

AFRP ロッド埋め込み補強 RC 版の押し抜きせん断性状

Punching Shear Capacity of RC Slabs Strengthened with Near Surface Mounted AFRP Rods

三井建設(株)
室蘭工業大学
(独)北海道開発土木研究所
室蘭工業大学

○フェロー
フェロー
正会員
フェロー

三上 浩 (Hiroshi Mikami)
岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
田口史雄 (Fumio Taguchi)
松岡健一 (Ken-ichi Matsuoka)

1. はじめに

近年、新活荷重の対応策および劣化部補強対策として、下面増厚工法や鋼板接着工法およびFRPシート接着工法などによる鉄筋コンクリート(RC)床版の補強工事が盛んに行われている。しかしながら、既往の床版下面補強工法では、コンクリート表面を完全に補強材で被覆してしまうため、1)コンクリートに発生したひび割れの目視点検が不能になること、2)コンクリートからの排水が困難であり部材内部に滞水して床版コンクリートの耐疲労性能が低下すること、等の問題点を有している。

このような背景より、本研究では版状既設RC構造物の新しい補強方法として、アラミド繊維製ロッド(以後、AFRPロッド)をRC部材のかぶりコンクリートに埋設する工法を提案し、その補強効果をRC版の押し抜きせん断実験によって検討した。なお本実験では、3種類の直径を有するAFRPロッドを埋設したRC版を製作

し、押し抜きせん断耐力や破壊性状に与える補強材量の影響に着目して検討を行った。

2. 実験の概要

表-1に本実験に用いた試験体の一覧を示している。試験体数は、無補強試験体を含め3種類の直径のAFRPロッドを用いて補強量を変化させたロッド補強試験体3体の全4体である。表中、試験体名の第一項目はNが無補強、Rがロッド補強試験体を示し、Rに付随する数字はロッド径の小さな順に1,2,3と示している。

図-1には、試験体の形状寸法と配筋状況およびAFRPロッドの配置状況を歪ゲージの位置とともに示している。RC版の寸法は1,650×1,650×150mmであり、主鉄筋および配力鉄筋にはD13(SD295A)を用い、150mm間隔で下端のみに配置している。ロッド補強試験体製作にあたり、まず配力鉄筋方向のロッドを埋設するために直径の2倍強の深さおよびロッド径を多少上回る幅の溝をカッターで掘削し、その後、主鉄筋方向のロッドを埋設するための溝を、直径を多少上回る幅および深さで切削した。その溝内にエポキシ樹脂系パテ材を充填した後、配力鉄筋方向、主鉄筋方向の順にロッドを埋設し、再度、パテ材を充填した。またロッド埋設後、ロッドの浮き上がりが生じないように鋼製の刃型治具で押さえ

