

特集 「素材・材料により拓かれた新技術・新工法」

FRPブロックを用いた意匠的な耐震補強技術

萩尾 浩也 栗田 康平
増田 安彦 木村 耕三

Aesthetically Pleasing Retrofit Technique Using FRP Blocks

Hiroya Hagio Kohei Kurita Yasuhiko Masuda Kohzo Kimura

Abstract

Fiber Reinforced Plastic (FRP) has recently been used for aircrafts and automobiles, because FRP is both light and strong. FRP blocks can also be used for retrofitting, where FRP blocks are bonded on the existing frames as a new shear wall. The recent trend is not retrofitting but also aesthetic. Responding to new social needs, we carried out experiments on a shear wall composed of FRP blocks fitted on existing spandrel frames because of extension the range of application, and ascertained the efficacy. Our experiment clearly showed that the strength of a retrofitted frame using FRP blocks was nearly three times that of the unretrofitted frame. Maximum strengths evaluated from the experimental results are presented in this paper.

概要

近年、発展が目覚ましいFRP(Fiber Reinforced Plastic)は、軽くて強いというメリットを活かして航空機や自動車にも使われるようになってきている。著者らはこの新しい材料を利用して耐震補強部材FRPブロックを開発し、増設耐震壁として適用してきた。最近の傾向として耐震補強だけではなく美観への配慮が求められている。そこで、本工法の適用拡大のために、腰壁付き柱のFRPブロックによる補強実験を行い、その効果を確認した。実験結果によれば、補強しない架構に対してFRPブロックを用いて補強した架構は最大約3倍の耐力を有し、十分な補強効果を有することが分かった。FRPブロックによる腰壁付き柱の補強耐力の評価手法を提案した。

1. はじめに

軽くて強いという利点を有するFRPは、成形技術の発展とともに、近年では航空機や乗用車にも使われるようになってきている。同じ形状ならば複雑でも、大量生産が可能になってきているからである。建築においても、軽いことおよび高強度であることは、構造設計上の大きなメリットがあり、任意の形状が製作可能ということは、色々なデザインが可能になる。そのメリットを活かし、構造部材でありながら、優れた意匠性を有するFRPブロック¹⁾を開発した。そのFRPブロックおよびFRPブロック

を用いた増設耐震壁による耐震補強の例を、それぞれPhoto 1およびPhoto 2に示す。

本報では、FRPブロックを用いた耐震補強工法に、腰壁付き柱を適用対象に含めるために、FRPブロックによる腰壁付き柱の補強実験を行ったので、その実験およびその評価方法について報告する。

2. 実験概要

2.1 実験計画および試験体形状

補強対象は、腰壁により短柱化した脆性部材(以下、腰



Photo 1 FRPブロック
Appearance of FRP Block



Photo 2 採用事例
Sample of application

壁付き柱と呼称)である。本補強対象は、地震被害でよく見られるように、腰壁により変形が拘束されるために、脆性的に破壊することが知られている。腰壁付き柱は、より多くの採光をしたいため、建物の南側に配置されることが多い。一方、採光をあまり期待しない北側では腰壁のみならず垂壁も配置されることが多い。今回の補強対象は、FRPブロックの特徴を活かすため、その南側の腰壁のみ取り付く柱とした。つまり、南面の腰壁付き柱をFRPブロックによって補強しつつ、意匠的かつ採光可能にすることを目的とする。その補強イメージをFig. 1に示す。補強には、建物を使いながら補強でき、かつ極力騒音・振動がしないように、接着剤を使用する。FRPブロックと接着剤以外で補強に用いる材料は、ガイドスチール(以下、GSと呼称する)、ならびに必要に応じて無収縮モルタルである。施工は、既存躯体に接着剤でGSを貼り付け、

