

論文

[2022] 二段配筋されたRC梁の付着割裂破壊

正会員 〇松原洋志 (明治大学大学院)
 正会員 高木仁之 (明治大学理工学部)
 正会員 狩野芳一 (明治大学理工学部)

1. はじめに

RC梁の付着割裂破壊は、一段配筋についてはかなり解明されてきており、諸々の付着強度算定式および梁部材の付着割裂耐力算定式が提案・検討されてきた。しかし、二段配筋に対しては不明な点が多く、付着強度および付着割裂耐力の定量化には至っていない。そこで、本論文では二段配筋において内側に配された主筋が付着割裂破壊に与える影響について検討を行う。

2. 実験概要

2.1 実験計画

本実験は、表-1に示すように主筋配筋およびせん断補強筋の降伏強度を変化させた7体の梁部材試験体から構成されている。主筋の配筋は、二段配筋において内側に配された主筋の影響を検討するため図-1に示す5種類とし、F-90-041, E-90-041は外側に配された主筋による付着割裂破壊、B-90-041はせん断引張破壊、G-90-041, H-90-041は内側に配された主筋による付着割裂破壊に至ることを想定した。また、せん断補強筋は、高強度 ($w\sigma_y=9040 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$) 以上および普通強度 ($w\sigma_y=2208 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$) とし、普通強度を用いた場合、付着割裂破壊およびせん断引張破壊に至る以前にせん断補強筋が十分降伏し、せん断圧縮破壊で耐力に至るように想定した。なお、検討には当研究で過去に行った (文献1, 2) の試験体も用いる。

表-1 試験体一覧

試験体名	引張主筋量			有効せい d (cm)	重心 間距離Jt (cm)	せん断補 強筋の降 伏強度 (kgf/cm^2)	共通事項 主筋降伏強度 $s\sigma_y=9500$ (kgf/cm^2) せん断補強筋比 $p_w=0.41$ (%) せん断補強筋形状 丸筋溶接閉鎖型 コンクリート強度 $F_c=3600 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$ 梁長さ $L=160$ (cm) 断面寸法 $B \times D=20 \times 40$ (cm)
	外側	内側	p t (%)				
1 F-90-041	3-D23	—	1.77	36.0	32.0	9000	
2 E-90-041	3-D23	1-D23	2.46	34.5	29.0	9000	
3 B-90-041	3-D23	2-D23	3.15	33.6	27.2	9000	
4 G-90-041	3-D23	3-D23	3.85	33.0	26.0	9000	
5 H-90-041	3-D23	3-D19	3.21	33.3	26.6	9000	
6 E-30-041	3-D23	1-D23	2.46	34.5	29.0	3000	
7 G-30-041	3-D23	3-D23	3.85	33.0	26.0	3000	

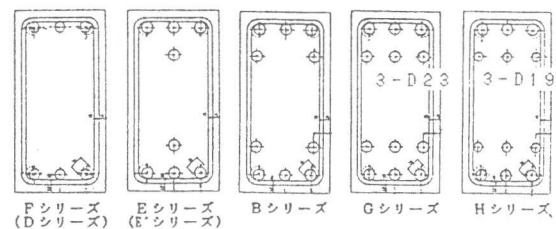


図.1 断面配筋図

2.2 試験体

図-1に代表的なB-90-041の配筋図を示す。主筋の降伏強度は降伏しないものとして $s\sigma_y=9560 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$ のPC鋼棒を用いた。また、せん断補強筋の配筋は、

