

論文 RC 造有孔梁における改良型螺旋補強材の補強効果に関する実験的研究

前口 剛洋

要旨：本研究では鉄筋コンクリート造有孔梁の貫通孔補強において、これまでに提案したひし形状の螺旋型補強材の形状をより合理的に改善した補強材を提案した。提案した補強材は、重量で約 20%軽量化して経済性を図った改良型螺旋補強材、改良型螺旋補強材の施工性を考慮して更に改善を加えた再改良型螺旋補強材である。これらの補強材の有効性を確認するため、有孔梁せん断実験を行なって力学的な補強効果を検討した。その結果、改良型及び再改良型螺旋補強材で補強した試験体共に強度性状及び変形性状等に補強効果が見られ、鉄筋コンクリート造有孔梁の貫通孔補強に有効であることが確認できた。

キーワード：鉄筋コンクリート造、有孔梁、せん断強度、補強材

1. はじめに

本研究では、これまでに鉄筋コンクリート造有孔梁の貫通孔補強において、補強作業の省力化を図る目的で、1 箇所の貫通孔を 1 個の補強材で補強することが可能なひし形状の螺旋型補強材（以下、HS 型螺旋型補強材と呼ぶ）を提案し、その有効性を検討してきた。¹⁾

既往の研究では、HS 型螺旋補強材はコンクリート強度が比較的高い 30N/mm^2 級の有孔梁試験体においては補強効果が見られ、開孔補強に有効であることが確認できたが、コンクリート強度が低い 21N/mm^2 級の有孔梁試験体では、十分な補強効果が得られず、HS 型螺旋補強材で補強した試験体のせん断強度は、コンクリート強度に依存する傾向が見られた。本論文は、既往の HS 型螺旋補強材をより合理的に改善し、重量で約 20%軽量化し、経済性及び補強作業の効率化を図った改良型螺旋補強材(以下、DS 型螺旋補強材と呼ぶ)、更に DS 型螺旋補強材の欠点でもある補強材両端に設けたボイド管受け筋を延長して水平に折り曲げ加工して、より施工性の向上を図った再改良型螺旋補強材（以下、NS 型螺旋補強材と呼ぶ）を考案し、これらの螺旋補強材の有効性を確認するため有孔梁せん断実験を行なって、力学的な補強効果を検討した。本報告では、実験結果より得られた力学的

性状のうち、主に強度性状、変形性状、ひび割れ及び破壊性状等について考察し、改良した補強材の補強効果について検討した結果を述べる。

2. 実験概要

2.1 螺旋型補強材

本研究で提案した既往の HS 型、改良した DS 型および NS 型螺旋補強材の形状を図 1 に示す。いずれの補強材も梁幅方向に連続した斜めせん断補強筋で構成された螺旋状の形状であり、主な特徴は孔部 1 箇所を 1 個の補強材で補強する方法である。

改良した DS 型及び NS 型螺旋補強材の基本形状は、鉄筋コンクリート造梁のせん断補強筋の配置は理論的、実験的にも材軸 45 度が最も有効であると考えられることから、せん断補強筋である肋筋に結束して固定する補強材外側の斜め筋を梁材軸 45 度に折り曲げて矩形を構成し、内側の螺旋状のせん断補強筋は既往の有孔梁せん断実験結果によれば、貫通孔補強材で補強した有孔梁の最終破断のほとんどは孔部の接線ひび割れが卓越して破断することから、そのひび割れ角度のほぼ直角となる材軸 55 度に折り曲げて連続して配した。したがって、DS 型、NS 型螺旋補強材は外側に材軸 45 度に折り曲げた 2

