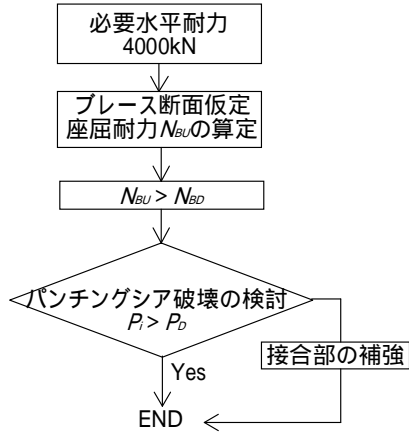


図 - 4 設計フロー

4. 補強設計

設計フローを図 - 4 に示す。本補強では前述の表 - 1 のように I_s 値 0.7 となるように設計し、これを満たすために必要な 1 層あたりの水平耐力は 12000kN であった。本補強法はブレースに圧縮力が作用する場合のみ効果があるので、1 スパンあたり 4000kN の耐力増強が要求されることになった。従って、ブレースの必要軸圧縮耐力 N_{BD} は、ブレースの傾斜角度を θ として、 $4000/\cos\theta=5367\text{kN}$ になる。

ブレースの断面を仮定する。1 階、2 階ともに断面は $300 \times 300 \times 12$ に設定した。鋼管の降伏強度は 295N/mm^2 、コンクリートは 54N/mm^2 を採用して設計した。

ブレースの軸圧縮耐力 N_{BU} は「コンクリート充填鋼管構造設計施工指針」³⁾ を用いて算定した。ブレースの座屈長さをブレース材の 0.7 と仮定すると、ブレースは中柱となり、式(1)によって算定されることになり、 N_{BU} は 7909kN となった。

$$N_{BU} = N_{cu1} - 0.125(N_{cu1} - N_{cu3}) \cdot (l_k / D - 4) \quad (1)$$

ここで N_{cu1} 、 N_{cu3} はそれぞれ CFT 短柱、CFT 長柱の軸圧縮耐力、 l_k は座屈長さ、 D は断面せいである。 N_{cu1} 、 N_{cu3} は下記の式(2)、式(3)で算定したものであり、ここで N_c 、 N_{cr} 、 N_{cs} はコンクリート、鋼管の圧縮耐力、 N_{cr} 、 N_{cs} はコンクリート、鋼管の座屈耐力である。

$$N_{cu1} = cN_c + sN_{cr} \quad (2)$$

$$N_{cu3} = sN_{cr} + cN_{cs} \quad (3)$$

CFT ブレースが必要強度に達した時の接合部の設計について述べる。図 - 5 の楕円で囲んだ箇所におけるパンチングシア破壊の検討を行う。ブレースに 5367kN の軸力が生じている時、接合部では水平方向に 4000kN 、鉛直方向に 3579kN の分力が生じる。

図 - 5 に示す接合部のパンチングシア耐力 P_i は文献⁴⁾ に示す方法で式(4)によって算定する。

$$P_i = 0.34 / (0.52 + a/D) \cdot \tau_0 \cdot be \cdot D \quad (4)$$

$$\tau_0 = 0.98 + 0.1F_c + 0.85\sigma \quad (5)$$

$$\sigma = P_g \cdot \sigma_y + \sigma_0 \quad (6)$$

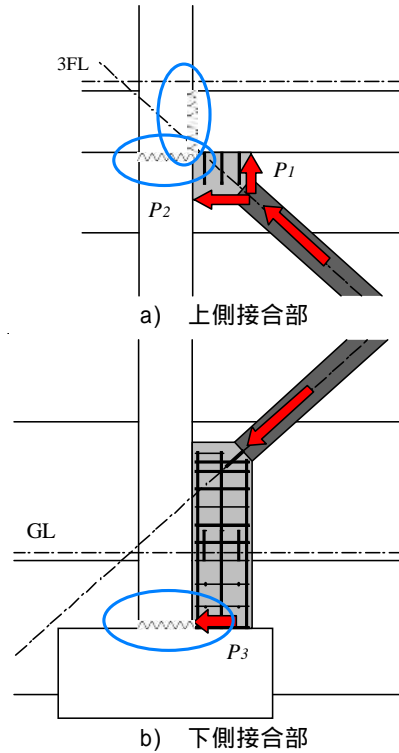


図 - 5 パンチングシア検討箇所

ここで、 D は柱せい、 be は柱の有効幅、せん断スパン比 (a/D) は $a=0$ としている。 σ_0 はせん断応力度で F_c は躯体コンクリートの設計基準強度、 P_g は有効断面に対する柱の全主筋断面積の比、 σ_y は柱主筋の降伏点強度、 σ は軸方向応力度である。

