

論文 モルタル充填式継手と集約配筋が RC はりのせん断性状に与える影響

安田 瑛紀^{*1}・松本 浩嗣^{*2}・松本 智夫^{*3}・二羽 淳一郎^{*4}

要旨: 機械式継手の一種であるモルタル充填式継手と、継手のスリーブ端に集約配筋されたせん断補強鉄筋を有する RC はりのせん断性状を把握するため、スリーブ位置、スリーブの有無、集約配筋の有無をパラメータとして5体の RC はり供試体の載荷実験を行った。実験の結果、いずれの試験体においても既往の修正トラス理論式に従って耐力を計算することで、安全側に耐力を評価できることを確認した。スリーブと集約配筋を併用することで集約区間へのひび割れの集中を防ぐことができ、特にスリーブ位置がせん断スパンの一端側に配置されると破壊がせん断スパン内の残り区間に集中し、耐力が大きく向上することが明らかとなった。

キーワード: モルタル充填式継手, 集約配筋, スリーブ位置, せん断性状, RC はり

1. はじめに

近年、構造物の高層化・長大化に伴い、高強度鉄筋や太径鉄筋の使用、加えて施工合理性・信頼性に優れるプレキャスト工法の利用が広がっており、これらに適用できる鉄筋継手が求められている。モルタル充填式継手はこのような背景から使用実績が増加しつつあり、今後ますますの使用が見込まれる。

しかしながら、モルタル充填式継手は主鉄筋より径の太いスリーブを有するために、スリーブ部にせん断補強鉄筋を配置する場合には主鉄筋部分とは寸法の異なるせん断補強鉄筋が必要となり、施工性が悪化してしまう。同時に、スリーブ部に配置されたせん断補強鉄筋によりかぶり厚が決定されてしまい、最小かぶり厚を確保するためには主鉄筋をさらに内側に配置しなければならない。これらの問題に対し、スリーブ部のせん断補強鉄筋をスリーブ端部に集約して配筋する「集約配筋」を採用できれば、施工上、設計上有利である。しかし、スリーブや集約配筋が RC はりのせん断性状に与える影響についての研究は建築分野では行われているものの¹⁾未だ多くはない。著者らはこれまで、せん断スパン比 2.5~3.3 程度の RC はりについて載荷試験を行い、スリーブの存在によりせん断耐力が上昇することを確認してきた²⁾。しかし、せん断スパン比が比較的大きい RC はりの場合や、スリーブ位置が異なる場合に集約配筋が与える影響については未だ不明瞭である。そこで本研究では、せん断スパン比 4.0 の RC はりについて、スリーブ位置やスリーブの有無、集約配筋の有無をパラメータとした5体の RC はり供試体の載荷実験を行い、スリーブおよび集約配筋が RC はりのせん断性状について与える影響を検討した。

2. 実験概要

2.1 実験ケースおよび供試体概要

表-1 に実験ケースを、図-1 に供試体図を、ならびに表-2 に供試体諸元を示す。供試体はせん断破壊先行型となるよう設計したせん断スパン比 $a/d=4.0$ 、全長 3m の RC はりであり、実験パラメータは、1)スリーブ位置、2)スリーブの有無、3)集約配筋の有無である。

スリーブ位置による影響を検討する A シリーズではスリーブの中心と支点間の距離 x を、有効高さ d と同じ長さだけ水平方向に変動させてそれぞれ 600, 300, 900mm とした A-Center, A-Support, A-Load の3体の供試体を用意した。また、スリーブを配置せずにせん断スパン中央にスリーブ長と同じ 300mm の区間を空けて集約配筋をした B と、スリーブ径に合わせて主鉄筋部よりサイズの大きいせん断補強鉄筋を用意してスリーブ部にも均等配筋とした C の、合計5体の供試体を作製した。

コンクリートには呼び強度 30N/mm²、粗骨材最大寸法 20mm の市販のレディーミクストコンクリートを使用し、5体の供試体を同時に打設した。主鉄筋と圧縮鉄筋には異形 PC 鋼棒 D22 (SBPD1080/1230) を2本ずつ配筋し、曲げ耐力を確保した。せん断補強鉄筋には異形鉄筋 D6

