コンクリート工学年次論文報告集 11-2 1989

論文

[2011] 付着割裂破壊に支配される梁のせん断耐力

- 正会員 O 奥出久人(明治大学大学院)
- 正会員 高木仁之(明治大学工学部)
- 正会員 狩野芳一(明治大学工学部)

【1】はじめに

曲げせん断力下での脆性的な破壊形式として、異形鉄筋周辺の被りコンクリートが、鉄筋節の クサビ作用により割り裂かれて耐力を喪失する、付着割裂破壊が近年注目されている。これは割 り裂きにより鉄筋と周辺コンクリートとの間の付着作用が失われるもので、主筋の応力がコンク リートに伝達されなくなり、鉄筋コンクリート構造としての本来のはり機構が成り立たなくなる ものである。

一方、近年高強度鉄筋の活用に関する研究が各方面で行われているが、高強度鉄筋をあばら筋 としてその高張力を活かして有効に使用すればあばら筋比が小さくなり、その場合付着割裂破壊 の危険性が生じてくる。本論では[文献1]で報告した実験結果に新たな実験結果を加えて、付 着割裂破壊の特性と付着割裂破壊耐力に及ぼすあばら筋の効果について総合的に論じようとした。

【2】実験概要

<u>2.1 実験計画</u>

筆者等が行った高強度のあばら筋に関する実験は、表-1に示すように断面、コンクリート 強度、および主筋量を変化させた3つのシリー ズから構成されている。[文献1]で報告した Aシリーズは、20×30(cm)の断面に3本の超高 強度引張主筋(異形PC鋼棒 ¢=23mm、sびy= 9560kg/cm²)を配したもので、コンクリート強 度は 280(kg/cm²)である。FシリーズおよびB シリーズは、断面が20×40(cm)でコンクリート 強度を360(kg/cm²)としたものである。また、 Fシリーズは付着割裂破壊を起こさせるように Aシリーズと同じく引張主筋を超高強度鉄筋3 本としたが、Bシリーズは付着割裂破壊を防止 するために引張主筋を5本としたもので、[文

表-1 実験計画一覧

シリーズ名	新面 b×D (cm)	柔長さ 2 a (cm)	有効せい d (cm)	コンクリート 強度 Fc (kg/cm²)	引張鉄筋比 pt (記置主筋量) (%)
Aシリーズ	20×30	120	26. 0	280	2.39(3 - D23)
ドシリーズ		160	36. 0	000	1.73(3 - D23)
Bシリーズ	20 × 40		33. 6	360	3.09(5 - D23)
全シリーズ共通次項: 引缀飲筋の降伏強度 sびy=9560 0kg/cm²) せん 斯スパン比 a/D=2.0					

表-2 試験体および実験結果一覧

1		あばら筋			コンクリート強度	最大耐力	
L	試験体名	wTy (kg/cm²)	рж (%)	径 (cm)	Fc (kg/cm²)	Qu. exp (ton)	<u>破壊</u> モード
1	A-30-043	3260	0.43	6.0	295	15.98	BL
2	A-30-077	3380	0.77	8.0	296	19.04	BL
3	A-30-121	3140	1.21	10.0	299	22.38	BL
4	A-80-015	7610	0.15	3.5	282	12.53	BU
5	A-80-030	7990	0.30	5.0	287	16.38	BL
6	A-80-059	8220	0.59	7.0	273	18.45	BL
7	A-120-030	11710	0.30	5.0	266	16. 67	BL
8	A-120-059	11650	0.59	7.0	279	19. 73	BL
9	A-120-077	11340	0.77	8.0	288	20. 40	BL
10	A-120-121	11580	1.21	10.0	280	23. 80	BL
11	F-120-019	10830	0.19	6.0	351	22. 98	BU
12	F-120-059	10820	0.59	8.0	353	29. 09	BL
13	F-120-121	10870	1.21	10.0	353	43. 50	BU
14	B-120-019	10830	0.19	6.0	352	33. 05	ST
15	B-120-059	10820	0.59	8.0	354	48. 41	DC
16	B-120-121	10870	1.21	10.0	355	55. 13	DC
×	※破壊モード BU:上端筋に沿った付着割裂破壊、BL:下端筋に沿った						

