

論文 低強度コンクリート RC 部材の耐震補強性能に関する実験的研究

宮内 靖昌*1・福原 武史*2・毛井 崇博*3

要旨: 圧縮強度が 9 N/mm² 程度の低強度コンクリートの圧縮強度とヤング係数および割裂強度等の関係を調査した。さらに、低強度コンクリートの既存 RC 造建物の耐震補強に関する資料を得るために、次の 2 つの実験を実施して以下のことがわかった。(1) 増打ちして断面を大きくした柱の中心圧縮実験により、圧縮耐力は増大するが、既存部と増打ち部の圧縮耐力を単純累加した耐力は発揮されない場合がある。(2) エポキシ樹脂を用いて低強度コンクリートと鋼板を接着接合した接合部の一面せん断実験により、低強度コンクリートに対する接着接合部のせん断すべり耐力が得られ、実験値を安全側に与える計算式を提案した。

キーワード: 耐震補強, 低強度コンクリート, 増打ち柱, 中心圧縮耐力, エポキシ接着強度

1. はじめに

既存躯体コンクリートの圧縮強度 σ_B が 9 N/mm² 程度の低強度コンクリートの RC 造建物を耐震補強して長く利用しようという要望が増大している。しかしながら、低強度コンクリートの材料特性あるいは部材・骨組の耐震補強効果に関して不明な点も多い。そこで、本研究は、表-1 に示すように 3 水準のコンクリート強度を対象として、コンクリートの材料試験を実施し、さらに、耐震補強工法に係わる以下の 2 つの実験を実施した結果について報告する。なお、本論では、日本建築防災協会 RC 耐震診断基準¹⁾等を参考にして、 $\sigma_B=13.5$ N/mm² 未満を低強度コンクリートと定義した。

実験 1) 柱断面を増打ちした低強度コンクリート RC 柱に対し、圧縮性状および終局圧縮耐力などについて検討することを目的とした柱の中心圧縮実験（コンクリートの圧縮強度 $F_c=9$ N/mm² のみを対象にして実施）

実験 2) 枠付き鉄骨ブレースを RC 柱梁骨組内にエポキシ樹脂を用いた接着工法により取り付ける鉄骨ブレース接着工法^{2), 3)} (図-6 参照) による耐震補強方法を対象とし、低強度コンクリートと鋼板の接着強度に

ついて検討した接着接合部の一面せん断実験

2. コンクリートの材料特性

表-1 に本研究で用いたコンクリートの調合（水セメント比）および材料特性を示す。対象とするコンクリートの設計基準強度 F_c は、9, 13.5 および 21 N/mm² の 3 水準である。コンクリートには普通セメントおよび最大径 13mm の粗骨材を用い、所定の強度となるように水セメント比などの調合を決めた。

図-1 にコンクリートの圧縮応力度-ひずみ度曲線の

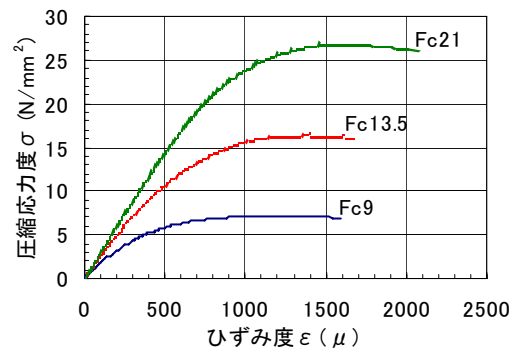


図-1 コンクリートの圧縮応力度-ひずみ度曲線

表-1 本研究で用いたコンクリートの調合および材料特性

設計基準強度 F_c (N/mm ²)	調合	増打ち柱の中心圧縮実験 ²⁾			接着接合部の一面せん断実験 ³⁾			
	水セメント比 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	ポアソン比
9	118 ¹⁾	6.95	15520	0.75	7.34	15260	0.76	0.176
13.5	95	—	—	—	16.49	23610	1.55	0.171
21	70	—	—	—	27.14	28800	2.19	0.180

1) コンクリート用分離低減剤を使用

2) 2回の試験の平均値, 3) 3回の試験の平均値, ただし、ポアソン比は1回の試験結果(各3本)