表-1 実験ケース

供試体	A-Center	A-Support	A-Load	B	C
$x(\text{mm})$	600 (中央)	300 (支点)	900 (載荷点側)	600	600
スリーブ	○	○	○	×	○
集約配筋	○	○	○	○	×

x : 支点とスリーブ (B の場合は集約区間) 中央間の距離

*1 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

*2 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 助教 博(工) (正会員)

*3 日本プライススリーブ(株) 研究部 課長 博士(工学) (正会員)

*4 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 教授 工博 (正会員)

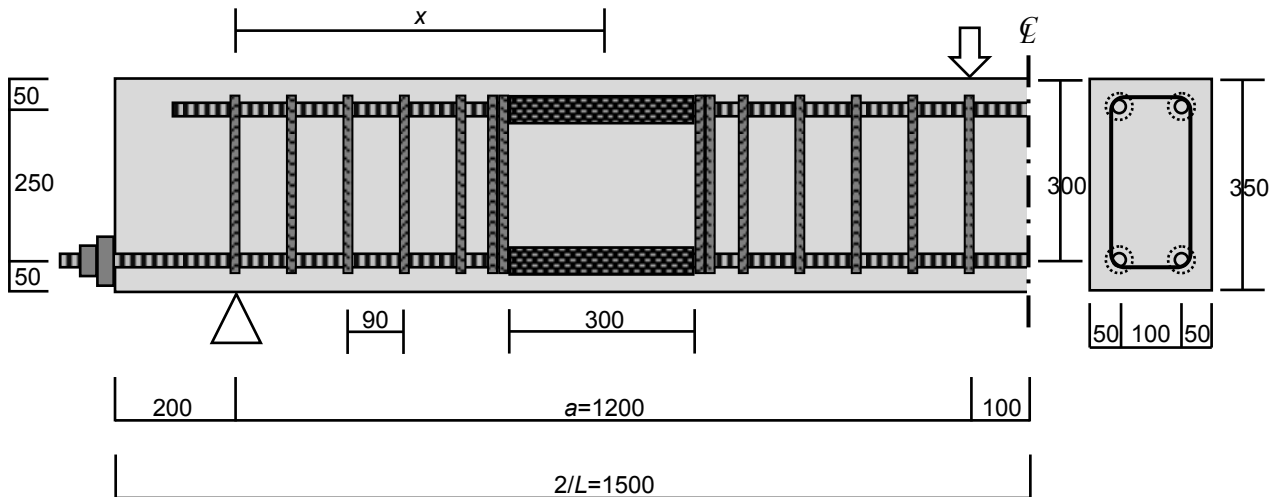


図-1 供試体図

表-2 供試体諸元

寸法			コンクリート	主鉄筋および圧縮鉄筋			せん断補強鉄筋			
b (mm)	d (mm)	a/d	呼び強度 (N/mm^2)	規格	p_w (%)	f_y (N/mm^2)	規格	r_w (%)	f_{wy} (N/mm^2)	s (mm)
200	350	4.0	30	SBPD1080/1230 D22	1.29	1168	SD295A D6	0.35	333	90

b : 部材幅, d : 有効高さ, a/d : せん断スパン比, p_w : 主鉄筋比, f_y : 主鉄筋の降伏強度,
 r_w : せん断補強鉄筋比, f_{wy} : せん断補強鉄筋の降伏強度, s : 非集約部のせん断補強鉄筋間隔

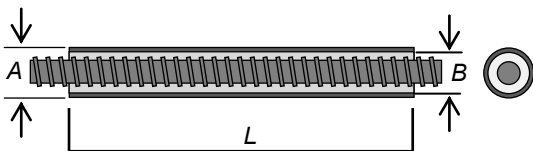


図-2 継手部の詳細

表-3 スリーブ物性

規格	降伏強度 (N/mm^2)	外径 A (mm)	内径 B (mm)	長さ L (mm)
FCAD1000	1041	44	28	300

(SD295A) を使用し, せん断補強鉄筋間隔 $s=90mm$ で配筋した。集約配筋とした供試体ではせん断補強鉄筋をスリーブ (B では主鉄筋上の 300mm 区間) の両端に集約して配筋し, いずれの供試体においても集約区間の両端に 2 本ずつ集約して配筋した。スリーブの材質には FCAD1000 を使用し, グラウトモルタルは圧縮強度 $120N/mm^2$ の無収縮モルタルを使用した。図-2 に継手部の詳細を示し, 継手の材料特性を表-3 にまとめる。また, 継手内は通し配筋とした。なお, 各供試体のスリーブ位置と配筋の違いは, 図-4 に図示されている。