8年一下 BU:上編版に沿った17者割裂破壊、BL:下編版に沿った 付着割裂破壊、ST:せん断引張破壊、BC:圧縮域でのコ ンクリートの直接せん断破壊

献 2] で報告した一連の実験の中からFシリーズとの比較のためにとりあげた 3 体である。 それ ぞれのシリーズについては、 あばら筋量およびその強度を変数として、 それらの影響を検討しよ うとした。 なお全シリーズ共通事項として、 せん断スパン比は a /D = 2.0とした。

<u>2.2 試験体</u>

表-2に本論で検討する試験体16体を示す。また、図-1に代表的な試験体としてF-120-121 の配筋図を示す。Aシリーズはあばら筋の降伏強度wCyと径を変動要因とし、あばら筋間隔は一



ここで、コンクリートの打ち込み方向として、Aシリーズは梁上端からの縦打ちとしたが、F ・Bシリーズは上端筋、下端筋の付着力に差の生じないよう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(大野式)の一方向載荷とした。加力履歴は全試験体共通で、最 大耐力の3分の2以下の範囲で2回の片振り繰り返し載荷を行った後、破壊に至らしめた。

また測定は、左右のスタブに対するはり中央点の鉛直変位を測定する他に、主筋およびあばら 筋の歪度の測定に重点をおいた。特に主筋は図-1に示したように上端筋、下端筋とも各10点に

おいて歪度を測定し、実験終了後 Q(t) に詳細な付着応力度の計算ができ 40 るように配慮した。なお、あばら 筋は試験部に配置したすべてにつ いて歪度を測定した。

【3】実験結果

表-2に実験結果一覧を示し、 図-2にFシリーズとBシリーズ の荷重変形曲線および最大耐力時 の亀裂図を示す。

<u>3.1 最大耐力</u>

各シリーズとも、あばら筋の降 伏強度 w G y が同じであれば p w が 大きくなるほど、 p w が同じであ れば w G y が大きくなるほど、最大 耐力は大きくなっている。また、 主筋量のみが異なる F シリーズと B シリーズとを同一の p w で比較 すれば、引張主筋を5本としたB シリーズの最大耐力は、 F シリー ズよりもかなり大きな値を示し、 最大耐力時の変形量も大きくなっ ている。



<u>3.2 破壞状況</u>

全試験体において主筋の降伏は生じておらず、A・Fシリーズは付着割裂破壊によって、Bシ リーズはせん断破壊によって最大耐力に至った。

コンクリートの打ち込み方向による上端、下端の相異がないFシリーズでは、左右ほぼ同時に 発生した斜めひび割れが、比較的低い荷重段階で圧縮域に進展した後、上端、下端主筋に沿って 波状の付着ひび割れが多数発生した。その後、荷重の増加にともなって付着ひび割れの間に微細 なひび割れが発生し、その箇所での部分的なコンクリートの剥離を招きながら、上端もしくは下 端のいずれかの主筋に沿った付着ひび割れが、一気に拡大して最大耐力に至った。

一方、付着割裂破壊しなかったBシリーズでは、付着ひび割れがほとんど進展しないせん断破 壊であった。その詳細については [文献2]を参照されたい。

【4】付着応力度による検討

4.1 各区間における付着応力度の検討

図-3に付着割裂破壊した試験体の一例としてA-120-030の上端主筋における、各区間の付着 応力度てaとせん断力の関係を示す。実験における付着応力度の算定には式(1)を用い、 図中の 破線は森田・藤井等が提案した付着割裂強度てuである[文献3]。

 てa= (Ei+1-Ei)·As·Es φ·ΔLi
 (1)
 * Ei+1,Ei:主筋の歪、As:主筋の断面積、Es:主筋 のヤング率、φ:主筋の周長、ΔLi:ゲージ間距離 これらの図によると、せん断力の増加に伴いてaも徐々に増加していくが、 特に斜めひび割れ の左側7~2の区間では、各区間ごとにてaがある値に達するとてaは減少する傾向にある。その時 のせん断力は主筋に生じる曲げ引張力の大きい区間の方が小さく、圧縮側になるにつれて大きく なっており、各区間で付着応力が同時に最大値になることはない。これは付着ひび割れの発生順 序に対応しており、各区間におけるてaの最大値は 森田式による付着割裂強度に良く適合した。

<u>4.2 平均付着応力度の検討</u>

図-4に上端および下端主筋における斜めひび割れ域を除いた定着区間全域にわたる平均付着 応力度てaとせん断力の関係を、A120シリーズ2体を例として示す。また、図-5にはAシリー ズにおける平均付着応力度の最大値てa.maxとpwの関係を示す。ここで言う斜めひび割れ域とは、 図-1に示した盃ゲージ位置図における引張側2区間と仮定した。これらの図から てa.maxは上 端筋に関して全ての試験体で森田式を下回り、その平均は森田式の0.72倍であり、下端筋に関し



