

# 論文 二段配筋された梁部材の付着割裂破壊

對比地健一\*1・増田浩之\*2・高木仁之\*3・狩野芳一\*4

要旨：付着割裂破壊を計画した二段配筋梁部材実験を行い、藤井・森田式および筆者らが提案した内側主筋付着割裂強度算定式の適合性を検証した。その結果、二段配筋梁部材特有の大きな横補強筋拘束効果、および正負加力载荷による付着割裂強度低下を確認した。また、これらを考慮し、実際の外側・内側主筋引張力が得られれば、塑性理論によるせん断破壊耐力を応用した付着割裂耐力が良い適合性を得られることを確認した。

キーワード：二段配筋、内側主筋、加力比、付着割裂破壊、付着割裂耐力

## 1. はじめに

筆者らは、これまでに梁部材を模擬した、片持梁形式試験体による一連の実験的研究を行ってきた。その結果、主筋が二段配筋された場合の付着割裂破壊について、①外側主筋付着割裂強度と内側主筋付着割裂強度は異なる。②外側主筋付着割裂破壊は一段配筋の研究結果で評価できる。③内側主筋付着割裂強度は、外側主筋引張力による付着割裂抵抗面へのせん断応力により、一段配筋の場合より著しく小さい。④横補強筋の拘束効果は一段配筋とはその性状を異にすることなどを確認し、二段配筋の内側主筋位置での付着割裂破壊時の、付着ひび割れ発生強度と、付着割裂強度を算定する式を提案した[1]。本研究は、二段配筋梁部材での付着破壊性状、主筋滑り性状、横補強筋の拘束効果の把握を目的とする。また、外側・内側主筋位置における付着割裂強度および付着割裂破壊時の梁部材せん断耐力と、提案式による算定値の適合性を検証する。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

表-1に試験体一覧を、図-2に代表的な試験体の形状および配筋を示す。試験体は、部材長さ(1600[mm])、梁せい(400[mm])、シアスパン比(2.0)、外側主筋本数(4-D23)を共通事項とし、加力比 $\gamma$ (内側主筋引張力に対する外側主筋引張力の比)、横補強筋比 $p_w$ (0.65,0.82[%])、

梁幅 $b$ (240,270[mm])、加力方法(正負、一方向)を変動因子とした。なお加力比 $\gamma$ は、図-1に示すような平面保持の仮定に基づいた部材の微小区間における力の釣り合いによる式(1)から算出した。ただし、 $\Sigma A_{11}$ ( $A_{12}$ )は、外側(内側)主筋全断面積、その他の記号は図-1による。

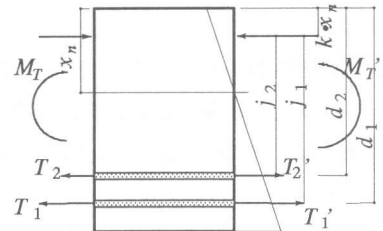


図-1 微小区間の力の釣り合い

$$\gamma = T_1/T_2 = \Sigma A_{11}(d_1 - x_n) / \Sigma A_{22}(d_2 - x_n) \tag{1}$$

\*1 (株)東京建築研究所、工修(正会員)

\*2 (株)構造計画研究所、工修

\*3 明治大学助手 理工学部建築学科、工修(正会員)

\*4 明治大学教授 理工学部建築学科、工博(正会員)

表-1 試験体一覧および実験結果

No.	試験体名	コンクリート強度 $\sigma_B$ [kgf/cm <sup>2</sup> ]	主筋		横補強筋		形状 $b \times D$ [mm]	加力方法	加力比 (計算) $\gamma_{cal}$	最大耐力 $Q_{max}$ [tf]	破壊形式*					
			配列		配列											
			降伏強度 $\sigma_y$ [kgf/cm <sup>2</sup> ]	外側主筋	内側主筋	降伏強度 $\sigma_{wy}$ [kgf/cm <sup>2</sup> ]						(pw [%])				
1	4-2-065N-a	293.2	10430	4-D23	3-D23	8620	$\phi 10@100$ (0.65) $\phi 10@90$ (0.65) $\phi 10@80$ (0.82) $\phi 10@100$ (0.65) $\phi 10@90$ (0.65) $\phi 10@80$ (0.82) $\phi 10@100$ (0.65) $\phi 10@100$ (0.65) $\phi 10@100$ (0.65)	240×400 270×400 240×400 240×400 270×400 240×400 240×400 240×400 240×400	正負繰返	2.70	36.2	BU1				
2	4-2-065W-a	314.9											2-D23	2.68	42.1	SC
3	4-2-082N-a	307.0											2-D23	2.70	42.1	B1
4	4-3-065N-a	301.9											2-D23	1.81	38.3	B2
5	4-3-065W-a	318.2											3-D23	1.80	43.8	BL2
6	4-3-082N-a	319.1											3-D23	1.80	42.3	BL2
7	4-4-065N-a	319.8											4-D23	1.36	42.1	BU2
8	4-2-065N	292.6											2-D23	2.70	41.8	SC
9	4-4-065N	306.5											4-D23	1.36	40.3	BL2