2.2 荷重実験内容および計測項目

荷重実験は, 油圧式 1000kN 万能試験機を用いて 2 点単調荷重で行った。荷重点は, 石膏を用いて水平にした上で, 幅 64mm の鋼板を設置した。主鉄筋は供試体端部から突出させ, アンカプレートとナットを用いて定着補強した。荷重実験中の計測項目は, 荷重, スパン中央

と支点の変位, せん断補強鉄筋ひずみ, 等曲げ区間の主鉄筋ひずみである。

3. 実験結果

3.1 耐力計算

荷重実験当日におけるコンクリート圧縮強度とそれを用いて求めた計算せん断耐力, そして実験におけるせん断耐力を, 表-4 にまとめる。

せん断耐力の計算には修正トラス理論を用いて, 式(1)~(3)から算出した。コンクリート部分が受け持つせん断耐力については文献³⁾から式(2)を使用した。

$$V_{u-cal} = V_{c-cal} + V_{s-cal} \quad (1)$$

$$V_{c-cal} = 0.2 f'_c{}^{1/3} (d/1000)^{1/4} / p_w^{1/3} (0.75 + 1.4/(a/d)) b d \quad (2)$$

$$V_{s-cal} = A_w f_{wy} z / s \quad (3)$$

ここで, V_{u-cal} : 計算せん断耐力 (kN), V_{c-cal} : コンク

表-4 計算最大荷重, 載荷実験結果まとめ

供試体	f'_c (N/mm ²)	V_{cal} (kN)			V_{exp} (kN)		
		V_{s-cal}	V_{c-cal}	V_{u-cal}	V_{s-exp}	V_{c-exp}	V_{u-exp}
A-Center	34.7	61.5	63.3	124.8	78.0 (1.27)	65.4 (1.03)	143.4 (1.15)
A-Support	41.2	61.5	67.1	128.6	61.8 (1.00)	104.0 (1.55)	165.8 (1.29)
A-Load	38.1	61.5	65.3	126.8	84.4 (1.37)	101.1 (1.55)	185.5 (1.46)
B	36.4	61.5	64.4	125.9	74.5 (1.21)	63.7 (0.99)	138.2 (1.10)
C	38.1	61.5	65.3	126.8	90.4 (1.47)	91.1 (1.40)	181.5 (1.43)

() 内の数字は計算値に対する比率である

リート部分が受け持つせん断力 (kN), V_{s-cal} : せん断補強鉄筋が受け持つせん断力 (kN), f'_c : コンクリート圧縮強度 (N/mm²), d : 有効高さ (mm), p_w : 主鉄筋比 (%), a : せん断スパン (mm), b : 部材幅 (mm), A_w : せん断補強鉄筋断面積 (mm²), f_{wy} : せん断補強鉄筋の降伏強度 (N/mm²), z : モーメントアーム長= $7d/8$ (mm), s : せん断補強鉄筋間隔 (mm) である。

計算においては, 集約配筋とスリーブの影響を考慮せず, スリーブと集約配筋のない RC はりの計算値とし, これと実験値を比較することで, スリーブや集約配筋がせん断性状に与える影響を考察する。

3.2 載荷実験結果

載荷実験の結果, いずれの供試体においても計算せん断耐力を下回ることはなく, 修正トラス理論に基づいて式(1)~(3)からせん断耐力を計算することでいずれも安全側の評価となった。しかし, 計算値との比率は 1.10 ~ 1.46 となり, 一部の供試体では過度に安全側に評価する結果となった。この理由については 4 章で考察する。