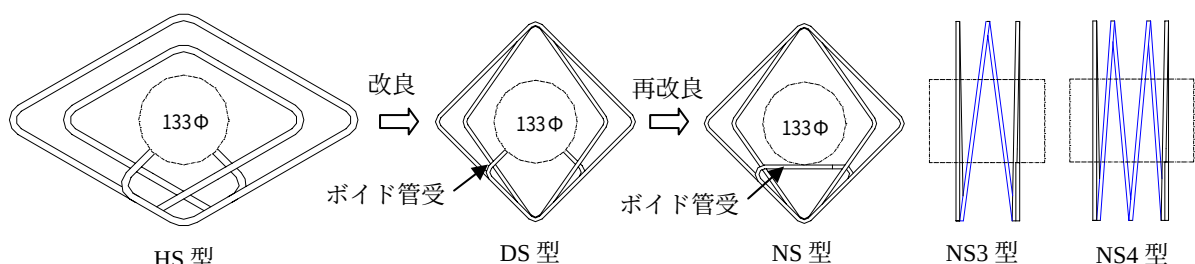
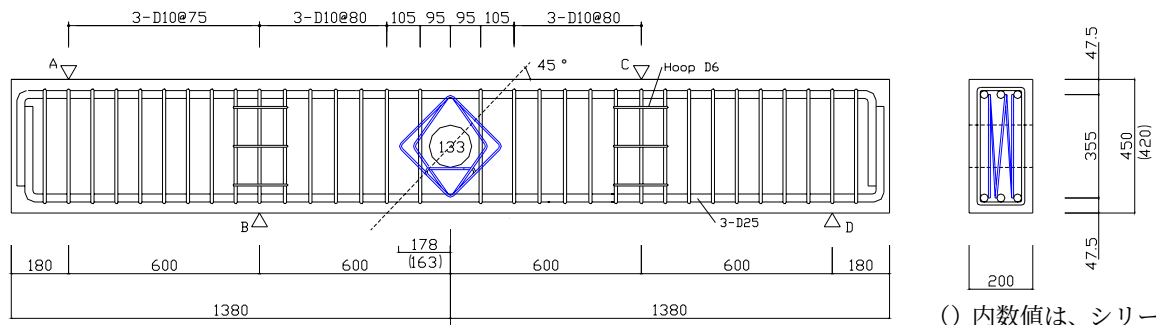


図-1 螺旋型補強材



(a) 24-NS31

() 内数値は、シリーズ I 試験体の寸法を示す。

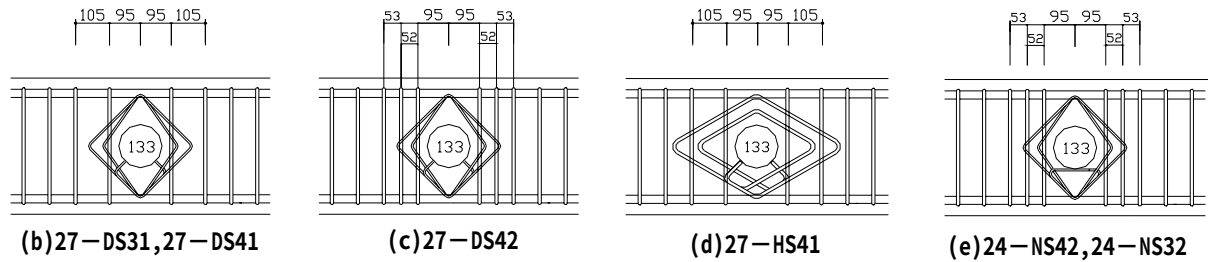


図-2 試験体形状・配筋図

表-1 試験体概要

種別	試験体名		開孔補強筋(比)		主筋	コンクリート 呼び強度	断面寸法 b×D (mm)	孔径(比) He(mm)
	No	記号	補強材	肋筋	配筋			
シリーズ I	1	27-O1	無し	D10-1組	3-D25 (SD390)	Fc27	200×420	133 (0.32)
	2	27-DS31	DS3型	D10-1組				
	3	27-DS41	DS4型	D10-1組				
	4	27-DS42	DS4型	D10-2組				
	5	27-HS41	HS4型	D10-1組				
シリーズ II	6	24-O1	無し	D10-1組	3-D25 (SD390)	Fc24	200×450	133 (0.30)
	7	24-NS31	NS3型	D10-1組				
	8	24-NS32	NS3型	D10-2組				
	9	24-NS42	NS4型	D10-2組				

表-2 素材試験結果

(a) コンクリート

呼び強度 (N/mm ²)	スランプ (mm)	材令 (日)	圧縮強度 _{Ave} σ _c (N/mm ²)	
27	180	33	28.2	28.2
24	180	33	25.8	26.3
		37	26.8	

(b) 鉄筋(D6:KSS785,D10:SD295A,D25:SD390)

呼び名	使用箇所	降伏点強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 ×10 ⁵ (N/mm ²)
I	D6 補強材	1013 ¹⁾	1225	2.07
	D10 肋筋	349	499	1.87
	D25 主筋	427	651	1.85
II	D6 補強材	1095 ¹⁾	1175	1.94
	D10 肋筋	370	536	1.90
	D25 主筋	427	651	1.85