図-3 各区間における付着応力度とせん断力の関係 [A-120-030]

ては森田式の0.93倍(上下平均 Q(t)) で 0.83倍) であった。また、 てa.max は森田式で言うように **pw**に依存して大きくなってお り、その傾向は上端筋の方が顕 著であった。さらに、上端筋、 下端筋ともwびyによる てa.max の相異はなかった。



図-4 平均付着応力度とせん断力の関係 [Aシリーズ]

さらにF・Bシリーズにおいて、上端筋に関する平均付着 Շа. вах (кg/cg²) 応力度とせん断力の関係を図ー6に示す。付着割裂破壊した Fシリーズは、平均付着応力度の最大値がほぼ森田式に適合 しているのに対して、せん断破壊したBシリーズでは森田式 を上回る大きな付着応力度が生じている。

4.3 あばら筋の引張力と平均付着応力度の関係

図-7はあばら筋の歪度分布で、Fシリーズの最大耐力時 と同じ荷重に対するBシリーズとFシリーズの比較である。 この図によると、Fシリーズでは左右のせん断ひび割れ領域 に集中して歪度が生じているが、Bシリーズの試験体は斜め ひび割れが引張主筋と交わる辺りから、中央付近にかけて大 きな歪度が生じている。特に斜めひび割れの外側の、付着ひ

40

30

20

10

۵

5000

4000

3000

2000

40

30

20

ß

10 20

び割れが最初に発生する位置で Qui は、両者の歪度に大きな差が生 じている。

図-8は付着割裂領域に配置 されたあばら筋に生じる引張力 の総和Fs(ton)と、下端主筋に おける平均付着応力度の関係を ε(μ) 示したものである。ここで、付 着割裂領域とは左右の梁端から 梁せいDの部分を除いた試験体 中央部をさすものとする。 Bシ 1000 リーズではドシリーズに比べて 同一の付着応力度に対する Fs の値が大きく、これは試験体中Fs(t) 央部にも斜めひび割れが発生し たためである。

これら2つの図から、Bシリ ーズではあばら筋の引張力とコ ンクリートの斜め圧縮力とによ って主筋が拘束され、主筋とコ



図-8 平均付着応力度とあばら筋に生じる総引張力の関係

--- F-120-019

40 Talke/cm2)

B -120-019

X

10

10

30

40

30

F-120-059

B-120-059

Ta(kg/cm2)

ンクリートとの付着耐力が高められたものと考えられる。しかし、その定量的な評価については、 0 今後更に研究を要する。

【5】梁部材としての付着割裂耐力

5.1 森田・藤井式による検討

T u = (0.307 b i + 0.427 + ...)

森田・藤井は正負繰り返し加力を受けて、曲げ降伏する梁の付 着割裂耐力を算定する式として、次式を提案した〔文献4〕。

Q b =	3.5 \cdot { \mathcal{T} c \cdot D + \mathcal{T} u \cdot (L – D)} Σ A s \cdot d				
	Г·др				
7 c =	р w · w O y · b w · D	(0)			
	$4 \cdot \mathbf{j} \cdot \boldsymbol{\Sigma} \phi$	(3)			



図-9 森田・藤井式と実験結果との比較 *記号は原文参照

髙層壁式ラーメン構造に関する一連の研究成果によると、式(2)によるせん断耐力の 曲げ降伏 耐力に対する余裕度が、1.0~1.1を境として付着割裂破壊の有無が判定できる[文献5他]。図 -9は今回の実験結果と式(2)による計算値とを比較したものであるが、 一方向加力によって曲 げ降伏以前に付着割裂破壊に至った本実験に対しては、計算値は過小評価となる。

(4)