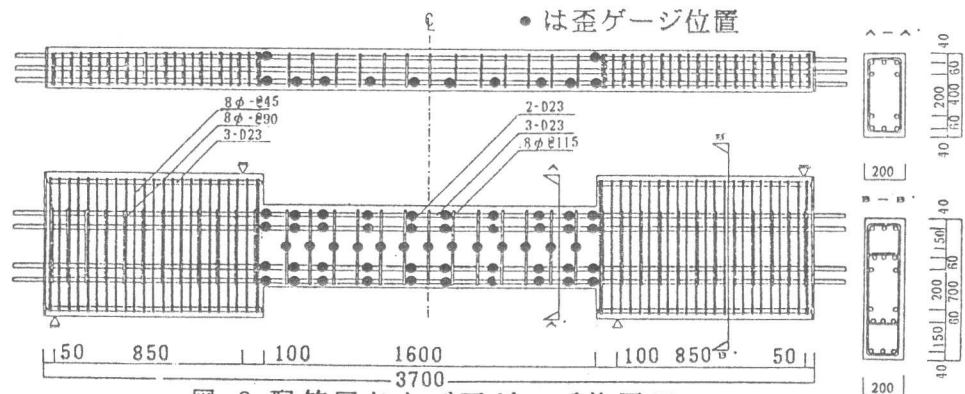


図-2 配筋図および歪ゲージ位置図

ピッチ $S=11.0$ (cm)、径 $\phi=8$ (mm) とした。なお、コンクリート打ち込みは側面からの平打ちとした。

2.3 加力および測定方法

加力は逆対称モーメント形式の一方荷とした。加力履歴は、せん断補強筋に高強度筋を用いた試験体は2回、普通強度筋を用いたものは1回の片振り繰り返し荷重を行い、その後破壊に至らした。

測定は、左右のスタブに対する梁中央点の鉛直変位、引張および圧縮端の縁水平変位を測定する他に主筋およびせん断補強筋の歪度の測定をした。特に主筋は、二段配筋で外側および内側に配された上端および下端の主筋、また、一段配筋ではせん断補強筋の隅角に配された主筋だけでなく、辺上に配されている上端および下端の主筋に各10点づつで歪度を測定し、主筋位置の違いによる付着応力度負担の違いを検討できるように配慮した。なお、せん断補強筋は試験部に配した全てについて長辺中央で歪度の測定を行った。

表-2 実験結果一覧

NO	試験体名	コンクリート強度 F_c (kgf/cm ²)	補強筋の降伏強度 $w\sigma_y$ (kgf/cm ²)	付着ひび割れ強度 (t)		最大耐力 Q_{exp} (t)	最大耐力時の部材角 R	破壊モード		
				上端筋	下端筋					
1	F-90-041	376	9040	13.42	17.70	27.34	1/112	LB		
2	E-90-041			26.07	28.26	33.19	1/68	UB		
3	B-90-041			—	—	38.15	1/82	sf→ST		
4	G-90-041			22.31	33.79	38.15	1/89	LB2		
5	H-90-041			22.23	22.85	35.70	1/83	sf→LB2		
6	E-30-041			2208	—	—	—	22.74	1/66	sf→SC
7	G-30-041					—	—	22.02	1/88	sf→SC

3. 実験結果

表-2に実験結果の一覧を示し、図-3に荷重変形曲線、図-4に最大耐力時の亀裂図を示す。

3.1 最大耐力

$w\sigma_y=2208$ (kgf/cm²) の場合、両試験体ともせん断補強筋が十分降伏しせん断圧縮破壊に至り、主筋配筋の違いによる耐力差は見られなかった。

$w\sigma_y=9040$ (kgf/cm²) の場合、表-2に示されるようにF-90-041, E-90-041, B-90-041の間では主筋比の増加に伴い耐力が上昇する傾向が見られ、内側主筋の多いB-90-041, H-90-041, G-90-041の間では主筋比と耐力に関係は見られなかった。

主筋比が同一の場合、せん断補強筋の発揮した実応力の大きい $w\sigma_y=9040$ (kgf/cm²) の試験体の方が最大耐力は高い値であった。

3.2 破壊状況

F-90-041, E-90-041ではせん断補強筋は降伏しておらず、外側に配された主筋位置での付着割裂破壊によって最大耐力に至った。B-90-041はせん断引張破壊に至ったが、圧縮端付近では付着割裂破壊に似た性状を示していた。また、G-90-041およびH-90-041では内側に配された主筋位置での付着割裂破壊に至っていたが、この破壊性状は試験体中央部でせん断引張破壊に似た性状を示していた。

* sf→:せん断補強筋の降伏 ST:せん断引張破壊 SC:せん断圧縮破壊
 UB:上端筋での付着割裂破壊 LB:下端筋での付着割裂破壊
 LB2:二段配筋において内側に配した下端筋での付着割裂破壊

