

論文 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

宮内 靖昌\*1・毛井 崇博\*1

**要旨:** 既存建物の耐震補強において、騒音・振動・粉塵等の発生源になるあと施工のアンカーボルト工事をなくすために、既存コンクリートと増設部材の接合にエポキシ樹脂を用いた接着接合が採用されている。本論では、接着接合に用いるエポキシ樹脂およびエポキシ樹脂モルタルの圧縮性状、クリープ性状および硬化時の発熱性状について検討し、接着接合の採用に際しての注意事項を明らかにした。また、コンクリートと鉄骨の接着強度および接着接合部の一面せん断強度を実験により検討し、接着強度とコンクリート圧縮強度の関係を示した。

**キーワード:** 耐震補強, 接着接合部, エポキシ樹脂, せん断強度, 接着強度, クリープ

1. はじめに

既存建物の耐震補強において、工事中の騒音、振動、粉塵等の発生源になるあと施工のアンカーボルト工事をなくすために、近年、既存躯体コンクリートと補強用増設部材の接合にエポキシ樹脂を用いた接着接合が多用されつつある<sup>1)2)</sup>。図-1はRC柱梁骨組に鉄骨プレスを増設する補強法の既存躯体とプレース周囲の鉄骨枠との接合部を示したものである。従来工法では、あと施工のアンカーボルトおよびスタッドを設置した後、スパイラル筋を配筋し、無収縮モルタルを圧入する。これに対して、接着工法では、既存躯体と鉄骨枠の隙間(20mm程度)をシールした後、エポキシ樹脂を圧入するものである。

しかしながら、接着接合に用いられるエポキシ樹脂およびエポキシ樹脂モルタルの材料特性およびコンクリートと鉄骨との接着接合部の力学性状については不明な点がある。本論文ではこれらの点について検討した結果を報告する。

試験に用いたエポキシ樹脂は、K社の土木建築用低粘度形エポキシ樹脂(以下、エポキシと略す)、エポキシ樹脂モルタルは、K社のグラウトポンプによる注入施工が可能な樹脂モルタル(以下、樹脂モルと略す)である。また、比較検討用に用いた無収縮モルタルはO社のセメント系

無収縮グラウト材(以下、単にモルタルと略す)である。

2. 圧縮応力度-ひずみ関係

表-1に各材料の圧縮強度試験の結果を、図-2に圧縮応力度-ひずみ曲線の一例を示す。圧縮試験は、いずれの材料も直径50φ、高さ100mmの円柱試験片を用いて行った。

圧縮強度はいずれも70N/mm<sup>2</sup>程度でほぼ同じであった。しかしながら、ヤング係数は大きく異なり、エポキシ樹脂は無収縮モルタルの約1/10、樹脂モルタルは約1/2.5であった。

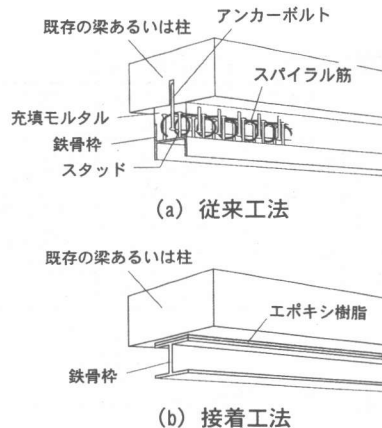


図-1 鉄骨プレースを用いた耐震補強法

\*1 (株)竹中工務店 技術研究所 主任研究員(正会員)

表-1 圧縮強度試験結果

種類	材令 (日)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 ( $\times 10^5$ N/mm <sup>2</sup> )	比重
エポキシ	20	69.5	2910	1.13
樹脂モル	20	74.7	10030	1.78
モルタル	33	69.2	27560	2.20