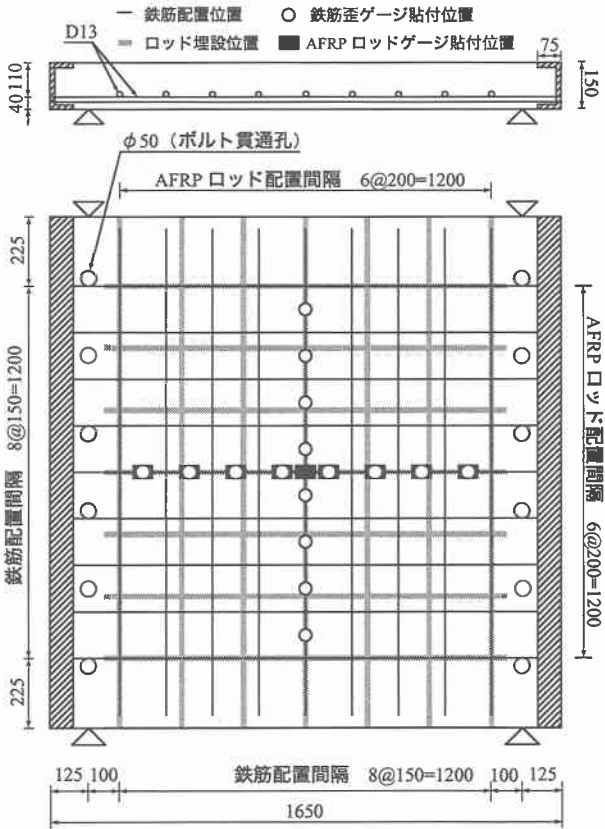


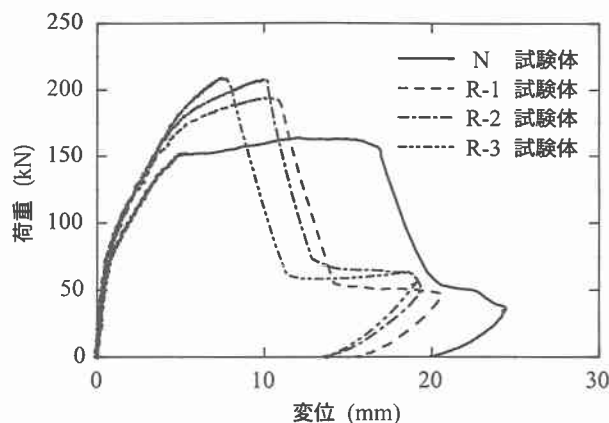
図-1 試験体の形状寸法と歪ゲージ位置

表-1 試験体の一覧

試験体名	版厚(mm)	かぶり(mm)	有効高さ(mm)	鉄筋配置間隔(mm)	AFRPロッド配置間隔(mm)
N	150	40	110	D13@150	-
R-1					RA5@200
R-2					RA7@200
R-3					RA9@200

表-2 AFRPロッドの材料特性値

補強材料	ロッド径(mm)	公称断面積A(mm ²)	弾性係数E(GPa)	引張強度(GPa)	破断歪ε(%)
RA5	5.0	19.6	62.5	1.45	2.00
RA7	7.3	42.0			
RA9	9.0	63.0			



図－２ 荷重－版中央変位関係

表－３ 各試験体の実験値一覧

試験体名	最大荷重 (kN)	最大荷重時 変位 (mm)	引張剛性 $E \cdot A$ (GN)	荷重増分 (kN)
N	163.7	12.0	-	-
R-1	193.9	10.4	1.2	30.2
R-2	207.8	10.0	2.6	44.1
R-3	209.0	7.5	3.9	45.3

込み所定の位置にロッドを配置した。なお、ロッドの歪ゲージは試験体完成後に貼り付けることとしたため、主鉄筋方向のみに貼り付けている。ロッドの配置位置は、版中央部から配力鉄筋方向には全面、主鉄筋方向には両側支点の 50 mm 手前までとし、それぞれ版中央部から 200 mm 間隔で配置している。

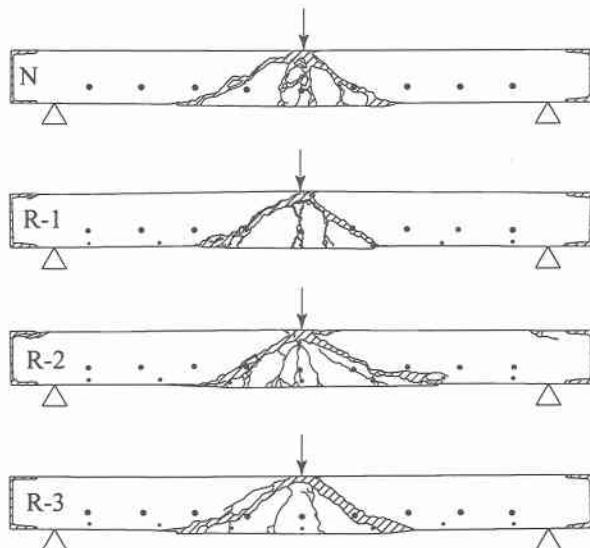
試験体の一对辺は支持間隔が 1,400 mm で支点部は回転を許容するが浮き上がりを拘束したピン支持に近い構造とし、他対辺は自由とした。なお、載荷板は直径 60 mm の鋼製厚肉円板とし版中央に設置した。