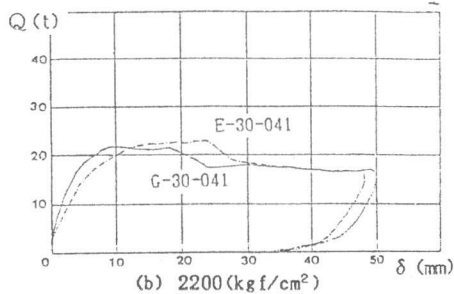
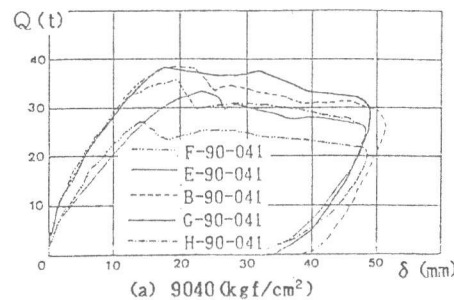


図-3 荷重-変形曲線

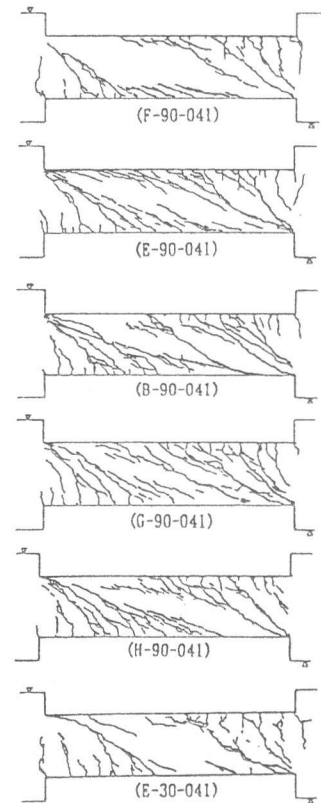


図-4 亀裂図

4. 付着応力度に対する検討

実験における付着応力度でbは主筋に貼った歪ゲージより算出(詳細は文献1)した。付着応力度の検討区間は、以下のすべての検討で全試験体共通に、付着割裂破壊

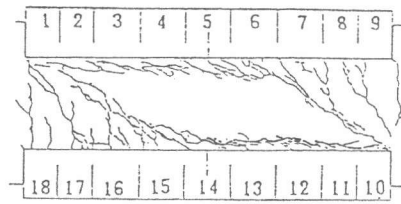


図-5 区間位置図

に対する危険断面として外側上端筋でT1~T6、外側下端筋でT10~T15、内側上端筋でT3~T6、内側下端筋でT12~T15とした。

4.1 各区間の付着強度に対する検討

二段配筋における外側主筋の各区間の付着強度は、内側主筋の配筋の影響は見られず、図-6に示されるようにほぼ一定の値であった。

4.2 二段配筋における外側主筋と内側主筋の平均付着応力度の関係

図-7に外側主筋と内側主筋の歪度分布を例示する。図-8はこれに基づいて得られた平均付着応力度と作用せん断力の関係である。外側主筋に生ずる平均付着応力度は内側主筋の平均付着応力度より大きな値となるが、これは図-9に示すように主筋が降伏しない場合は、外側主筋により大きな引張力が負担されるためである。外側主筋の付着応力度と内側主筋の平均付着応力度の関係は、梁全域での中立軸が一定でないため若干問題はあるが、近似的に式(1)で表される。

$$\tau a_i = \tau a_o \cdot (J t_i / J t_o) \cdot (d b_i / d b_o) \quad (1)$$

ただし、 τa_i :内側主筋の付着応力度(kgf/cm²)、 τa_o :外側主筋の付着応力度(kgf/cm²)、 $J t_i$:内側主筋間距離(cm)、 $J t_o$:外側主筋間距離(cm)、 $d b_i$:内側主筋の径(cm)、 $d b_o$:外側主筋の径(cm)

