論文 アラミド繊維補強プレキャストコンクリート梁端接合部の実験

今村 雅泰*1·望月 重*2

要旨:本研究は,アラミド繊維補強ロッド(以後,アラミドロッド)を接合筋とした梁端接合部の 滑りの抵抗機構を実験と解析により解明したものである。試験体は,コッターの位置と大きさを 変えた逆 T 字形とし,曲げせん断実験を行っている。解析は,変形の増大とともに生じる鉛直 応力による摩擦抵抗を考慮した有限要素法(以後,FEM)を用いて,実験値との比較を行い,接合 部の滑り挙動を追跡できることを示している。その結果,従来の圧壊型コッターに代わるせん断 破壊型コッターによる接合部設計を提案している。

キーワード:アラミドロッド,接合部,せん断破壊型コッター,滑り剛性,摩擦抵抗

1. はじめに

アラミド・炭素・ガラス等の長繊維を樹脂加 工したロッドが、その高い比強度、耐久性、耐 腐食性から、鉄筋に代わるコンクリートの補強 材として注目を集めているが、これらの新素材 は付着強度及びせん断耐力が低いといった欠点 をもっている¹⁾。一方において情報化時代の今 日では、非磁性の性質をもつ、アラミドロッド・ プレキャストコンクリート建物の開発が求めら れている。

既に,著者らの一人は,アラミドロッドの付 着強度とせん断耐力が低い点に関し,S字形間 接せん断実験を行い,アラミドロッド・プレキ ャストコンクリート梁端接合部の望ましい接合 筋として,13¢以上の砂付き組紐状アラミドロ ッドが最適であることを確認している²⁾。

本研究は,望ましい接合筋と特定されたアラ ミドロッド13φを接合筋とする逆T字形曲げせ ん断実験を行い,その破壊形式と接合部の挙動 を解明している。また,アラミドロッドによる 接合部の弾性拘束を考慮して接合部をボンド要 素で置換し,摩擦抵抗を各荷重段階毎に評価し た FEM 解析を行い,梁端部の曲げせん断抵抗 機構を解明することを目的としている。

2. 逆「字形曲げせん断実験

2.1 実験概要

試験体は断面が200×350mmで長さ675mmのプ レキャスト梁を場所打ち柱と組合わせた逆T字 形とする。アラミドロッド13¢を接合筋(梁主 筋兼用)として上下各2本,計4本を配筋する。 梁のシアスパン比は1.5である。標準試験体図 (A-10-0-0)を図-1に示す。試験体のパラメー タは、コッターの位置、大きさ及び直接せん断



*1 武蔵工業大学大学院 工学部研究科建築学専攻(正会員) *2 武蔵工業大学教授 工学部建築学科 工博(正会員) カを伝えないように、界面近傍で接合筋に通す 管長40 nm,内径19 nmの管の有無とした4体と, 比較のため接合筋を鉄筋とした試験体1体の計 5 体とする。構造諸元を表-1に,材料特性を表 -2 に示す。コッターはせん断破壊を起こすよ うに圧縮耐力をせん断耐力より高くなるよう設 計している。コッター位置は中央と両側とし, 両側は中心から左右対称に各々57.5 nm離した位 置に分けて設ける。試験体名の最初のアルファ ベットは,接合筋の種類を示しており,Aはア ラミドロッド,Rは鉄筋である。2 番目の数字 はコッター1 個のせん断面積を丸めた値で,3 番目は管の内径そして最後は管長を表している。 加力装置を図-2 に示す。加力は能力 490kN

のジャッキを用い,変位制御の正負交番繰り返

試験体名	主筋径 (表面)	コッター	筋厚	
		せん断(圧縮) 面積 (mm ²)	位置	■長 (内径)
A-00-0-0		-	1	1
A-04-2-4	13 <i>¢</i>	4500(1800) × 2*	田/ 創	40(19)
A-05-2-4	(砂付)	5400(1350) × 2*		
A-10-0-0		10800(1350)	中央	1
R-10-0-0	D13 (横節)	10800(1350)	中央	_

表一1 構造諸元

*:コッターを2個配置したもの

コンクリート	試験体部位		王縮強度 (MPa)	弓 弓長金度* 1 (MPa)	弾性係数* 2 (*10 ⁺ MPa)	
	プレキャスト 梁		28.6~ 30.4	2.11~ 2.87	3.04~ 3.43	
	柱		27.0~ 31.6	2.15~ 2.64	3.14~ 3.33	
補強筋又はロッド	呼び径		引張強度 (降伏点) (MPa)	付着強度 (MPa)	弾性係数 (*10 ⁴ MPa)	
	アラミド	13 Ø	1432	9.60	6.96	
	鉄筋	D10	513 (370)	_	17.15	
		D13	497 (342)	4.50	17.93	

