

論文 打込型枠と炭素繊維シートによる柱の耐震補強に関する 実験的研究

市川 昌和^{*1}・石渡 康弘^{*1}・中根 博^{*2}・宮尾 巻治^{*3}

要旨：本論文では、主に鉄筋コンクリート造柱を対象とした、短工期で施工可能な耐震補強法を開発することを目的として行った載荷実験の結果および考察について述べたものである。載荷実験により、外周の型枠システムの影響、主筋種別（異形、丸鋼）、主筋量等が柱の構造性能に及ぼす影響を把握した。結果の検討にあたり、既報で報告した補強された試験体5体の結果も含めて、せん断強度、付着強度および変形能について検討を行った。その結果、シート直巻きした試験体と同等の強度および変形能を有していること、および各強度は安全側に評価できることを確認した。

キーワード：耐震補強，打込型枠，炭素繊維シート，鉄筋コンクリート造柱

1. はじめに

筆者らはガラス繊維で補強された、高強度のモルタル成形板（以下、GFRC）と炭素繊維シート（以下、シート）を用いて、短工期で施工できる柱の耐震補強工法を提案し、その結果について報告した¹⁾。本工法は、図 - 1 に示すように、コ型に成型した型枠の内面にシートを貼り付け、現場ではシートの継手部のみを接着後、既存柱との隙間にグラウトを注入し一体化させ、柱のせん断強度等を高め、変形能を向上させる工法である。一方、型枠システムのより合理化

を図るために、GFRC型枠ではなく、厚さ13mmの軽量な打込型枠を用いることを考えた。この打込型枠はフライアッシュと軽量コンクリートで形成され、内部はガラス繊維で補強されている。比重は1.05、曲げ強度は約14.7N/mm²で、不燃材料となっている。

本論文では、打込型枠と炭素繊維シートにより補強された柱について、静的載荷実験を行い、前報で報告した試験体の結果も含めて、諸強度および変形能について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体および使用材料

表 - 1 に試験体の諸元を一覧にして示す。図 - 2 に試験体の配筋例を示す。各試験体とも、試験体の断面寸法は50×50cm、内法高さは150cmとした。実験因子は、シートの層数、コンクリート強度、主筋径、主筋の形状（異形、丸鋼）である。平板の打込型枠をL型にプラスチック製の面木を用いて組立て、内面にシートを貼り付けている。シートの継手は加力方向の影

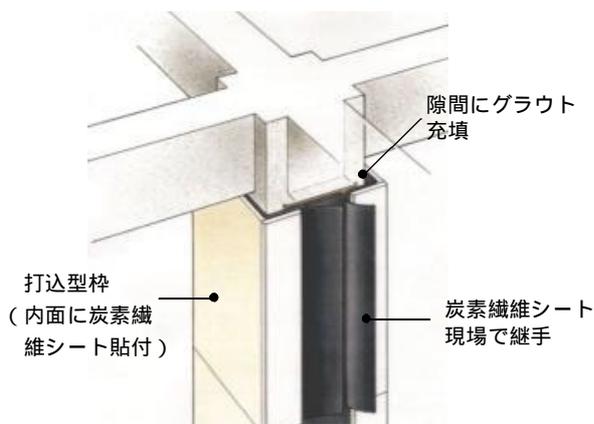


図 - 1 工法概要

*1 鉄建建設(株) 技術研究所 (正会員)

*2 大木建設(株) 技術研究所

*3 日鉄コンポジット(株) コンポジット部

表 - 1 試験体一覧

No	断面	主筋	p_g (%)	シート 層数	$p_{w(CF)}$ (%)	N/mm^2 (N/mm^2)
No.10		12-D22	1.86	1層	0.06	36.0
No.11				2層	0.12	36.0
No.12				1層	0.06	25.7
No.13	継手	12-D29	3.08	1層	0.06	35.8
No.14	両方向	12- 22	1.82	1層	0.06	35.8
No.2	直巻き	12-D22	1.86	1層	0.07	27.0
No.3				2層	0.13	27.9
No.4		12-D22	1.86	2層	0.12	29.6
No.5				3層	0.18	29.9
No.6				4層	0.24	29.3

【共通事項】

- ・ $b \times D = 50 \times 50$ (cm), $h_o = 150$ (cm), 帯筋 D10@200, 軸力比 0.2
- ・ No.10 ~ No.15は打込型枠, No.4 ~ No.6はGFRC型枠
- ・ No.2 ~ No.6については既報1)で報告