実験時におけるコンクリートは材令 120 日、平均圧縮強度が $f'_c = 31.6 \text{ MPa}$ であった。また、鉄筋の降伏強度は 362 MPa であった。表－2 には、AFRP ロッドの力学的特性値の一覧を示している。本実験における測定項目は、載荷荷重、版中央変位、鉄筋およびロッド各点の歪である。また、実験終了後には配力鉄筋方向の版中央部を切断して破壊面の観察を行っている。

3. 実験結果及び考察

3.1 荷重－版中央変位関係

図－2 には、各試験体の荷重と版中央変位（以後、単に変位）の関係を比較して示している。また、表－3 には各試験体の最大荷重、最大荷重時変位およびロッド一本あたりの引張剛性 $E \cdot A$ と荷重増分の一覧を示している。図より、ロッド補強を施していない N 試験体は 80 kN 程度で主鉄筋方向に曲げひび割れが発生し、版の曲げ剛性が低下して変位が増大していることが分かる。その後、荷重は変位 5 mm、荷重 150 kN 程度までほぼ線形に増加し、最大荷重程度の荷重を保持して変位が 16 mm 程度に達した後、押し抜きせん断破壊に至った。



図－３ 切断面のひび割れ図

表－４ ひび割れ角度の一覧

試験体名	$\alpha 1$ (度)	$\alpha 2$ (度)
N	36	22
R-1	34	30
R-2	36	17
R-3	37	16

一方、AFRP ロッドで補強した R 試験体は、N 試験体のような剛性低下が顕著には見られず、荷重の増加と共に徐々に変位が増大して押し抜きせん断破壊に至っている。なお、いずれの補強試験体もロッドが破断していないことを確認している。このように、R 試験体で剛性低下が抑制されるのは、ロッドを埋設することによって、かぶりコンクリートにおけるひび割れの発生および拡大が抑制されるためと推察される。また、R 試験体の中では、R-3 試験体の最大荷重時変位が最も小さく、剛性勾配が最も大きいことが分かる。しかしながら、R-3 試験体の補強による荷重増分は R-2 試験体のそれとほぼ同程度であることから、 $E \cdot A$ の増加と荷重増分は線形比例関係にないことが分かる。これは、補強量を増加させても補強効果には上限があることを示すものと考えられる。なお、N 試験体で塑性棚が生じたのは、曲げ耐力と押し抜きせん断耐力がほぼ同等であることを示している。また、ロッド補強によって曲げ耐力が押し抜きせん断耐力を上回り、R 試験体は全て押し抜きせん断破壊したのと考えられる。

3.2 押し抜きせん断性状

図－3 には配力鉄筋方向の版中央部の切断面におけるひび割れ性状を示している。図から明らかなように、上縁から下端鉄筋までのひび割れ角度 ($\alpha 1$) とかぶりコンクリートのひび割れ角度 ($\alpha 2$) とが異なり、これらは試験体によっても変化していることが分かる。各試験体のひび割れ角度を整理し、表－4 に示す。表より、 $\alpha 1$ はいずれの試験体もほぼ同程度であることが分かる。一方、 $\alpha 2$ はいずれの試験体においても $\alpha 1$ を下回っており、かぶり部において押し抜きせん断面が緩やかとな

表－５ かぶり部の耐力負担と押し抜きせん断耐力

試験体名	耐力増分 実験値① (kN)	耐力増分 計算値② (kN)	①/②	押し抜きせん断耐力 実験値③ (kN)	押し抜きせん断耐力 計算値④ (kN)	③/④
N	-	-	-	163.7	161.6	1.01
R-1	30.3	33.6	0.90	193.9	195.2	0.99
R-2	44.1	46.6	0.95	207.8	208.2	1.00
R-3	45.3	51.4	0.88	209.0	213.0	0.98