表-2 材料特性

*1: 引張強度は、コンクリートの割裂強度とする。 *2:弾性係数は、最大圧縮強度の1/3の点で算定する。

し加力とする。同一部材角を2回繰り返し,部材 角 R=1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 12.0, 16.0, 20.0, 30.0 ×10⁻³rad で制御する。部材角 R=30.0×10⁻³rad



を2度繰り返したところで実験を終了とする。 測定方法は、加力点の水平変位、接合部の滑り 及び目開き変位を変位計で、接合界面より上下 15 mm位置の接合筋及び接合界面より 35 mm位置 の梁側面のコンクリート歪みを歪みゲージによ り測定する。

2.2 実験結果

(1)破壊状況

接合筋がアラミドロッドの試験体は全てにわ たって、①1 サイクル目で接合界面にひび割れ が発生して接合界面を貫通、②曲げひび割れ発 生,③梁端近傍の中央より45°方向にせん断ひ び割れ発生、④引張側接合筋が破断し、圧縮側 縁コンクリートが圧潰して終局となった。接合 筋が鉄筋の R-10-0-0 においては、せん断ひび割 れ発生前に接合筋が降伏し、荷重がほぼ一定の まま部材角 R=30.0×10⁻³rad をもって加力を終 了した。実験終了後、接合部を解体して接合面 を調べると、アラミドロッドを接合筋とする試 験体のコッターはせん断破壊していて、破壊面 は他の打ち継ぎ面に比較して相当粗面となって いた。R-10-0-0 はコッター形状が圧縮面積に比 してせん断面積が大きいことから, コッターの 破壊はせん断破壊と一部圧縮破壊が混在してい た。A-00-0-0の接合筋は破断面の繊維が比較的 揃っており、せん断破断が優位であるのに対し て、A-04-2-4、A-05-2-4 及び A-10-0-0 では繊維 が筆の穂先をやや広げた引張破断に近い状態で あり、いずれも引張強度の7割程度で破断して いる。これはアラミドロッドに引張力とせん断

カが働き,そのインタラクションにより破断し たと考えられる。最大荷重は,A-00-0-0 で 125.0kN に対し,A-04-2-4,A-05-2-4 及び A-10-0-0 では各々153.7kN,159.6kN 及び 156.1kN と差はみられなく,A-10-0-0 に対して 管のあるA-04-2-4 及びA-05-2-4 では,A-10-0-0 のアラミドロッドに働いたせん断力に等価な管 の両端の相対変位で起こる拘束モーメントによ る付加せん断力を受けたと考えられる。

(2)荷重-変形関係

図-3 にアラミドロッドを接合筋とする A-10-0-0と鉄筋を接合筋とする R-10-0-0の荷重 -部材角曲線を示す。A-10-0-0は、除荷時にお ける挙動が常に原点に戻るといった傾向がみら れる。また、破断まで荷重の増加がみられるの も、接合筋が降伏点の無い弾性材の特徴といえ る。接合筋がアラミドロッドである他の試験体 は、最大荷重に差があるだけでほぼ同じ挙動を 示しているため曲線を省く。一方、R-10-0-0は、 主筋が降伏後は荷重の増加のない bi-linear 型の 包絡線で、紡錘型の履歴を示している。

図-4に正荷重時の荷重-滑り曲線の包絡線 を示す。R-10-0-0 では,鉄筋の降伏時までほと



図-3 荷重-部材角曲線



んど滑りはないが、鉄筋の降伏後は荷重が増す ことなく滑りが増加する。それに対し、アラミ ドロッドを接合筋とする試験体では、滑りは荷 重とともに増加している。また、いずれの試験 体も滑り 0.02 mmまでは似た挙動を示している が, 滑り 0.5 mm以降になるとコッターのある試 験体ではせん断荷重が増加するのに対して、 A-00-0-0 ではその傾きが低下する。これは A-00-0-0 ではコッターによるせん断抵抗がない ので、界面のせん断摩擦のみで抵抗していると 考えられる。一方, A-04-2-4, A-05-2-4 及び A-10-0-0の荷重-滑り曲線の平均を取ると、い ずれも±5%内に収まっているので、大胆に滑り 0.02 mmと 0.5 mmを折点とする tri-linear 型で表し てみる。滑り曲線のモデルを図-5に示す。ま た, 各点でのせん断荷重, 滑り及び B 点と C 点 を結ぶ直線の傾斜による平均滑り剛性を表-3 に示す。 滑り 0.02 mm では全ての試験体で、 接合 界面にひび割れが貫通し、コッターのある試験 体は界面から音が発生している。従って、ここ でコッターが壊れ始めていると思われる。QB

