

高強度異形コイル鉄筋HDC800を用いた梁貫通孔補強筋の開発

High Strength Deformed Bar-in-coil “HDC800” for Shear Reinforcement of RC Beam with Web-opening

鈴木 昭 信^{*(1)}
Akinobu SUZUKI

相 原 正 史^{*(2)}
Masashi AIHARA

原 田 健 吾^{*(3)}
Kengo HARADA

大 橋 章 一^{*(4)}
Shoichi OOHASHI

抄 録

鉄筋コンクリート造建築物の梁貫通孔の補強に用いる高強度異形コイル鉄筋HDC800を開発した。HDC800の開発及び本材料を用いた有孔梁の構造実験結果、梁貫通孔補強筋の設計手法に関して報告した。

Abstract

High strength deformed bar-in-coil “HDC800” was developed for shear reinforcement of RC beam with web-opening. This paper reports on the development of material for HDC800, the results of structural experiment and design method of RC beam with web-opening strengthened by HDC800.

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート(以下、RCと省略する)構造による超高層建築物が急激に増加し、特に集合住宅の分野では最も標準的な構造形式として定着している。大きなせん断力を受ける部材において、十分な耐力及び靱性を確保するためには、従来の普通強度の鉄筋では必要補強筋量の確保が困難なことから、せん断補強筋の高強度化が図られた。これと同様に、梁貫通孔補強筋についても高強度化が求められている。梁貫通孔補強筋とは、梁などの構造躯体を貫通させて配管・ダクト等を設置するために貫通孔を設けるが、その周囲に配置する補強筋である(写真1)。梁に貫通孔を設けると、孔の周囲に応力が集中し、梁のせん断耐力の低下、変形性能の低下、孔周

囲でのひび割れ発生などを招く危険性があるため、適切な補強鉄筋を配置することによって先の問題点を解決するものである。

本報では、新日本製鐵釜石製鐵所で製造を開始した梁貫通孔補強用の高強度異形コイル鉄筋HDC800の材料特性について概説するとともに、桐井製作所が実行したHDC800を梁貫通孔補強筋として用いたRC部材のせん断実験、その結果より検証した梁貫通孔補強筋の設計手法に関して報告する。

2. 高強度異形コイル鉄筋HDC800の開発

対象とする梁貫通孔補強筋(商品名: NSジョーブレン[®])は、異形コイル鉄筋を直線矯正した後、多数回の連続曲げ加工を行うことによって製造する工場加工製品である。そのため、素材となる異形コイル鉄筋には、高強度特性と伸び性に加えて、安定した曲げ加工性が要求されている。機械的性質の設定にあたっては、新日本製鐵室蘭製鐵所で建築材料認定を取得している高強度異形コイル鉄筋HDC685及び既存の785N/mm²級異形コイル鉄筋の仕様を参考として、表1に示すように、0.2%耐力を800N/mm²以上、伸びを8%以上とし、その名称をHDC800と定めた。また、異形コイル鉄筋の寸法、質量及び節についてはJIS G 3112“鉄筋コンクリート用棒鋼”に従い、鉄筋径は呼び名D6、D8、D10の3種類、節形状は曲げ加工性を考慮し“斜め節”とし、コンクリートとの付着性能を確保している。

表2にHDC800の基本的な化学成分を示す。NSジョーブレンの製作は、連続曲げ加工により行うため溶接作業を必要としないが、従来の製品開発において溶接性を要求することも予想されるため、炭

(注) ジョーブレンはメタルシステム(株)の登録商標である。

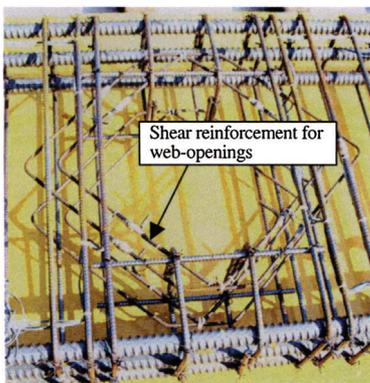


写真1 梁貫通孔補強筋の配置
Arrangement of shear reinforcement for web-openings

* (1) 建材開発技術部 土木基礎建材技術グループ マネージャー
東京都千代田区大手町2-6-3 〒100-8071 TEL:(03)3275-7758

* (2) (株)桐井製作所 開発部 係長

* (3) 釜石製鐵所 製造部 技術グループ

* (4) 釜石製鐵所 製造部 品質管理グループ グループリーダー

表1 機械的性質
Mechanical properties

Proof stress by offset method * (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)	Bending property	
			Bending angle	Pin diameter for bending test
800 min.	1 000 min.	8 min.	180 deg.	Nominal dia. × 3

* Proof stress shall be calculated on the basis of permanent deformation of 0.20%.