・いずれも3本の平均値，試験片は 50φ×100 mm  
 ・ヤング係数は，1/3強度時の割線剛性

3. 硬化時の発熱温度

コンクリートと鉄骨の隙間にエポキシ樹脂を充填して接着接合する場合，隙間が大きく樹脂使用量が多くなると，硬化時の発熱によりエポキシ樹脂の温度が上昇し，硬化後ひび割れが生じたり，所定の強度が発現されないことがある。

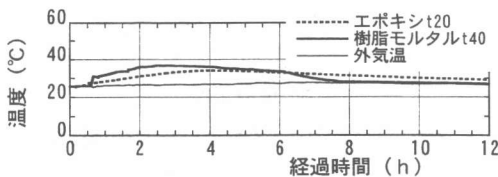
表-2 にエポキシ樹脂およびエポキシ樹脂モルタルの硬化時の発熱温度の試験一覧および発熱温度を，図-3 に発熱温度の推移状況を示す。なお，材料は表-1 に示すものであり，混練および計測は 2000 年 9 月に行った。

試験 A-1, A-2 は，後述する接着接合部の一面せん断実験の試験体製作時において，充填したエポキシ樹脂および樹脂モルタルの発熱温度を熱電対を用いて計測したものである。接着接合部の大きさは 300mm×600mm，エポキシ樹脂の厚さは 20mm(試験 A-1)，樹脂モルタルの厚さは 40mm(試験 A-2) である。

試験 B-1~B-4 は，上面を除く周囲を断熱した

表-2 発熱試験の一覧および発熱温度

試験	種類	大きさ (mm)	厚さ (mm)	最高発熱 温度(°C)	備考	
A-1	エポキシ	300×600	20	34.1	試験体No. 21	
A-2	樹脂モル		40	36.7		
B-1	エポキシ	230×230	20	117.9	鉄製の箱 (周囲に 断熱材を 設置)	
B-2			40	155.4		
B-3			樹脂モル	20		52.5
B-4			樹脂モル	40		87.2



(a) 試験 A

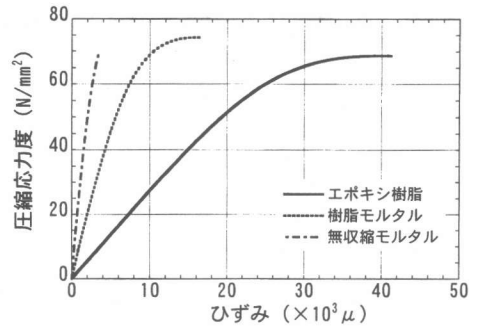


図-2 圧縮応力度-ひずみ曲線

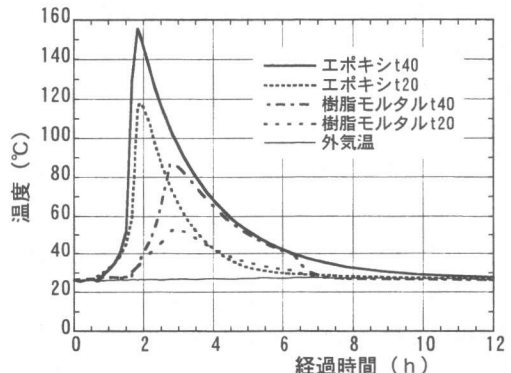
鋼製の箱にエポキシ樹脂および樹脂モルタルを所定の厚さに入れ，温度計測したものであり，試験 A と同時に行った。試験の結果，以下のことが明らかになった。

(1) 試験 A では，両材料とも温度上昇はゆるやかであった。最高発熱温度は，A-1 が 34.1°C，A-2 が 36.7°C であり，発熱温度は硬化後の材料特性に悪影響を与えていない。

(2) 試験 B では，温度の上昇が急激であり，エポキシ樹脂 B-2 (厚さ 40 mm) では最高発熱温度が 155.4°C に達し，黒く焼けた。

(3) 樹脂モルタル (厚さ 40 mm) の発熱温度は，エポキシ樹脂 (厚さ 20 mm) より小さい。

(4) 同一厚さでは，試験 A の発熱温度が，試験 B より小さい。試験 B では断熱により発熱温度の上昇が促進されたが，試験 A ではコンクリートおよび鉄骨を介して発熱温度が逸散されたため，発熱温度が小さくなったと考えられる。



