

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・ガラス等の長纖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、13φ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T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せた逆T字形とする。アラミドロッド13φ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

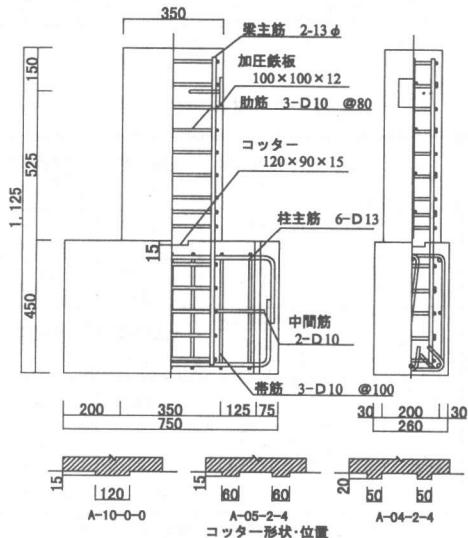


図-1 標準試験体図 (A-10-0-0)

*1 武藏工業大学大学院 工学部研究科建築学専攻 (正会員)

*2 武藏工業大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

力を伝えないように、界面近傍で接合筋に通す管長 40 mm, 内径 19 mm 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 mm 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

表-1 構造諸元

試験体名	主筋径 (表面)	コッター		管長 (内径)
		せん断(圧縮) 面積 (mm ²)	位置	
A-00-0-0		—	—	—
A-04-2-4	13φ (砂付)	4500(1800) × 2*	両側	40(19)
A-05-2-4		5400(1350) × 2*		
A-10-0-0		10800(1350)	中央	—
R-10-0-0	D13 (横筋)	10800(1350)	中央	—

*: コッターを 2 個配置したもの

表-2 材料特性

コンクリート	試験体部位		圧縮強度 (MPa)	引張強度 ¹⁾ (MPa)	弾性係数 ²⁾ (×10 ⁴ MPa)
	プレキャスト 梁	柱			
	28.6～ 30.4	2.11～ 2.87	3.04～ 3.43		
	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	13φ	1432	9.60	6.96	
鉄筋	D10	513 (370)	—	17.15	
	D13	497 (342)	4.50	17.93	

*1: 引張強度は、コンクリートの割裂強度とする。

*2: 弹性係数は、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 $R = 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 12.0, 16.0, 20.0, 30.0 \times 10^{-3} \text{ rad}$ で制御する。部材角 $R = 30.0 \times 10^{-3} \text{ rad}$

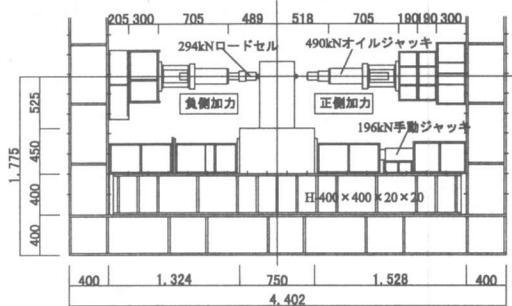


図-2 加力装置図

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 $R = 30.0 \times 10^{-3} \text{ rad}$ 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纖維が比較的揃っており、せん断破壊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 では纖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

力が働き、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く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 の荷重一部材角曲線を示す。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は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、鉄筋の降伏時まではと

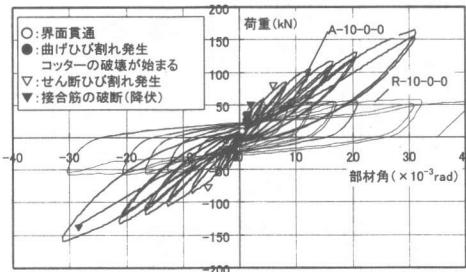


図-3 荷重一部材角曲線

表-3 各点のせん断荷重、滑り及び平均滑り剛性

試験体名	Q_A	δ_A	Q_B	δ_B	Q_C	δ_C	K
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

$Q_{A,B,C}$: 各点 A,B,C におけるせん断荷重(kN)、 $\delta_{A,B,C}$: 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。

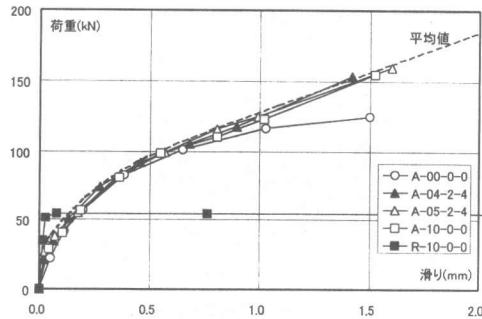


図-4 正荷重時の荷重-平均滑り包絡曲線

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。 Q_B

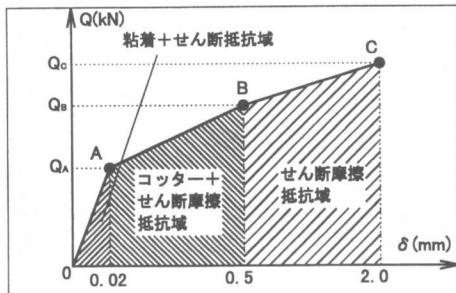


図-5 滑り曲線モデル

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。 Q_c 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一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-10-0-0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。