表2 化学成分 (mass%)
Chemical compositions

C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	B	Carbon equivalent
0.20	1.10	2.00	0.035	0.030	0.10	0.50	0.0030	0.65
max.	max.	max.	max.	max.	max.	max.	max.	max.

where, carbon equivalent (%) = $C + Mn/6 + Si/24 + Cr/5$

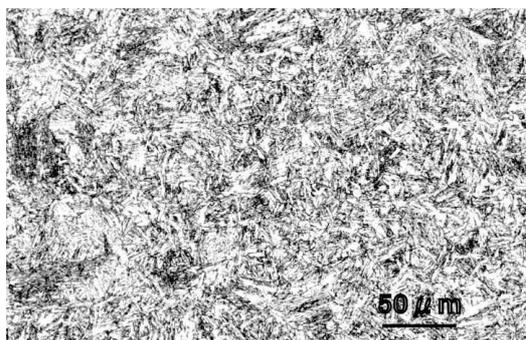


写真2 HDC800の組織写真
Microstructure of HDC800



写真3 HDC800/D8の曲げ試験結果
Result of bending test for HDC800/D8

素量を低く抑えている。このため、高強度化にあたっては、マンガ
ン、その他の強化元素を添加し焼入れ性を確保している。

熱間圧延工程では、仕上げ圧延時に異形状に圧延を行い、その
後の冷却過程において高強度を得るために必要な空冷処理を行って
いる。焼入れ性の高い鋼種では、熱間でリング状に巻き取った後、
コンベアで搬送する際にリング内で疎密部が発生し強度ばらつきが
生じうる。強度ばらつきは連続曲げ加工時の加工形状不良の要因と
なりうるため、冷却条件の調整によりリング内での強度ばらつきを
極限まで低減することを可能としている。

本製造方法により得られたHDC800は、上部ベイナイト組織(写真
2)を有しており、優れた曲げ性(写真3)を有している。

3. HDC800を用いた梁貫通孔補強筋で補強したRC造 有孔梁の加力実験

本実験では、RC造梁の円形貫通孔周囲を、HDC800を用いた梁貫

通孔補強筋“NSジョーブレン”で補強した場合の補強効果を確認する
ため、無開孔梁や有開孔無補強梁との比較、破壊の進展状況、及
び、繰返し加力の影響などに着目し構造実験を行った。

3.1 実験計画

3.1.1 試験体

表3に試験体の一覧を示す。試験体を計画するにあたり、以下の
要因を考慮し、10体とした。

- (1) 貫通孔の有無
- (2) 貫通孔部の補強方法：貫通孔部無補強、貫通孔補強筋のみ、貫
通孔補強筋と孔際筋筋の併用の差異
- (3) 貫通孔部補強筋量：孔周囲の補強筋比による差異
- (4) コンクリートの圧縮強度：コンクリートの設計基準強度 F_c を
36N/mm²と60N/mm²の2水準
- (5) 加力方法：繰返し加力と一方向加力の差異
- (6) 主筋量：2水準(曲げ破壊よりもせん断破壊が確実に先行するよ
うに主筋量を増やす)

試験体は、梁幅×梁せいを300mm×450mmとし、貫通孔は直径
150mmの円形で試験部分のスパン中央かつ梁せいの中央に1個を配
置した。貫通孔の設置に際して切断される筋筋の影響を厳しく評価
するため、貫通孔により2組の筋筋が切断されるものとして試験体
の計画を行った。梁主筋は上下とも1段配筋とし、スラブを設け
ず、スラブによる拘束を期待できない条件とした。また、試験体の
計画に際して、主筋や筋筋の量は貫通孔部のせん断破壊が曲げ破壊
に先行するように設定し、シアスパン比は約1.1とした。試験体の
形状、配筋を試験体No. 8を事例として図1に示す。

3.1.2 使用材料

試験体に使用したコンクリート及び鉄筋の材料試験結果を表4及
び表5に示す。コンクリートは、設計基準強度を36N/mm²、60N/
mm²の2水準とし、試験体のコンクリート打設と同時に製作したテ
ストピースを用いて、材齢28日及び構造実験の実施時期に近い材齢
52日で圧縮強度試験及び割裂強度試験を実施した。また、鉄筋は梁
主筋にSD390を、筋筋にはKSS785を使用した。

3.1.3 加力方法及び測定方法

加力方法は、図2に示す建研式加力装置を用いた逆対称の曲げせ
ん断力載荷とし、試験体No. 1～No. 8については正負繰返し加力、
No. 9～No. 10については一方向加力とした。繰返し加力の制御は部
材角Rによる変位制御とし、部材角Rが1/500、1/250、1/100の各段
階で正負3回の繰返しを行った後、正方向への押し切り加力とし
た。なお、試験体への軸方向荷重は零とし、試験体自重による影響
は無視した。また、測定は、変位計を用いて加力点間の相対的な変
位量を各荷重サイクルごとに測定すると同時に、主筋、筋筋、貫通
孔補強筋の各部に発生するひずみをひずみゲージで測定した。