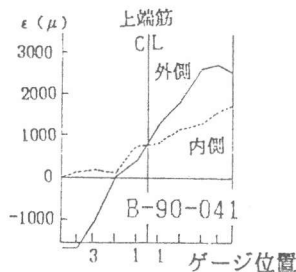


図-7 主筋の歪度分布

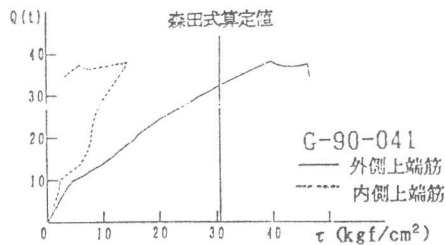


図-8 二段配筋の平均付着応力度

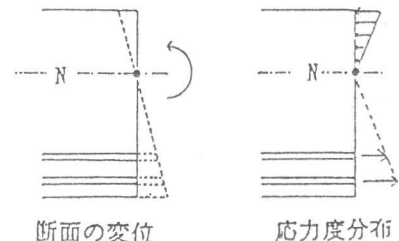


図-9 断面の応力分布

4.3 二段配筋で外側に配された主筋の最大平均付着応力度

二段配筋で外側に配された主筋の最大平均付着応力度は森田式(3)による付着強度を越えることが確認され、その中でせん断補強筋が十分降伏しないものはせん断補強筋比および内側に配された主筋比に依存して上昇する傾向が見られた。なお、本実験の範囲では、二段配筋で外側に配された主筋の最大平均付着応力度は森田式に内側主筋の影響を考慮した式(2)で示された。

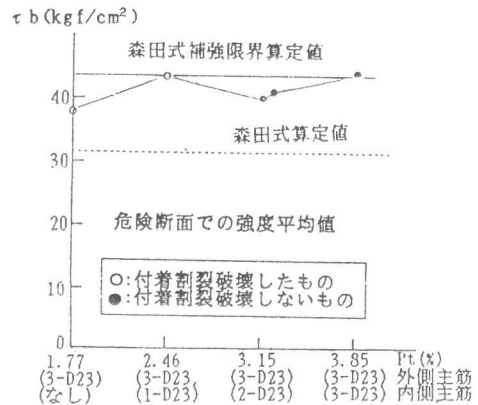


図-6 外側主筋の各区間の付着強度

$$\tau_{u.o} = \tau_{u,i} \times (1 + (\sum \Psi_i / \sum \Psi_o) \cdot (J_{t,i} / J_{t,o}) \cdot (A_{s,i} / A_{s,o})) \quad (2)$$

ただし、 $\tau_{u,i}$: 森田式算定値 (kgf/cm²)、 $\sum \Psi_i$: 内側主筋周長和 (cm) $\sum \Psi_o$: 外側主筋周長和 (cm)
 $A_{s,i}$: 主筋断面積 (内側) (cm²)、 $A_{s,o}$: 主筋断面積 (外側) (cm²)

この式は図-11に示されるように、本実験および文献(1,2)のせん断補強筋が十分降伏しない試験体の最大平均付着応力度をよく捉えていた。ただし、それらの試験体には付着強度に達していないものも含まれているため、式(2)は内側主筋の存在による外側主筋の付着強度上昇の下限となる。なお、付着強度増大理由は、

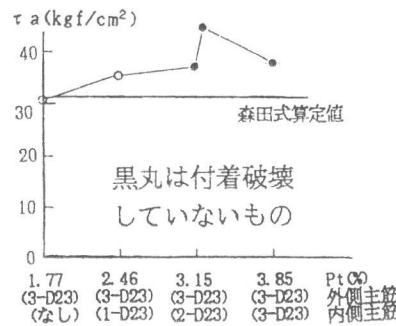


図-10 外側主筋の最大平均付着応力度

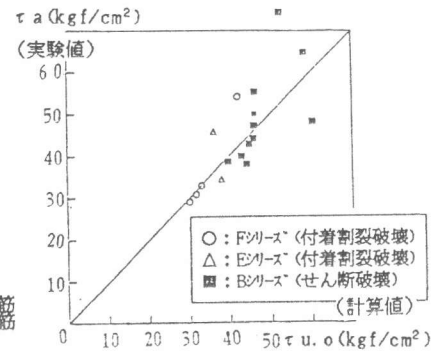


図-11 二段配筋に対する外側主筋の付着強度算定式の適合性

内側主筋の存在によってせん断応力度と付着応力度の関係が変化し同一付着応力度レベルで外側主筋に対するせん断補強筋の拘束力が増大したことが考えられる。

4.4 二段配筋における内側主筋の最大平均付着応力度

表-3に内側に配された主筋の最大平均付着応力度を示す。本実験の場合、内側主筋の付着強度は外側主筋に比べ極めて低く、森田式と対応しない。前述のように内側主筋は外側主筋に比べ作用付着応力は小さいが、上記の結果から外側主筋とは別の対策が必要と判断される。なお、表-3中の強度計算値とは森田式を内側主筋の配列に適用し、せん断補強筋による付着強度増分を除いた場合の計算値であるが、その計算値に比べても低い付着強度であった。