表 - 2 鉄筋引張試験結果

鉄筋	降伏強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (kN/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	伸び量 (%)	備考
D22	385	200	587	24.5	No.10 ~ 14
22	302	206	453	42.8	
D29	375	201	572	33.2	
D10	363	188	495	18.5	

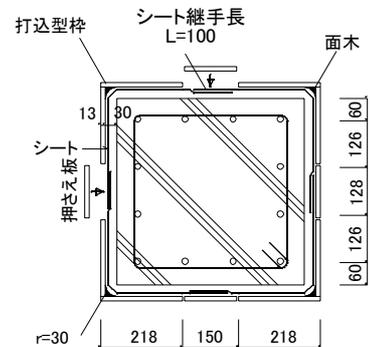
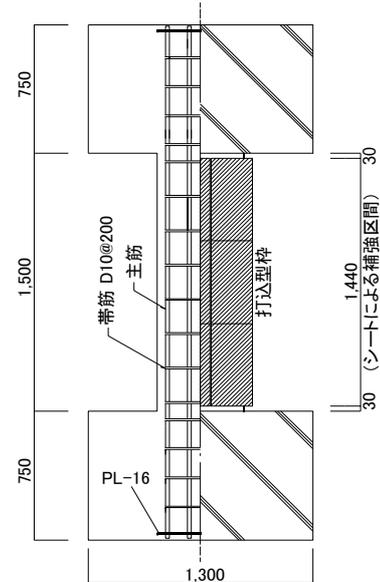


図 - 2 試験体配筋図

響をなくすため両方向に設け、継手長はすべて100mmとした。既存柱の隙間30mmにはグラウトを注入して一体化している。また、グラウトが曲げ強度に影響を与えないように、柱の上下に30mmのスリットを設けた。なお、表 - 1には比較のために前報1)で報告した試験体も合わせて示している。No.10とNo.11については、外周の型枠システムを変えたことによる影響を把握するための試験体である。No.12についてはコンクリート強度を他の試験体と比較して低くし、コンクリート強度の影響を把握する。No.13は主筋にD29を用い主筋量を多くし、せん断強度を把握するための試験体であり、No.14は主筋に丸鋼を用い、主筋形状の影響を把握する。

コンクリートはすべて普通コンクリートとした。実験時における各試験体のコンクリートの圧縮強度を表 - 1に示す。当初、No.12は $F_c 18N/mm^2$ を、

他の試験体は $F_c 27N/mm^2$ を目標としたが、かなり高い圧縮強度を示す結果となった。実験時におけるグラウトの圧縮強度は50.4 ~ 57.6 N/mm^2 の値を示した。表 - 2に使用した鉄筋の力学的特性を一覧にして示す。また、シートには規格引張強度3400 N/mm^2 で、目付量300 g/m^2 のものを用いた。

2.2 加力方法および計測方法

加力は既報1)と同じ建研方式により行った。加力サイクルは $R = \pm 1/400$ を1回、 $R = \pm 1/200$, $\pm 1/100$, $\pm 1/67$, $\pm 1/50$, $\pm 1/33$ を2回、 $R = \pm 1/25$ を1回繰り返した後、最後に押し切りを標準としたが、著しい耐力低下が生じた場合はその時点で加力を終了した。

計測は、荷重をロードセルにより測定し、層間変形、軸変形等を変位計で、シートおよび鉄筋の歪を歪ゲージにより測定した。

3. 実験結果

3.1 実験経過

図 - 3にNo.10～No.14の荷重 - 変位関係を、写真 - 1に最終状況の一例としてNo.10の結果を示す。以下、各試験体の実験経過について述べる。

シート層数が1層のNo.10, 2層のNo.11とシートの層数が増すに従い、変形能が向上しているが、最終的に、No.10では $R = -1/33$ の加力中に、No.11では最後の押し切りで、コーナー部付近でシートが破断し、急激な耐力低下を起こした。それに対し、コンクリート強度が低いNo.12は、同じシート補強量のNo.10と比較して実験値は小さくなっているが、変形能はよい結果を示している。主筋にD29を用い、せん断破壊型としたNo.13ではほぼ曲げ強度時せん断力の計算値に達すると同時にコーナー部のシートが破断し、急激な耐力低下がみられた。本試験体は、せん断破壊型の破壊モードを示したと思われる。主筋に丸鋼を用いた試験体は、全般的にスリップ状の履歴を示したが、本シリーズの中で最も安定した荷重 - 変位関係を示した。前シリーズと比較して本シリーズはコンクリート強度が高いため、本シリーズでは全般的にやや脆性的な破壊モードを示したと思われる。