4) ヤング係数は、1/3強度時の割線剛性であり、コンプレッションメーターにて計測した値

*1 (株) 竹中工務店 技術研究所 主席研究員 博士 (工) (正会員)

*2 (株) 竹中工務店 技術研究所 研究員 博士 (工) (正会員)

*3 九州工業大学大学院工学研究院 教授 博士 (工) (正会員)

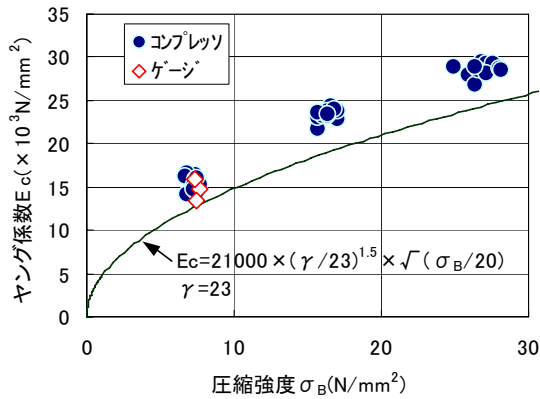


図-2(a) 圧縮強度とヤング係数の関係(本研究)

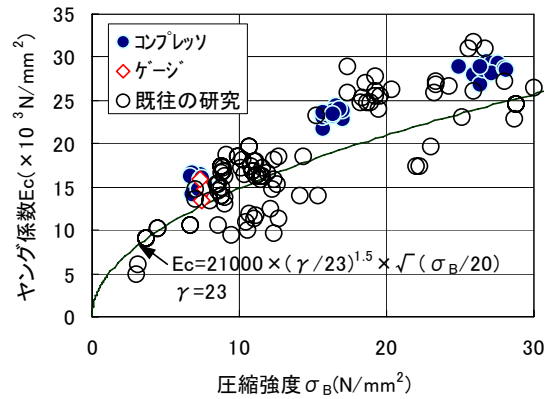


図-2(b) 圧縮強度とヤング係数の関係(既往の研究)

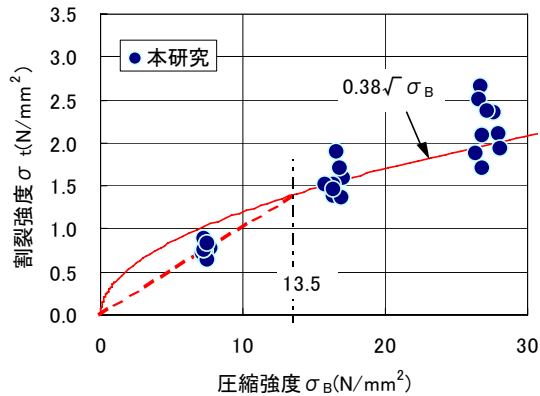


図-3(a) 圧縮強度と割裂強度の関係(本研究)

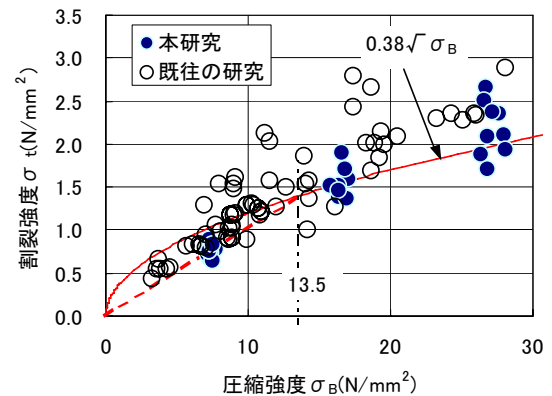


図-3(b) 圧縮強度と割裂強度の関係(既往の研究)

一例を示す。また、図-2 および図-3 にそれぞれコンクリートの圧縮強度とヤング係数および割裂強度の関係を示す。各図(b)は既往の研究で報告された試験結果^{4)~24)}もあわせてプロットしたものである。これらの図より以下のことがわかった。

(1) 本研究のヤング係数には、コンプレッソメーターによる値とひずみゲージによる値を区別して示した。ひずみゲージより求めたヤング係数が若干小さくなったが有意な差ではないと思われる。