表-3 内側主筋の最大平均付着応力度

NO	試験体名	強度計算値 $\tau_{u,i}(co)$ (kgf/cm ²)	内側主筋の最大平均付着応力度		
			上端筋 $\tau_{u,i}(u)$ (kgf/cm ²)	$\tau_{u,i}(l)/\tau_{u,i}$	下端筋 $\tau_{u,i}(d)$ (kgf/cm ²)
2	E-90-041	45.43	19.04	0.42	27.31
3	B-90-041	30.84	17.58	0.57	16.14
4	G-90-041	19.56	18.77	0.96	15.90
5	H-90-041	23.18	16.93	0.73	17.44

* ただし、E-90-041のみ最大耐力時以降も付着応力度が上昇し、それ以外は最大耐力以前に低下した。

4.5 終局強度型耐震設計指針における設計用付着応力度

終局強度型耐震設計指針においては、曲げ作用による付着応力 t とトラス作用による付着応力 t のどちらか一方が付着強度を下回ればよいとしており、本実験および文献(1,2)の試験体では t の方が小さいため、せん断破壊したBシリーズに対してその検討を行った。

二段配筋における付着応力度負担は、外側主筋の方が内側主筋に比べ大きいため、図-12(a)に示すように指針式で算出された t は、外側主筋の最大平均付着応力度より小さい値であり、内側主筋のものより大きな値であった。しかし、指針では外側主筋の設計用付着応力と付着強度を比較するため、外側主筋の付着応力負担を過小評価することは問題がある。そこで、外側主筋の t を算出する式として式(3)を提案する。

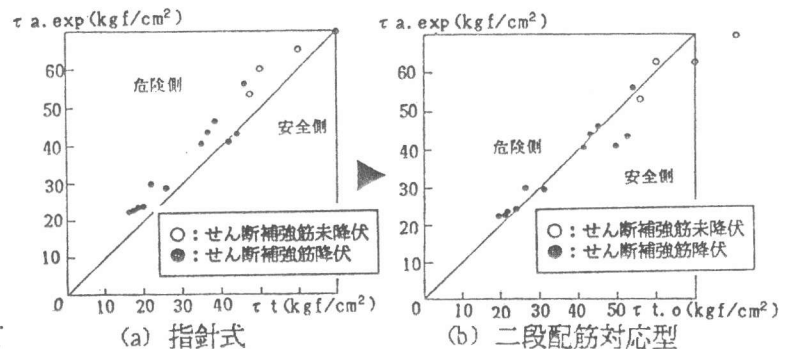


図-12 トラス機構に必要な付着応力度

$$\tau_{t.o} = b \cdot p_w \cdot \sigma_{wy} \cdot \cot \phi / (\sum \Psi_o + \sum \Psi_i \cdot (J_{t.i} / J_{t.o}) \cdot (d_{b.i} / d_{b.o})) \quad (3)$$

ただし、 b :部材幅(cm)、 p_w :せん断補強筋比、 σ_{wy} :せん断補強筋降伏強度(kgf/cm²)、トラス機構によるコンクリート圧縮束材角度(rad)

この式は、図-12に示されるように、現指針式に比べて適切な値を算出することが認められる。ただし、若干危険側の値を示すものも見られるが、これは式上でせん断補強筋の降伏強度を用いているため、上限強度を用いることによって改善される。なお、せん断耐力式との対応からせん断補強筋の降伏強度を用いることに問題はない。