3.2 シートの歪

図 - 4に最大耐力時および限界変形時における各試験体のシートの最大歪を示す。横軸はシート補強量とし、No.2～No.6の結果も含めている。なお、限界変形とは荷重変位曲線の包絡線で耐力が最大耐力の80%に低下した時の変形と定義した。

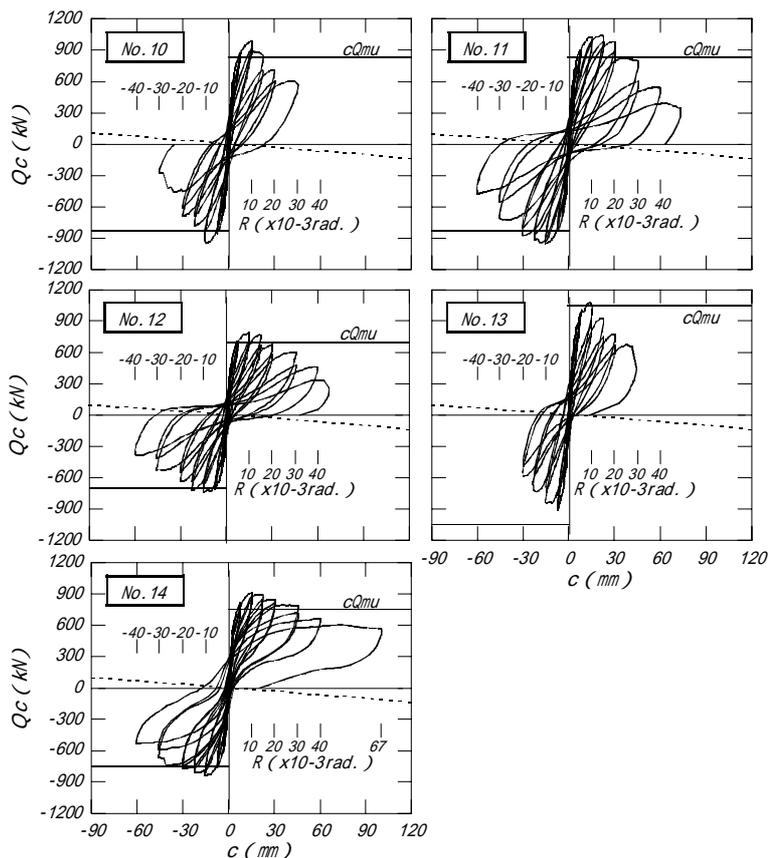


図 - 3 荷重 - 変位関係



写真 - 1 No.10最終破壊状況

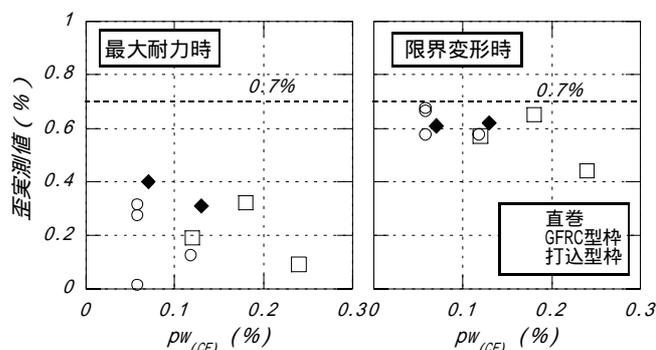


図 - 4 シートの最大歪

図 - 4より、工法および型枠システムの違いによらず、最大耐力時では全般的にシートの歪は小さく、限界変形時で大きな歪を示しており、最大歪は0.7%程度となっている。以下、せん断強度の検討にあたっては、シートの有効歪を0.7%、すなわちシートの有効設計強度を $1600\text{N}/\text{mm}^2$ として、せん断強度の検討を行う。

4. 実験結果の検討

4.1 工法の違いによる影響

図 - 5にシートを直巻きしたNo.2(1層補強)とNo.3(2層補強)および本工法で補強した試験体No.12とNo.11の荷重 - 変位関係を比較し、工法の違いによる影響を検討する。検討にあたり、No.3とNo.11ではコンクリート強度が大きく異なることを考慮して、曲げ強度時せん断力の計算値で実験値を除し、無次元化して比較を行う。