(2) 図-2 中には、日本建築学会 1999 年版 RC 規準に示されたヤング係数の計算式を示す。ばらつきはあるが、低強度コンクリートにおいても、上記計算式によりヤング係数をほぼ推定できるものと思われる。

(3) 後述するように、文献^{2), 3)}では、圧縮強度 σ_B が 13.5 N/mm^2 以上のコンクリートの割裂強度 σ_t を(1)式で計算している。

$$\sigma_t = 0.38\sqrt{\sigma_B} \quad (1)$$

(1)式は、 σ_B が 13.5 N/mm^2 以上の場合は平均的な値を示すが、 13.5 N/mm^2 未満の場合は危険側になる可能性が高い。そこで、低強度コンクリートの割裂強度は、図中に示す原点と $\sigma_B = 13.5 \text{ N/mm}^2$ の点を結ぶ直線式で表わす方が良いと思われる (このことは 4.2 節に関係する)。

3. 柱の中心圧縮実験

低強度コンクリート柱の圧縮耐力およびせん断耐力等を増大させるために、増打ちして柱断面を大きくする耐震補強工法がよく行われる。ここでは、増打された柱の中心圧縮耐力および破壊性状を検討するために行った実験結果について述べる。

3.1 実験計画

表-2 に試験体の一覧を、図-4 に試験体の形状およ

表-2 試験体一覧 (柱の中心圧縮実験)

試験体	既存柱の諸元	増打ち後の柱断面	増打ち部	
			厚さ (mm)	帯筋
C9-0	断面: $300 \times 300 \text{ mm}$ 主筋: 12-D10 主筋比 $P_g = 0.95\%$ 帯筋: 2-D6@100 帯筋比 $P_w = 0.21\%$	—	なし	なし
C9-5-4		$400 \times 400 \text{ mm}$	50mm	2-D6@40
C9-5-8		$400 \times 400 \text{ mm}$	50mm	2-D6@80
C9-10-8		$500 \times 500 \text{ mm}$	100mm	2-D6@80

表-3 鉄筋の材料試験結果 (中心圧縮実験)

種類	部位	降伏点強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
D10	柱主筋	341	185700
D6	帯筋	336	185900

