

論文 トラス筋により補強された鉄筋コンクリート有孔梁のせん断耐力とひび割れ性状

李 振宝*1・大野 義照*2・馬 華*3・近藤 淳樹*4

要旨: トラス筋により補強された複数の開口がある鉄筋コンクリート有孔梁のせん断実験を行い、補強工法、補強筋量、開口間隔などをパラメータとする試験体のせん断性状を調べると共に、トラス筋の補強効果を確認した。また、同じ補強筋量であっても、トラス筋と添え筋との緊結方法や開口上下ウェブ部の補強の有無によってせん断耐力及び破壊状況に差異があった。補強筋のせん断ひび割れ幅の制御効果についても検討した。

キーワード: 鉄筋コンクリート有孔梁、トラス筋、開口補強、せん断耐力、せん断ひび割れ

1. はじめに

設備配管が自由に取り替えられるフリープラン設計の普及に伴い、鉄筋コンクリート（以下 RC と略記）梁に多くの貫通孔を設けることが要望される。しかし、梁に貫通孔を設けるとその構造性能が低下するため、RC 構造計算規準・同解説¹⁾（以下 RC 規準と略記）では、梁の貫通孔に対して補強を施すなどの規定を設けている。

現在、RC 梁の開口補強方法には斜め筋による補強方法（在来工法）及び工場生産された特殊な金物による補強方法がある。しかし、これらの補強方法はいずれも一つの貫通孔に対するもので、多数の貫通孔が開けられた場合には、その補強配筋が複雑になる。本報で取り上げた補強方法は、予め曲げ加工した鉄筋（トラス筋と呼ぶ）と添え筋とを溶接し、一つの梁にある多数の貫通孔に対して補強を経済的かつ簡便に行う方法である。

本報では、このトラス筋により補強された RC 有孔梁のせん断実験を行い、トラス筋の補強効果を確認すると共に、トラス筋と添え筋との緊結方法や開口上下ウェブ部の補強の有無、開口

間隔などがせん断耐力及び破壊性状に及ぼす影響を調べた。また、補強筋のせん断ひび割れ幅の制御効果を実験結果から検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体の概要及び配筋の例を図-1 に、試験体の一覧を表-1 に示す。

試験体は断面 $b \times D = 350 \times 400 \text{mm}$ 、コンクリート強度 24N/mm^2 を共通因子としている。試験体 No.3 は標準試験体で、無開口試験体 No.1 と同等なせん断耐力が得られるように補強筋量を定め、その補強方法はトラス筋によるものである。主筋に 4-D22 (SD490)、スターラップに $\square 10@95$ 、トラス筋に 2-D13 を用い、トラス筋と添え筋とを溶接して緊結した。

他の試験体はそれぞれ以下のように計画した。ここに、標準試験体 No.3 と異なる点のみを記す。

No.2 は在来工法（斜め筋）により補強されたもの、No.4 は No.3 の単調載荷に対して繰返し載荷を、No.5 は曲げ先行型破壊（主筋：SD345）とし、No.6 はトラス筋と添え筋とを溶接せず、結束線にて結束した。No.7 は孔の両脇にスター