\* BU1:上端外側主筋付着割裂破壊,BU2:上端内側主筋付着割裂破壊  
BL1:下端外側主筋付着割裂破壊,BL2:下端内側主筋付着割裂破壊  
SC:せん断圧縮破壊

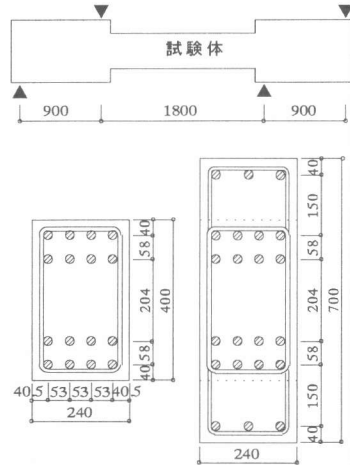
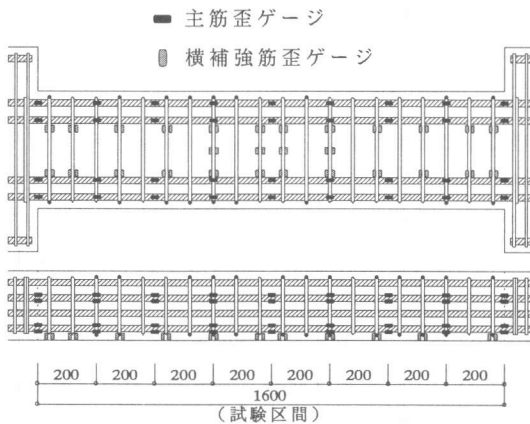


図-2 試験体配筋図および歪ゲージ添付位置

## 2.2 加力および測定方法

加力は逆対称モーメント型加力(大野式加力)とし、一方繰返し載荷および正負繰返し載荷を行った。載荷履歴は、一方繰返し載荷では、部材角  $R=1/200$  ( $\delta=8.0$  [mm])、 $1/100$  ( $\delta=16.0$  [mm])、 $1/67$  ( $\delta=24.0$  [mm])、 $1/50$  ( $\delta=32.0$  [mm]) とし、正負繰返し載荷では、 $R=\pm 1/200$  ( $\delta=8.0$  [mm])、 $\pm 1/100$  ( $\delta=16.0$  [mm])、 $\pm 1/67$  ( $\delta=24.0$  [mm])、 $+1/50$  ( $\delta=32.0$  [mm]) とした。

図-2 に代表的な試験体の主筋および横補強筋の歪ゲージ貼付位置を示す。主筋の歪ゲージは、 $200$  [mm] 間隔に計 9 点 18 枚(1 点 2 枚)貼付した。横補強筋の歪ゲージは、一組おきに上端・下端内側目主筋位置に 1 点 2 枚ずつ貼付した。主筋滑りは部材中央と、部材中央から右側  $30$  [cm] の位置において測定した。