5. 梁部材としての耐力の検討

5.1 塑性理論を適用した付着耐力式の二段配筋への適用

文献(1)に示している塑性理論を適用した付着耐力式を二段配筋に用いる場合、外側主筋と内側主筋の付着強度および主筋の付着応力負担の関係を適切に扱わなくてはならない。そこで、外側主筋と内側主筋の付着応力負担は常に式(1)の関係を満たしており、どちらか一方の主筋が付着強度に達すると最大耐力に至ると仮定し、安全側の値を与える式として次式のように修正する。なお、外側主筋の付着強度($\tau_{u.o}$)は式(2)によるものとし、内側主筋の付着強度($\tau_{u.i}$)は森田式における無補強筋の場合の算定値(τ_{co})を内側主筋の配列に適用したものとする。

$$Q_u = Q_b + Q_a \quad (4) \quad \sum \Psi_o, \sum \Psi_i: \text{外側および内側主筋周長和}$$

$$Q_b = \tau_{a.o} \cdot \sum \Psi_o \cdot J_{t.o} + \tau_{a.i} \cdot \sum \Psi_i \cdot J_{t.i} \quad (5) \quad J_{t.o}, J_{t.i}: \text{外側および内側の主筋間距離}$$

$$Q_a = ab / 2 \cdot (\sqrt{1 + (L/D)^2} - L/D) \cdot D \cdot \nu \cdot F_c \quad (6) \quad ab: \text{アーチ機構におけるコンクリート束材の幅}$$

$$ab = b \cdot \frac{\tau_{a.o} \cdot \sum \Psi_o + \tau_{a.i} \cdot \sum \Psi_i}{\nu \cdot F_c \cdot \sin \phi \cdot \cos \phi} \quad (7) \quad L: \text{スパン長さ, } D: \text{はり全せい}$$

なお $\tau_{a.o}$ は $\tau_{u.o}$ および $\tau_{u.i} \cdot (J_{t.o} / J_{t.i}) \cdot (d_{b.o} / d_{b.i})$ の小さい方の値

$\tau_{a.i}$ は $\tau_{u.o} \cdot (J_{t.i} / J_{t.o}) \cdot (d_{b.i} / d_{b.o})$ および $\tau_{u.i}$ の小さい方の値

ここで、トラス機構におけるコンクリート束材の角度は、文献(1)ではせん断補強筋が降伏する場合としない場合に分けているが、付着割裂破壊に至る場合せん断補強筋が降伏することは少ないことから、式の安全性および簡単化などを考慮して $\phi = 45^\circ$ とする。また、コンクリート圧縮強度有効係数は終局強度型耐震設計指針による $\nu = 0.7 - F_c / 2000$ とする。なお、付着法算定値は、せん断補強筋が十分降伏しないせん断引張破壊モードの試験体の最大耐力をある程度捉えていた。

5.2 コンクリート圧縮強度有効係数の検討

塑性理論A法においては、せん断補強筋量の上限を $p_w \cdot \sigma_{wy} = \nu \sigma_B / 2$ としている。ここで、せん断補強筋の十分降伏せず、かつ、付着割裂破壊しなかった試験体に対してせん断補強筋の実応力を用い、