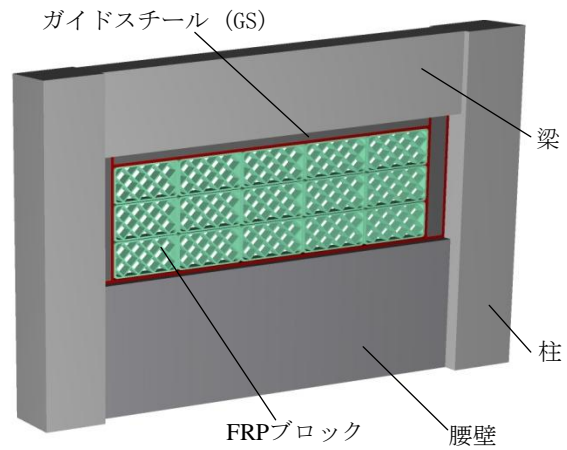


Fig. 1 補強概要
Overview of retrofitting Image

Table 1 試験体の諸元
Details of Specimens

		K0	K3	K3S	K3A	K4	K3t7
柱配筋 b×D : 220×220 mm	主筋	12-D13(SD345)ρg=3.15%					
	帯筋	□-D6@150(SD345)ρw=0.29%					
腰壁の概要	幅 mm	1,480					
	高さ mm	460				333	460
	厚さ mm	50					70
	余長	280					
補強の概要	FRP ブロック	無	6列3段	5列3段	6列3段	6列4段	6列3段
	アンカー	無			D10@150	無	
	幅調整部	無		有	無		
	特徴	無補強	補強標準	幅調整充填部有	腰壁アンカー有	腰壁高さ低い	腰壁厚い補強
軸力		$\sigma_0 = F_c / 6(3N/mm^2)$					