り、広がり有る傾向にあることが分かる。

3.3 押し抜きせん断耐力

表－５には、かぶり部の耐力負担と押し抜きせん断耐力の関係を示している。ここでは、かぶりコンクリートがロッド補強によってより健全となり、押し抜きせん断耐力の向上に寄与するものと仮定して、土木学会コンクリート標準示方書¹⁾（以後、示方書）に基づいてかぶり部の押し抜きせん断耐力を計算した。式(1)に耐力算定式を示す。

$$V_{pcd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot f_{pcd} \cdot u_p \cdot d \tag{1}$$

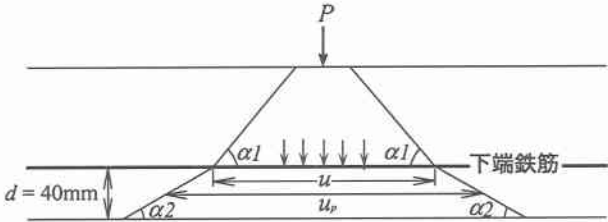
$$f_{pcd} = 0.20 \sqrt{f'_{cd}} \text{ (N/mm}^2\text{)}, \quad \beta_d = \sqrt[3]{1/d} \text{ (d:m)}$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100p}, \quad \beta_r = 1 + 1/(1 + 0.25u/d)$$

- f'_{cd} : コンクリートの圧縮強度
- u : 載荷面の周長, u_p : 設計断面の周長
- d : かぶり厚さ, $p (=n_f \cdot A_f / (b \cdot d))$: 補強筋比
- A_f : AFRP ロッドの断面積, b : 幅
- $n_f (=E_f / E_s)$: 弾性係数比 (AFRP ロッド/鉄筋)

すなわち、図－４に示す押し抜きせん断性状のモデル化を参考に、 $\alpha 1 = 45^\circ$ の角度で下端鉄筋位置までひび割れが進展した際の周長を載荷面の周長 (u) とし、前述した $\alpha 2$ の角度でかぶり部に押し抜きせん断面が形成されるものと仮定して、設計断面の周長 (u_p) を求め評価することとした。なお、版下面の AFRP ロッドは、鉄筋との弾性係数比を用いて補強筋比として考慮した。なお、本手法は FRP シートを下面接着した RC 版の押し抜きせん断耐力を比較的良好に評価できる方式として、著者らが既往の研究²⁾で提案した方式である。上記に基づいて算出したかぶり部の押し抜きせん断耐力を表－５に示している。表には、かぶり部の計算押し抜きせん断耐力②に、N 試験体の計算耐力を加算した計算押し抜きせん断耐力④を実測耐力③と比較して示している。ここで、耐力増分の実験値①は R 試験体の押し抜きせん断耐力から N 試験体の耐力を差し引いた耐力である。なお、N 試験体の計算値は示方書に基づいて下端鉄筋より上側の断面を対象に、押し抜きせん断面の角度 $\alpha 1$ を 45° と仮定して算出した値である。

表より、かぶり部の耐力負担として算出した計算値②は、実験値①に比べて多少大きいものの両者はほぼ対応していることが分かる。また、押し抜きせん断耐力の計算値④は、かぶり部の耐力負担が全体の 15～25 % 程度と小さいことから、実測の耐力と比較的良好に対応している。従って、ロッド補強による押し抜きせん断耐力の



図－４ 押し抜きせん断性状のモデル化

増加は主としてかぶりコンクリートが押し抜きせん断耐力の向上に寄与するためと考えられる。

3.4 張力分担性状

図－５には、各試験体の主鉄筋方向における鉄筋とロッドおよび配力鉄筋方向の鉄筋の分担張力を示している。張力は、鉄筋およびロッドに貼り付けた歪ゲージの値を用いて算出した。なお、鉄筋およびロッドの張力は、各々版中央に配置された鉄筋およびロッド 1 本の分担張力である。