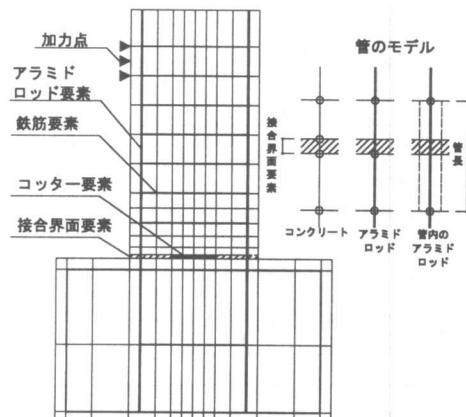


図-6 解析モデル (A-10-0-0)

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

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のせん断応力度を $\mu \sigma_n$ 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 $\tau_A = 0.01 \cdot f_c$ 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。

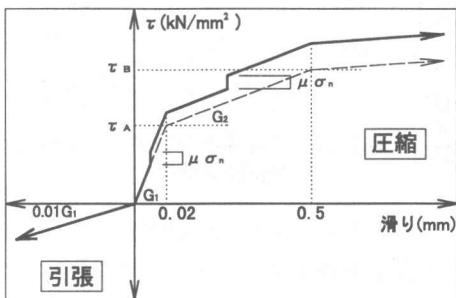


図-7 接線剛性モデル

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 $E = 0.8f_c/0.02\text{kN/mm}^2$ として、 $\sigma_n = 0.8f_c$ 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

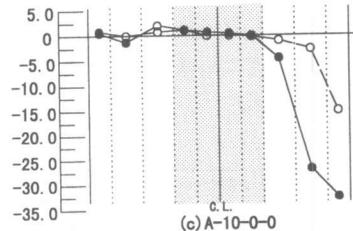
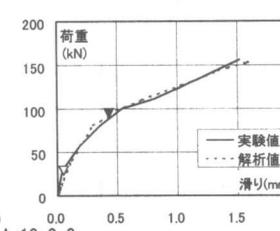
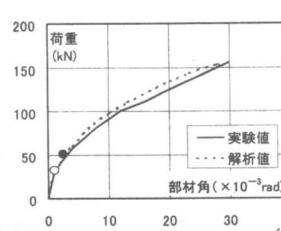
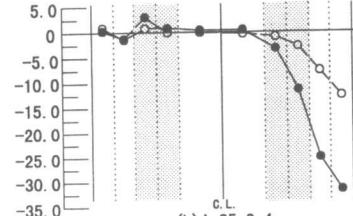
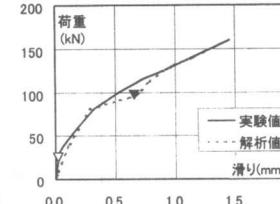
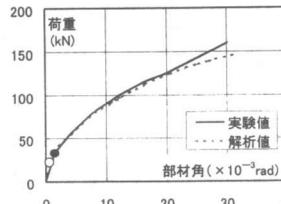
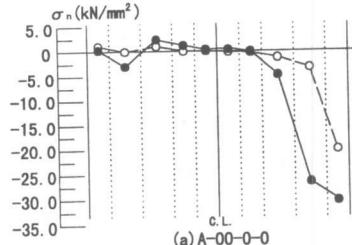
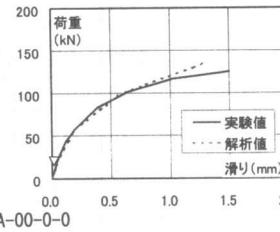
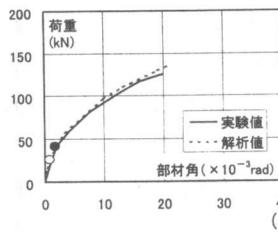
各試験体の荷重一部材角及び滑り関係の実験結果との比較を図-8及び図-9に示す。解析における破壊状況は、せん断荷重がおよそ20kNで試験体引張側コンクリート要素に曲げひび割れが発生し、コッター要素のせん断破壊が始まった。更に、コンクリート要素にせん断ひび割れが発生した後、滑り0.5mm近傍でコッター要素が完全にせん断破壊し、部材角 $30 \times 10^{-3}\text{rad}$ をもって終了した。最大せん断荷重は、A-00-0-0、A-05-2-4及びA-10-0-0において、134.9kN、145.5kN及び153.6kNであり、実験結果における最大せん断荷重の1.07、0.91及び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。荷重一滑り関係においては、A-00-0-0では滑り0.5mm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0.5mm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0.05mm及び1.5mm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-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0.05mmより、コッターのせん断破壊した滑り1.5mm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	接合方法	接線剛性の特性				法線剛性の特性	
		τ_A (N/mm ²)	δ_A (mm)	τ_B (N/mm ²)	δ_B (mm)	μ	σ (N/mm ²)
コッター	○	$0.01f_c + \mu \sigma_n$	0.02	$0.09 \lambda f_c + \mu \sigma_n$	0.5	0.8	$0.8f_c$
(1)	○	$0.01f_c + \mu \sigma_n$	0.02	$0.09 \lambda f_c + \mu \sigma_n$	0.5	0.8	$0.8f_c$
(2)	×	$0.01f_c + \mu \sigma_n$	0.02	$\mu \sigma_n$	0.5	0.4	$0.8f_c$

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



○：曲げひび割れ発生

●：せん断ひび割れ発生

図-8 荷重一部材角関係

▽：コッターが壊れ始める

▼：コッターのせん断破壊

図-9 荷重一滑り関係

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。

1. 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。

2. 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。
3. 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

- 1) 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