(b) 試験 B

図-3 硬化時発熱温度の推移状況

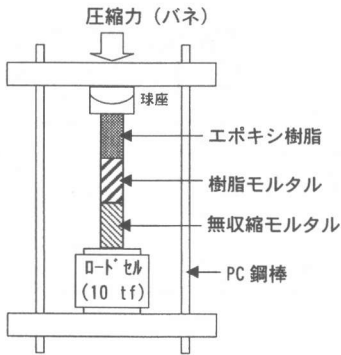


図-4 圧縮クリープ試験

実際に用いる場合は試験 A に近いことから、エポキシ樹脂は 20mm 以下、樹脂モルタルは 40mm 以下の厚さにしておけば、硬化時の発熱による悪影響は生じないことが確認された。

#### 4. 圧縮クリープ性状

図-1 に示す鉄骨ブレース接着工法では、既存柱梁骨組に鉄骨ブレースを組み込むため、エポキシ接着接合部は長期軸力を負担しない。しかしながら、長期圧縮力を受ける箇所に接着接合を用いる工法も考えられる。この場合には、エポキシ樹脂の圧縮クリープ性状を考慮しなければならないが、試験データは極めて少ない。ここでは、エポキシ樹脂、樹脂モルタルおよび無収縮モルタルの圧縮クリープ性状を検討した。

図-4 に試験装置を示す。図に示すように、エポキシ樹脂、樹脂モルタルおよび無収縮モルタルの試験片 (50φ×100 mm) を積み重ね、バネの反力を利用して、常時圧縮力を載荷した。用いた材料は表-1 に示すものである。圧縮力は  $P_c = 11.6 \text{ kN}$  (圧縮応力度  $\sigma_c = 5.88 \text{ N/mm}^2$ ) である。

表-3 に載荷時および載荷 101 日の圧縮ひずみを、図-5 に圧縮ひずみの推移状況を示す。縦軸は各試験片に埋込んだボルトに取り付けた変位計 (検長 50 mm) により毎日 6, 12, 18, 24 時に計測された圧縮ひずみ  $\epsilon$  ( $\mu$ ) を、横軸は経過時間  $T$  (日) を示す。

無収縮モルタルの載荷時の圧縮ひずみは  $240 \mu$ 、クリープ係数 (載荷 101 日) は、 $\phi = 4.0$  であり、

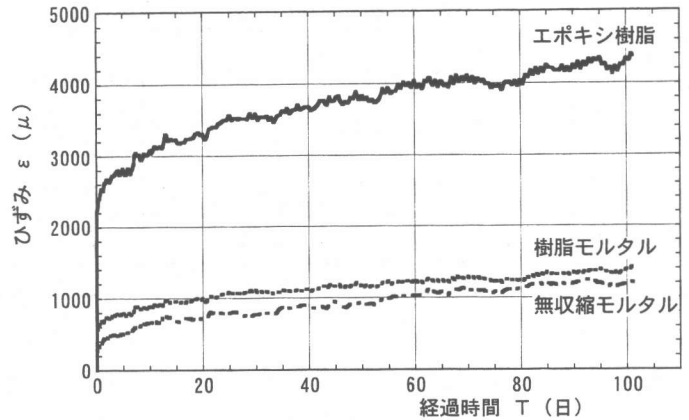


図-5 圧縮ひずみの推移状況

表-3 圧縮クリープの試験結果

種類	圧縮力 載荷時 $\epsilon_0$ ( $\mu$ )	載荷後 101日 $\epsilon_1$ ( $\mu$ )	クリープ 係数 $\phi$
エポキシ	1980	4370	1.21
樹脂モル	520	1400	1.69
モルタル	240	1200	4.00