(a) 図より、各試験体の主鉄筋の張力は版中央部近傍において最大 45 kN 程度を示していることが分かる。この値は鉄筋の降伏張力にほぼ対応していることから、本実験の試験体は補強の有無にかかわらず、全ての試験体で最大荷重時には版中央部付近の主鉄筋が降伏して、押し抜きせん断破壊に至っていることが分かる。また、N 試験体では、荷重が 100 kN ですでに中央部主鉄筋が 30 kN 以上の張力を分担し、荷重が 150 kN では中央部近傍の主鉄筋が降伏したものの、その後の張力分布の変化は顕著ではない。

一方、R 試験体の主鉄筋の張力分布はほぼ台形状を示し、中央部近傍では荷重 150 kN 以上で主鉄筋が降伏している。その後、荷重の増加とともに大きな張力を分担する範囲が版中央部から支点側に大きく拡大している。またロッドの張力分布は、R-1, R-2 試験体では載荷点を中心とする三角形形状を示し、補強量が大きい R-3 試験体では張力分布範囲がより支点側に拡大し、台形状を呈していることが分かる。荷重が 100 kN で主鉄筋の分担張力を比較すると、明らかに R 試験体の分担張力は N 試験体よりも小さく、ロッド補強によって主鉄筋の分担張力が軽減されていることが分かる。なお、最大荷重時の版中央部におけるロッドの分担張力は R-3 試験体を除いて主鉄筋の半分程度以上であり、R-3 試験体では半分程度以下と小さい。このように、ロッド径を増加させてもある張力以上をロッドが負担することはできない。このため、R-3 試験体と R-2 試験体の押し抜きせん断耐力に大差が無かったものと推察される。