*) D6 (KSS785) は0.2%耐力

個の矩形とその内側に材軸 55 度に折り曲げた数個のダイヤ形のせん断抵抗斜め筋が梁幅方向に螺旋状に連続して構成された一筆書きの補強材であり、NS 型螺旋補強材は DS 型を改善し、両端の末端部にボイド管を受ける水平筋を設置した螺旋型のシンプルな形状の補強材である。なお、本実験では改良型、再改良型補強材のせん断補強斜筋数が 3 本の DS3 及び NS3 型と 4 本の DS4 及び NS4 型の 2 タイプの螺旋補強材を用いた。

螺旋補強材の主な特徴を示すと、(1)孔部 1 箇所を 1 個の補強材で補強する方法。(2)施工の際、補強材がバネ状であるので、梁幅方向に伸縮ができるため取付け作業が容易である。(3)強度設計の際、せん断応力に対しては、梁幅方向の斜め筋数及び鉄筋径で対応できる。(4)運搬時に縮めてコンパクトに包装できる。(5)補強材の設置状態は、梁断面中央部にも数列の連続した補強筋が設置されているので、貫通孔の周囲全体を鉄筋で囲うような形状となる。(6)一筆書き製作が可能である。等である。したがって、本補強材の有効性が確認できれば、

鉄筋コンクリート造有孔梁の貫通孔補強作業の合理化、施工精度および補強材製作の際の低コスト化や品質向上を図れることから、これからの有孔梁貫通孔補強作業の省力化に大いに寄与できるものと考えられる。

2.2 試験体

試験体概要を表-1 に示す。また、試験体の形状及び配筋図の一例を図-2(a)に示し、孔部周辺の配筋図を図-2(b)~(e)に示す。実験はコンクリートの呼び強度 FC27 を使用し、孔部周辺補強に DS 型及び HS 型の螺旋補強材と孔際肋筋 D10 の組合せで補強した試験体をシリーズ I、コンクリートの呼び強度 FC24 を使用し、NS 型の螺旋補強材と孔際肋筋の組合せで補強した試験体をシリーズ II に分類して実験を行った。

試験体の製作において、螺旋補強材は高強度鉄筋 D6(KSS785)、肋筋は D10(SD295A)、梁主筋は D25 (SD390)

の鉄筋を用いて加工した。貫通孔はせん断スパン及び梁
せい中央に設置し、開孔直径 $H_e=133\text{mm}$ ($H_e/D=1/3$) とし
て、曲げ降伏に先行してせん断破壊するように設計した。

シリーズ I の試験体の種類は、無補強有孔梁試験体
(27-01)、27-01 試験体を DS3 型補強材で補強した有孔梁
試験体(27-DS31)、27-01 試験体を DS4 型補強材で補強し
た有孔梁試験体(27-DS41)、27-01 試験体の孔際肋筋を 2
組とし、DS4 型補強材で孔部を補強した有孔梁試験体
(27-DS42)、27-01 試験体を従来型の HS4 型補強材で補
強した有孔梁試験体(27-HS41)の合計 5 体である。

シリーズ II の試験体の種類は、無補強有孔梁試験体
(24-01)、24-01 試験体を NS3 型補強材で補強した有孔梁
試験体(24-NS31)、24-01 試験体の孔際肋筋を 2 組とし、
NS3 型補強材で孔部を補強した有孔梁試験体 (24-NS32)、
同様に 24-01 試験体の孔際肋筋を 2 組とし、NS4 型補強
材で孔部を補強した有孔梁試験体 (24-NS42) の合計 4
体である。また、本実験に用いた使用材料の試験結果を
表-2 に示す。

2.3 試験方法

図-3 に実験装置を示す。試験は曲げの影響を少なく
するため、有孔梁せん断実験で一般的に用いられている
逆対称曲げモーメント形式とし、加力は万能試験機を用
いて一方向単調載荷とした。測定方法は、荷重を荷重計
で変位は 2 個の高感度変位計を用いてせん断スパンにお
ける支点間相対変位を測定した。歪は最大モーメント
が生じる支点位置の主筋、孔際の肋筋および補強材の斜
筋に歪ゲージを貼付して測定した。また、ひび割れ性状
を調べるため、剛性およびせん断強度に最も影響を及ぼ
すと考えられる孔部接線ひび割れと孔部対角線ひび割
れの 2 つのひび割れ幅をひび割れ発生時から 100kN 毎に
クラックスケールを用いて目視で計測した。