計算の結果、 $P_1=3703\text{kN}$ 、 $P_2=4295\text{kN}$ 、 $P_3=4800\text{kN}$ となり、それぞれ水平方向では 4000kN 、鉛直方向では 3579kN を上回っている。もしも P_i が必要パンチングシア耐力を下回る場合、アンカー筋などによる接合部補強が必要となる。

5. 実施工

本工事手順を説明する。まず 1 階の基礎梁、2 階梁、および接合部個所の外装モルタルのハツリ工を行う。次に接合部コンクリート固定用のケミカルアンカーを打設する(写真 - 1)。ブレース部分の角形鋼管を搬入する。1



写真 - 1 ハツリ工事・アンカー打設

階部分のブレース材に用いる鋼管は、台車に荷卸しして、その後台車で所定の位置まで人力で移動する。吊揚げ用アンカーに吊金具をセットし、チェーンブロックを設置する吊り込みをし、位置決めをする。鋼管にナイロンスリングを使用し玉掛けする。固定用金具を設置し、所定の位置までチェーンブロックで巻き上げる。所定の位置に鋼管を固定用ピースで固定した(写真 - 2)。建方において大型重機が不要であり、横移動も仮設足場を人力で移動させることが可能であった。これは、ブレースの内部コンクリートを後施工するため、建方時には鋼管のみの重量 420kg の運搬に留まったためである。重量が小さいため、チェーンブロックおよびホールアンカーの容量を小さいものが使用できている。なお、コンクリートを充填した場合のブレース重量は、1200kg となる。固定用の金具は、ブレースの角度と位置を微調整するためのも