表3 試験体一覧
List of test specimens

Specimen ID	Design strength of concrete F_c (N/mm ²)	Web-opening		Volume of rebars for web-opening				Vol. of main rebars (Rebar ratio) p_t (%)	Type of loading		
		Diameter H (mm)	Ratio of opening H/D	Stirrup	Shear reinforcement (HDC800)	Stirrup at web-opening	Ratio of reinforcement for web opening P_{w0}				
No. 1	36	No opening	-	2-D10	-	-	-	3-D25 (1.27%)	Multi-cyclic		
No. 2		150	1/3	2-D10	-	-	0.27				
No. 3		150	1/3	2-D10	4-D6	-	0.62				
No. 4		150	1/3	2-D10	4-D6	2-D10	0.89				
No. 5	60	No opening	-	2-D10	-	-	-			4-D25 (1.69%)	Monotonic
No. 6		150	1/3	2-D10	-	-	0.27				
No. 7		150	1/3	2-D10	4-D6	-	0.62				
No. 8		150	1/3	2-D10	4-D6	2-D10	0.89				
No. 9		150	1/3	2-D10	4-D6	-	0.62				
No. 10		150	1/3	2-D10	4-D6	2-D10	0.89				

Remarks: Beam-width×height (effective-height) $b \times D (d) = 300 \times 450 (400)$ mm, Distance between centers of tension and compression $j = 350$ mm, Stirrup D10@100(stirrup-ratio $p_v = 0.48\%$), Bending-span $a = 450$ mm, Shear-span (shear span ratio $M/Qd = 900$ mm (1.125))

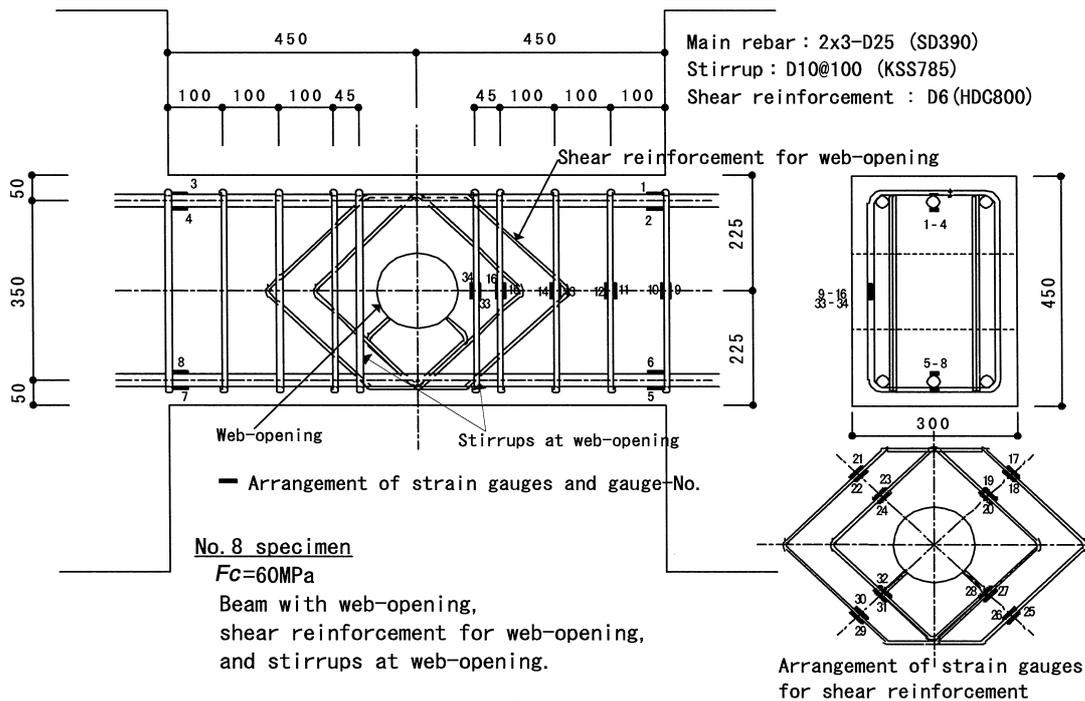


図1 試験体配筋図(試験体記号No. 8)
Details of No.8 specimen

表4 コンクリートの材料試験結果
Results of material test of concrete

For specimen ID	Design strength (N/mm ²)	Curing period (day)	Compressive strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)
No.1-4	36	28	40.9	2.88
		52	43.3	2.74
No.5-10	60	28	68.1	4.37
		52	70.3	4.46

表5 鉄筋の引張試験結果
Results of material test of reinforcing bars

Rebar	Type	HDC800	KSS785	SD390
	Designation	D6	D10	D25
	Nominal cross-sectional area (mm ²)	31.67	71.33	506.7
Yield point or proof stress (N/mm ²)		984	900	433
Strain at yield stress or proof stress (μ)		7359	6672	2458
Tensile stress (N/mm ²)		1110	1051	605