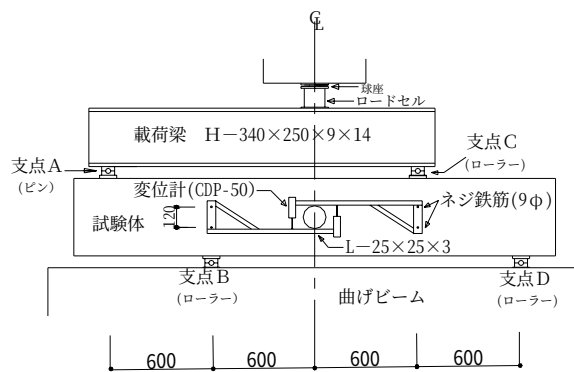


図-3 実験装置

3. 実験結果及び考察

3.1 強度性状

実験結果を表 3 に示す。図-4 にせん断力と補強筋
量の関係、図-5 に実験値と有孔梁せん断終局強度式²⁾
で求めた計算値との関係を図示した。これらの図表をも
とに各試験体の強度性状について考察する。

シリーズ I 試験体において、補強材の補強効果は無補
強有孔梁試験体 27-01 と比較すると、DS3 型補強材で補
強した 27-DS31 試験体は終局強度で 248 kN、DS4 型補強
材で補強した 27-DS41 及び 27-DS42 試験体は 289 kN、
341kN の増加が見られ、それぞれの補強材にその効果が
見られた。既往の HS4 型補強材で補強した 27-HS41 試
験体は 255kN の増加が見られたが、ほぼ同じ補強量の改良
した 27-DS41 試験体に比べて荷重の増加は小さい値を示
した。

コンクリート強度 24N/mm^2 で DS 型補強材を再改良した
NS 型補強材を用いたシリーズ II の試験体も同様に、補強
材の補強効果は無補強有孔梁試験体 24-01 と比較すると、
24-01 試験体を NS3 型補強材で補強した 24-NS31 試験体

表-3 実験結果

シ リ ー ズ	No	試験体	提案 補強材	開口部補強筋比			実験値		計算値	実験/計算
				肋筋	補強材	補強筋比	終局強度 ^{*1)}	せん断強度 ^{*2)}	せん断強度	
				sPw	kPw	ΣPw	eP(kN)	eQ(kN)	cQ(kN)	
I	1	27-O1	無し	0.0044	-	0.0044	521	174 (2.65)	121	1.43
	2	27-DS31	DS3型	0.0044	0.00416	0.0086	769(△248)	256 (3.99)	184	1.40
	3	27-DS41	DS4型	0.0044	0.00553	0.0099	810(△289)	270 (4.18)	200	1.35
	4	27-DS42	DS4型	0.0089	0.00553	0.0144	862(△341)	287 (4.45)	214	1.34
	5	27-HS41	HS4型	0.0044	0.00538	0.0098	776(△255)	259 (3.97)	200	1.30
II	6	24-O1	無し	0.0040	-	0.0040	592	197 (2.75)	139	1.42
	7	24-NS31	NS3型	0.0040	0.0038	0.0078	882(△290)	294 (4.13)	207	1.42
	8	24-NS32	NS3型	0.0080	0.0038	0.0118	946(△354)	315 (4.47)	224	1.41
	9	24-NS42	NS4型	0.0080	0.0051	0.0131	996(△404)	332 (4.71)	238	1.39

*1) () 内数値は無補強有孔梁試験体を基準とした増加荷重を示す。

*2) () 内数値は、 $eQ/bj(\text{N/mm}^2)$ の値を示す。

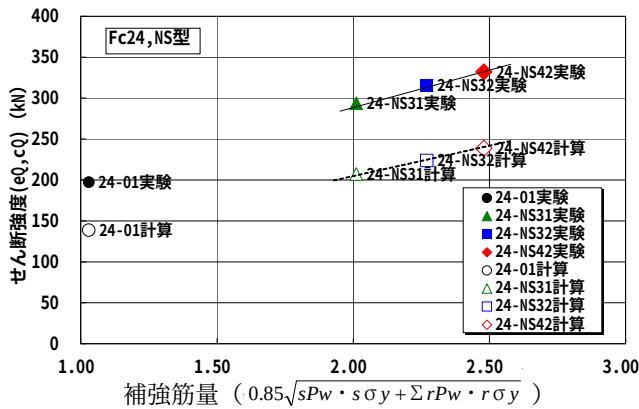


図-4 せん断強度と補強量の関係

は、最大荷重で 290kN、24-NS31 試験体に孔際肋筋を 1 組増した 24-NS32 試験体は 354kN、また、NS4 型補強材で補強した 24-NS42 試験体は 404kN の荷重の増加が見られ、それぞれの補強方法にその効果が見られた。