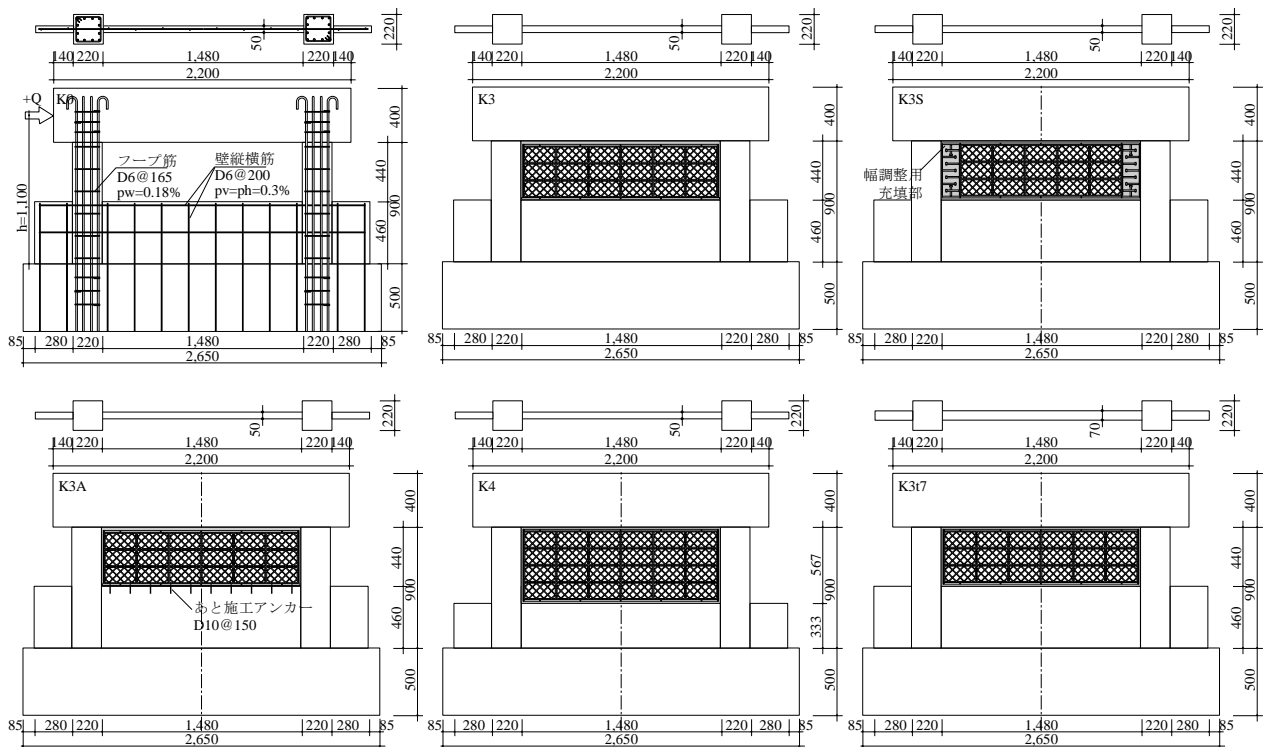


Fig. 2 試験体の形状・寸法(単位: mm)
Shape and Dimensions of Specimens

内部にFRPブロックを接着剤で組積する方法とした。その補強工法の構造的な把握のために、試験体は、比較対象である無補強試験体K0と、補強試験体5体で計6体とした。試験体一覧および各試験体の配筋・形状図を、それぞれTable 1およびFig. 2に示す。試験体の縮尺比は約1/3とした。全試験体共通の腰壁の余長は、事前のFEM解析により決定した。FEM解析パラメータは、腰壁の余長が内法スパンの約1/2, 1/4, 1/5, および余長がないものとし、内法スパンの1/2の解析結果の最大耐力とほとんど差が認められない最少の内法スパンの約1/5とした。また、柱主筋およびせん断補強筋も全試験体同じとした。試験パラメータは、補強廻りの既存躯体との接続方法、腰壁高さ、ならびに腰壁厚さとした。各試験体の比較により得られる項目を、Table 2 に示す。

2.2 使用材料

FRPブロックは、ガラス繊維と樹脂との複合材料であり、強化繊維であるガラス繊維は周囲および斜めのリブに切断されることなく配置され、樹脂と一体化させてある。FRPブロックの外観写真を、photo 1に示す。使用したコンクリート、鉄筋、およびFRPブロックの素材の機械的特性を、Table 3に示す。

2.3 荷重方法

水平せん断力Qは柱頂部のスタブから戴荷し、部材角

R (= 荷重高さの水平変位 / 荷重高さ1,100mm, 以後Rと記す) の目標所定値 ($R = \pm 0.1, 0.2, 0.4, 0.66, 1.33$ %) で各2回の正負交番繰返で荷重した。柱頂部には一定の鉛直軸力を荷重した。加力図をFig. 3に示す。

3. 実験結果

3.1 破壊性状および荷重-変形関係

荷重-部材角R関係および最終破壊状況をFig. 4に示す。無補強試験体K0の腰壁は、柱によって押される局部が一部圧壊していること、並びに柱際に柱と平行に発生したひび割れおよび腰壁余長部分にせん断ひび割れが観察された以外に大きな損傷はなかった。最終的には柱のせん断破壊であった。一方、FRPブロックで補強された試験体は、すべて腰壁に無補強試験体K0よりも密にせん断ひび割れが発生している。破壊状況から判断して、補強試験体の腰壁は無補強試験体と比較すると構造的に大きく寄与したと思われる。また最大耐力までFRPブロックには損傷は見当たらず、最終的には柱のせん断破壊とFRPブロック部分の下側で破壊した。この破壊位置は、腰壁の縦筋端部に相当するため鉄筋が存在せず、いわゆるかぶり部分に一致する。各試験体の最大耐力一覧をTable 4 に示す。この表より、補強効果は2.58~3.34倍あり、腰壁部分の上側にFRPブロックを積み込む補強方法は、腰壁付き柱の強度を上昇させる効果があること

Table 2 比較ポイント
Concept Points

比較試験体		把握項目
K0	K3	腰壁厚さ50mmにおける補強効果
K0	K4	腰壁高さ低い場合における補強効果
K3	K4	腰壁高さにおける補強効果の違い
K3	K3S	幅調整用充填部の有無における補強効果の違い
K3	K3A	腰壁におけるアンカー有無における補強効果の違い
K3	K3t7	腰壁厚さ違いにおける補強効果の違い