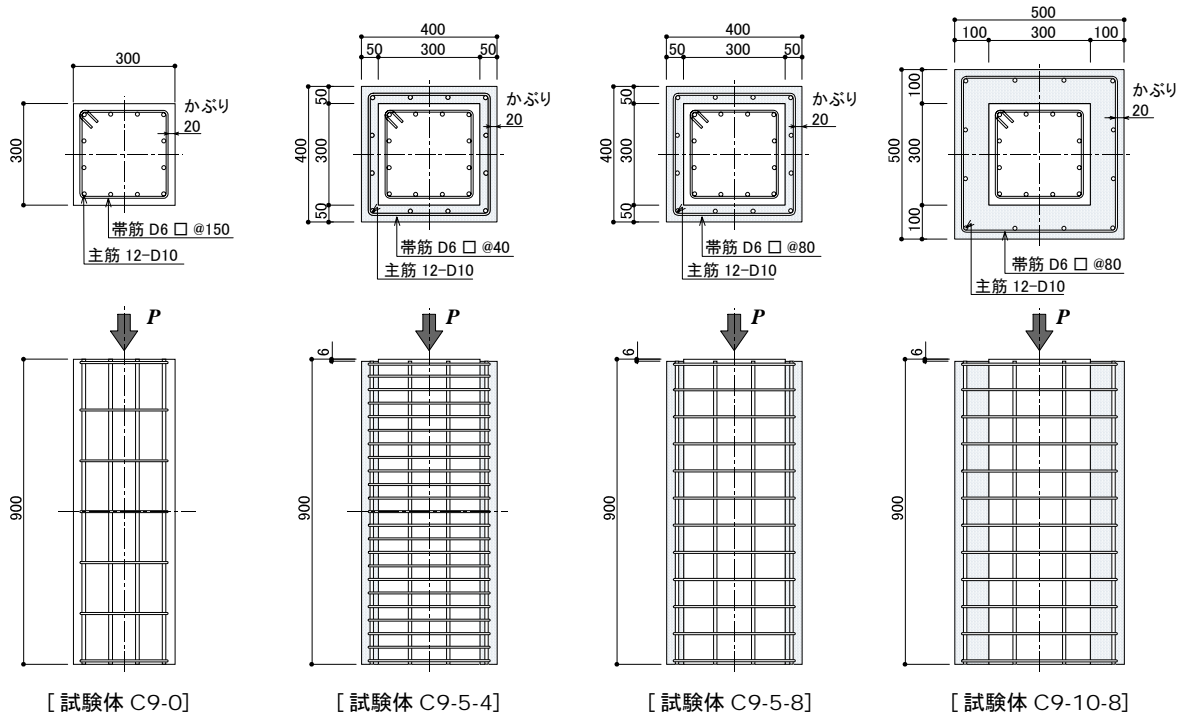


図-4 試験体の形状および配筋（中心圧縮実験）（単位；mm）

び配筋を示す。試験体は4体で、試験体 C9-0 は増打ちの無い既存柱であり、断面は 300mm×300mm である。これに対して、試験体 C9-5-4 および C9-5-8 は増打ちして断面を 400mm×400mm、試験体 C9-10-8 は 500mm×500mm とした。試験体 C9-5-4 と C9-5-8 では、増打ち部の帯筋量を変えた。

既存柱の上と増打ち部の上には 6mm の段差を設け、初期の加力時に増打ち部には圧縮力が直接作用しないようにした。既存柱の表面は合板型枠面とした。

既存部コンクリートの圧縮強度 σ_B は、表-1 に示す。増打ち部にはプレミックスタイプの無収縮モルタルを打設し、実験時の圧縮強度は 50.1 N/mm^2 、ヤング係数は 22170 N/mm^2 であった（実験開始日から終了日の3回の試験結果の平均値）。

加力は一方向の繰り返し加力とし、最終破壊までに数回除荷し、ひび割れを観察した。

3.2 実験結果

図-5 に荷重-変位曲線の包絡線を示す。縦軸は圧縮荷重 P (kN) を、横軸は既存柱全長に対する鉛直変位 D_v (mm) を示し、図中には下式で求めた既存柱および増打ち柱の中心圧縮耐力の計算値 P_u を示す。

$$P_u = A_{c1} \cdot \sigma_{B1} + A_{r1} \cdot \sigma_{y1} + A_{c2} \cdot \sigma_{B2} + A_{r2} \cdot \sigma_{y2} \quad (2)$$

ここで、

A_{c1} , A_{c2} : それぞれ既存部および増打ち部のコンクリート断面積 (mm^2)。主筋の断面積を除いた。

A_{r1} , A_{r2} : 既存部および増打ち部の主筋断面積 (mm^2)

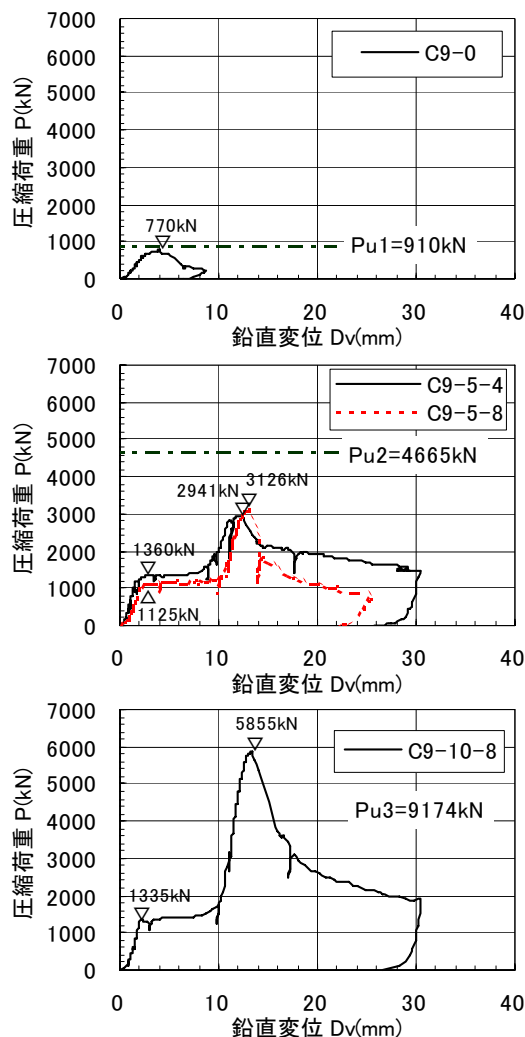


図-5 荷重-変位曲線の包絡線（中心圧縮実験）

σ_{B1} , σ_{B2} : 既存部コンクリートの圧縮強度および増打ち部モルタルの圧縮強度 (N/mm^2)