シート層数が1層、2層の場合も、最後の押し切り以外では概ね同じような履歴を示していることから、本工法はシート直巻きとほぼ同じ性能を有していると思われる。

4.2 型枠システムの違いによる影響

図 - 6に型枠システムを変えたNo.4(GFRC型枠)とNo.11(打込型枠)の荷重 - 変位関係を比較して示す。シートを直巻きした場合と同様に、打込型枠を用いたNo.11は $R=1/25$ までの履歴は同じ履歴を示したが、最後の押し切りで耐力低下がみられた。これは、GFRC型枠の場合、コ型に一体化して成型されているのに対し、打込型枠の場合、平板を接着剤等を用いて組立しているため、打込型枠のコーナー部の強度が小さいことによるとと思われる。

4.3 付着応力度の比較

表 - 1に示した試験体のうち、付着破壊型と判断される試験体の柱主筋に生じた付着応力度を検討する。主筋に生じた付着応力度は図 - 7に示した中央に貼付した3点の歪ゲージより、付着応力度を求めた。各サイクルピーク時における各試験体の付着応力度の履歴を図 - 8に示す。主筋が異形鉄筋の場合、付着応力度の計算

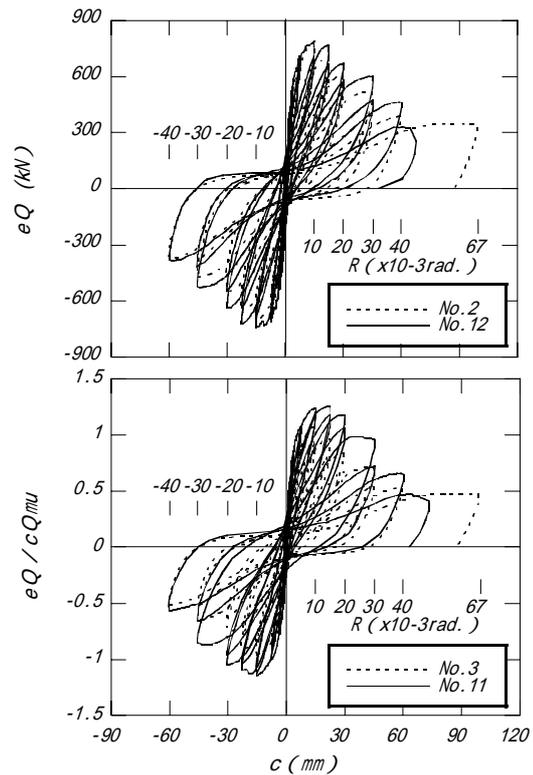


図 - 5 荷重 - 変位関係の比較 (シート直巻工法との比較)

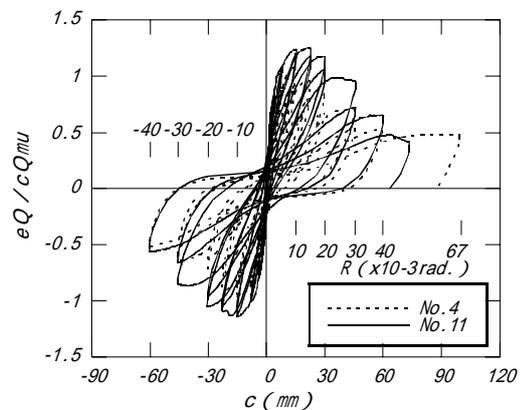


図 - 6 荷重 - 変位関係の比較 (型枠システムの比較)

値 f_{bu} は文献3)に準拠して求めた。累加せん断補強量 p_w を求める際、シートのヤング係数は規格値($2300\text{N}/\text{mm}^2$)を、帯筋は材料試験結果の値を用いた。文献3)によると、帯筋とシートのせん断補強量を累加する場合、シートのせん断補強量に乗じる係数として3.0倍を上限として、補強量に応じて低減することとしている。一方、主筋が丸鋼の場合はRC規準⁴⁾に示された短期許容応力度を付着応力度 f_{bu} とした。

主筋が異形鉄筋の場合、付着破壊型と考えら

れる試験体は，工法の相違に係わらず，文献3)により求めた付着応力度計算値付近で実験値は頭打ちとなり，低下していることがわかる。また，主筋が丸鋼のNo.14については，ややばらつきがみられるが，短期許容応力度付近で実験値が頭打ちとなっている。