Table 3 材料特性
Properties of Materials

コンクリート: 試験体	部位	弾性係数 E_c kN/mm ²	圧縮強度 σ_B N/mm ²	割裂強度 σ_T N/mm ²	
K0,K3,K4	柱・腰壁	19.9	24.1	2.4	
		K3S,K3A,K3t7	17.7	19.1	1.7
鉄筋: 試験体	部位	弾性係数 E_s kN/mm ²	降伏点 σ_y N/mm ²	引張強さ σ_u N/mm ²	
					K0,K3,K4
	K3S,K3A,K3t7	D6(帯・壁筋)	195	371	472
		D13(柱主筋)	183	365	559
FRPブロック: 試験体	部位	弾性係数 E_c kN/mm ²	圧縮強さ $F_{\sigma c}$ N/mm ²	引張強さ $F_{\sigma T}$ N/mm ²	
					K3,K4
K3S,K3A,K3t7	FRPブロック	18.2	326	358	
準拠する 試験方法	—	—	JIS K7018	JIS K7165	

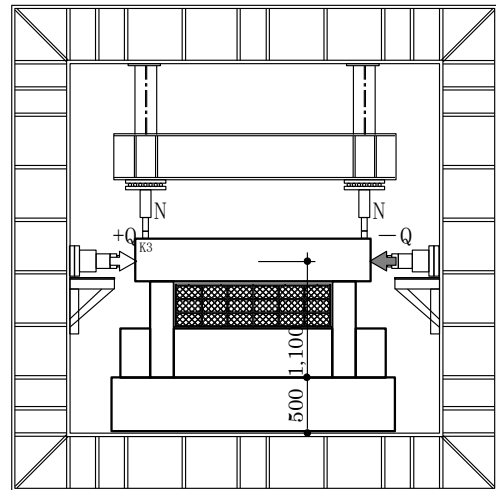


Fig. 3 加力図
Properties of Materials

Table 4 各試験体の最大耐力
Maximum Strength of Specimens

	最大耐力		破壊モード	補強効果 (K0に 対する比)
	荷重 (kN)	部材角 (%)		
K0	192	0.409	柱せん断破壊	—
K3	522	0.401	腰壁すべり	2.72
K3S	556	0.378	腰壁すべり	2.90
K3A	566	0.404	腰壁すべり	2.95
K4	495	0.400	腰壁すべり	2.58
K3t7	640	0.371	接着剤界面と腰壁すべりの混合	3.34

が分かる。また、破壊後も軸保持能力を失うことはなかった。

3.2 試験体比較

Table 2に従って比較した包絡線をFig. 5に示す。試験体K0とK3および試験体K0とK4の比較により、腰壁上に設置したFRPブロックの補強は最大耐力を向上させる効果がある。試験体K3とK4の比較により、本腰壁高さの範囲(内法高さの $1/3 \sim 1/2$)であれば補強効果に大差ない。試験体K3とK3Sの比較により、既存柱との接合を間接接合にすることで、Table.4に示すように補強効果がK3の2.72倍から2.90倍となり少し補強効果が向上している。試験体K3とK3Aの比較により、腰壁にアンカー筋を打設す

ることで補強効果がK3の2.72倍から2.95倍となり少し耐力増加している。耐力上昇がわずかだったのは、腰壁は薄いので十分なはしあき距離を確保できなかったためと推察される。試験体K3とK3t7の比較により、破壊した腰壁が厚いK3t7の方が最大耐力が高い。破壊した部分は接着面と腰壁の混合ではあるが、腰壁部分の破壊が支配的と仮定すると、腰壁が厚かった分だけK3t7の最大耐力が高いと思われる。