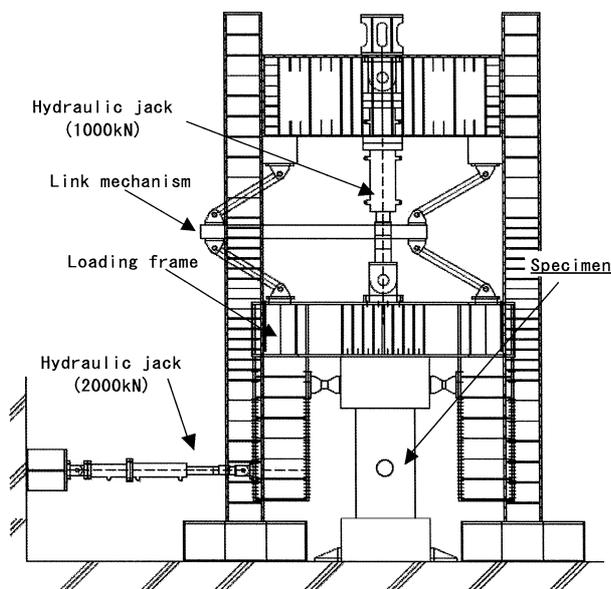


図2 加力装置(建研式加力装置)
Loading apparatus

3.2 実験結果

3.2.1 ひび割れ及び破壊状況

試験体No. 8のひび割れ状況を写真4に示す。加力開始後、最初に梁端部に曲げひび割れが発生し、引き続き、貫通孔の中心から45度方向にひび割れが発生するが、梁貫通孔補強筋の位置で止まった。部材角の増大とともに、貫通孔の縁から接線方向に、試験体コーナー部に向かってひび割れが入り、このひび割れが支配的なひび割れとなり、最終的には貫通孔の左右部分がせん断破壊した。

3.2.2 荷重～変位関係

試験体No. 8の荷重～変位関係を図3に示す。試験体No. 8では、部材角1/250まではほぼ線形関係を保持したが、部材角1/100の加力1サイクル目の途中で最大耐力に達し、その後は荷重が低下した。

コンクリート設計基準強度 $F_c=60\text{N/mm}^2$ シリーズの荷重～変位関係を正側加力時の包絡線により図4に示す。貫通孔無しの試験体No. 5では最大耐力に達した後も最大耐力の90%以上の荷重を保持したのに対して、貫通孔を設け無補強とした試験体No. 6では、その最大耐力はNo. 5の最大耐力の半分以下となった。一方、貫通孔を設け各種条件で貫通孔補強を行った試験体No. 6～10では、No. 5と比べた耐力の低下は小さく補強効果が確認できた。

3.3.3 貫通孔補強筋に生じたひずみ

試験体No. 8における荷重と貫通孔補強筋に生じたひずみの関係を図5に示す。ひずみゲージ貼付位置を図1に示したが、貫通孔補強筋の内周側は外周側比べて大きいひずみを発生し、かつ、内周側、外周側とも有効な貫通孔補強効果を発揮していることを確認した。

3.3.4 貫通孔補強筋による補強効果の検討

貫通孔補強筋による補強効果を検討するため、せん断耐力の評価式として、貫通孔の無い梁に対しては荒川式(1)を、貫通孔の有る梁に対しては広沢式(2)を適用した¹⁻³⁾。

$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.092 K_u \cdot K_p (F_c + 18)}{M / Qd + 0.12} + 0.85 \sqrt{s P_{w0} \cdot s \sigma_y} \right\} \cdot bj \quad (1)$$

$$Q_{su0} = \left\{ \frac{0.092 K_u \cdot K_p (F_c + 18)}{M / Qd + 0.12} \left(1 - 1.61 \frac{H}{D} \right) + 0.85 \sqrt{w P_{w0} \cdot w \sigma_y + s P_{w0} \cdot s \sigma_y} \right\} \cdot bj \quad (2)$$

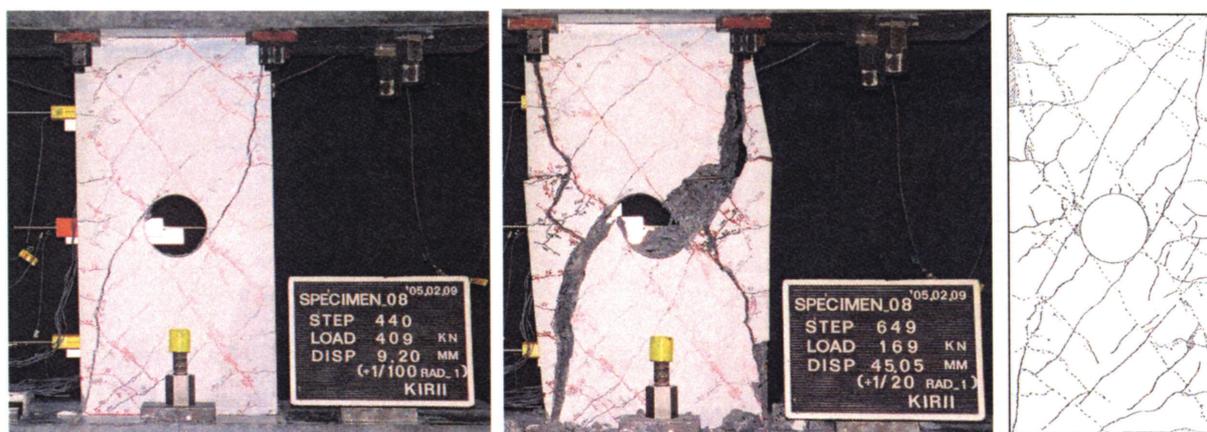


写真4 試験体No. 8のひび割れ状況(左より、部材角1/100時、部材角1/20時、ひび割れ図)
Crack distribution of No.8 specimen (from left-side: rotation angle at 1/100, 1/20, and crack-pattern)