図-4 に NS 型補強材のせん断強度と有孔梁計算式²⁾の補強筋負担の項(第 2 項)との関係を示し、補強筋量がせん断強度に及ぼす影響を考察する。図中の近似直線の実線は実験、破線は計算式で求めた値を示す。

図より、補強筋量が増すにつれて実験値のせん断強度は増大する傾向を示しており(実線)、補強方法の有効性が伺える。また、計算式で求めた破線とほぼ平行な直線を示している。このことから NS 型補強材で補強した有孔梁は有孔梁計算式で概ね評価できると考えられる。

図-5 に示した計算値に対する実験値の割合は、DS 型補強材で補強した 3 体の有孔梁試験体は、試験体ごとに若干の差は見られるが 1.34~1.40 の範囲(平均値は 1.36)であり、既往の HS 型補強材で補強した 27-HS41 試験体の 1.30 よりも大きい値を示し、改善の効果が見られた。また、DS 型補強材で補強した有孔梁試験体は普通鉄筋コンクリート造有孔梁の設計において、低減係数算定の基準値(1.32)を上回る結果が得られた。

シリーズⅡの NS 型補強材で補強した試験体の計算値に対する実験値の割合は、1.39~1.42(平均 1.41)であり、普通鉄筋コンクリート造有孔梁の低減係数算定基準値(1.32)を上回る結果が得られた。

このことより、コンクリート強度 24~27N/mm²級の普通鉄筋コンクリート造有孔梁に高強度鉄筋($\sigma_y=800\text{N/mm}^2$ 級)で製作した DS 型、NS 型螺旋補強材を用いた有孔梁の補強設計は、有孔梁せん断終局強度式で概ね評価できると考えられる。また、既往の実験結果¹⁾を基に HS 型、DS 型、NS 型の計算値に対する実験値の割合(余裕度)とコンクリート強度との関係を図 6 に示した。

図によれば、既往の HS 型補強材はコンクリート強度が高くなるに従って余裕度が大きくなっており、強度がコンクリート強度に依存する傾向が見られるが、DS 型

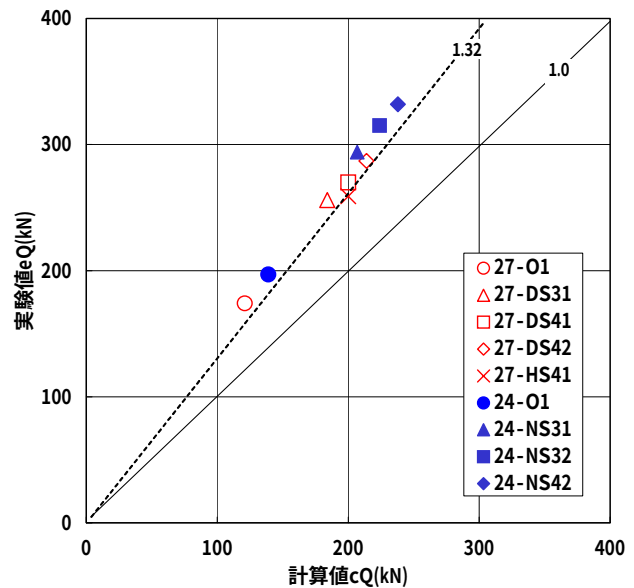


図-5 実験値と計算値の関係

「有孔梁せん断終局強度計算式²⁾」

$$cQ_s = \left\{ \frac{0.092KuKp(18 + Fc)}{M/Qd + 0.12} \left(1 - 1.61 \frac{H}{D} \right) + 0.85\sqrt{sPw \cdot \sigma_y + \Sigma rPw \cdot r\sigma_y} \right\} \cdot bj$$

<記号>

cQ_s : せん断終局強度 Ku : 有効せい d による補正係数

Kp : 引張鉄筋比 Pt による補正係数で $Kp=2.36(Pt)^{0.23}$

Fc : コンクリート圧縮強度(N/mm²) M/Qd : せん断スパン比

H : 円孔の直径(mm) D : 梁せい(mm) b : 梁幅(mm)

d : 有効せい(mm) j : 応力中心間距離(mm)

sPw : 孔周囲有効肋筋補強筋比

$$sPw = \Sigma as \cdot (\sin \theta + \cos \theta) / (b \cdot c)$$

ΣrPw : 孔周囲有効補強材補強筋比 ($\Sigma rPw = rPw(\theta=45^\circ) + rPw(\theta=55^\circ)$)