図-3 に全供試体の荷重-変位曲線を, 図-4 に各供試体の破壊したせん断スパンにおける最大荷重時のひび割れ性状をまとめる。図-4 中において, 顕著な斜めひび割れを太線で示す。いずれの供試体も斜めひび割れの発生後にひび割れを横切るせん断補強鉄筋が降伏し, その後斜めひび割れが上縁に到達し最大荷重を迎えた。いずれの供試体においても最大荷重時に主鉄筋は降伏しておらず, せん断破壊したと判断した。

最大荷重時における, 顕著な斜めひび割れを横切るせん断補強鉄筋の計測ひずみからせん断補強鉄筋が受け持つせん断力の実験値 V_{s-exp} を求め, せん断耐力 V_{u-exp} と V_{s-exp} の差をコンクリート部分が受け持つせん断力の実

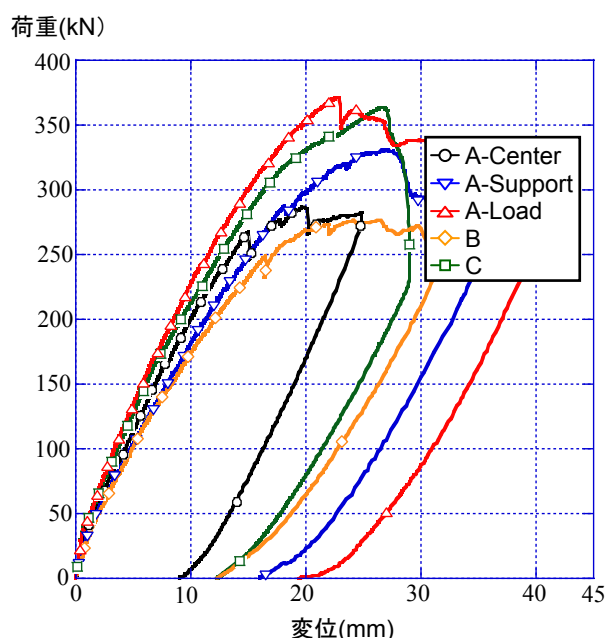


図-3 荷重-変位曲線

験値 V_{c-exp} として算出し, 表-4 内に示す。

4. 集約配筋はりのせん断性状の考察

4.1 スリーブの有無による影響

せん断スパン中央にスリーブと集約配筋を配置した A-Center とスリーブのない B では, A-Center の方が若干ながら高い耐力を示した。また, V_{s-exp} と V_{c-exp} のそれぞれの値も, どちらの供試体でも V_{s-exp} が計算値より 20% 前後増加している一方で, V_{c-exp} が計算値とほぼ同等という結果となり, 少なくともスリーブが中央に位置する場合には, スリーブの有無がせん断抵抗機構の形成に与える影響は小さいといえる。しかしながら, 両者の荷重-