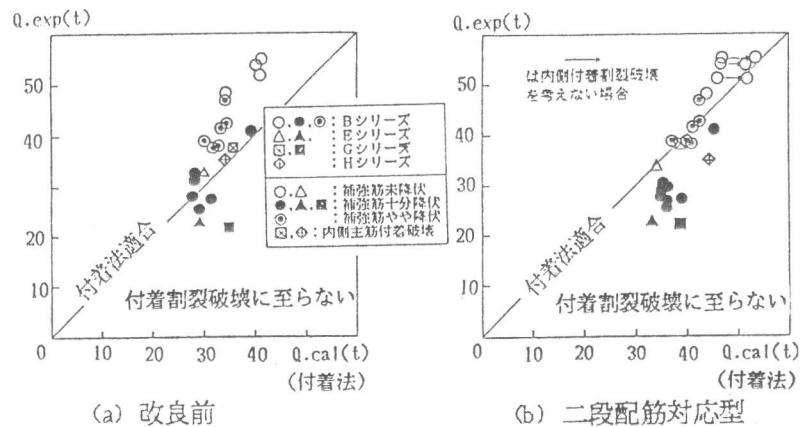


図-13 付着法の適合性

式(9)によってコンクリート圧縮強度有効係数 ν を逆算すると、その値は $p_w=0.59(\%)$ において0.31、 $p_w=1.2(\%)$ において0.41となり、 $\nu=0.7-F_c/2000$ による値(0.52)を下回るものとなった。したがって、終局強度指針による ν が高すぎる値であることも考えられるが、それらの試験体においてはダボ作用による割裂もしくは付着割裂のような兆候が見られ、付着応力の伝達が不可能となったためコンクリート圧縮束材の破壊する以前に最大耐力に至ったことも考えられる。なお、後者が正論である場合にはそれらの破壊に対してA法を用いることは疑問視され、付着法により最大耐力の算定ができたことが妥当であるとも考えられる。また、Bシリーズでせん断補強筋が十分降伏しない試験体では、A法算定値がわずかではあるが危険側の値となるものがある。

表-3 コンクリート圧縮強度有効係数の逆算値

試験体名	せん断補強筋の実応力 σ_{wt} (kgf/cm ²)	逆算される有効係数 ν	$\nu=0.7-F_c/2000$
B-80-121	5660	0.39	0.52
B-80-110-S	6970	0.43	
B-120-059	9260	0.31	
B-120-121	6140	0.42	
Av.		0.39	

$$\nu = 2 \cdot p_w \cdot \sigma_{wt} / F_c \quad (9)$$

ただし、 σ_{wt} :せん断補強筋実応力(kgf/cm²)

5.3 塑性理論を適用した両算定式の最小値と実験結果

塑性理論A法および塑性理論付着法の低い方の算定値は実験結果をよく捉えており、内側主筋での付着割裂破壊となった試験体を除き、極めて良い適合性であった。なお、せん断補強筋の十分降伏しない試験体についてはすべて付着法算定値の方が低い値であった。

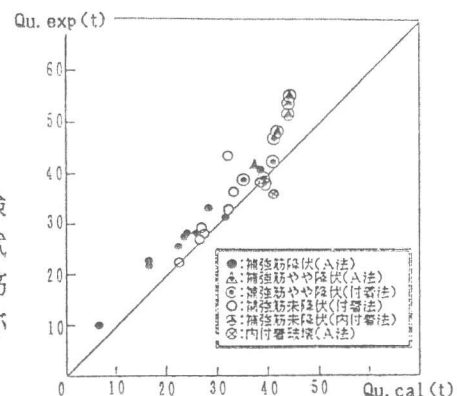


図-14 塑性理論を適用した2式の適合性

6. まとめ

- (1) 二段配筋の付着割裂破壊は外側主筋位置で生じるものと内側主筋位置で生ずるものがあり、区別する必要がある。
- (2) 外側主筋位置で付着割裂破壊する場合、外側主筋に沿って測定された各区間の付着強度は、内側主筋の配筋にかかわらず一定の値であった。
- (3) 二段配筋における外側主筋の付着強度を森田式に内側主筋の効果に乗じた式で捉えた。
- (4) 二段配筋で内側に配された主筋は、外側の主筋に比べて付着応力の負担は少ないが、その付着強度は極めて低いものであり、内側主筋における付着割裂破壊への対応が必要であると認められた。
- (5) 終局強度指針におけるトラス作用に必要な付着応力度は、二段配筋で外側に配された主筋に対し過小評価するものであるが、外側主筋と内側主筋の付着応力負担を適切に扱えば改善できる。
- (6) 塑性理論A法および塑性理論付着法の低い方の算定値は実験結果をよく捉えていた。

謝辞：本実験の試験体作成にあたり、住友電工(株)、(株)神戸製鋼、高周波熱線(株)、卒論生の川村厚司、鏡由香、坂本悟、石井正樹、富岡香織の諸氏にご協力いただき、深くお礼申し上げます。

参考文献：

- 1) 奥出久人、高木仁之、狩野芳一：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, NO. 11-2, PP81-86, 1989
- 2) 高木仁之、奥出久人、新田隆雄：せん断補強筋の強度による梁のせん断耐力 コンクリート工学年次論文報告集, NO. 11-2, PP75-80, 1989
- 3) 藤井栄、森田司郎：異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究 一第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, 1983.2