4. 最大耐力の評価

4.1 無補強試験体

無補強試験体は、Fig. 6に示す柱のせん断破壊であるの

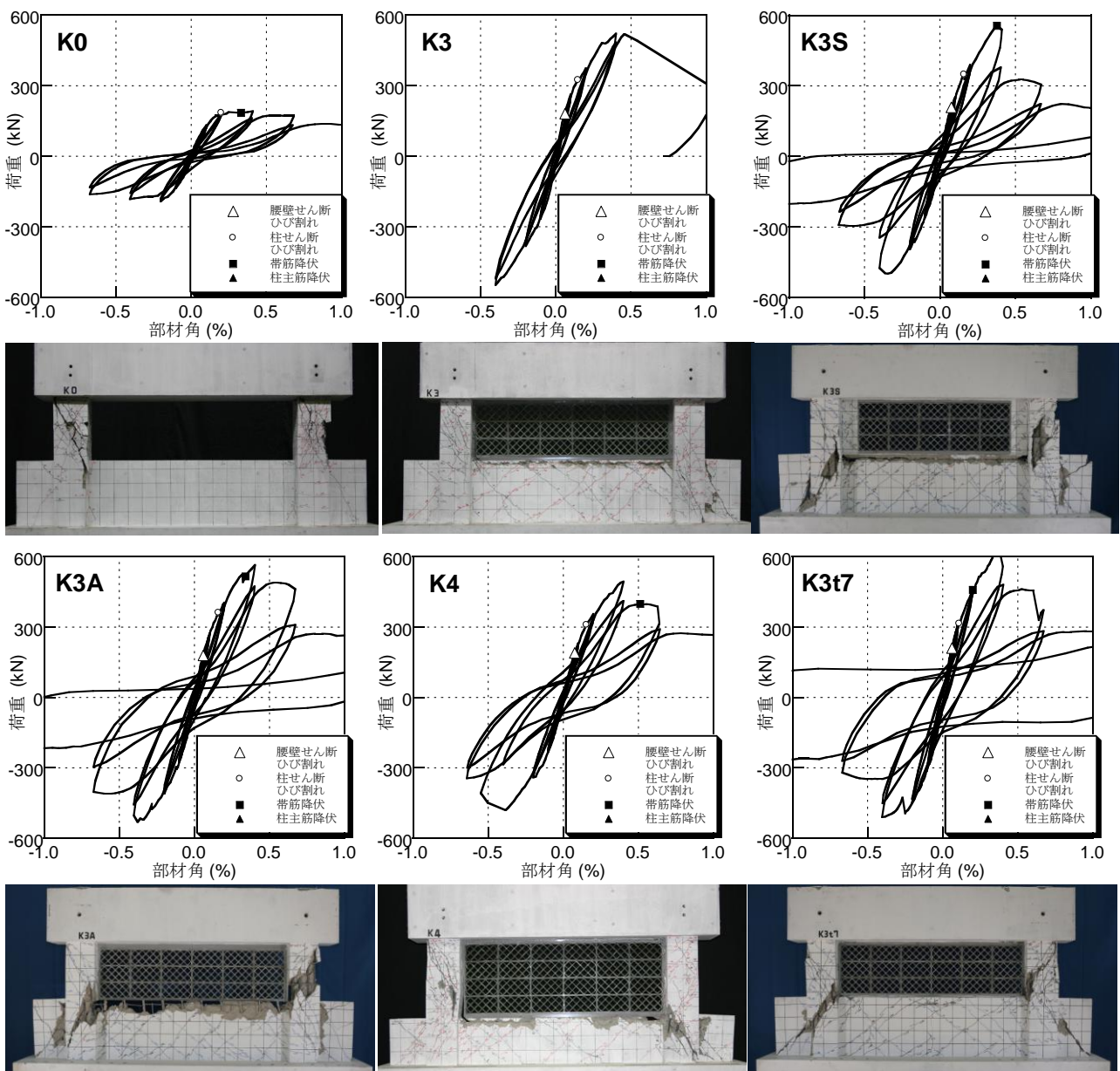


Fig. 4 荷重—変形関係および最終破壊状況
Relationships between Share Force—Deformation Angle, and Failure State of Specimens