 $\frac{24.9 \text{ k} \cdot \text{A st}}{\text{)} \cdot \sqrt{\text{F c}}}$

 $s \cdot N \cdot db$

5.2 塑性理論による検討

塑性理論を用いた付着割裂耐力の検討は、柱に関して〔文献6〕で行われている。ここでは、 南モデル【文献7】を基本として、以下の方法によって梁の付着耐力を算出する。

Q u = a Q + b Q	(5)
$\mathbf{b} \mathbf{Q} = \boldsymbol{\mathcal{T}} \mathbf{b} \cdot \boldsymbol{\Sigma} \ \boldsymbol{\psi} \cdot \mathbf{j} \mathbf{t}$	(6)
$aQ = ab/2 \cdot (\sqrt{1 + (L/D)^2} - L/D) \cdot D \cdot v \cdot Fc$	(7)
a b = b - b b	
$b b = \frac{\zeta b \cdot \Sigma \phi}{\gamma \cdot F c \cdot s in \phi \cdot cos \phi}$	(8)
$\sigma_{\rm W} = \frac{\tau_{\rm b} \cdot \Sigma \phi \cdot \tan \phi}{{\rm b} \cdot {\rm p} {\rm w}}$	(9)
$\mathcal{T}\mathbf{b} = \mathbf{k} \cdot \mathcal{T}\mathbf{u}$	(10)

5) * Cb: 平均付着强度、 k: 平均付着强 度低減係数(水平上端筋に関して0.72、 6) それ以外の鉄筋に関して0.93)、てu: (7) 森田式による付着割裂強度、Σφ:引 張鉄筋の周長和、 jt: 主筋の重心間 距離、 bb: トラス機構におけるコン 8) クリート東材の幅、L:部材の内法ス パン、ッ:コンクリート強度低減係数、 9) **φ:トラス機構におけるコンクリート** 東材の角度

ここで、トラス機構による耐力bQは、 主筋の付着応力とコンクリート束材に生じる圧縮力と の釣合いから式(6)を用いて求め、平均付着強度てbは森田式を用いて決定されるものとする。ま た、トラス機構で必要とされる コンクリート圧縮束材の幅bbは、あばら筋が降伏しないとき、 式(8)において φ = 45°とおいて求められる。あばら筋が降伏するときは、式(9)より ひw=wひy とおいて φ を求め、 この φ を用いて b b を求める。 なお コンクリート強度低減係数 γ は、 日本建 築学会終局強度型耐震設計指針案によるv=0.7-Fc/2000を採用した。

算定式による計算結果を表-3に、算定値と実験結果との比較を図-10に示す。算定値はあば ら筋が降伏する場合も降伏しない場合も、実験の傾向を良くとらえている。また、あばら筋が降 伏しない場合に算出される応力度もほぼ実験結果をとらえている。

この算出方法によれば、あばら筋が降伏する範囲ではwびyが小さいほどゅが小さくなり、それ にともなってbbが大きくなるため式 (5)の第1項の値が小さくなり、全せん断力Quが小さくな る。したがって、鉄筋とコンクリートとの付着強度自体は、森田式で予測されるように pwのみ によって定まっても、梁と

しての付着割裂耐力にはあ ばら筋の降伏強度が影響し

うることが説明される。

- 【6】まとめ
- 付着割裂破壊する梁の せん断耐力は、通常の せん断破壊に比べて著 しく低い値を示した。

	試験体名	森田式 てu (kg/ca²)	あばら筋の 算出応力 <i>G</i> w (kg/cm ²)	圧縮東材 の角度 ∮ (DEC.)	せん 耐力 Qu. ((ton)
1	A-30-043	22. 86	降伏	27.0	15.8
2	A-30-077	27. 22	降伏	38.2	18.2
3	A-30-121	32. 66	降伏	43.4	20.8
4	A-80-015	18. 54	降伏	37.6	10. 99
5	A-80-030	20. 57	降伏	43.5	15. 00
6	A-80-059	24. 23	5030	45.0	16. 70
7	A-120-030	20. 86	8550	45.0	15. 32
8	A-120-059	24. 53	5090	45.0	17. 00
9	A-120-077	26. 90	4260	45.0	18. 09
10 11 12 13	F-120-019 F-120-059 F-120-121	26. 28 32. 89 43. 16	5290 降伏 5640 3600	45.0 38.3 45.0 45.0	20. 57 23. 33 27. 04 32. 64
	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13		株田式 てu (kg/ca ²) 1 A-30-043 22.86 A-30-077 27.22 A-30-121 32.66 4 A-80-015 18.54 5 A-80-030 20.57 6 A-80-030 20.57 A-80-030 20.52 A-120-039 24.53 A-120-037 22.80 A-120-03 22.89 3 F-120-121 43.16	★ 読んを貸の 第田式 てu びましたか でu びましたか でu びましたか でu びましたか でu びましたか でu びましたか でu びましたか でu びましたか でu びましたか でu びましたか でu びましたか でu びました でu びました でu びましたか でu でましたか でu でましたか でu でましたか でu でましたか でu でましたか でu でましたか でu たましたか でu たましたか でい でい でい でい たましたか でい たましたか でい でい でい たましたか でい でい でい でい たましたか でい でい たたい でい でい でい でい たたか でい でい たたか でい でい でい でい たたか でい でい でい でい でい でい でい でい でい でい たたのでい でい たたのでい でい たたのでい でい たい でい でい たい でい でい たい でい でい たい でい でい でい でい でい たい でい でい たい でい でい たい でい でい でい でい でい でい でい でい たい でい でい でい でい でい でい でい でい でい でい でい でい でい	大学の 2015 日本120-053 24.53 5040 45.0 ガリング 2015 14.55 50.0 ガリング 2015 14.55 50.0 ガリング 2015 14.55 50.0 オー30-043 22.86 単伏 27.0 オー30-077 27.22 単伏 38.2 オー30-121 32.66 単伏 43.4 オー30-015 18.54 単伏 37.6 オー30-030 20.57 単伏 43.5 オー30-030 20.57 単伏 43.5 オー30-030 20.86 8550 45.0 オー120-030 24.53 5030 45.0 オー120-039 24.53 5030 45.0 オー120-059 32.89 5640 45.0 オー120-059 32.89 5640 45.0 オー120-121 43.16 3600 45.0