$$\phi = (\epsilon_1 - \epsilon_0) / \epsilon_0$$

一般に言われている普通コンクリートのクリープ係数 2~4 より若干大きくなる傾向にある。また、樹脂モルタルは載荷時の圧縮ひずみ  $520 \mu$ 、 $\phi = 1.69$  であり、101 日後の圧縮ひずみは無収縮モルタルとほぼ同じになった。これに対して、エポキシ樹脂は載荷時の圧縮ひずみ  $1980 \mu$ 、 $\phi = 1.21$  であった。載荷時の圧縮ひずみが大きいいため、クリープ係数は小さくなったが、載荷後の圧縮ひずみの増大は、樹脂モルタルより大きい。このときエポキシ樹脂の圧縮縮みは、試験片の高さ 100mm に対して 0.4 mm 程度である。

#### 5. 接着接合部の引張強度

エポキシ樹脂を用いてコンクリートと鉄骨を接着した接合部の引張強度を検討するために接着試験を行った。接着試験は、図-6 に示すように、コンクリート板 (300 mm×300 mm, 厚さ 50 mm) の表面に、エポキシ樹脂およびエポキシ樹脂モルタルを用いてプレート (40mm×40mm) を接着し、このプレートを上部に引っ張ることにより行った (建研式接着試験)。

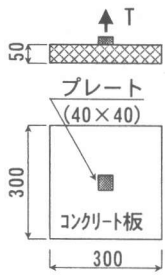


図-6 接着試験

表-4 接着試験の一覧および試験結果

試験	接着剤	被着体	コンクリートの圧縮強度 $\sigma_B$ (N/mm <sup>2</sup> )	接着試験結果		
				接着強度 $\sigma_a$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\frac{\sigma_a}{\sqrt{\sigma_B}}$	破壊モード
C	エポキシ	コンクリート	25.5	3.19	0.63	コンクリート内部の引張破壊
D	樹脂モル	コンクリート	25.5	3.00	0.59	
E	エポキシ	軽量コンクリート	27.4	2.75	0.53	
F	エポキシ	PSM+ コンクリート	31.4	2.06	0.37	
G	エポキシ	コンクリート	32.2	2.13	0.38	

・ PSM : ポリマーセメントモルタル 厚さ 5mm 塗布

表-4 に試験の一覧を示す。実験変数は接着剤および被着体の種類である。試験 E の被着体は比重 1.90 の軽量コンクリートとした。試験 F の被着体では、普通コンクリートのコンクリート板に断面修復用のポリマーセメントモルタルをコテ塗りし (厚さ 5 mm) , 養生後、ポリマーセメントモルタルの表面にプレートをエポキシ接着した。50φ×100 mm の円柱試験片を用いたポリマーセメントモルタルの圧縮強度は 33.0 N/mm<sup>2</sup>、割裂強度は 3.86 N/mm<sup>2</sup> であった。なお、試験 F は、仕上げモルタル等を研って除去した後に生じる既存コンクリート表面の凹凸をポリマーセメントモルタルを用いて整形し、その後鉄骨ブレースを接着接合する工法を想定したものである。また、試験 G は既に文献(1)で報告したものを再掲したものであり、試験 C と同一条件であるが、試験体の製作時期および試験日が異なる。

表-4 にコンクリート (被着体) の圧縮強度および接着強度を示す。接着試験の破壊モードはすべてコンクリート内部の引張破壊 (被着体の凝集破壊) であり、プレート、ポリマーセメントモルタルおよびコンクリートの接着面は健全であった。従って、接着強度  $\sigma_a$  は、コンクリートおよび接着剤の種類にかかわらず、いずれの

場合もコンクリートの引張強度で表すことができると考えられる。さらに、コンクリートの引張強度は、圧縮強度の平方根と一義的な関係にあると考え、接着強度を圧縮強度  $\sigma_B$  で表すと、 $\sigma_a/\sqrt{\sigma_B}=0.37\sim 0.63$  となった。