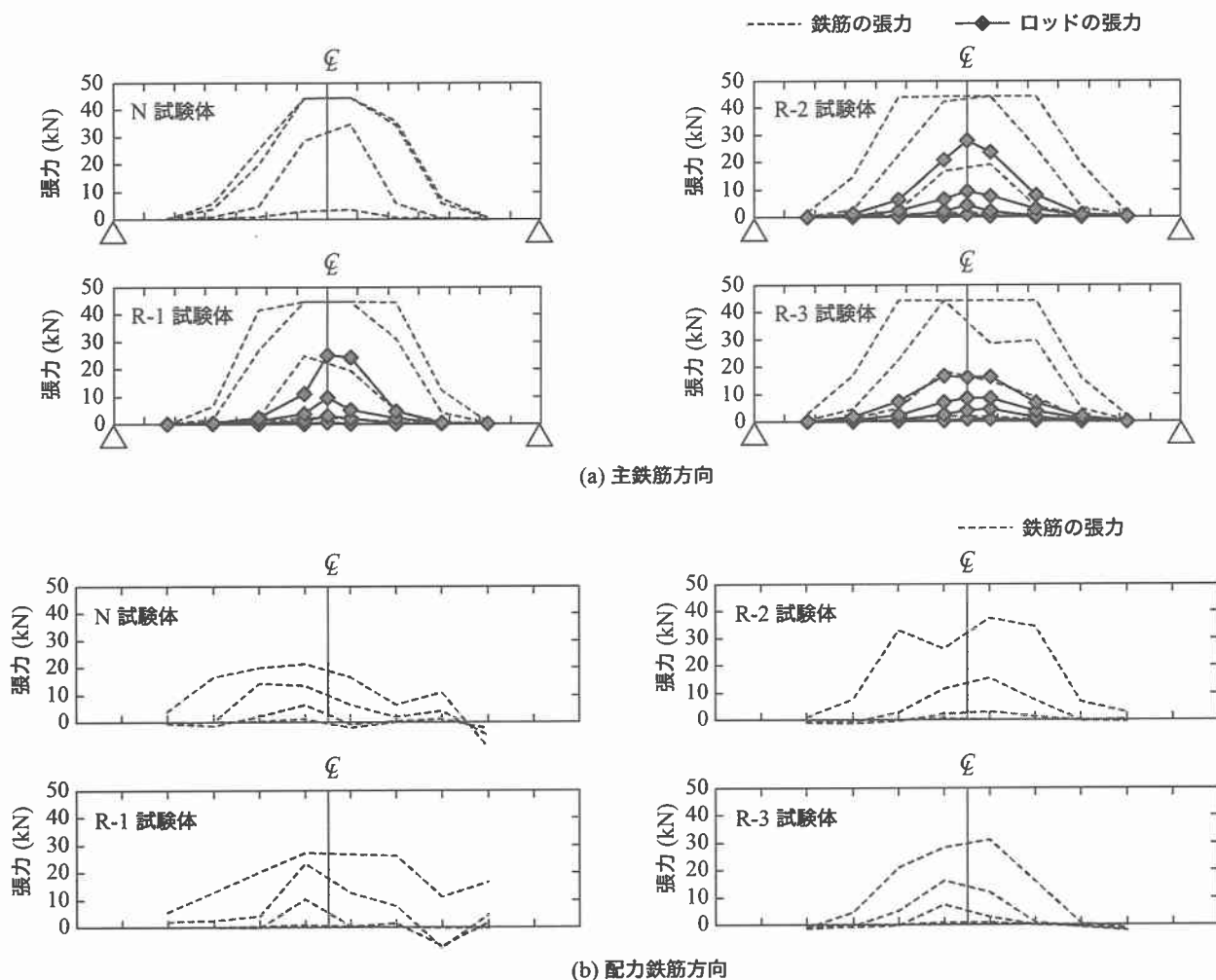


図-5 鉄筋およびAFRPロッドの分担張力の比較図（荷重段階：50, 100, 150 (kN)，最大荷重時）

(b) 図より、N 試験体の配力鉄筋の張力は主鉄筋に比べて自由端側に広がる傾向にあり、最大荷重時の版中央部配力鉄筋の最大張力は、降伏張力の半分程度であることが分かる。一方、R 試験体の配力鉄筋の張力分布は N 試験体に比べて版中央に集中する傾向にあり、最大張力は最大押し抜きせん断耐力の増加に対応し、N 試験体に比べて大きくなる傾向にある。このように、補強量が増加するにつれて配力鉄筋の張力が版中央に集中するため、小さな変位量で押し抜きせん断破壊しやすいものと考えられる。

4. まとめ

本実験では、AFRP ロッドの下面埋設による RC 版の押し抜きせん断耐力向上効果を検討するため、3 種類の直径を有する AFRP ロッドを埋設した RC 版の押し抜きせん断実験を行い、押し抜きせん断耐力や破壊性状を比較検討した。本研究の範囲内で得られた結論を要約すると下記の通りである。

- 1) RC 版下面に AFRP ロッドを埋設して補強することにより、ひび割れ発生後における剛性低下の抑制や、押し抜きせん断耐力の増加が期待できる。
- 2) かぶりコンクリートに形成された押し抜きせん断面の角度は、載荷面から下端鉄筋位置までに形成され

る押し抜きせん断面の角度よりも小さくなる傾向にある。

- 3) かぶりコンクリートの耐力寄与を仮定した計算押し抜きせん断耐力は実測値とほぼ対応する。これは、FRP シート補強の場合と同様であることから、ロッド補強もシート補強と同様に押し抜きせん断耐力の増加が期待できる。
- 4) ロッド補強を施すことによって主鉄筋の分担張力が軽減され、一方で配力鉄筋の分担張力は荷重増加に対応して増大する。しかし、補強量を増大させてもロッドの分担張力には限界がある。また、ロッド補強により配力鉄筋の分担張力は版中央に集中し、小さな変位で押し抜きせん断破壊に至りやすい。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書（平成 8 年制定）設計編，1996。
- 2) 三上 浩，岸 徳光，栗橋祐介，松岡健一：FRP シートを下面接着した RC 版の押し抜きせん断性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.23, No.1, pp. 847-852, 2001。