表-3 各点のせん断荷重、滑り及び平均滑り剛性

試験体名	Qa	δ	Qв	δ _B	Qc	δ _c	К
A-00-0-0	12.1	0.018	82.1	0.494	125.0	1.500	42.53
A-04-2-4	17.2	0.020	98.0	0.500	153.7	1.419	60.56
A-05-2-4	24.4	0.019	91.9	0.500	159.6	1.603	61.35
A-10-0-0	22.6	0.022	96.1	0.510	156.1	1.524	59.24
R-10-0-0	43.3	0.023	54.4°	0.070*	55.3	2.958	0.29

QABC: 各点 A,B,C におけるせん断荷重(kN)、 SABC: 各点 A,B,C における滑り(mm)

K:B点とC点を結ぶ直線の平均滑り剛性= $(Q_c - Q_B)/(\delta_c - \delta_B)$ (kN/mm)

*:鉄筋が降伏時の値とする。



図-5 滑り曲線モデル

はA-00-0-0が82.1kNであるのに対し, A-04-2-4, A-05-2-4 及び A-10-0-0 では各々98.0kN, 91.9kN 及び 96.1kN であり、各々15.9kN、9.8kN 及び 14.0kN の差が生じており、コッターを設けるこ とによってせん断荷重が増加している。Qc は試 験体の最大せん断荷重である。ここで平均滑り 剛性 K は, A-00-0-0 で 42.53kN/mm であるのに対 し、A-10-0-0 では 59.24kN/mmであり、コッター があることによって平均滑り剛性は 1.5 割程度 上昇している。これは、せん断破壊したコッタ ーの粗面の摩擦抵抗が滑りに抵抗したと考えら れる。更にコッターを両端に設けた A-04-2-4 及 び A-05-2-4 では、平均滑り剛性 K は、60.56kN/ mm及び61.35kN/mmとA-10-0-0より高くなってい る。これは、変形が進むにつれて中立軸が圧縮 側に移動するため、コッターを梁中央に設ける より、分割し両端に設けた方が、その圧縮域の コッターの粗面により滑りが少なくなっている。 また鉄筋は降伏後、歪みが増加し界面の圧縮拘 束力は一定となり,滑りが増加するのに対し, アラミドロッドは弾性材で高引張力に釣合う圧 縮力が働くことにより、摩擦抵抗が滑りに対し 抵抗して、その破断時の滑りを 2.0 mm以下で抑 えることができる。

3. 有限要素法による解析

3.1 解析概要

本解析は、弾塑性2次元有限要素法とする。 解析では平面応力状態であるものとし,試験体 A-10-0の解析モデルを図-6に示す。コンク

リートは、4節点アイソパラメトリック要素で 構成され,構成則は Darwin 等による直交異方性 モデルを用いている。主応力と歪みの関係は, 引張側ではひび割れ発生まで弾性とし、主応力 が引張強度を超えて、ひび割れ発生後はテンシ ョンスティフニング効果を考慮した。一方、圧 縮側は圧縮強度に至るまでは Saenz 式を用い. それ以降の軟化域はその負勾配を直線と仮定す る。アラミドロッドは軸方向力を負担する棒要 素とし、応力-歪み関係は linear 型とする。ま た, アラミドロッドとコンクリートとは完全付 着とする。鉄筋は軸方向力を負担する要素を用 いた。鉄筋の応力-歪み関係は降伏点を折点と する bi-linear 型とする。管のモデル化では、接 合筋のせん断力の影響を無くすために, 接合界 面においてコンクリート要素とアラミドロッド 要素とで接点を設けていない。また、管の上下 端部はコンクリートの充填が不完全となるため, 管長の 1.2 倍の長さで付着が不完全とし、管内 のアラミドロッドの剛性を2割低減している。



図-6 解析モデル(A-10-0-0)

3.2 梁柱接合界面モデル

接合界面は,梁柱接合部をボンド要素で置換 し,節点に入る応力を水平方向及び鉛直方向毎

に,接線剛性と法線剛性とでモデル化を行う。 接線剛性は,界面の粘着力,コッターのせん 断抵抗及び垂直圧縮応力によるせん断摩擦を考

--- 268 ---

慮してモデル化したものである。接線剛性モデ ルを図-7 に示す。本モデルにおいては、接合 面に圧縮応力 (σ_n) が生じると、ステップ毎に その時点でせん断応力度を $\mu \sigma_n$ だけ増加させ, 初期に仮定した折れ線を、その増分だけ平行移 動させた折れ線をたどるものとする。ここで、 μは摩擦係数として,実験結果の平均滑り剛性 からコッターのない界面では 0.4, コッターの ある界面では 0.8 としている。表-4 に接合界 面モデルの特性値を示す。界面の粘着力τ_Α= 0.01・fc は、コンクリートの粘着力及び敷モル タルのせん断摩擦効果を考慮して仮定している。 ここで、コッターのせん断応力式は、コッター が試験体全幅に設けられていないので、コッタ ーのせん断強度に面積比λを乗じて, せん断強 度を低減している。