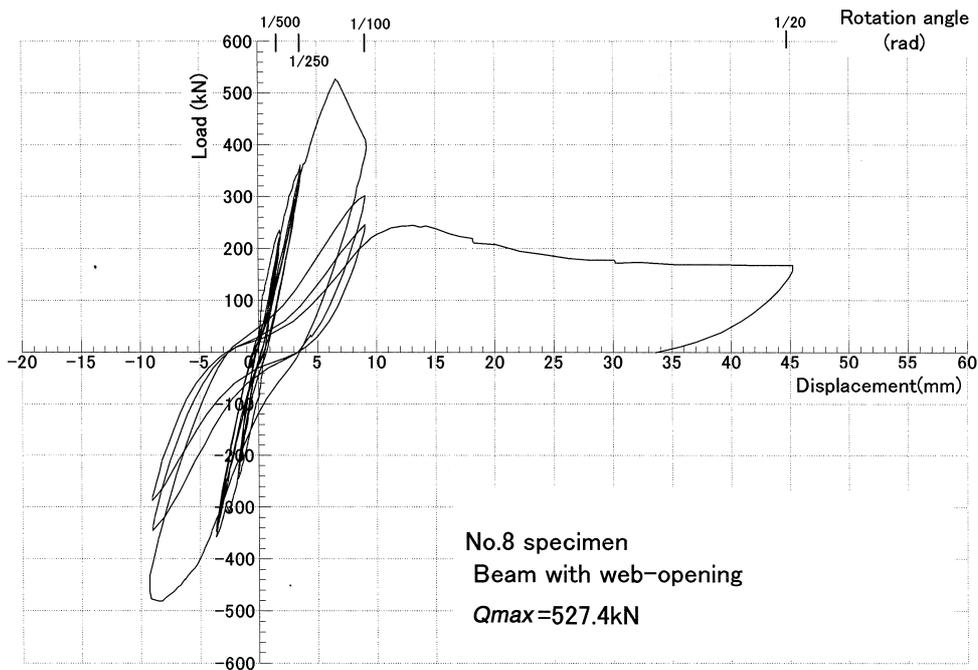


図3 試験体No. 8の荷重～変位曲線
Load-displacement relations of No.8 specimen

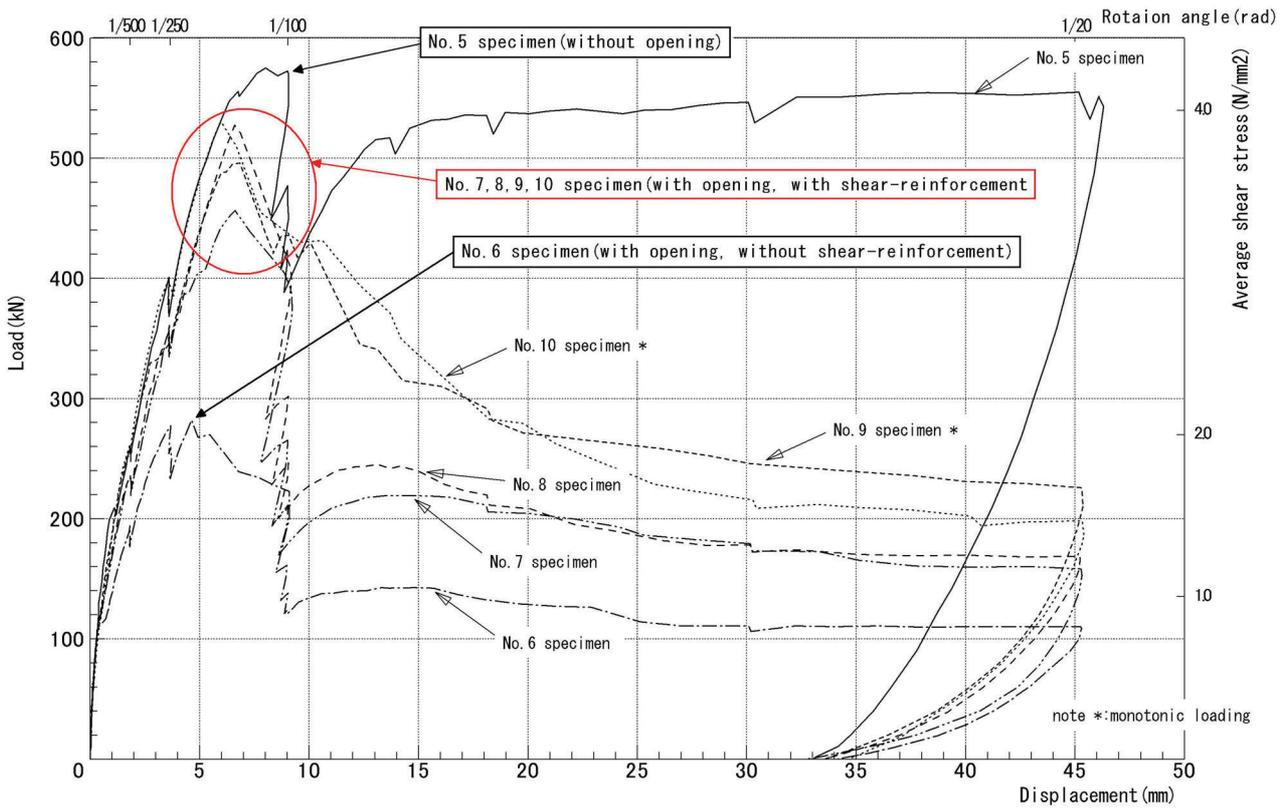


図4 設計基準強度 $F_c=60\text{N/mm}^2$ シリーズの荷重～変位関係(正側加力時の包絡線)
Load-displacement relations (envelopes of cyclic response of specimens)

ここで、

H : 円形孔の直径(mm)

D : 梁せい(mm)

K_u : 断面寸法による補正係数($d \geq 400\text{mm}$ のとき $K_u=0.72$)