*1 大末建設（株） 技術統括部 工博（正会員）

*2 大阪大学大学院教授 建築工学専攻 工博（正会員）

*3 恵州鉄路公司（中国）副技師長 工博（正会員）

*4 大末建設（株） 技術統括部 工修

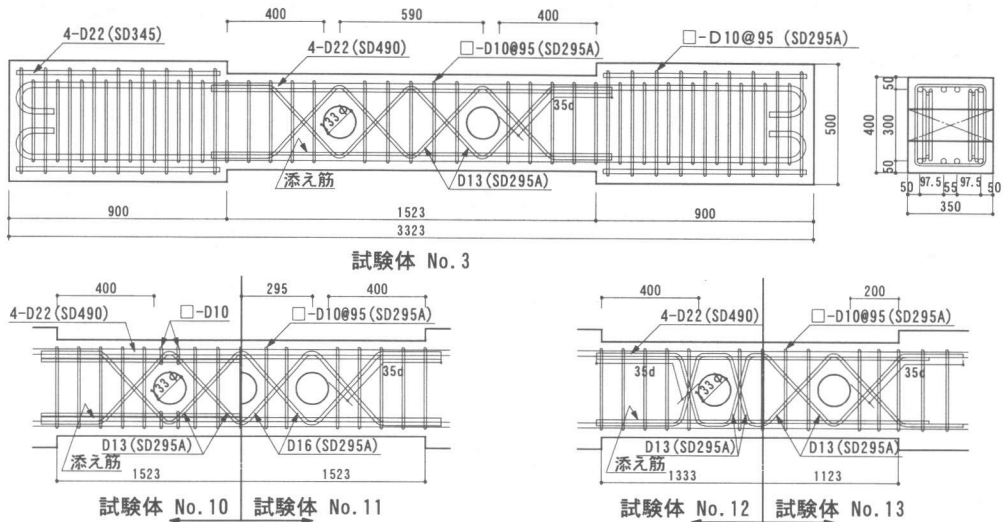


図-1 試験体の概要及び配筋の例

ラップを2本ずつ追加し、No.8, No.9はトラス筋をそれぞれD10, D16にした。No.10は孔の上下ウェブ部にスターラップで補強を施し、No.11、No.12は開口の間隔をNo.3の $4.44He$ (He :開口の径)に対してそれぞれ $2.22He$ と $3.0He$ とした。また、No.13は開口の端部からの距離をNo.3の $1D$ (D :梁せい)に対して $0.5D$ とした。

表-1 試験体一覧

試験体 No	梁長 * (mm)	開口数	開口間隔 L_e (mm)	端部からの距離 (mm)	開口補強筋	梁主筋 4D22	せん断終局強度 Q_{su0} (kN)	備考
1	1523	0	—	—	—	SD490	201.6	無開口
2	1523	2	590	400	2-D13	SD490	201.5	在来工法(斜め筋)
3	1523	2	590	400	2-D13	SD490	201.5	トラス補強筋工法
4	1523	2	590	400	2-D13	SD490	201.5	繰返加力載荷
5	1523	2	590	400	2-D13	SD345	201.5	曲げ先行型破壊
6	1523	2	590	400	2-D13	SD490	201.5	トラス補強筋と添え筋とを結束線にて結束
7	1523	2	590	400	2-D13 +2-D10	SD490	221.9	スターラップ追加
8	1523	2	590	400	2-D10	SD490	175.1	補強筋量少
9	1523	2	590	400	2-D16	SD490	230.2	補強筋量多
10	1523	2	590	400	2-D13	SD490	201.5	ウェブ部補強
11	1523	3	295	400	1-D16	SD490	189.1	開口間隔 $2.22He$
12	1333	2	400	400	2-D13	SD490	205.5	開口間隔 $3He$
13	1123	2	590	200	2-D13	SD490	215.1	開口の端部からの距離 $0.5D$

*:梁の両端に載荷用スタブ部 $350 \times 500 \times 900\text{mm}$ を設け、一体に製作した。

なお、表-1中のせん断終局強度 Q_{su0} はRC規準式による計算値である。

2.2 使用材料

試験体の主筋にSD490 (D22), SD345 (D22) (No.5のみ), スターラップにSD295A (D10), 開口補強筋にSD295A (D10, D13, D16)を用い、その力学特性を表-2に示す。また、試験体に用いたコンクリートの載荷時材齢の力学特性を表-3に示す。

2.3 載荷及び測定方法

表-2 鉄筋の力学特性

種類		降伏点強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び率 (%)
呼び径	種類			
D10	SD295A	326	448	19.7
D13	SD295A	336	464	23.6
D16	SD295A	334	515	20.4
D22	SD345	385	573	18.9
D22	SD490	533	745	13.1