## 3. 実験結果

表-1 に実験結果を示す。試験体 9 体のうち、No.1, No.3

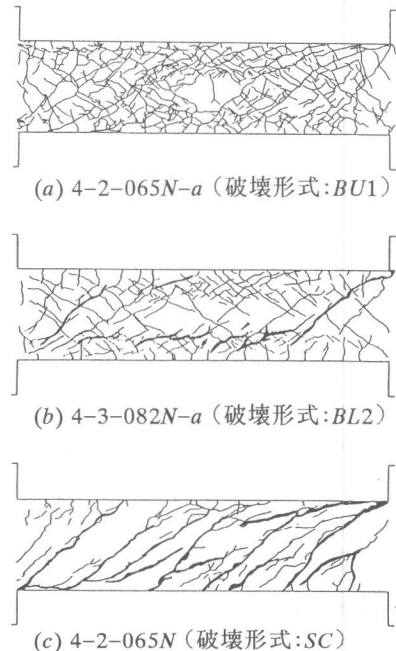


図-3 ひび割れ状況

の2体が外側主筋付着割裂破壊(B1)、No.4～No.7, No.9の5体が内側主筋付着割裂破壊(B2)、No.2, No.8の2体がせん断圧縮破壊(SC)と判定された。

### 3.1 ひび割れ状況

図-3(a)に外側主筋付着割裂破壊に至った4-2-065N-a、(b)に内側主筋付着割裂破壊に至った4-3-082N-a、(c)にせん断圧縮破壊に至った4-2-065Nのひび割れ状況を示す。(a)では外側主筋位置において、(b)では内側主筋位置において付着割裂が確認できる。(c)では、部材端部および部材中央域における斜めひび割れの拡大、部材圧縮端の圧壊がみられる。

### 3.2 荷重-変形関係

図-4に全試験体の荷重-変形関係(正側加力における包絡線)を示す。全試験体が同様の性状を示し、付着またはせん断破壊特有の傾向はない。ただし、全体的に最大耐力後の荷重低下が約20%であり、その後は荷重を維持しながら変形が増大していることから、全試験体ともに付着割裂破壊の傾向が強いものと推測される。