K_p : 引張鉄筋比 p_t による補正係数 $K_p=2.36 p_t^{0.23}$

b : 梁幅(mm)

d : 梁の有効せい(mm)

F_c : コンクリート設計基準強度(N/mm^2)

M/Qd : せん断スパン比

ただし、せん断スパン比は1よりも大きく3以下とし、3以上の場合は3とする。

w_p : NSジョープレンの斜め筋の補強筋比

s_p : 補強筋の有効範囲内にある肋筋の補強筋比

p_w : 貫通孔部補強筋比。補強筋の有効範囲内にあるNSジョー

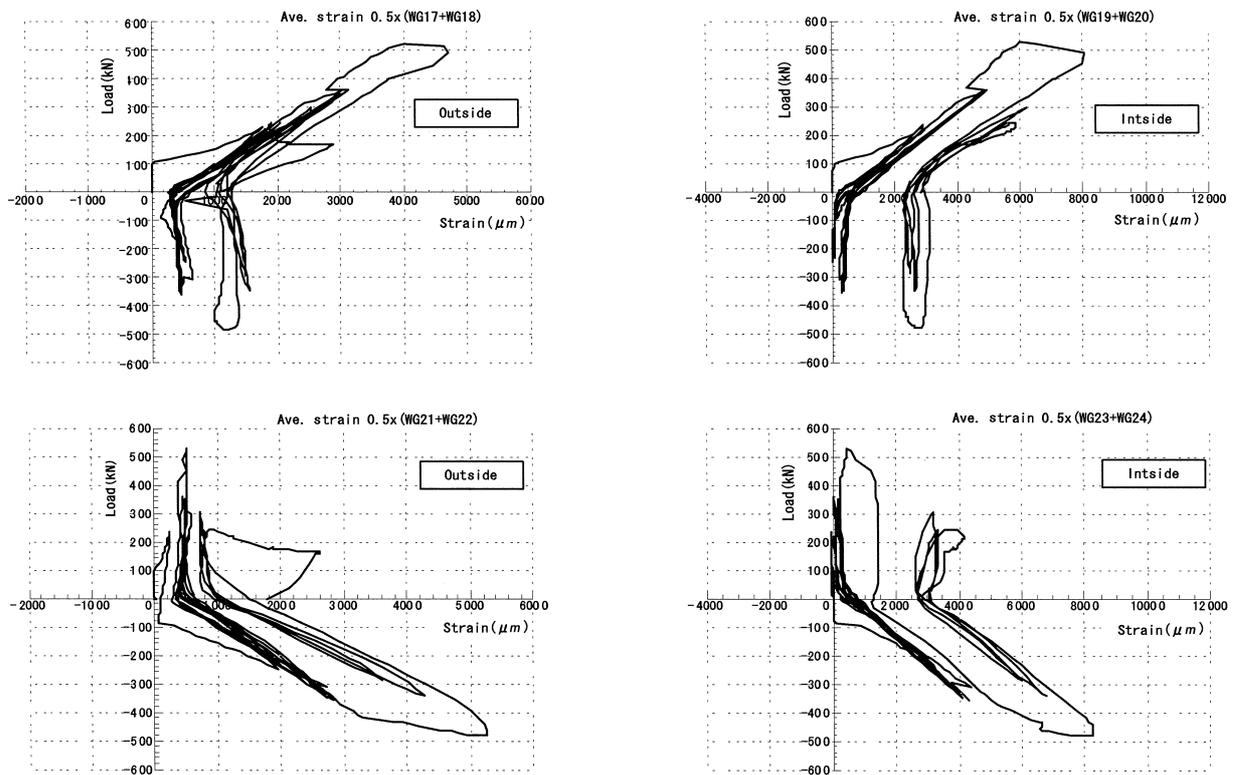


図5 試験体No. 8の貫通孔補強筋における荷重～発生ひずみ関係
Load-strain relations of shear reinforcement for web-openings