表-3 コンクリートの力学特性

材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)
15	23.9	2.16×10^4	2.48

載荷方法は逆対称加力法を用い、単調加力載荷を標準とし、試験体 No.4 のみ繰返し加力載荷を行った。

主筋、トラス筋及びスターラップのひずみ

は検長 2mm の箔ゲージにより測定した。梁のせん断スパンにおける変位を図-2 に示すように梁の両側に取付けた 4 個の変位計により、せん断ひび割れ幅は同図に示すように区間①～④においてコンタクトストレインゲージ（検長 10cm）を用いて測定した。

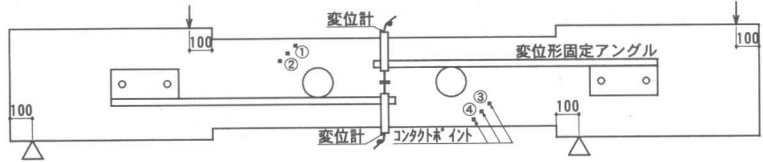


図-2 変形及びひび割れ幅測定方法

3. 実験結果及び考察

3.1 ひび割れ性状と破壊性状

試験体 No.1, No.3, No.6, No.10～No.13 の最終破壊状況を図-3 に示す。試験体 No.1 は両端にまず曲げひび割れが発生し、続いてせん断ひび割れが生じた。荷重の増加に伴って、曲げひび割れ及びせん断ひび割れが進展し、せん断ひび割れと付着割裂ひび割れが大きくなって終局を迎えた。試験体 No.3 は両端に曲げひび割れが発生した後、開口部からせん断ひび割れが発生し、その進展とともに No.1 と同様なせん断ひび割れと付着割裂ひび割れの増大で終局を迎えた。3 つの開口がある試験体 No.11 では両端に曲げひび割れの発生に続いて両側の開口部からせん断ひび割れが発生し、そのあと中央の開口部にせん断ひび割れが生じた。試験体 No.6, No.10 はせん断ひび割れの増大で終局を迎え、それまでは付着割裂ひび割れは見られなかった。これは No.6 では、トラス筋と添え筋とを結束線で結束しているので補強効果が小さく、せん断耐力が低かったこと、No.10 では、開口ウェブに補強が施され、主筋の付着割裂強度が高くなったことによると考えられる。試験体 No.12, No.13 は開口の間隔、開口の端部からの距離がそれぞれ No.3 と異なるが、ひび割れ性状及び破壊性状は No.3 とほぼ同じであった。なお、無開口試験