## 6. 接着接合部のせん断強度

エポキシ樹脂を用いてコンクリートと鉄骨を接着した接合部のせん断強度を検討するために一面せん断実験を行った。

表-5 に試験体の一覧を示す。試験体は 4 体で、接着剤の種類と厚さ、およびアンカーボルト量を実験変数とした。エポキシ樹脂モルタルは、硬化時の発熱が小さく、コンクリートと鉄骨の隙間を大きくできるため、厚さを 40mm とした。

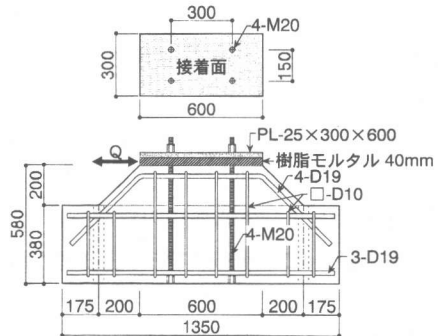


図-7 試験体の形状・配筋 (一面せん断実験)

表-5 一面せん断実験の試験体一覧および実験結果

試験体	接着剤の種類	厚さ (mm)	アンカーボルト	最大耐力 (kN)		
				実験値 $Q_{max}$	計算値 $Q_{su}$	$Q_{max}/Q_{su}$
No. 21	エポキシ	20	なし	589	516	1.14
No. 22	樹脂モルタル	40	なし	481	516	0.93
No. 23			4-M16	878	713	1.23
No. 24			4-M20	896	834	1.08

・ 最大耐力の実験値は、正負荷重の大きい方

表-6 材料強度 (一面せん断実験)

コンクリート	圧縮強度	割裂強度	
		25.2	2.19
アンカーボルト	降伏点*	引張強度	
	M16	448	536
	M20	463	562

\* : 0.2% オフセット, 単位 : N/mm<sup>2</sup>

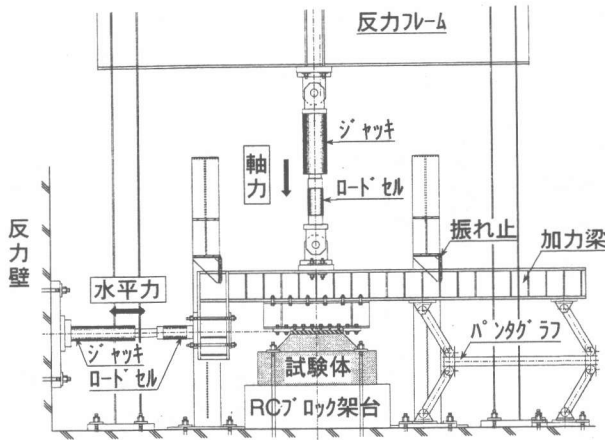


図-8 一面せん断実験の加力方法

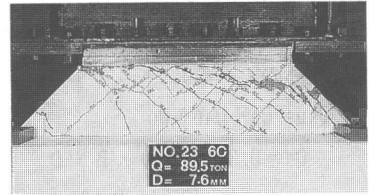
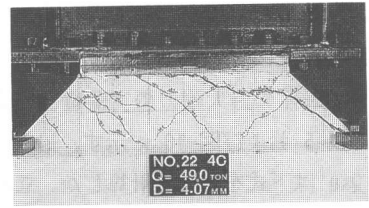


写真-1 ひび割れ状況

なお、アンカーボルトは、接着系のあと施工アンカーを模擬してコンクリートの打設時に埋込み、初期軸力は導入していない。

試験体は、図-7 に示すように、台形の形状をした RC 部材とプレートを接着接合したものである。表-6 に材料強度を、図-8 に加力装置を示す。実験に際しては、接着接合面に圧縮軸力  $N=177 \text{ kN}$  (圧縮応力度  $\sigma_0=0.98 \text{ N/mm}^2$ ) を載荷した。