σ_{y1} , σ_{y2} : 既存部および増打ち部の主筋の降伏点強度 (N/mm^2)

写真-1 に最終破壊状況の一例を示す。試験体 C9-0(増打ちなし) は、圧縮荷重 $P=770\text{ kN}$, 鉛直変位 $Dv=4.0\text{ mm}$ で高さ中央付近にひび割れが発生し、最終的に中央部から下部において圧縮破壊した。これに対して、増打ちした試験体はいずれも、 $Dv=6\text{ mm}$ より小さい鉛直変位の時に、柱上部に鉛直方向の割裂ひび割れが発生した。これは試験体上部の突出した既存柱部分が圧壊に伴って横方向に膨張したために生じたものである。その後、鉛直方向のひび割れが試験体全面(増打ち部)に進展した。

荷重-変位曲線によると、増打ちした試験体は、 $P=1000\sim 1400\text{ kN}$ 付近で圧縮荷重が増大しない降伏現象がみられた。これは、突出した既存柱部分が圧壊している段階であり、この時の圧縮荷重は増打ち部の帯筋が多いほど、また増打ち厚さが大きいほど大きくなった。

その後、 $Dv=7\text{ mm}$ 付近から、圧縮力が直接増打ち部に作用したため、圧縮荷重が再び増大した。しかしながら、最大圧縮荷重は、(2)式による圧縮耐力の計算値には達せずに荷重低下した。これは、初期の段階で増設部の上部に割裂ひび割れが生じたためであると思われる。



試験体 C9-0 (増打ちなし) 試験体 C9-5-4 (50mm)
写真-1 最終破壊状況 (中心圧縮実験)

既存の梁あるいは柱

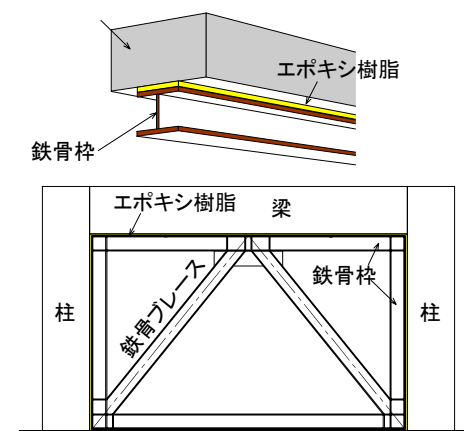


図-6 鉄骨プレース接着工法

4. 接着接合部の一面せん断実験

図-6 に示す鉄骨プレース接着工法^{2), 3)}では、既存コンクリート躯体と鉄骨プレースの接着接合部のせん断すべり耐力(ここでは接着耐力とも略す)を鉄骨プレースのせん断耐力より大きくして鉄骨プレースの降伏を先行させるため、低強度コンクリートに対してもせん断すべり耐力を把握しておく必要がある。そこで、接着接合部の一面せん断実験を行った結果について報告する。

4.1 実験計画

表-4 に試験体の一覧を示す。試験体は 8 体で、コンクリート強度およびエポキシ樹脂の厚さを実験変数とした。表に示すように、エポキシ樹脂の厚さ 50mm の試験体では、硬化発熱を抑えるために粗骨材を入れてエポキシ樹脂を注入した試験体およびエポキシ樹脂モルタルを注入した試験体を計画した。

試験体は、写真-2 中に示すように、L 字形のコンクリート部材に鋼板 (PL-22) をエポキシ樹脂を用いて接着接合した。コンクリートの材料強度は表-1 に示す。

写真-2 に加力状況を示す。接着接合した鋼板を鉄骨治具にボルト接合して試験体を設置し、コンクリート側の接着接合面レベル高さにせん断力を載荷した。なお、加力時に試験体を安定させるために、 $N=0.05\sigma_B \cdot A_{ja}$ (A_{ja} : 接着接合部の面積, $200\text{ mm} \times 400\text{ mm}$) の圧縮力