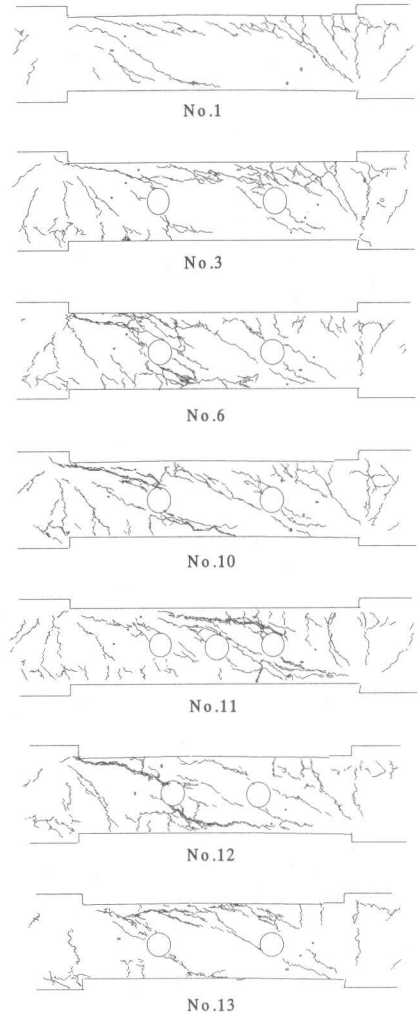


図-3 最終破壊状況

体 No.1 と曲げ先行破壊試験体 No.5 を除き、試験体の破壊は開口部が先行した。

3.2 荷重～変位関係

各試験体のせん断力～変形関係を図-4 に示

す。変形は試験体両側に取付けられた4つの変位計の平均値で、せん断スパン半分の変位である。なお、正負両方向繰返し加力载荷を行った試験体 No.4 は正方向载荷時のせん断力～変形関係の包絡線である。試験体長の短い No.12, No.13 を除いて、せん断力～変形関係は開口部からのせん断ひび割れが発生するまでほぼ同じ傾向を示した。ひび割れが発生した後も、開口補強筋の効果によって剛性の低下は少なく、有開口試験体の剛性は無開口試験体 No.1 の剛性と同等以上であった。最大荷重に達すると、曲げ先行型破壊の No.5 と開口の上下ウェブに補強が施された No.10 を除き、付着剥離破壊またはせん断破壊により急激に耐力が低下した。

3.3 せん断ひび割れ強度とせん断終局強度

各試験体のせん断ひび割れ強度とせん断終局強度の一覧を表-4 に示す。有開口試験体のせん断ひび割れ強度の計算値は、RC 規準の有孔梁せん断ひび割れ強度式による値に有孔梁のせん断終局強度式における開口部の補正係数³⁾ (1-1.61He/D) を乗じて求めた。せん断終局強度計算値(1)は RC 規準せん断終局強度式、計算値(2)は韌性保証型設計指針式²⁾による値である。

有開口試験体 No.2～No.13 のせん断ひび割れ強度の実験値は無開口試験体 No.1 の値の約 1/2 である。RC 規準有孔梁のせん断終局強度式における開口部の補正係数をそのまま無開口梁せん断ひび割れ強度式に用いた計算値は実験値とほぼ一致している。

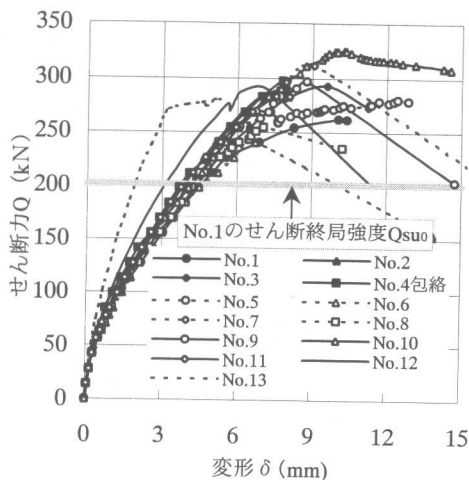


図-4 各試験体のせん断力～変形関係

表-4 せん断ひび割れ強度とせん断終局強度

試験体 No.	せん断ひび割れ強度 Q_c (kN)			せん断終局強度 Q_{su} (kN)				
	実験値	計算値	実験値/計算値	実験値	計算値(1)**	計算値(2)**	実験値/計算値(1)	実験値/計算値(2)
No.1	113.2	113.5	1.00	262.5	201.6	293.3	1.30	0.89
No.2	56.6	52.7	1.07	293.0	201.5	206.5	1.45	1.42
No.3	56.6	52.7	1.07	293.0	201.5	206.5	1.45	1.42
No.4	56.6	52.7	1.07	297.6	201.5	206.5	1.48	1.44
No.5	56.6	52.7	1.07	280.3*	201.5	206.5	1.39	1.36
No.6	56.6	52.7	1.07	249.1	201.5	206.5	1.24	1.21
No.7	56.6	52.7	1.07	311.7	221.9	197.0	1.40	1.58
No.8	56.6	52.7	1.07	254.8	175.1	184.0	1.46	1.38
No.9	56.6	52.7	1.07	297.3	230.2	234.9	1.29	1.27
No.10	56.6	52.7	1.07	325.0	201.5	206.5	1.61	1.57
No.11	56.6	52.7	1.07	284.0	189.1	206.5	1.50	1.38
No.12	61.4	56.5	1.09	289.7	205.5	185.1	1.41	1.57
No.13	67.8	61.2	1.11	280.1	215.1	206.5	1.30	1.36