$rPw(\theta=45^\circ)$: 補強材補強筋比(材軸 45 度)

$rPw(\theta=55^\circ)$: 補強材補強筋比(材軸 55 度)

$$rPw(\theta) = \Sigma as \cdot (\sin \theta + \cos \theta) / (b \cdot c)$$

as : 孔の片側 c の範囲内にある 1 組の補強筋の断面積(mm²)

θ : 孔周囲補強筋が材軸となす角度

σ_y : 肋筋降伏点強度(N/mm²)

$r\sigma_y$: 補強材降伏点強度(N/mm²)

c : 孔周囲補強筋の有効な範囲

Pt : 引張鉄筋比

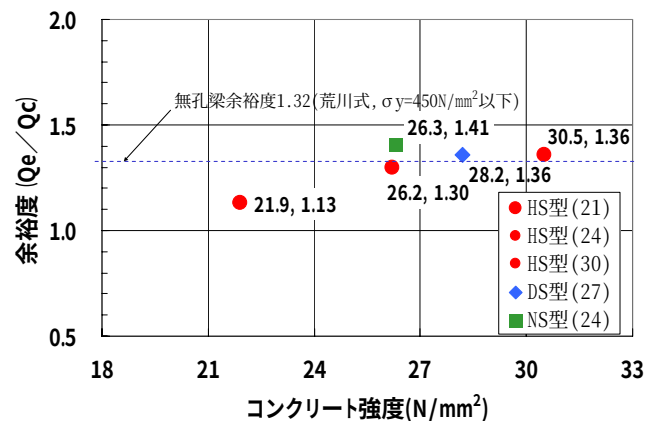


図-6 螺旋型補強材のコンクリート強度と余裕度(実験値/計算値)

NS 型補強材は、コンクリート強度 $FC=24, 27 \text{ N/mm}^2$ (実強度: $26.3, 28.2 \text{ N/mm}^2$) において、計算値に対する実験値の割合は 1.36, 1.41 であり、コンクリート強度による強度への影響は小さいと考えられる。

3.2 変形状

図-7 にシリーズ I 試験体、図-8 にシリーズ II 試験体の荷重-変形関係を示す。

図-7 によれば、開孔部を補強材で補強した有孔梁試験体の変形状は、孔際筋筋を 2 組として補強筋比が最も大きい 27-DS42 試験体は、曲げ及び対角線ひび割れ発生後も最大荷重時までの変位は小さく、他の試験体に比べて高い剛性を示した。これは補強方法の違いから、孔際の 2 組の筋筋が有効に作用したものと考えられる。

他の試験体の変形状は、いずれの試験体も曲げひび割れ、対角線ひび割れおよび接線ひび割れ発生時による局所的な変形の増大も見られず、最大荷重までの剛性低下も小さく緩やかな変形曲線を示し、ほぼ類似した履歴を示した。一方のシリーズ II の補強材で補強した試験体は、図-8 によれば、いずれの試験体も曲げ及び対角線ひび割れ発生後、せん断ひび割れ発生付近 ($540 \sim 590 \text{ kN}$) に若干のスリップが見られるが、接線ひび割れ発生時にも急激な変形は見られず、最大荷重まで緩やかな変形曲線を示した。また、孔際筋筋 2 組に補強材 NS3 型、NS4 型で補強した 24-NS32, 24-NS42 試験体の荷重-変形曲線はほぼ類似した履歴曲線を示しており、補強材の違いによる変形状への影響は小さいといえる。総じて、いずれの試験体も初期荷重時に発生する曲げ及び対角線ひび割れ発生荷重までの変形は小さく、補強材の違いによる影響は小さいと言える。なお、無補強試験体 27-01, 24-01 は、対角線ひび割れが発生してから徐々に変形が増大し、その対角線ひび割れ幅が増大して行き、急激な剛性低下が見られた。その後、荷重の増加は小さく変形のみ大きく増加して最大荷重に達した。

3.3 ひび割れ及び破壊性状

ひび割れ発生過程は、いずれの試験体も最大曲げモーメントを受ける支点付近に曲げひび割れが発生し、その直後に孔部から梁材軸 45 度方向に上下ほぼ同時にひび割れ（以下、対角線ひび割れと呼ぶ）が発生した。無補強有孔梁試験体 27-01, 24-01 はこの対角線ひび割れが卓越して最終破断に至るが、補強材で補強した試験体は、シリーズ I 試験体では最大荷重の 76~80% 付近で、シリーズ II 試験体は最大荷重の 90~98% 付近で孔部上下に材軸約 35 度の孔に接するひび割れ（以下、接線ひび割れと呼ぶ）が発生し、このひび割れが進展して最終破断に至った。