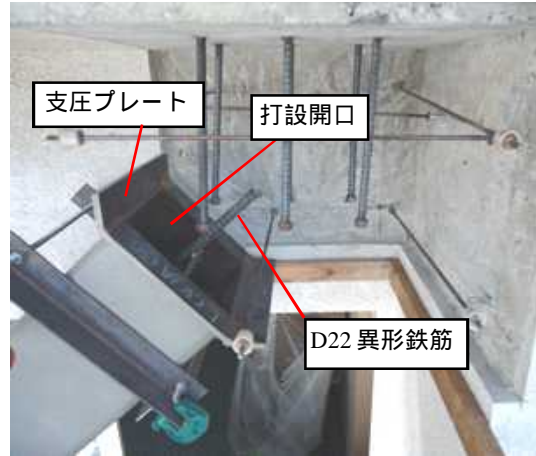


写真 - 3 ブレース上面

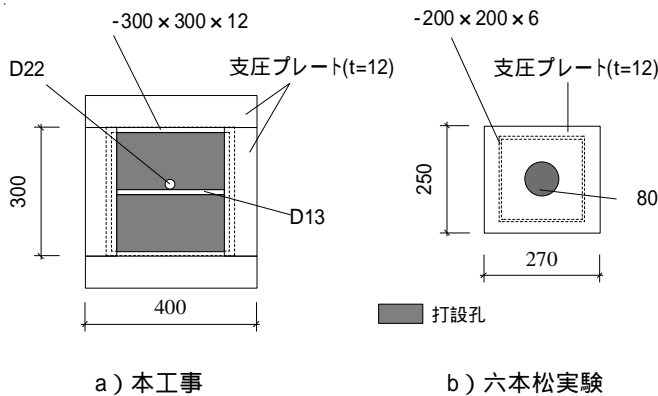


図 - 6 ブレース上側打設孔

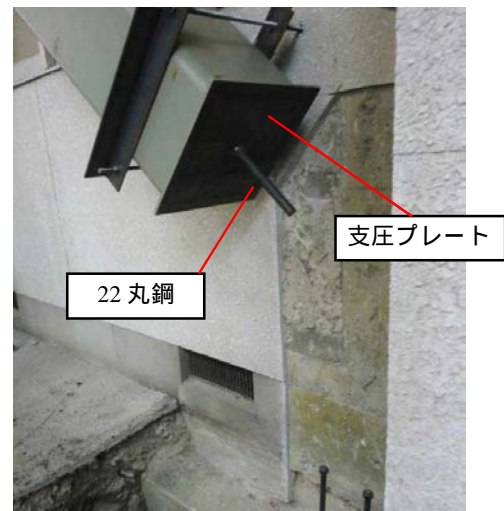


写真 - 4 ブレース下面



写真 - 2 吊り治具・固定具

のである。

本補強法はブレースが圧縮のみを負担する接合部詳細となっているため、ブレースの圧縮力が消失するとブレースが不安定な状態になることが危惧される。そのため、本工法ではブレースの上部を躯体に固定するが、ブレースの下部は圧着と離間が可能な接合部詳細としている。ブレース上側にはD22の異形鉄筋を設置しており(写真 - 3)、ブレース内部と接合部のコンクリートを同時に打設することで一体化している。

六本松キャンパスでの実大施工実験²⁾では、ブレースの上側は図 - 6b) で示す打設開口を設けたが、コンクリートを流し込む際に詰まりが生じ、施工時間に大幅なロスが出た。本工事では図 - 6a) や写真 - 3 が示すように、コンクリートの打設開口を広く設けており、その結果、スムーズなコンクリート打設が可能となった。支圧プレートはブレースの鋼管に働く圧縮応力を接合部コンクリートに伝達することを目的として設置したものである。鋼管は、ブレース座屈耐力時に降伏強度近くまで圧縮応力を負担する。その際、鋼管断面が直接コンクリートに設置していると、当該部が脆性的に破壊することが危惧される。本工事では、図 - 6、写真 - 3、写真 - 4 のように鋼管にプレートを溶接することで、圧縮応力のス



写真 - 5 配筋工事



写真 - 8 グラウト注入



写真 - 6 型枠工事



写真 - 9 工事完了後



写真 - 7 コンクリート打設

ムズな伝達を確保した。ブレース下側には、支圧プレート中央に 22の丸鋼を溶接している(写真 - 4)。これは、ニードルベアリングのように機能して、地震応答時には、圧着と離間を繰返しても、ブレースの図芯位置

を保持することを意図して設置している。

写真 - 4の後は、写真 - 5のように1階下側接合部の配筋を行い、接合部型枠を設置した(写真 - 6)。前述の通り、ブレースと下側接合部は地震応答時に、離間と接触を繰返す。そのため、下側接合部は、繰返しの衝撃荷重を受けることになり、この部分での脆性的な破壊が危惧される。本工事では、この部分に配筋することで上記の破壊を防ぐことを意図している。上述したように、高流動コンクリートの打設は3回に分けて行った。最初に1階下側接合部を打設し、その後2階下側接合部と1階上側接合部、1階ブレースを同時に打設した(写真 - 7)。そして2階上側接合部と2階ブレースを同時に打設した。上側接合部は最後にグラウト注入で打設した(写真 - 8)。その後補修、仕上げ工事を行い、工事完了となった。工事完了後の外観を写真 - 9に示す。

6. 工期・専門業者

表 - 7に工事項目別の工事日数を示す。足場工事3日、スミ出し3日、掘削・ハツリ工事4日、アンカー打設1日、鉄骨搬入・取付3.5日、配筋工事2日、型枠工事7日、コンクリート打設3日、グラウト工事1日、補修・仕上げ工事4日である。工期は休日を除き、全体で27日であった。アンカー打設が1日で終了していることから、騒音を低く抑えることができ、居ながら工事も可能であると考え

表 - 7 工期

工事項目	日数
足場	3
スミ出し	3
掘削・ハツリ	4
アンカー打設	1
鉄骨搬入・取付	3.5
配筋	2
型枠	7
コンクリート充填	3
グラウト	1
補修・仕上げ	4