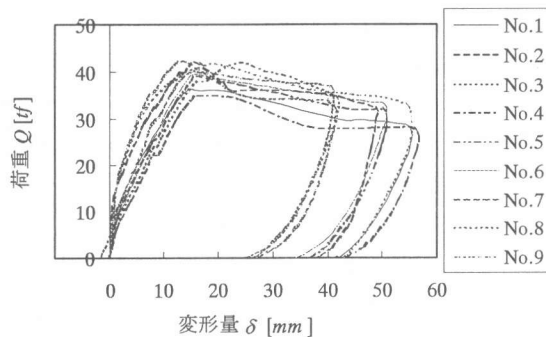


図-4 荷重-変形関係

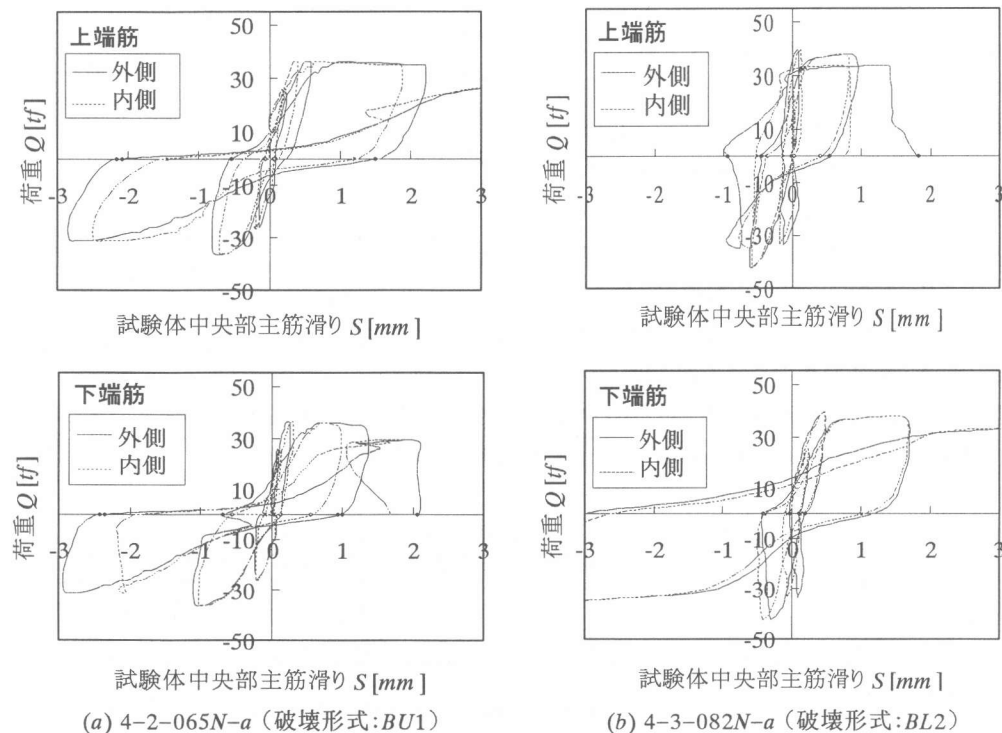


図-5 荷重-主筋滑り関係

### 3.3 荷重－主筋滑り関係

図-5(a)に外側主筋付着割裂破壊に至った4-2-065N-a、(b)に内側主筋付着割裂破壊に至った4-3-082N-aの荷重－主筋滑りを示す。(a)では、外側主筋・内側主筋ともに大きな滑りを示している。同一荷重において外側主筋滑りが内側主筋滑りよりも大きく、これは外側主筋付着割裂破壊の傾向であると推測される。(b)は、外側主筋付着割裂破壊と同様に外側主筋・内側主筋ともに大きな滑りを示しているが、同一荷重において内側主筋滑りは、外側主筋滑りとほぼ同等の値となり、他の内側主筋付着割裂破壊に至った試験体も同様の傾向を示していることから、これは内側主筋付着割裂破壊の傾向であると考えられる。

表-2 横補強筋引張応力度の比較

年度	試験体名	形状	横補強筋比 $p_w$ [%]	付着割裂耐力 $Q_{max}$ [tf]	横補強筋引張応力 $\sigma_{wt}$ [kgf/cm <sup>2</sup> ]
1995	4-2-065N-a	梁部材	0.7	42.1	5218
1994 <sup>[2]</sup>	4-2-050	梁部材	0.5	37.3	5386
1993 <sup>[1]</sup>	DCL.65-60	片持梁	0.6	—	3061

## 4. 付着割裂強度による検討

### 4.1 横補強筋拘束効果

表-2に本実験と片持ち梁型試験体を含めた文献[1][2]の実験結果( $p_w \approx 0.6$ [%]時)の最大耐力時横補強筋引張応力度の比較を示す。片持ち梁型試験体に生ずる横補強筋引張応力度は、本実験および文献[2]の二段配筋梁部材に対して約2000[kgf/cm<sup>2</sup>]小さいものとなる。文献[2]で示したように、二段配筋梁部材では部材中央域における横補強筋の拘束効果により、付着抵抗が向上し付着割裂強度が1.3倍程度増加する。これは、二段配筋片持ち梁型試験体に比べ、二段配筋梁部材には部材中央域において多数の斜めひび割れが発生し、横補強筋に生じる引張応力度が増大したことが主たる原因である。

### 4.2 正負加力による付着割裂強度低減

同一配筋した試験体の正負加力と一方向加力の比較を、図-6に荷重－変形曲線(包絡線)、表-3に最大平均付着応力度について示す。また同時に一方向加力に対する正負加力の最大付着応力度の比を示す。一方向加力(4-2-065N, 実線)に対し正負加力(4-2-065N-a, 点線)は初期剛性・最大耐力・維持荷重ともに小さく、正負加力による強度低下の傾向がみられる。また、正負加力(4-2-065N-a)の付着応力度は、一方向加力(4-2-065N)を下回り、正負加力による強度低下の傾向がみられ、本実験では正負加力による強度低下があると判断する。

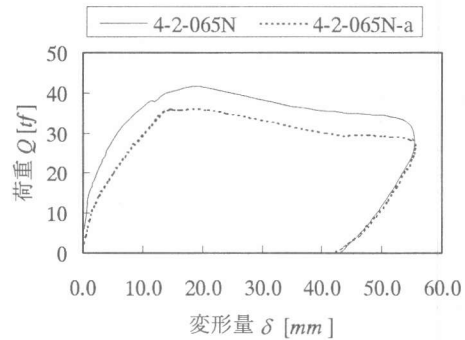


図-6 加力方法の違いによる荷重－変形関係

表-3 加力方法の違いによる付着割裂強度

No.	試験体名	コンクリート強度 $\sigma_B$ [kgf/cm <sup>2</sup> ]	最大平均付着応力度 $\tau_{av,max}$			
			上端		下端	
			外側主筋	内側主筋	外側主筋	内側主筋
1	4-2-065N-a	293.2	27.6	16.0	30.2	16.2
8	4-2-065N	292.6	33.8	18.2	29.7	18.7
$\frac{(\tau_{av,max} / \sqrt{\sigma_B})}{(\tau_{av,max} / \sqrt{\sigma_B})}$			0.82	0.88	1.02	0.87