図-9 にシリーズ I、図-10 にシリーズ II の試験体の対角線ひび割れ幅の荷重による進展状況及びひび割れ

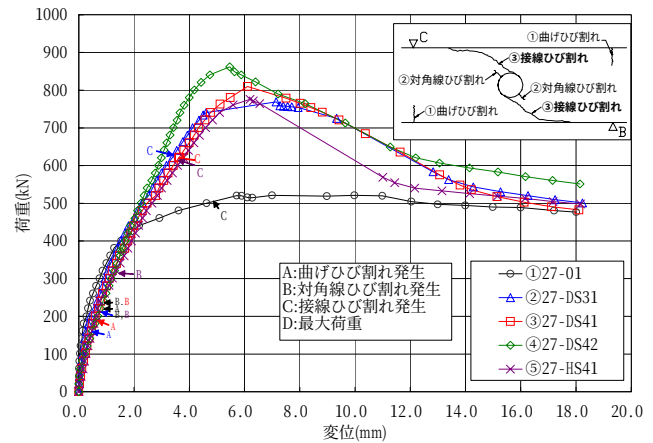


図-7 荷重-変形関係 (シリーズ I)

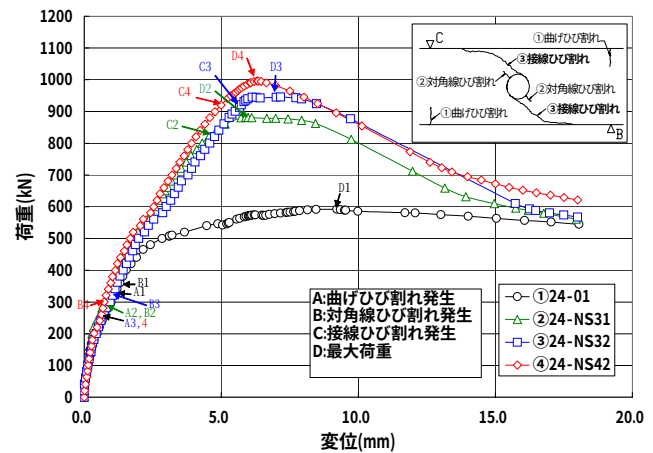


図-8 荷重-変形関係 (シリーズ II)

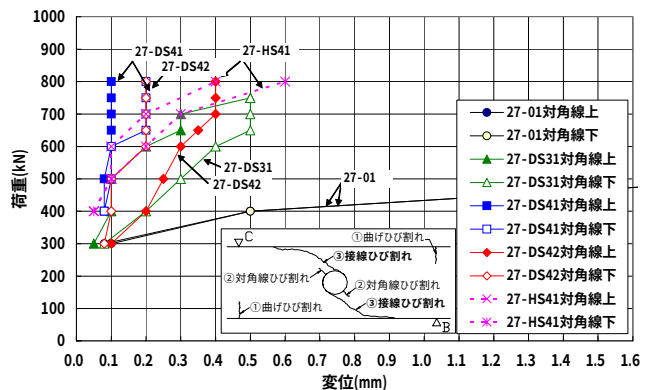


図-9 ひび割れ進展状況 (シリーズ I)

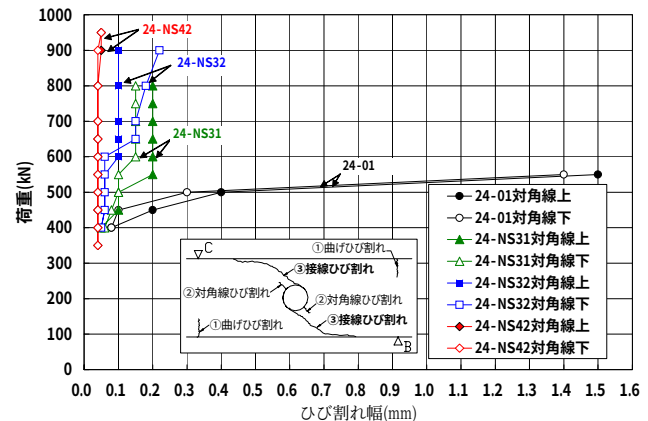


図-10 ひび割れ進展状況 (シリーズ II)