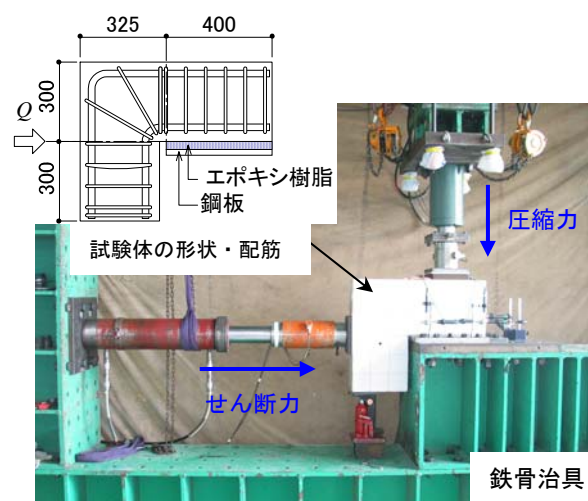


写真-2 加力状況 (接着接合部の一面せん断実験)

を接着接合部に載荷した。

4.2 実験結果

写真-3 に試験体 S09-25 の最終破壊状況を示す。いずれの試験体も、写真のようにエポキシ樹脂とコンクリートの接着面ではなく、若干コンクリート内部に入った面でせん断すべり破壊を生じ (コンクリートの凝集破壊)、鋼板にコンクリートがくっついた状態で破壊した。

表-4 試験体一覧（接着接合部の一面せん断実験）

試験体	コンクリートの設計基準強度 Fc (N/mm ²)	接着厚さ (エポキシ樹脂の厚さ)	コンクリートの圧縮強度 σ _B (N/mm ²)	载荷 ³⁾ 圧縮力 N (kN)	接着耐力 の計算値 Qja (kN)	せん断すべり耐力(接着耐力)		
						実験値 Qmax (kN)	計算値 ⁴⁾ Qu (kN)	実/計
S09-05	9	5 mm	7.34	29.0	60.7	137	90	1.53
S09-25		25 mm				125		
S09-50		50 mm ¹⁾				144		
S13-25	13.5	25 mm	16.49	65.8	123.4	198	189	1.05
S13-50		50 mm ¹⁾				262		
S13-50K		50 mm ²⁾				267		
S21-25	21	25 mm	27.14	107.4	158.4	341	266	1.28
S21-50S		50 mm ²⁾				357		

- 1) 硬化発熱を抑えるため、粗骨材をプレバクトした後に、エポキシ樹脂を注入した
 2) S社およびK社のエポキシ樹脂モルタルを使用した
 3) $N=0.05\sigma_B \cdot A_{ja}$ (A_{ja} : 接着面積)
 4) $Q_u=Q_{ja} + \mu \cdot N$ ($\mu=1.0$)

そこで、接着接合部のせん断すべり強度 τ_{ja} は、コンクリートのせん断強度（本工法では割裂強度 σ_t と同等としている）で表わされ、コンクリートのせん断強度は圧縮強度 σ_B の関数で表わされるとして、(1)式で求めるものとしている^{2), 3)}。しかしながら、 $\sigma_B=13.5\text{N/mm}^2$ 以下の低強度コンクリートの割裂強度は、図-3 に示す直線で表わす方が安全側の評価となるため、せん断すべり強度に関してもこれを踏襲することにし、(3)式、(4)式を提案した。ここで、 Q_{ja} は接着接合部の接着力によるせん断すべり耐力である。

$$\sigma_B < 13.5\text{N/mm}^2 \text{ の時}$$

$$Q_{ja} = \frac{0.38\sqrt{13.5}}{13.5} \cdot \sigma_B \cdot A_{ja} \quad (3)$$

$$\sigma_B \geq 13.5\text{N/mm}^2 \text{ の時}$$

$$Q_{ja} = 0.38\sqrt{\sigma_B} \cdot A_{ja} \quad (4)$$

ここで、 A_{ja} : 接着接合部の面積 (mm²)
 σ_B : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