4.4 実験値と計算値の比較

表 - 3に実験値と計算値を一覧にして示す。図 - 9にせん断強度の実験値と計算値の比較を，図 - 10に付着強度の実験値と計算値の比較をそれぞれ示す。検討にあたり，縦軸は最大耐力の実験値を曲げ強度時せん断力の計算値で除し，横軸は各強度の計算値を曲げ強度時せん断力の計算値で除して検討している。

図 - 9よりシートの有効強度を1600N/mm²として求めたせん断強度の計算値は主筋の種別に係わらず，安全側に評価されていること，および本工法で補強された柱の実験値は直巻き補強した試験体より全般的に高いことがわかる。本工法による試験体の実験値がやや高い理由として，柱周辺に注入したグラウトの効果による思われる。また，図 - 10より，シート補強効果を文献3)に準拠した累加せん断補強量により求めた付着強度は工法の違いに係わらず，安全側に評価されている。

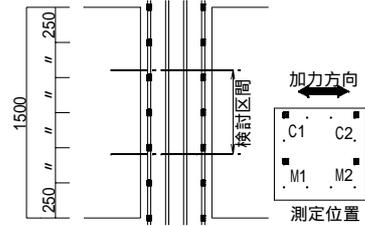


図 - 7 主筋の歪測定位置

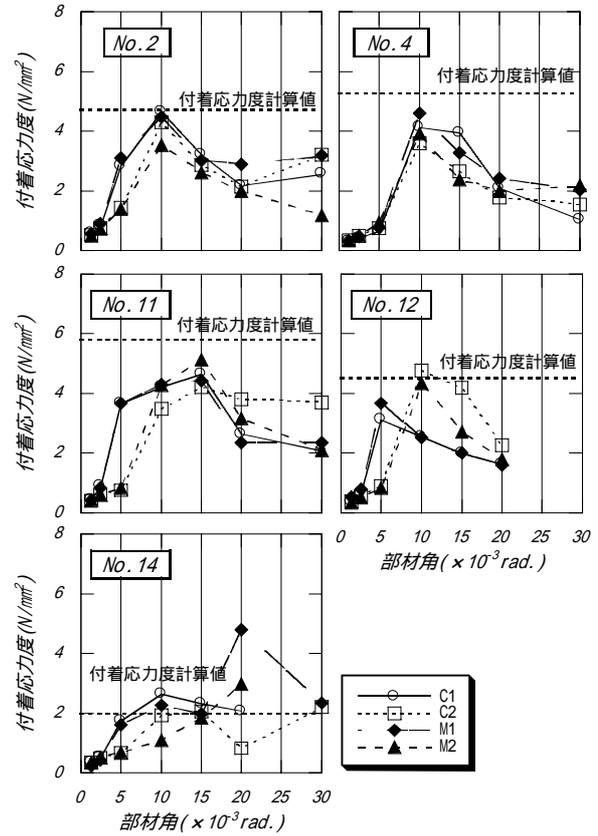


図 - 8 主筋の付着応力度の比較

表 - 3 実験値と計算値の比較

No	実験値				計算値			破壊モード
	eQmax (kN)	eRmax (×10 ³ rad.)	限界変形角 (×10 ³ rad.)	塑性率 eμ	cQmu (kN)	cQsu (kN)	cQbu (kN)	
No.10	+ 986 - 952	+ 10.0 - 10.0	17.5	2.63	833	787	827	F CF,B
No.11	+1045 - 943	+ 14.2 - 12.1	28.6	4.29	833	1052	865	F CF,B
No.12	+ 787 - 742	+ 10.0 - 9.9	26.0	3.90	695	706	676	F CF,B
No.13	+1085 - 910	+ 9.2 - 5.0	16.7	2.50	1047	785	821	S,CF
No.14	+ 911 - 839	+ 10.2 - 10.1	35.3	5.30	749	785	540	F B

注)・破壊モード F 主筋降伏、CF CFシート破断、S せん断破断、B 付着割裂破断

- ・塑性率：限界変形角 / (1/150)
- ・cQmu：曲げ強度時せん断力 $cQmu = Mu / ho$ 、Mu 多段配筋式²⁾
- ・cQsu：せん断強度 A法³⁾、pw・wyを求める際、帯筋量とシート量を累加。 $wy_{(CF)} = 1600(N/mm^2)$ として算出
- ・cQbu：付着強度 A法³⁾、主筋が異形鉄筋の場合 stを求める際、 $pw = pw_{(HOOP)} + (Ea/Ec) \cdot pw_{(CF)}$
ここに、pw_(HOOP) 帯筋量、pw_(CF) シート量。主筋が丸鋼の場合 buはRC規準³⁾の短期許容応力度

cQ_{su}/cQ_{mu} と靱性能の関係について検討する。図 - 11に cQ_{su}/cQ_{mu} と塑性率実験値の関係を示す。塑性率は文献6)に準じ、限界変形角を降伏部材角 ($R_y=1/150rad.$)で除して求めた。また、塑性率計算値は文献2)に示された式により求め、図中に示した。