で、荒川mean式²⁾で評価可能と考えられる。ただし、腰壁付き柱に関しては、腰壁の変形により降伏ヒンジ位置が腰壁のフェイスではなく腰壁内部に存在すること³⁾が指摘されている。その指摘を踏まえて、本論文でもせん断破壊状況も考慮して、内法高さを梁下から腰壁頂部に柱せいの1.0倍を加えて評価した。その評価式を、式(1)に示す。式(1)を用いたせん断強度は 199 kNとなり、実験値に対する比は 0.97で、実験値をほぼ評価した。

$$Q_{c(su)} = \left\{ \frac{0.068 \cdot p_{te}^{0.23} \cdot (\sigma_B + 18)}{M/(Q \cdot d) + 0.12} + 0.85 \cdot \sqrt{\sum (p_w \cdot \sigma_y)} + 0.1\sigma \right\} \cdot b \cdot j \quad \dots (1)$$

- b : 柱の幅
- j : 応力中心間距離で、7/8dとして良い。
- d : 柱の有効せい
- $p_{te} = 100 \cdot a_t / (b \cdot D)$ (%)
- a_t : 柱の引張側主筋全断面積

- σ_B : コンクリートの圧縮強度
- $M/(Q \cdot d)$: せん断スパン比。ただし、 $1 \leq M/(Q \cdot d) \leq 3$ とする。
- p_w : 帯筋比

4.2 補強試験体

補強試験体は、内部のFRPブロックを積み込んだ後に、長期軸力相当を載荷する手順で、補強を行っている。そのため、補強部分に実際の補強では負担しえない軸力負担による補強効果の過大評価が懸念される。しかし、1枚のFRPブロックの水平断面は水平投影断面積の約24%であり、柱の軸剛性とFRPブロックによる補強部分の軸剛性の比は、15%弱に過ぎない。その軸剛性を基に、破壊部分である腰壁の軸方向力を計算すると、40 kNとなる。建築物の構造関係技術基準解説書²⁾によれば、柱のせん断強度および耐震壁のせん断強度は、軸力の1割の強度上昇を見込んでいる。それに従えば、軸力負担分によ