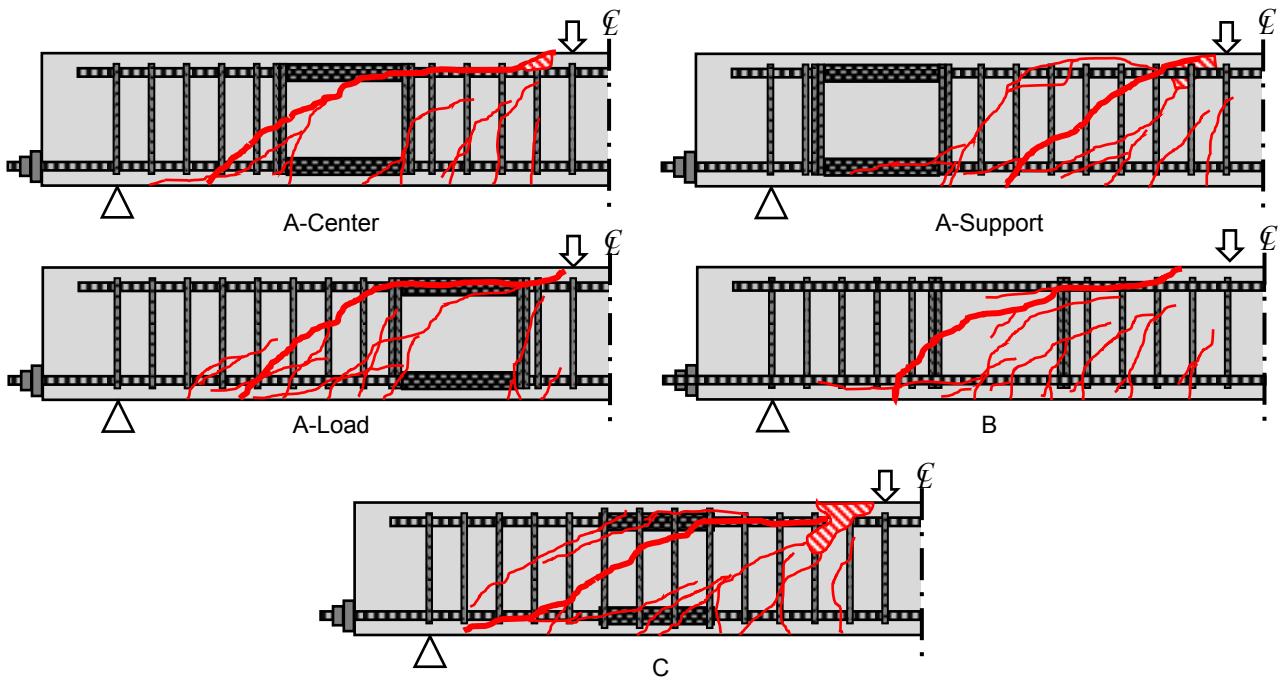


図-4 最大荷重時のひび割れ性状（太線は顕著な斜めひび割れ，斜線部は圧壊部）

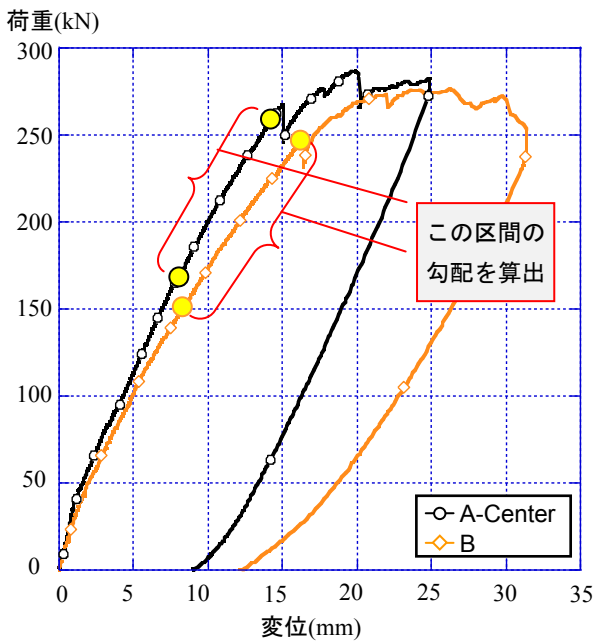


図-5 A-Center と B の荷重-変位曲線
(グラフ上の2点は曲げひび割れ時と最大荷重の90%時)

変位曲線を図-5に示すが，特に斜めひび割れ発生以降における剛性がスリーブのないBでは明らかに低下していることがわかる。剛性の指標として，荷重-変位曲線における最大荷重の90%荷重時 ($0.9P_{max}$) と，斜めひび割れ発生時荷重 (P_{cr}) における2点(図-6のグラフ上に○プロットで示す)を結ぶ割線の勾配を算出すると，A-Centerで14.68kN/mmなのに対し，Bでは12.10kN/mmと，17.6%ほど低下している。

また，ひび割れ性状に注目すると，Bではスリーブの

ない集約区間に斜めひび割れが集中している一方で，スリーブのあるA-Centerでは斜めひび割れは集約区間に特に集中していない。このことから，集約区間ではせん断補強鉄筋を配置していないために本来ひび割れが容易に進展・集中するが，スリーブを配置することでその影響を低減できることがうかがえる。これは図-6に示すように，集約配筋によりせん断補強鉄筋間隔が増大するとその区間のコンクリート圧縮力が集中するが，主鉄筋より剛性の高いスリーブを用いることで力の釣合を保つことができ，集約区間の変形の集中を防げること¹⁾，ダウエル作用によるせん断抵抗が上昇すること²⁾に起因すると考えられる。結果として，スリーブのないBでは集約区間に複数の斜めひび割れが集中し，その進展にともないA-Centerより剛性が低下したと考えられる。