表 - 8 専門業者

専門業者	人・日
設備工	2
電気工	2
墨出し	6
鳶工	9
ハツリ工・土工	20
アンカー工	4
鉄骨工	20
鉄筋工	2
型枠工	20
コンクリート工	20
左官工	7
1日平均	5.9

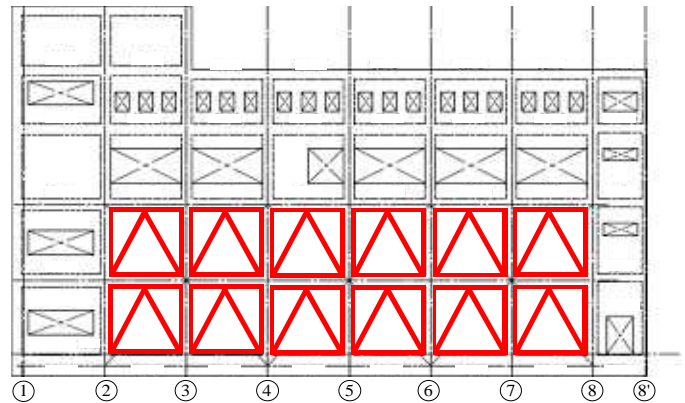


図 - 7 比較対象補強法の軸組図

表 - 9 コスト比較

	CFT圧縮ブレース	枠付き鉄骨ブレース
鉄骨工事	61.6	119.2
アンカー工事	2.7	43.8
スタッド工事	0.0	8.2
取合部ハツリ工事	21.9	5.5
コンクリート工事	6.8	0.0
グラウト工事	1.4	19.2
仕上補修工事	5.5	11.0
合計 (%)	100	206.8

られる。

工事を行った専門業者を表 - 8 に示す。数値は人数 × 日数で示す。主に接合部部分の梁を露出させるためのハツリ工・土工、鉄骨搬入・取付のための鉄骨工、コンクリート工の型枠工、コンクリート工を必要とした。本工事では、1日平均5.9人必要となった。

7. コスト比較

図 - 7 にコスト比較に用いた耐震補強法の軸組図を示す。これは一般的な枠付き鉄骨ブレースであり、今回のN大学耐震補強の原案である。表 - 9 にコスト比較表を示す。今回の工事によって算出されたコスト全体を100として、それぞれのコストを比較している。枠付き鉄骨ブレースのコストは同一施工業者による見積りである。表からわかるように全体で52%のコスト削減である。これはブレースに用いる鉄骨が少ないことに加え、本補強法の特徴であるアンカー、スタッドの大幅な削減によるものである。また、枠付き鉄骨ブレースが鉄骨枠と補強架構の接合面を全てモルタルによるグラウト工事を行うのに対し、CFT圧縮ブレースは2階上部の接合部と補強架構の接合面を埋めるだけでよい。

8. まとめ

本報では、CFT圧縮ブレースの実際の適用事例の施工記録を整理して、その施工性について調べた。この工事

では工期約1か月、コストは従来の約50%減と高い経済性を示した。ブレースと接合部には、高強度・高流動コンクリートを打設する必要があるが、現在流通している生コンクリートを通常の管理のもとで使用することで十分施工可能であることが示された。

謝辞

本研究では鹿島建設(株)竹中一雄所長、杉山健二工事主任、土井規寛工事主任、田中構造設計室田中健氏のご協力を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 中原浩之, 西田裕一, 崎野健治, 北島幸一郎: 圧縮抵抗型CFTブレースにより耐震補強したRC造建物の地震応答性状に関する解析的研究, コンクリート工学論文集, 第22巻, 第2号, pp.1-10, 2011.5.
- 2) 高畑陽一, 中原浩之, 他: CFTブレースにより補強した実在3階建て文教施設の繰返し載荷実験(1~5), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp.305-314, 2011.8.
- 3) 日本建築学会: コンクリート充填鋼管構造設計施工指針, 2008.
- 4) 日本建築防災協会: 2001年改訂版既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計指針・同解説, 2005.2.