### 4.3 外側主筋付着割裂強度

#### (1) 一方向載荷

外側主筋付着割裂強度( $\tau_{t1}$ )は文献[3]の藤井・森田式による。二段配筋梁部材の場合は、式(2)のように横補強筋拘束効果を考慮する。

$$\tau_{u.1}' = k_1 \cdot k_2 \cdot \tau_{u.1} \quad (2)$$

ただし、 $k_1=1.30$ （補強筋拘束効果）、 $k_2=0.85$ （[4]による付着長さ域の平均付着応力度を考慮した低減係数）である。図-7に算定値と実験値との比較を示す。ここで、平均付着応力度は部材端からの斜めひび割れ域を除いた区間の付着応力度の平均値である。算定値は、実験値に対して若干危険側の値を与えるが、内側主筋付着割裂破壊した外側主筋付着応力度(▲, △)を考慮すると、適合性は比較的良好といえる。

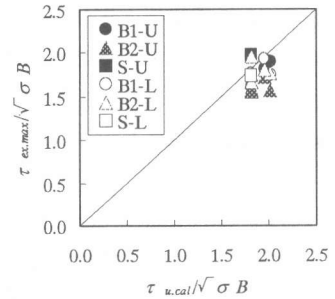


図-7 実験値と算定値の比較  
(外側・一方向)

## (2) 正負加力載荷

正負加力による強度低減を考慮した外側主筋付着割裂強度算定式は、式(3)で表される。

$$\tau_{u.1}'' = \alpha \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \tau_{u.1} \quad (3)$$

ただし、 $\alpha=0.80$ （正負加力による低減係数）である。図-8に算定値と実験値との比較を示す。外側主筋付着割裂強度算定値は、実験値に対してよい適合性を示した。

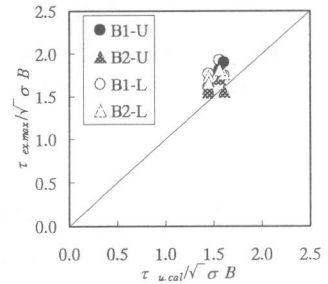


図-8 実験値と算定値の比較  
(外側・正負)

## 4.4 内側主筋付着割裂強度

### (1) 一方向載荷

内側主筋付着割裂強度( $\tau_{u.2}$ )は提案式による。詳細は文献[1]を参照されたい。二段配筋梁部材の場合、式(4)のように横補強筋拘束効果を考慮する。

$$\tau_{u.2}' = k_1 \cdot k_2 \cdot \tau_{u.2} \quad (4)$$

図-9に算定値と実験値の比較を示す。内側主筋の平均付着応力度は、部材端の斜めひび割れ域を除いた区間の区間付着応力度の平均値である。横補強筋拘束効果を考慮した内側主筋付着割裂強度算定式は、実験値に対して過大評価となり、危険側の値を与えている。

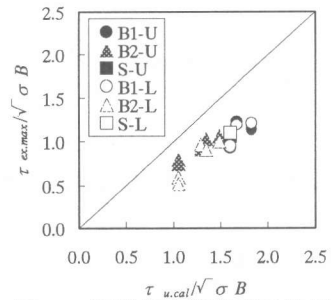


図-9 実験値と算定値の比較  
(内側・一方向)

### (2) 正負加力載荷

正負加力による強度低減を考慮した内側主筋付着割裂強度算定式は、式(5)で与えられる。

$$\tau_{u.2}'' = \alpha \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \tau_{u.2} \quad (5)$$

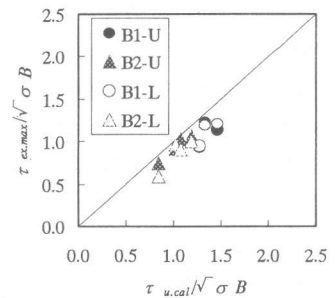


図-10 実験値と算定値の比較  
(内側・正負)