模式図を示す。シリーズⅠの DS 型補強材で補強した試験体は補強筋比の違いによるひび割れ幅の進展の違いが若干見られるが、ほぼ同補強筋比の 27-DS41, 27-HS41 試験体では、27-DS41 試験体の方が 27-HS41 試験体に比べてひび割れの進展が小さい。これは HS 型補強材の材軸 30 度の斜め筋を 45 度に変更して改良した DS 型の補強筋が対角線ひび割れに、より有効に作用してひび割れの進展を抑制したものと考えられる。

一方のシリーズⅡにおいて、図-10 より対角線ひび割れ進展状況を比較検討してみると、NS 型補強材で補強した試験体はいずれの試験体も無補強試験体 24-01 に比べて同荷重におけるひび割れ幅が小さく、その後のひび割れの進展状況も非常に小さいことがわかる。また、NS 型補強材で補強した試験体は補強筋比の大きい試験体ほど同荷重におけるひび割れ幅は小さく、かつ、ひび割れ幅の進展も小さいことが顕著に現れている。このことから、補強材の斜筋が有効に作用して対角線ひび割れの進展を抑制したものと考えられる。

最終破壊モードは、無補強有孔梁試験体 27-01, 24-01 は対角線ひび割れ位置でのせん断破壊、補強材で補強した試験体はいずれの試験体も接線ひび割れ位置でのせん断破壊である。図-11, 12, 写真-1, 2 に最終破壊状況例を示した。また、最終破壊状況でも明らかに、補強材で補強した有孔梁試験体は、無補強試験体に比べて孔周辺に斜めせん断ひび割れが数多く発生しており、かつ分散していることがわかる。

4. まとめ

本報告は既往の HS 型螺旋補強材を改良した DS 型螺旋補強材及び再改良した NS 型螺旋補強材の特徴、実験概要および実験結果について述べた。本実験結果から得られた知見を以下に述べる。

実験結果によれば、DS 型及び NS 型螺旋補強材共にせん断強度及びひび割れ制御に改良効果が見られた。特に再改良した NS 型補強材を用いた試験体は開孔部補強量の増加に伴い強度が上昇し、NS3 型、NS4 型螺旋補強材で補強した試験体共に高い補強効果が見られた。

また、DS 型及び NS 型螺旋補強材で補強した有孔梁の補強設計は、有孔梁せん断終局強度式で概ね評価できる。

なお、本報告では補強筋の歪性状については紙面の都合上触れていないが概略を述べると、いずれの試験体も孔際筋筋は降伏歪まで達したが補強材の歪は未降伏であった。このことは降伏点の低い筋筋(SD295)が先に降伏することによってひび割れが進展して補強材のコンクリート付着力が低下し、この部分の圧縮力が伝達できなくなり最終破壊に至ったと考えられる。今後の検討課

題として、有孔梁実験結果の力学的性状に影響を及ぼすと考えられるコンクリート強度、加力方法(繰返し载荷等)、せん断スパン比及び開口径比等の違いによる影響を考慮して更に多くの実験を加えて検討していきたい。

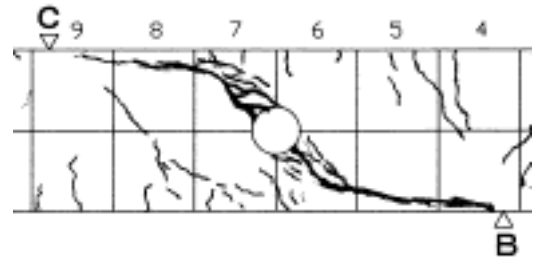


図-11 最終破壊状況 (24-01)

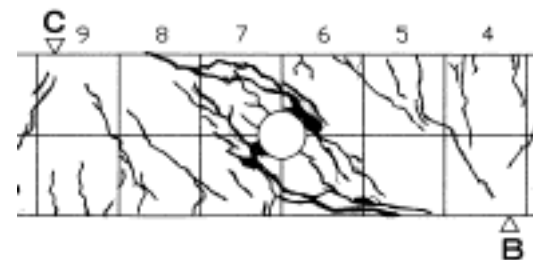


図-12 最終破壊状況 (24-NS42)



写真-1 最終破壊状況 (27-01)



写真-2 最終破壊状況 (27-DS31)

参考文献

- 1) 前口剛洋他：スパイラル型補強材を用いた RC 造有孔梁の補強効果に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.26, №2, pp.337-342, 2004.7
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，1999, pp.271-274