* : 曲げ破壊

** : 計算値(1)は RC 規準式により、計算値(2)は韌性保証型設計指針式により求めた。

トラス筋により補強された試験体 No.3 のせん断終局強度の実験値は 293.0kN で、在来工法により補強された試験体 No.2 と同じ値となり、無開口試験体 No.1 の実験値 262.5kN を上回り、トラス筋による開口補強は在来工法と同様に十分な補強効果が得られていることを示している。

また、開口部に補強を施すことにより、開口部耐力の向上のみではなく、母材耐力の向上にも寄与していると推察できる。

トラス筋と添え筋とを結束線で結束された試験体 No.6 の値は 249.1kN となり、No.1 及び No.3 の値より小さく、補強効果が低かった。これはトラス筋と添え筋とを緊結していないため、開口補強筋のトラス筋の定着が不十分であったことによるものと考えられる。

開口両脇にスターラップを 2 本ずつ追加した No.7 の実験値は 311.7kN で、スターラップの追加による補強効果が大きく現れている。トラス筋を D13 から D10 または D16 にした No.8 と No.9 の値はそれぞれ 254.8kN と 297.3kN で、No.3 と較べて、トラス筋の径に応じた値となっている。ただし、No.9 の補強筋比は No.3 より大きく増えているが、せん断終局強度の増加は少ない。これは No.9 の補強筋比が 1.36% と大きく、補強効果が十分に発揮できず、コンクリートのせん断破壊によって終局を迎えたと考えられる。

開口の上下ウェブ部に補強を施した試験体 No.10 はウェブ部の補強により、せん断ひび割れ及び付着割裂ひび割れの進展が遅く、せん断終局強度は 325.0kN となり、最も大きな補強効果を示した。

開口間隔が 2.22He の試験体 No.11 は RC 規準で推奨している 3He 以上を満足していないが、せん断終局強度は 284.0kN で、補強効果が得られている。開口間隔が 3He で、トラス筋角度を 45° から 60° にした No.12 及び端部からの距離を 0.5D にした No.13 のせん断終局強度はそれぞれ 289.7kN 及び 280.1kN であり、トラス筋による開口補強効果が得られている。本実験の範囲内では、補強筋量が同じ場合、開口間隔及び開口端部からの距離がせん断耐力または破壊性状に対する影響は小さい。

実験値の RC 規準せん断終局強度式による計算値に対する比は、トラス筋により補強された No.3 は在来工法により補強された No.2 と同じ

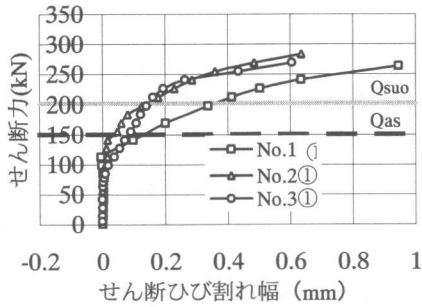
く 1.45 となり、無開口試験体 No.1 の 1.30 を上回っている。No.6, No.9, No.10 の値はそれぞれ 1.24, 1.29, 1.61 で、前述の補強効果の大小を表している。他の試験体の値は 1.30~1.50 である。有開口試験体実験値の靱性保証型耐震設計指針による値に対する比はほぼ同じであるが、試験体 No.7 は 1.58 と大きく、これは指針計算式では開口の両脇に追加したスターラップの効果を評価していないためである。

3.4 せん断ひび割れ幅

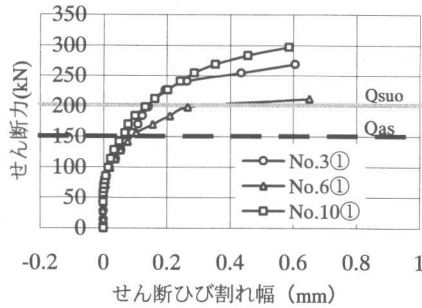
試験体 No.1~No.3, No.6~No.11 のせん断力~せん断ひび割れ幅関係を図-5 に示す。なお、せん断ひび割れ幅は前掲の図-2 に示す測定位置①における値で、この位置に生じているせん断ひび割れの幅が最も大きかった。