4.2 集約配筋による影響

スリーブ部も均等配筋としたCは，集約配筋としたA-Centerよりも26.6%高い耐力を有する結果となった。

V_{s-exp} を比較すると，いずれも計算値より安全側の評価であるが，CのほうがA-Centerよりさらに20%程度計算値より高い値となっている。ひび割れ性状に注目すると，A-Centerに比べてCではせん断スパン全体に多くの斜めひび割れが発生しており，また，顕著な斜めひび割れを横切るせん断補強鉄筋の数も他供試体より多い。一方でA-Centerでは，スリーブ支点側の集約筋を横切る斜めひび割れが上縁に到達して破壊に至った。これは集約区間にはせん断補強鉄筋が存在しないために集約配筋の降伏後は容易に斜めひび割れが進展するが，均等配筋とする

ことで破壊に結びつくひび割れの進展を遅らせることができ、ひび割れがせん断スパン全体に分散したものと考えられる。しかしながら、集約配筋を配置した A-Center においても、ひび割れを貫通する集約筋は降伏しており、 V_{s-exp} は V_{s-cal} よりも高くなっているため、せん断補強鉄筋をスリーブ端部に集約配筋しても設計上のせん断補強効果は十分に発揮しているといえる。

V_{c-exp} を比較すると、こちらも A-Center より C の方が高い値となっている。これは斜めひび割れが上縁と下縁のスリーブを貫通したためにダウエル作用による抵抗が上昇したことや、図-6 に示すように、均等配筋にすることでコンクリート圧縮力の集中を防ぐことができると同時に、スリーブがせん断補強鉄筋によって拘束されコンクリート圧縮力に対する抵抗が上昇するためであると考えられる。

C は A-Center より耐力は高いものの、スリーブ部も均等配筋としているため、他の供試体における最小かぶり厚が部材表面からスリーブ表面までの 28mm なのに対し、C では部材表面からスリーブ部のせん断補強鉄筋表面までの 22mm となっており、耐久性の観点から最小かぶり厚を確保するためにはさらに内側に主鉄筋を配置する必要がある。一方で、集約配筋にした A-Center では、耐久性を損なわない範囲で設計上のせん断耐力を確保したといえる。

4.3 スリーブ位置による影響

せん断スパン中央を基準に、スリーブ位置を有効高さ d だけ水平方向に移動させた A シリーズの 3 体の供試体を比較する。まず、せん断耐力は、A-Load と A-Support は A-Center に比べて顕著に耐力が向上している。このとき、 V_{s-exp} は 3 体の供試体の中で V_{s-cal} と比べた増加分が 0.5%~37.2% の範囲にあり、ばらつきはあるものの、せん断補強鉄筋を集約配筋されているながらも計算値以上のせん断補強効果は発揮していることがわかる。一方、 V_{c-exp} は、A-Center では V_{c-cal} とほぼ同等であったのに対して、A-Support と A-Load で明らかに向上しており、せん断補強鉄筋以外の要因によるせん断抵抗の性状が大きく変化していることがうかがえる。

ひび割れ性状の比較から、A-Load と A-Support では、それぞれスリーブが配置されていない荷点側、支点側の区間にひび割れが集中していることがわかる。A-Support では特にその傾向が顕著で、集約区間にはひび割れがほとんど通過せず、荷点側の $2.5d$ 区間に破壊が集中しており、 V_{c-exp} も全供試体の中で最も高い値となった。A-Load においても、進展した斜めひび割れは集約区間を通過したが、その発生はすべて支点側の $2.5d$ 区間の下縁に留まっていた。これは、主鉄筋より剛性の高いスリーブを圧縮側と引張側の全鉄筋に配置して同一断面内