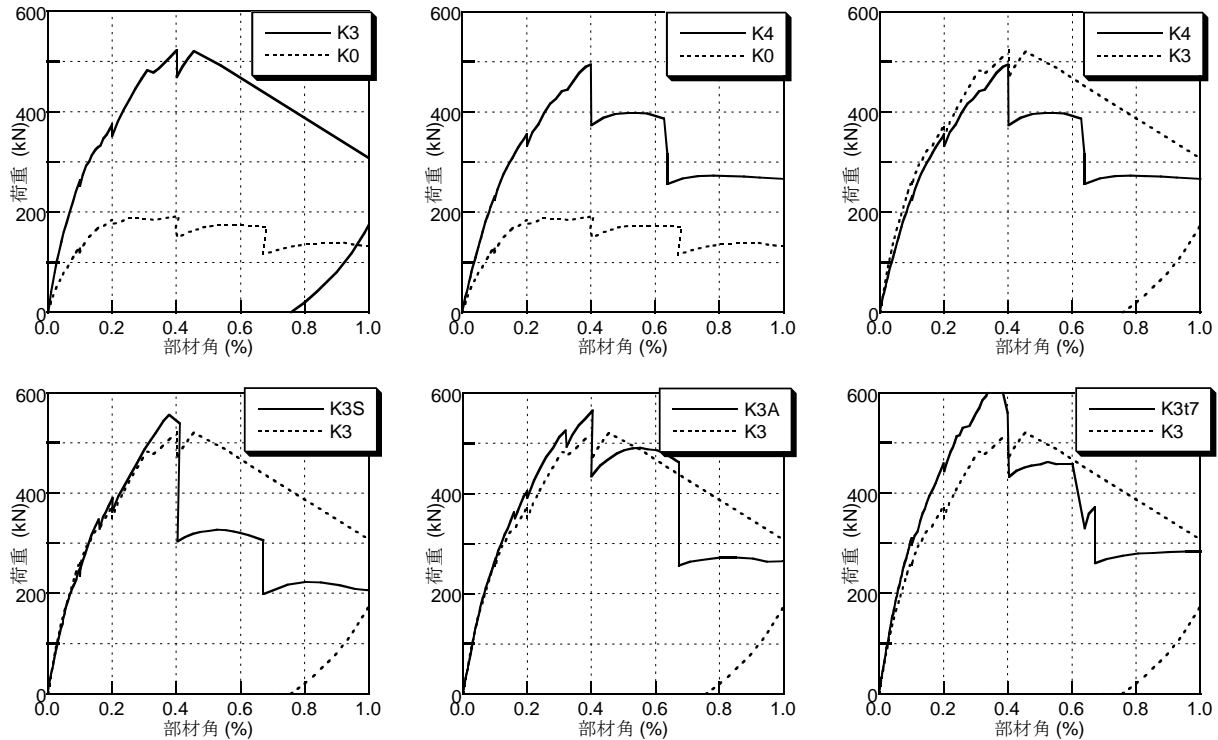


Fig. 5 包絡線比較
Comparison Of Envelope Curve

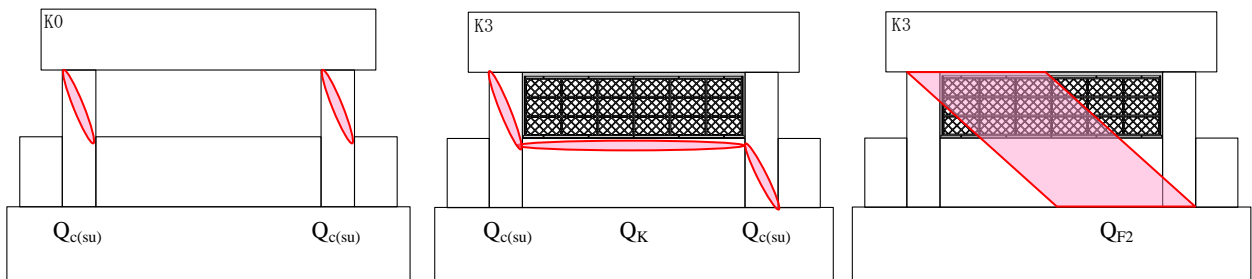


Fig. 6 破壊モード
Fracture Mode

るせん断力増加分は4kNとなる。最も小さい補強効果で約300kNであり、補強効果に対する軸力負担分は、1.4%に過ぎない。従って、実験における補強部分の軸力負担による影響は、無視できるものと判断している。

補強試験体は、Fig. 6に示すように柱でせん断破壊し、FRPブロック下面のかぶり部分ですべり破壊を生じている。この破壊状況から、次の3つの方法による最大耐力評価手法を検討した。一つ目は、耐震改修指針⁴⁾の増設耐震壁の評価と同様に、柱のせん断耐力と壁の耐力を累加する方法で、式(2)である(以下、方法Aと呼称する)。その内、腰壁部分の強度は、本実験の破壊形式が耐震壁のすべり破壊と似ているために、論文⁵⁾の手法を用いた。二つ目は、靱性指針⁶⁾によるアーチトラス理論に準拠する方法で、式(4)である(以下、方法Bと呼称する)。曲げ圧縮側が腰壁と柱が一体的に破壊していることから、柱のせん断強度と腰壁のせん断強度の単純累加ではなく、一体的に評価する方法である。ただし、接着工法である本補強方法ではトラス機構を見込めないと考え、式(4)の第1項は算入しない。かつ、 β も0となる。また、有効圧縮強度低減係数は、式(5)を用いた。三つ目は、式(6)に示すGSと腰壁の接着部の破壊を想定したせん断強度である。その内、接着部の破壊耐力⁷⁾ Q_{JU} は、式(7)を用いた(以下、方法Cと呼称する)。