ブレンの補強筋比と補強有効範囲内の筋筋の補強筋比との

和とする。 $P_{w0} = {}_w P_{w0} + {}_s P_{w0}$

${}_w \sigma_y$: NSジョーブレンのせん断補強用材料強度 (N/mm²)

${}_s \sigma_y$: 筋筋のせん断補強用材料強度 (N/mm²)

ただし、 ${}_s \sigma_y$ は梁一般部筋筋の材料強度とする。

j : 応力中心間距離 (= (7/8)d, 単位はmm)

である。

せん断耐力に関する実験値と計算値の比較結果を表6に示す。なお、せん断耐力の計算には、コンクリート及び鉄筋の材料試験結果

を用いた。

梁貫通孔をNSジョーブレンで補強したRC造有孔梁の加力実験を行い、以下の結果を得た。

(1)せん断耐力について

試験体No. 2及びNo. 6は貫通孔を設けているが補強を行っていないため、他試験体と比べせん断耐力が大きく低下している。一方、貫通孔補強及び孔際補強を行った試験体では、実験値は計算値を上回った。

表6 せん断耐力に関する実験値と計算値の比較
Comparison of shear resistance between experiment and calculation

Specimen ID	Compressive strength of concrete (N/mm ²)	Shear resistance (kN)		Comparison ${}_e Q_{su} / {}_c Q_{su}$	Web-opening and reinforcements		
		Experiment ${}_e Q_{su}$	Calculated ${}_c Q_{su}$		Web-opening	Reinforcement for web-opening	Stirrup at web-opening
No. 1	43.3	507.4	480.7	1.06	×	×	×
No. 2		245.2	276.8	0.89	○	×	×
No. 3		354.3	352.8	1.00	○	○	×
No. 4		414.3	394.1	1.05	○	○	○
No. 5		574.9	611.2	0.94	×	×	×
No. 6	70.3	282.2	337.3	0.84	○	×	×
No. 7		456.3	413.3	1.10	○	○	×
No. 8		527.4	454.6	1.16	○	○	○
No. 9		495.9	426.8	1.16	○	○	×
No.10		530.4	468.1	1.13	○	○	○

Remarks: ○: exist, ×: not exist

(2)貫通孔部の孔際に孔際補強筋を配置した効果

貫通孔補強筋のみでも補強効果を確認したが、さらに孔際補強筋を配置することによってせん断耐力を向上させる効果を確認した。

4. 梁貫通孔補強筋NSジョープレンの設計手法⁴⁾

高強度コイル鉄筋HDC800を用いた貫通孔補強筋の終局せん断耐力設計式として、式(2)に安全係数 α を考慮することによってせん断終局耐力の余裕度を高めることとした。 α の設定にあたっては、荒川式(1)の計算値に対して無開孔梁の既往の実験結果のせん断終局耐力の余裕度が1.16程度あるので、高強度鉄筋を用いたNSジョーブレンについても、最も実験結果の値が小さい試験体No.3において同程度のせん断終局耐力の余裕度を確保することとして、 $\alpha = 0.85$ とし、式(3)を定めた。

$$Q_{HU} = \alpha \cdot \left\{ \frac{0.092 K_u \cdot K_p (F_c + 18)}{M / Qd + 0.12} \left(1 - 1.61 \frac{H}{D} \right) + 0.85 \sqrt{P_{w0} \cdot \sigma_y + P_{s0} \cdot \sigma_y} \right\} \cdot bj \quad (3)$$

ここで、

Q_{HU} : NSジョーブレンを用いた有孔梁の終局せん断強度

α : NSジョーブレンを用いる場合の安全係数, $\alpha = 0.85$

σ_y : NSジョーブレンのせん断補強用材料強度 (N/mm²)

$$\sigma_y = 800 \text{ (N/mm}^2\text{)},$$

その他の記号は式(2)に同じである。

また、適用範囲を下記のように定めている(図6及び図7)。

- ①貫通孔の形状: 円形を対象とする。なお、角形の貫通孔の場合は、その外接円とする。
- ②貫通孔の直径: 最大孔径は梁せいの1/3とする。
対象とする梁貫通孔の直径は100mm以上、450mm以下とする。
- ③貫通孔の位置: 梁の水平方向については、梁端部で柱面から梁せい寸法までの範囲内に貫通孔がかからないようにする。梁せいの上下方向に関しては、梁上下縁から梁せいの1/4かつ200mmの範囲内に貫通孔がかからないようにする。
- ④連続貫通孔の孔中心間隔: 貫通孔が梁の水平方向に並んで設け