表-4 に最大せん断すべり耐力の実験値 Q_{max} と計算値 Q_u を、また図-7 にコンクリートの圧縮強度 σ_B と最大せん断すべり強度 τ_{max} の関係を、図-8 に実験値と計算値を比較して示す。なお、図-7 に示すせん断すべり強度 τ_{max} は、実験で载荷した圧縮力の影響を除くため、表-4 の脚注 4) に示すように、圧縮力によるせん断耐力の増分を $Q_n = \mu \cdot N$ ($\mu=1.0$) として引いて求めた。

計算の結果、せん断すべり耐力の計算値に対する実験値の比（実/計）は 1.05~1.60 となり、図-7 に示すようにコンクリートの圧縮強度にかかわらず同程度の安全率をもって計算できることがわかった。

5. まとめ

低強度コンクリートの材料特性を検討した後、増打ち



写真-3 最終破壊状況（試験体 S09-25）

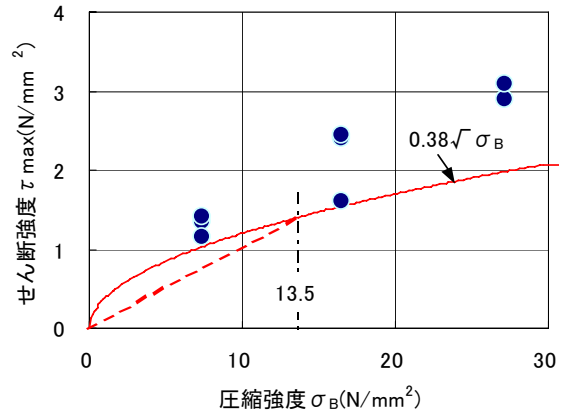


図-7 コンクリート圧縮強度とせん断強度の関係

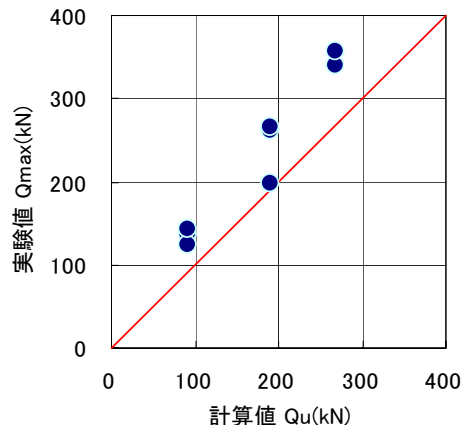


図-8 せん断すべり耐力の実験値と計算値の比較

柱の中心圧縮実験および接着接合部の一面せん断実験を行った結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 増打ちして断面を大きくした RC 柱の中心圧縮実験により、増打ち柱の圧縮耐力は既存柱より増大することがわかった。しかしながら、増打ち部の上面が既存柱の上面より低く、既存柱のみに圧縮力が作用した場合は、既存部と増打ち部の圧縮耐力を単純累加した耐力(2式)は発揮されないことがある。
- (2) エポキシ樹脂を用いて低強度コンクリートと鋼板を接着接合した接合部の一面せん断実験により、低強度コンクリートに対するせん断すべり耐力が得られ、せん断すべり耐力 Q_{ja} を安全側に与える(3)式、(4)式を提案した。