図-10に算定値と実験値の比較を示す。正負加力による強度低減を考慮した内側主筋付着割裂強度算定値は、実験値に対して過大評価となり依然危険側の値を与える。

### (3) 加力比 $\gamma$ における検討

表-4に式(1)による加力比 $\gamma_{cal}$ と、実験結果における最大平均付着応力度から算出した加力比を示す。加力比 $\gamma_{cal}$ は実験値による加力比に対して過小評価となった。図-11に内側主筋付着割裂破壊した試験体について、提案式に実験値による加力比を組み込んで得られた内側主筋付着割裂強度と実験値の比較を示す。実験値による加力比を考慮することにより、実験値に対してよい適合性を示す。

### 5. 二段配筋梁部材の付着割裂耐力

図-12に付着割裂耐力の算定値と実験値の比較を示す。なお、外側主筋付着割裂耐力算定式は文献[4]の塑性理論によるせん断耐力式を応用した付着割裂耐力式を、内側主筋付着割裂耐力は同式のトラス機構耐力を式(6)のように考える。

$$Q_{T.2} = \tau_{u.2} \cdot \sum \psi 2(j2 + \gamma \cdot j1) \quad (6)$$

なお、加力比 $\gamma$ は実験値による。トラス機構耐力を式(6)とした付着割裂耐力算定式は、実験結果を適切に評価できる。

### 6. 結論

- 二段配筋梁部材試験体を用いて実験を行った結果、以下のことが確認・検証された。
- ・試験体9体のうち、2体を除く7体が外側または内側主筋付着割裂破壊に至った。
  - ・二段配筋梁部材の場合、多数の斜めひび割れのため横補強筋拘束効果が一段配筋に比べ高い。
  - ・正負加力の付着劣化が顕著であり、付着割裂耐力の低減が確認された。
  - ・横補強筋拘束効果、正負加力による強度低減、実際の加力比を考慮すれば、外側主筋付着割裂強度は藤井・森田式、内側主筋付着割裂強度は提案式により評価することができる。
  - ・実際の加力比を考慮すれば、塑性理論によるせん断耐力式を応用した付着割裂耐力式により、二段配筋梁部材付着割裂耐力を評価することができる。

### 〈参考文献〉

- [1] 對比地健一、狩野芳一、他：二段配筋における内側主筋位置での付着割裂破壊（その4. 付着割裂強度算定式の提案）、日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）pp.647-648、1994.9。 [2] 増田浩之、狩野芳一、他：二段配筋梁部材における付着割裂破壊に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）pp.735-736、1995.8。 [3] 森田司郎、藤井栄：異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究-第2報- 付着割裂強度算定式の提案-、日本建築学会論文報告集第324号pp.45-53、1983.2。 [4] 奥出久人、狩野芳一、他：付着割裂破壊に支配される梁のせん断耐力、コンクリート工学年次論文報告集11-2、pp.81-86、1989

図-4 加力比による算定値と実験値の比較

No.	試験体名	加力比 (計算) $\gamma_{cal}$	実験による加力比	
			上端 $\gamma_{exp}$	下端 $\gamma_{exp}$
1	4-2-065N-a	2.70	4.81	4.22
2	4-2-065W-a	2.68	3.35	2.91
3	4-2-082N-a	2.70	3.12	3.24
4	4-3-065N-a	1.81	2.04	2.37
5	4-3-065W-a	1.80	1.96	2.14
6	4-3-082N-a	1.80	2.01	2.67
7	4-4-065N-a	1.36	2.08	2.19
8	4-2-065N	2.70	—	3.71
9	4-4-065N	1.36	1.99	2.86

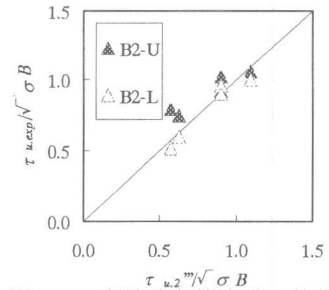


図-11 実験値と算定値の比較 (付着割裂強度)

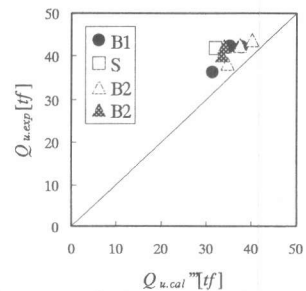


図-12 実験値と算定値の比較 (付着割裂耐力)