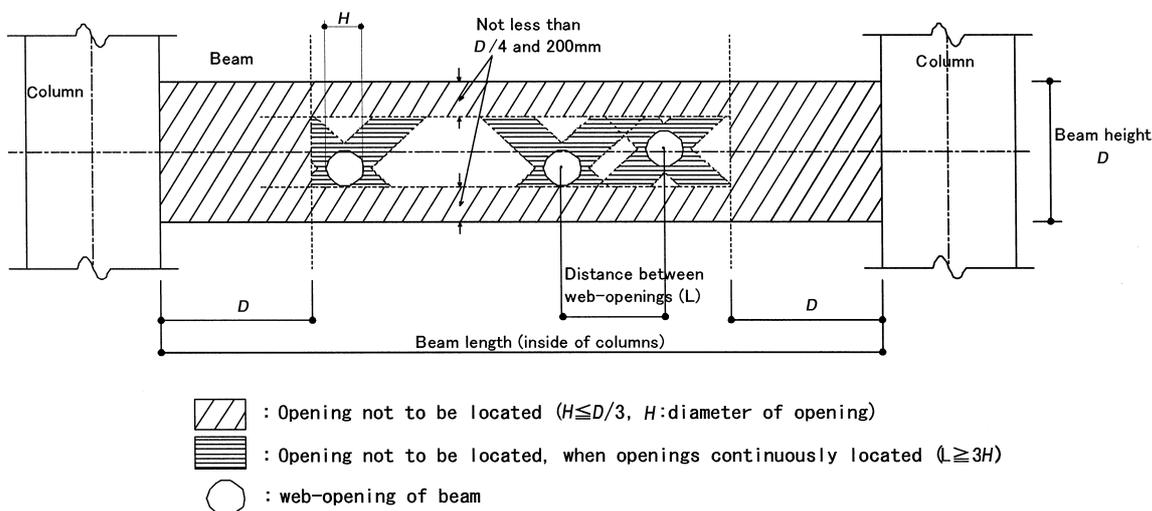


図6 貫通孔の位置に関する規定
Rules on the location of web-openings

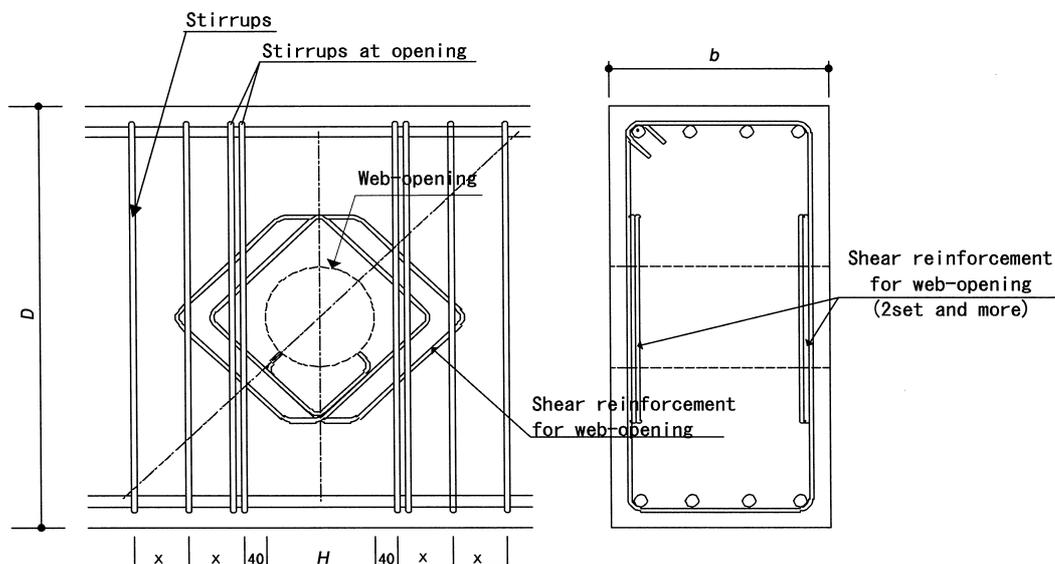


図7 孔際筋の配置
Arrangement of stirrups at web-opening

られる場合、貫通孔の中心間隔は水平面投影距離で表すものとし、その中心間隔は貫通径の3倍以上とする。なお、梁せい方向には連続貫通孔は設けられないものとする。

- ⑤連続貫通孔の孔位置：貫通孔の夫々の45度接線の範囲内には、次の貫通孔がかからないようにする。
- ⑥コンクリートの設計基準強度：36N/mm²以上、60N/mm²以下とする。
- ⑦孔際筋筋の配置：貫通孔の両側には一般部筋筋と同一使用の孔際筋筋を配置する。

5. おわりに

0.2%耐力800N/mm²以上を有する高強度異形コイル鉄筋HDC800を開発し、HDC800を用いた梁貫通孔補強筋NSジョーブレンを開発し

た。NSジョーブレンを適用したRC造有孔梁のせん断実験によって梁貫通孔部の補強効果を確認し、終局せん断耐力の評価式を定めた。梁貫通孔補強筋の高強度・細径化は、設計の合理化とともに、現場における運搬、配筋作業の能率向上の効果が期待できる。

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. 1999
- 2) 広沢雅也:鉄筋コンクリート部材の強度と靱性. 建築研究報告 No.76. 建設省建築研究所, 1977
- 3) 広沢雅也, 清水泰:鉄筋コンクリート造有孔梁のせん断強度と靱性. 建築技術. (331), (1979.4)
- 4) (財)ベターリビング:梁貫通孔補強材“NSジョーブレン”評定報告書. 評定CBL RC002-05号, 2006.3