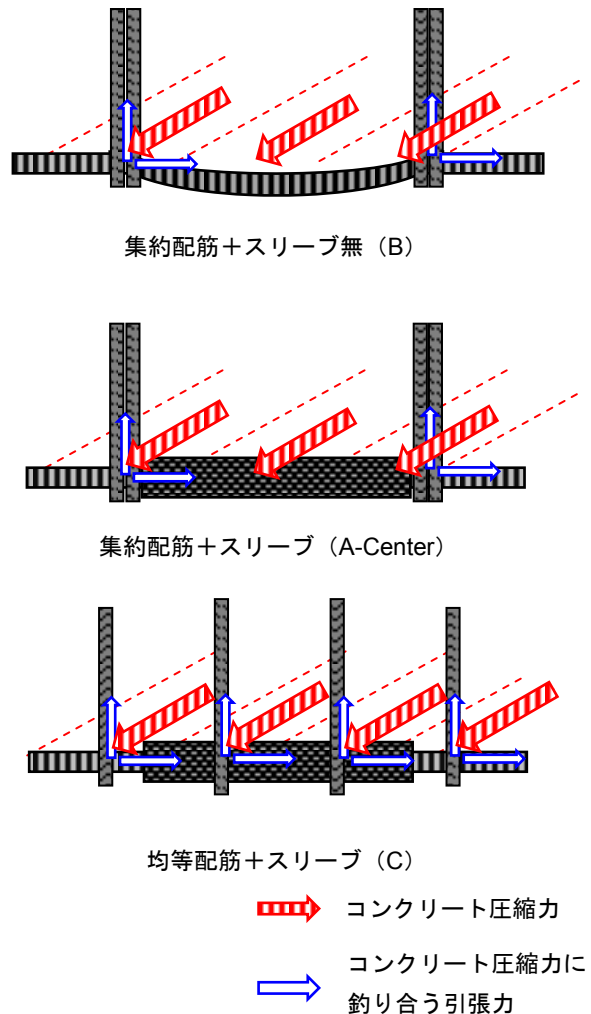


図-6 集約区間における圧縮力

に集中させることで、スリーブを有する断面が非常に剛となり、ひび割れ・変形が他の区間に集中するためと考えられる。この剛な領域をせん断スパンの一端側に集中させることで、破壊領域がせん断スパン内の残りの領域に集中し、見かけ上、せん断スパン長さ a 、せん断スパン比 a/d が減少したかのような挙動を示したと考えられる。その結果、図-7 に示すように、スリーブ端と上縁を結ぶ強固な圧縮ストラットを伴うアーチ機構を形成したと推察される。A-Center でも、斜めひび割れの発生はスリーブより支点側の下縁となっているが、スリーブをせん断スパン中央に配置することで破壊区間が集中しなかったために耐力が大きく上昇せず、A-Load や A-Center とは異なる破壊形態であったと考えられる。

一般的に、せん断スパン比が比較的小さい、いわゆるディープビームやショートビームに分類される RC はりにおいては、アーチ機構によってせん断抵抗が卓越し、せん断耐力が大きく上昇することが知られている⁴⁾。A-Load と A-Support において、破壊区間をスリーブがない側の $2.5d$ と仮定して、せん断スパン比 2.5 として、コ

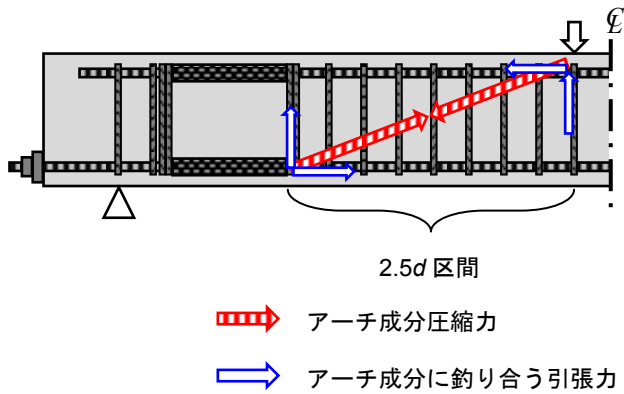


図-7 アーチ機構の形成 (A-Support)

表-5 A-Support と A-Load の再計算

	V_{c-cal} (kN)	$V_{wcd-cal}$ (kN)	V_{c-exp} (kN)	$V_{c-exp}/$ V_{c-cal}	$V_{wcd-exp}/$ V_{c-cal}
A-Support	67.1	88.0	104.0	1.55	1.18
A-Load	65.3	83.5	101.1	1.55	1.21