謝辞

本研究の実施に際して、ショーボンド建設(株)、(株)東邦アーステックおよびボンドエンジニアリング(株)のご協力を得た。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) (財)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診断基準・同解説,2001.10
- 2) 毛井崇博,宮内靖昌:接着接合された鉄骨ブレース補強骨組の力学性状,日本建築学会構造系論文集,第539号,pp.103-109,2001.1
- 3) 宮内靖昌,毛井崇博:エポキシ樹脂を用いた接着接合部の力学性状に関する研究,JCI年次論文集,Vol.23, No.1, pp.967-972,2001.7
- 4) 畑一男,福田幹夫,窪田敏行ほか:コンクリート強度の低いRC柱のせん断補強に関する実験的研究,日本建築学会大会,構造C-2,pp.15-16,1999.9
- 5) 市橋重勝,山本泰稔,秋山友昭,片桐太一,ジムトムブソン:低強度コンクリートに装着した接着系あと施工アンカー筋の挙動に関する実験的研究,日本建築学会大会,構造C-2,pp.397-408,2000.9
- 6) 山本泰稔,秋山友昭ほか:鋼板内蔵型外付け補強工法による既存低強度コンクリート造架構の補強実験,日本建築学会大会,構造C-2,pp.571-572,2005.9
- 7) 永坂具也,大川善丈:コンクリートが特に低強度な場合のRC柱のアラミド繊維テープによる巻き付け補強,日本建築学会大会,構造C-2,pp.375-376,2006.9
- 8) 根口百世,藤原頭太郎,南宏一:低強度コンクリートを用いた丸鋼を主筋とするRC柱のせん断破壊性状,JCI年次論文集,Vol.29, No.3, pp.157-162,2007.7
- 9) 八十島章,谷口博亮,荒木秀夫:低強度コンクリートを用いたRC部材の耐震性能,JCI年次論文集,Vol.29, No.3, pp.931-936,2007.7
- 10) 雨宮牧子,増田安彦,田才晃,楠浩一:付着割裂破壊を伴う低強度コンクリートRC柱の炭素繊維シートによる補強効果に関する実験的研究,JCI年次論文集,Vol.29, No.3, pp.1129-1134,2007.7
- 11) 帆足勇磨,増田安彦,田才晃,楠浩一:高軸力下における低強度コンクリートRC柱の炭素繊維シートによる補強効果に関する実験的研究,JCI年次論文集,Vol.29, No.3, pp.1231-1236,2007.7
- 12) 宮内靖昌,毛井崇博:鉄骨ブレース接着工法により耐震補強されたRC骨組の面外加力性状,JCI年次論文集,Vol.29, No.3, pp.1153-1158,2007.7
- 13) 村上恵都子,増田安彦,田才晃,楠浩一:低強度コンクリートRC造柱の破壊性状に関する実験的研究,JCI年次論文集,Vol.30, No.3, pp.211-216,2008.7
- 14) 八十島章,谷口博亮,伊東康貴,荒木秀夫:低強度コンクリートを用いたRC柱の中心圧縮性状,JCI年次論文集,Vol.30, No.3, pp.241-246,2008.7
- 15) 谷口博亮,八十島章,荒木秀夫:低強度コンクリートRC梁の耐力評価に関する実験的研究,JCI年次論文集,Vol.30, No.3, pp.265-270,2008.7
- 16) 根口百世,川上裕佳,南宏一ほか:10N/mm²級の低強度コンクリートを用いたRC柱のせん断破壊性状,JCI年次論文集,Vol.30, No.3, pp.1129-1134,2008.7
- 17) 池谷純一ほか:低強度コンクリートからなる袖壁付き柱の炭素繊維シートによる耐震補強に関する研究,JCI年次論文集,Vol.30, No.3, pp.1147-1152,2008.7
- 18) 帆足勇磨ほか:低強度コンクリートRC造柱の炭素繊維シート補強による靱性能に関する実験的研究,JCI年次論文集,Vol.30, No.3, pp.1243-1248,2008.7
- 19) 森田真由美ほか:低強度鉄筋コンクリート建物に対する圧着型外側耐震補強に関する基礎研究,JCI年次論文集,Vol.30, No.3, pp.1249-1254,2008.7
- 20) 立花弘ほか:接着系あと施工アンカーを用いる低強度RC建物の外側耐震補強に関する実験的研究,JCI年次論文集,Vol.30, No.3, pp.1255-1260,2008.7
- 21) 岸田幸治,田村雄一,畑中重光ほか:低強度コンクリートで造られたRC建築物の耐震診断に関する研究,JCI年次論文集,Vol.30, No.3, pp.1291-1296,2008.7
- 22) 栗田康平ほか:低強度躯体に適用したプレキャストブロック耐震壁のせん断耐力性状に関する実験的研究,JCI年次論文集,Vol.30, No.3, pp.1597-1602,2008.7
- 23) 土井裕貴,板倉裕章,内海洋志,佐藤立美:低強度コンクリートのせん断強度に関する研究,日本建築学会大会,構造C-2,pp.21-24,2008.9
- 24) 小平涉,神谷隆ほか:鋼板内蔵型外付け補強工法による既存低強度コンクリート造架構の補強実験(その6),日本建築学会大会,構造C-2,pp.33-36,2008.9