写真-1 にひび割れ状況の一例を、図-9 に各試験体の荷重-変位曲線を示す。図の縦軸は載荷

せん断力  $Q$  (kN) を、横軸は接着接合部のずれ変位  $\delta$  (mm) を示す。

試験体の破壊経過は、各試験体ともほぼ同様であった。初めに、加力側の端部からコンクリート部分に  $45^\circ$  方向のせん断ひび割れが発生した。その後せん断力の増大に従い、せん断ひび割れの発生点が次第に内側に移動するとともに、接着接合面に沿ったせん断すべりひび割れが、コンクリートの内側に入った断面 (かぶり部分) に加力側の端部から発生、進展し、最終的には

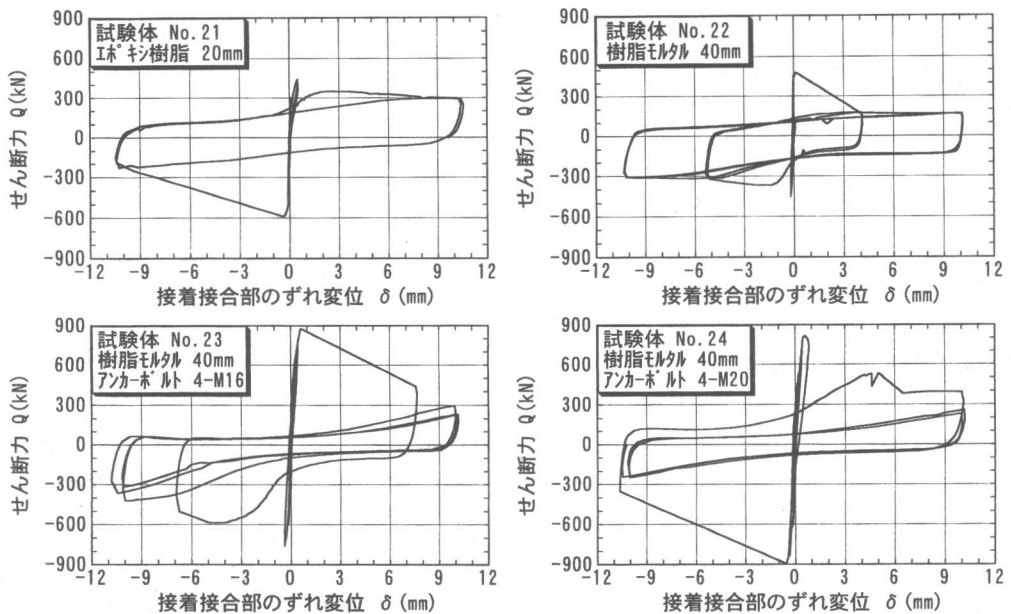


図-9 荷重-変位曲線

このひび割れが貫通して、せん断すべり破壊した。耐力低下は急激であった。

各試験体の最大耐力の実験値と計算値を比較して表-5 および図-10 に示す。最大耐力の計算値  $Q_{su}$  は下式を用いて計算した。これは無収縮モルタルを充填する従来の接合部のせん断耐力に、エポキシ樹脂の接着力によるせん断耐力  $Q_a$  を加えたものである。

$$Q_{su} = Q_a + Q_{ab} + Q_o \quad (1)$$

$$Q_a = 0.37\sqrt{\sigma_B} \cdot B \cdot D \quad (2)$$

$$Q_{ab} = \min(Q_{ab1}, Q_{ab2}) \quad (3)$$

$$Q_{ab1} = 0.7\sigma_y \cdot A_{ab} \quad (4)$$

$$Q_{ab2} = 0.4\sqrt{E_c \cdot \sigma_B} \cdot A_{ab} \quad (5)$$

$$Q_o = \mu \cdot N \quad (6)$$

ここで、

$Q_a$  : コンクリートの接着によるせん断耐力

$Q_{ab}$  : アンカーボルトによるせん断耐力 (kN)