ンクリート部分のせん断抵抗を再計算してみる。計算には文献⁴⁾から式(4)を用いる。

$$V_{wcd-cal} = \frac{0.244f_c^{2/3}(1+\sqrt{p_w})(1+3.33r/d)}{1+(a/d)^2}bd \quad (4)$$

ここで、 r ：支圧板幅 (mm) である。

計算結果を表-5にまとめる。式(4)を用いることで、式(2)よりは V_{c-exp} は実験値に近くなるものの、それでも安全側の評価となる。ディープビームに関する既往の研究⁵⁾より、最大荷重時においては、せん断抵抗に寄与する要因は主としてせん断補強鉄筋の引張力とストラット圧縮力が考えられ、骨材のかみ合わせ作用は、ひび割れが大きく開口するためほとんど影響しないと考えられる。しかしながら、ダウエル作用については、通常の RC はりであればさほど影響しないが、A-Load のようにひび割れ先端に剛性の大きいスリーブが配置されていれば、これによる影響も当然大きくなるはずである。加えて、計算の仮定とは異なりアーチ機構の始点となるスリーブ端には支圧板による拘束効果がなく、計算値との差はこれらの要因によるものと考えられる。

図-7 に示すようにアーチ機構に釣り合う力の成分としてせん断補強鉄筋 (スリーブ端では集約筋) と軸方向鉄筋の引張力が考えられるが、軸方向鉄筋の引張力分布が本実験では得られておらず検証ができないため、アーチ機構がスリーブ端から発現する場合のせん断抵抗の定量的な評価は今後の課題である。

以上より、せん断スパン内の一端側にスリーブを配置した場合には、スリーブ端から形成されるアーチ機構が卓越し、せん断耐力が大きく上昇することを確認した。

5. 結論

本研究では、スリーブ位置、スリーブの有無、集約配筋の有無をパラメータとした5体のRCはり供試体について静的載荷実験を行い、以下にまとめる知見を得た。

- 1) 本研究における配筋諸元の範囲では、スリーブ位置、スリーブ部におけるせん断補強鉄筋の配筋方法、スリーブの有無にかかわらず、既往の修正トラス理論式を用いることでRCはりのせん断耐力を安全側に評価することができ、集約配筋としてもせん断補強鉄筋によるせん断抵抗は計算値を下回ることはない。
- 2) 集約区間にスリーブを配置することで、集約区間への変形、斜めひび割れの集中を防ぐことができるとともに、ひび割れ発生後の剛性を向上させることができる。
- 3) スリーブ部のせん断補強鉄筋を均等配筋としたRCはりでは、斜めひび割れがせん断スパン全体に分散して最大耐力が上昇する一方で、最小かぶり厚を確保することができない。これに対して集約配筋とすることで耐久性を損なわずに設計上のせん断耐力を確保することができる。
- 4) 集約配筋を併用してスリーブ位置を変動させた場合、せん断スパンの一端側にスリーブを配置することで、せん断スパン内の残りの区間に破壊が集中する。同時に、スリーブ端からアーチ機構を形成することで、スリーブをせん断スパン中央に配置した場合に比べてせん断耐力が大きく上昇する。

参考文献

- 1) 例えば、山元雄亮ほか：集約せん断補強を行ったモルタル充填式継手を有する梁部材の構造性能に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.27, No.2, pp.721-726, 2005
- 2) 安田瑛紀，松本浩嗣，二羽淳一郎，松本智夫：モルタル充填式継手と集約されたせん断補強鉄筋を有するRCはりのせん断性状，土木学会第69回年次学術講演会講演概要集，V-186, pp.371-372, 2014
- 3) 二羽淳一郎，山田一字，横沢和夫，岡村甫：せん断補強鉄筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価，土木学会論文集，No.372/V-5, pp.167-176, 1986
- 4) 二羽淳一郎：FEM解析を用いたディープビームのせん断耐力算定式，第2回RC構造のせん断問題に関するコロキウム論文集，pp.119-128, 1983
- 5) 幸左賢二，脇山知美，西岡勉，小林寛：せん断スパン比に着目したディープビームの破壊形態に関する実験的検討，土木学会論文集 E, Vol.62, No.4, pp.794-814, 2006