$$Q_{F1} = 2 \cdot Q_{C(SU)} + Q_K \quad \dots (2)$$

$$Q_K = (0.84 \cdot \sqrt{\sigma_B} + 350 \cdot p_s) \cdot t \cdot l \quad \dots (3)$$

p_s : 腰壁筋比, ここでは0
 t : 腰壁厚さ
 l : 内法スパン

$$Q_{F2} = t_w l_{wb} \sum (p_s \sigma_{sy}) \cot \phi + \tan \theta (1 - \beta) t_w l_{wa} v \sigma_B / 2 \quad \dots (4)$$

$$v = 0.8 - \sigma_B / 200 \quad \dots (5)$$

$$Q_{F3} = 2 \cdot Q_{C(SU)} + Q_{JU} \quad \dots (6)$$

$$Q_{JU} = 0.12 \cdot \sigma_B \cdot t \cdot l + Q_A \quad \dots (7)$$

式(2)、式(4)および式(6)で示される計算値と実験との比較を、table 5に示す。その比較の結果、方法Aでも方法Bでも試験体K3、K4およびK3t7は、最大耐力をほぼ評価でき、試験体K3SおよびK3Aは少し安全側に評価すると判断される。試験体K3Aは、破壊面にアンカーが配置されているが、評価上考慮されていない。確かに実験では十分なはしあき距離が確保されていないので、アンカー効果が少なかったものと推察される。しかし、アンカーの寄与はゼロではないので、その分評価結果は、小さくなったものと考えられる。方法Cによる接着部の破壊強度は、実験結果よりかなり小さめに評価した。

本実験の補強形式では、式(7)による接着強度は小さめに評価するものと考えられる。

table 5 実験結果と評価結果の比較
 Comparison of test Results and Calculation

試験体	tQ (kN)	Q _{F1} (kN)	tQ / Q _{F1}	Q _{F2} (kN)	tQ / Q _{F2}	Q _{F3} (kN)	tQ / Q _{F3}
K3	522	480	1.09	488	1.07	338	1.55
K3S	556	435	1.28	398	1.40	292	1.90
K3A	565	435	1.30	398	1.42	292	1.93
K4	494	481	1.03	488	1.01	338	1.46
K3t7	640	545	1.17	667	0.96	292	2.19

5. まとめ

腰壁により短柱化した脆性部材を、FRPブロックで補強した実験を行った結果、以下のことが分かった。ならびに、実験におけるFRPブロックによる腰壁付き柱の補強耐力の評価方法を提案した。

- 1) 腰壁により短柱化した脆性部材を、FRPブロックで補強することによって、強度上昇させることが可能で、軸保持能力を失うことはなかった。
- 2) 腰壁により短柱化した柱のせん断耐力は、荒川mean式の内法スパンを腰壁の影響を加味することで、実験結果をほぼ評価できる。

参考文献

- 1) 萩尾 浩也 他：FRP ブロックを用いた増設耐震壁工法の開発(その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.631~632, (2004)
- 2) 日本建築センター：2007年度 建築物の構造関係規準解説書, (2007)
- 3) 白都 滋, 塩原 等, 楠原 文雄, 法量 良二：「炭素繊維シートにより耐震補強された既存鉄筋コンクリート造腰壁付き短柱の耐震性能」, 日本建築学会構造系論文集, 第534号, pp. 121~128, (2000)
- 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, (2001)
- 5) 江崎文也 他：Expression For Calculating Lateral Shear Capacity Of One-Bay One-Story Reinforced Concrete Framed Shear Walls Failing In Slip Shear Of Their Infilled Wall Panel, 日本建築学会構造系論文報告集 (366), pp142~154, (1986)
- 6) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, (1999)
- 7) 栗田康平, 増田安彦：ブレース型耐震補強工法「3Q-Brace」の開発, 大林組技術研究所報 No.73, (2009)