図 - 11より、工法の相違、主筋の形状に係わらず、塑性率の実験値は計算値に対して比較的よい対応を示していることがわかる。

5. まとめ

- (1) 型枠システムを変更したことによる影響はみられず、本工法はシート直巻き工法と比較して同等程度の変形性能が確保できる。
- (2) シートに生じた最大歪は限界変形時に0.7%程度であり、これをシートの有効設計強度として求めたせん断強度計算値は、工法の相違および主筋の形状に係わらず、実験値に対して安全側な評価となっている。また、せん断余裕度で評価した塑性率計算値は実験値に対して安全側の評価となっている。
- (3) 文献3)に準拠して求めた付着応力度は実験値に対して概ねよい対応を示した。

【謝辞】本研究は、新日本製鉄(株)、岡部ストラクト(株)との共同研究です。実験にあたり、東京理科大学の松崎育弘教授、中野克彦氏に、ご指導・ご助言を頂きました。ここに謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 石渡康弘，市川昌和ほか：GFRCと炭素繊維シートによる柱の耐震補強に関する実験的研究状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.3，pp.1405～1410，1999
- 2) 連続繊維補強材を用いた既存鉄筋コンクリート及び鉄骨鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計・施工指針，日本建築防災協会，pp.42,49，1999.11
- 3) 連続繊維補強コンクリート系構造設計施工

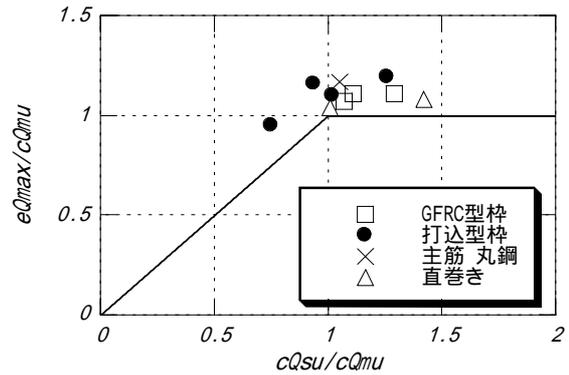


図 - 9 せん断強度の実験値と計算値の比較

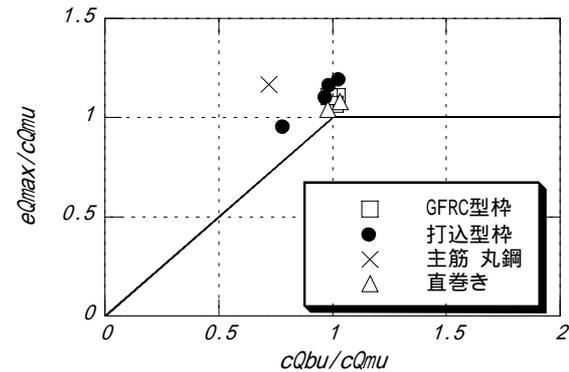


図 - 10 付着強度の実験値と計算値の比較

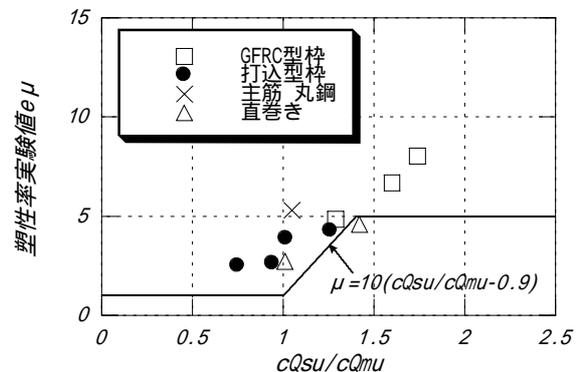


図 - 11 塑性率実験値の比較

指針案，日本建築学会，pp.292～294,2001

- 4) 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，日本建築学会，pp.48，1991
- 5) 鉄筋コンクリート造建築物の終局強度型耐震設計指針・同解説，日本建築学会，pp.106 1990
- 6) 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準同解説，日本建築防災協会，pp.93～105，1990.12