図-7 接線剛性モデル

法線剛性の復元力特性は、界面に圧縮力が働いた場合の剛性を E=0.8fc/0.02kN/mm²として、 σ_n =0.8fc 以降,また界面に引張力が働いた場合は、0.001E とし bi-linear 型に仮定する。

以上の解析モデルを用いてコッターを設けて いない A-00-0-0, 両端に配置した A-05-2-4 及び 中央に配した A-10-0-0 について解析を行う。

3.3 解析結果

各試験体の荷重-部材角及び滑り関係の実験 結果との比較を図-8及び図-9に示す。解析に おける破壊状況は、せん断荷重がおよそ 20kN で試験体引張側コンクリート要素に曲げひび割 れが発生し、コッター要素のせん断破壊が始ま った。更に、コンクリート要素にせん断ひび割 れが発生した後,滑り 0.5 mm近傍でコッター要 素が完全にせん断破壊し,部材角 30×10-3 ard を もって終了した。最大せん断荷重は, A-00-0-0, A-05-2-4 及び A-10-0-0 において, 134.9kN, 145.5kN 及び 153.6kN であり、実験結果におけ る最大せん断荷重の1.07,0.91及び0.98であり、 およそ10%以内に収まっていることから、よい 対応をしている。荷重-滑り関係においては、 A-00-0-0 では滑り 0.5 mm以降実験値よりも、そ の傾きは高くなっている。一方, A-05-2-4 及び A-10-0-0 は, せん断荷重 96.1kN 及び 91.1kN で コッターが完全にせん断破壊しており、その後 滑りが増加するといった挙動は、両試験体とも に実験値とほぼ一致している。滑り 0.5 mm以降 の滑り剛性は, A-00-0-0, A-05-2-4 及び A-10-0-0 において,各々39.7kN/mm,79.4kN/mm及び 50.9kN/ mmであり、コッターの存在及びコッターを分割 することによって滑りが減少している。

滑り 0.05 mm及び 1.5 mmの点における各試験体 の接合界面コンクリートの法線応力分布を図ー 10 に示す。いずれの試験体も接合界面の粘着力 が破壊し、コッターが壊れ始めた滑り 0.05 mmよ り、コッターのせん断破壊した滑り 1.5 mmにおい て、圧縮域に受ける法線応力は増加している。 この時 A-10-0-0 では、中央に設けたコッターの せん断破壊面にはほとんど圧縮応力を受けてい ないのに対し、A-05-2-4 では圧縮域に配置した

表-4 接合界面の特性値

	接合方法		法線剛性の特性					
	コッター	τ _A (N/mm ²)	δ <u>,</u> (mm)	τ _B (N/ mm ²)	δ _в (mm)	μ	σ (N/ mm ²)	δ (mm)
(1)	0	$0.01f_c + \mu \sigma_n$	0.02	$0.09 \lambda f_c + \mu \sigma_n$	0.5	0.8	0.8fc	0.2
(2)	×	$0.01f_c + \mu \sigma_n$	0.02	μσ.	0.5	0.4	0.8fc	0.2

O:有り、×:無し f_e:コンクリート強度、λ:コッター面積比=0.45、μ:摩擦係数



コッターのせん断破壊面に圧縮応力が働いてい ることが判る。したがってコッターを両側に分 割することで、変形が進んだ後もコッターのせ ん断破壊面に圧縮応力が働き、その粗面の摩擦 効果により滑りに抵抗するために、滑り剛性が 高くなることが実験と解析により示される。

また,解析において実験と同様にアラミドロ ッドは,引張強度に達していない。実験では, アラミドロッドに働く引張力とせん断力及び付 加せん断力によるインタラクションで破断した と思われる。本解析法では棒要素に働くせん断 力を考慮していないため,アラミドロッドの破 壊強度に関しては,今後の検討が必要とされる。

4. 結論

本研究から、以下の結論が得られる。

本解析法は、アラミドロッドを接合筋とする梁端部の滑り挙動の検証において、概ね

妥当であるとされ, せん断破壊型コッター は圧縮拘束を受けるよう端部に分割して 配置することにより, 効果的に滑りに対し 抵抗することを示している。

- 従来の圧壊型コッターに代わって、せん断 破壊型コッターによる接合部設計が可能 であるといえる。
- アラミドロッドの破断強度について、今後の検討を必要とする。

参考文献

- 連続繊維補強コンクリート編集委員会:連
 続繊維補強コンクリート【諸性質と設計法】, 技報堂出版,1995.7
- 2) 望月 重ほか:アラミド繊維補強プレキャストコンクリートの梁端接合部の実験(その2)S型せん断実験,日本建築学会大会学術講演梗概集C構造IV,pp.929-930,1998.9

-270-