無開口試験体 No.1 においては、せん断力 113.2kN でせん断ひび割れが生じ、その後せん断力の増加に伴い、その幅は大きく増加し、せん断終局強度 Q_{su0} 時における値は 0.34mm となっている。有開口試験体 No.2 と No.3 においては、せん断力 56.6kN でせん断ひび割れが生じ、その後のせん断力~せん断ひび割れ関係もほぼ同じで、せん断終局強度 Q_{su0} 時における値はそれぞれ 0.15mm と 0.16mm となっている。有開口試験体のせん断ひび割れ強度は無開口試験体より低い、補強筋の配置によりせん断ひび割れ幅の増加は緩やかである。有開口試験体の短期許容せん断力 (Q_{as}) 及び終局強度 (Q_{su0}) 時におけるせん断ひび割れ幅は、無開口試験体より小さくなっている。

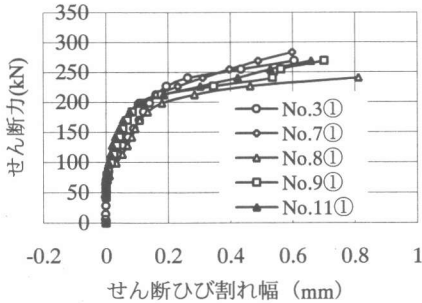
トラス筋と添え筋とを結束線で結束した試験体 No.6 のせん断力~せん断ひび割れ幅関係は短期許容せん断力まで No.3 とほぼ同じであったが、トラス筋の定着が十分でないため、その後、せん断力の増加とともに、せん断ひび割れ幅は No.3 より大きく増加した。開口の上下ウェブ部に補強が施された No.10 のせん断力~せん断ひび割れ幅関係は、せん断力 240kN までほぼ同じで、その後せん断ひび割れ幅の増加は No.3 より小さい。



(a) No.1~No.3



(b) No.3,6,10



(c) No.3,7,8,9,11

図-5 せん断～せん断ひび割れ幅関係

図-5(c)に開口に対する補強筋量を変化させた試験体 No.3, No.7, No.8, No.9, No.11 のせん断力～せん断ひび割れ幅関係を示し、その関係はせん断力 190kN まではほぼ同じであったが、その後トラス補強筋に D10 を用いた No.8 は他の試験体よりせん断ひび割れ幅の増加が大きくなっている。また、3 つの開口がある試験体 No.11 のせん断力～せん断ひび割れ幅関係は、トラス筋と同じ D16 を用いた 2 つの開口のある No.9 とほぼ同じである。

4. まとめ

以上の結果をまとめると次のようになる。

- 1) トラス筋により補強された試験体 (No.3) は、無開口試験体 (No.1) 及び在来工法により補強された試験体 (No.2) と同等以上のせん断耐力を有し、十分な補強効果が得られた。また、RC 規準せん断終局強度式による計算値に対する比は 1.45 であった。
- 2) トラス筋と添え筋とを結束線にて結束した試験体 (No.6) はトラス筋の定着が充分でないため、せん断終局強度は RC 規準による計算値を上回るものの、他の試験体と比べその値は低く、また、最大耐力後の破壊は最も急激であった。
- 3) 開口のウェブ部にスターラップで補強を施した試験体 (No.10) におけるせん断終局強度の実験値と RC 規準による計算値との比は 1.61 で、他の試験体と比べて最も大きく、最大耐力に達した後の破壊は緩やかであった。
- 4) 端部からの距離 0.5D の試験体 (No.13) 及び開口間隔 2.22He の試験体 (No.12) は他の試験体と同等な耐力が得られた。
- 5) 有開口試験体のせん断ひび割れは無開口試験体より早く発生するが、補強筋の配置により、短期許容せん断力及び RC 規準による計算値時における幅は無開口試験体より小さかった。

謝辞：本研究は(株)ゼファー、(株)プロテックとの共同研究であり、実験にあたっては、大阪大学大学院建築工学専攻助手中川隆夫氏、同大学院生莫勇氏の協力を得て行った。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、p.271, 1999
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針(案)・同解説、p.169, 1997
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料、p.40, 1987