$Q_o$  : 圧縮軸力により生じる摩擦耐力 (kN)

$A_{ab}$  : アンカーボルトの断面積 ( $\text{cm}^2$ )

$B, D$  : 接着接合部の幅および長さ (cm)

$N$  : 接着接合面に垂直方向に作用する圧縮力

$\sigma_B$  : コンクリートの圧縮強度 ( $\text{N/mm}^2$ )

$E_c$  : コンクリートのヤング係数 ( $\text{N/mm}^2$ )

$\sigma_y$  : アンカーボルトの降伏応力度 ( $\text{N/mm}^2$ )

$\mu$  : まさつ係数 (ここでは  $\mu = 1.0$  とした)

せん断すべり破壊はコンクリートの内側で生じたため、接合部の接着によるせん断応力度  $\tau_a$  は、接着強度試験および文献 1), 2) と同様に、コンクリートの引張強度、すなわち圧縮強度の平方根で表されるものとし、接着強度試験結果 (表-4) の下限値を用いて、 $\tau_a = 0.37\sqrt{\sigma_B}$  とした。なお、アンカーボルトによるせん断耐力  $Q_{ab}$  は、日本建築防災協会の改修指針式を用いた。

計算の結果、計算値に対する実験値の比 (実/計) は 0.93~1.23 となり、よく対応した。

## 7. まとめ

接着接合に用いられるエポキシ樹脂、エポキシ樹脂モルタルの材料特性およびコンクリートと鉄骨との接着接合部の力学性状について検討

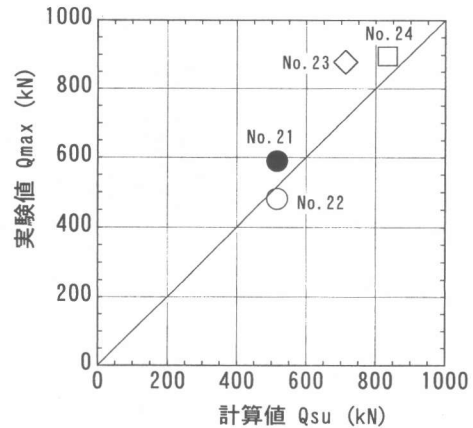


図-10 最大耐力の実験値と計算値の比較

した結果、以下のことが明らかとなった。

(1) エポキシ樹脂およびエポキシ樹脂モルタルの圧縮強度は  $70 \text{ N/mm}^2$  程度であったが、ヤング係数は、それぞれ無収縮モルタルの約 1/10, 1/2.5 程度であった。

(2) 硬化時の発熱の影響を考慮して、エポキシ樹脂の厚さ (接着接合部の隙間) は 20 mm 以下にする必要がある。これに対して、エポキシ樹脂モルタルの硬化時の発熱は、エポキシ樹脂より小さく、厚さを 40 mm 以下に緩和できる。

(3) 圧縮応力度  $5.88 \text{ N/mm}^2$  時のエポキシ樹脂およびエポキシ樹脂モルタルのクリープ係数は、101 日で 1.21, 1.69 であった。

(4) 接着試験および一面せん断実験における接着接合部の破壊は、接着面ではなく、いずれもコンクリート内部で生じた。接着接合部の接着強度およびせん断すべり強度は、コンクリートの圧縮強度を用いて計算できる。

**謝辞** エポキシ樹脂およびエポキシ樹脂モルタルについては、(株)コニシの御協力をいただいた。

## 参考文献

- 宮内靖昌, 東端泰夫, 毛井崇博, 太田義弘: 鉄骨プレースの接着接合により耐震補強された RC 架構の力学性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 3, pp. 1153-1158, 1998
- 毛井, 宮内他: 接着接合された軽みぞ形鋼によるパネル補強骨組の耐力と変形性状, 日本建築学会構造工学論文集, Vol. 47B, pp. 541-548, 2001. 3