表-3 塑性理論による計算値一覧



 \diamond

2) 付着割裂破壊した試験

図-10 塑性理論式と実験結果との比較

体における各区間の付着応力度の最大値は、森田式による付着割裂強度に良く適合した。

- 3)付着割裂破壊した試験体の平均付着応力度の最大値は、上端下端とも森田式を下回ったが、 森田式で言うようにあばら筋比pwに依存し、wのyによる影響はみられなかった。
- 4) 梁中央部に早期に斜めひび割れが発生した試験体では、森田式よりもかなり高い付着応力度 を示した。これは、あばら筋に生じる引張力に拘束されて、主筋が森田式を上回る大きな付 着応力度に耐えられたものと考えられたが、その定量的な評価はできなかった。
- 5) 塑性理論を適用した付着割裂耐力算定式は、付着割裂破壊する試験体の耐力をほぼ的確にと らえ、あばら筋の降伏強度による影響を定性的に説明できた。
- 6)本論文の知見は、一方向加力により曲げ降伏以前に付着割裂破壊する場合のものであり、正 負繰り返し加力等の影響については、今後更に検討する必要がある。

[謝辞]

本実験は、(株)神戸製鋼所、住友金属工業(株)、住友電気工業(株)3社の委託研究費によって 行われたものであり、貴重なご助言を賜った高強度せん断補強筋研究委員会の委員の皆様に、紙 面を借り深く謝意を表します。また、試験体作成にあたり、フジタ工業(株)、三友エンジニヤリ ング(株)、黒沢建設(株)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、狩野芳一他: せん断補強筋の強度がRC梁のせん断耐力に及ぼす影響について、 第10回コンクリート工学年次論文報告集、1988年10-3、PP.623~628
- 2) 新田隆雄、高木仁之他: せん断補強筋の強度による梁のせん断耐力、第11回コンクリート工 学年次論文報告集、1989年
- 3) 森田司郎、藤井栄: 奥形鉄筋の付着割裂強度に関する研究(付着割裂破壊を支配する要因に ついての実験結果)、日本建築学会論文報告集第319号、昭和57年9月、PP.47~54
- 4) 森田司郎、藤井栄他:鉄筋コンクリートT形梁の耐力と靱性に関する2、3の考察、日本建築学会大会学術講演梗概集、昭和63年度、PP.235~236
- 5) 芳村学、藤沢正視他:高主筋比T形はりの靱性確保に関する研究(高層壁式ラーメン構造に 関する研究)、日本建築学会大会学術講演梗概集、昭和63年度、PP.591~592
- 6) 渡辺史夫: R C 柱の付着割裂せん断破壊機構と耐力の解析、第2回 R C 構造のせん断問題に 対する解析的研究に関するコロキウム 論文集、1983・10、 PP.61~68
- 7) 南宏一: せん断を受ける鉄筋コンクリート部材の極限解析について、第1回RC構造のせん 断問題に対する解析的研究に関するコロキウム 論文集、1982・6、PP.1~16