

論文 鉄筋コンクリート造開孔梁のせん断補強に関する実験的研究

権 自然^{*1}・中山 輝郁^{*2}・袁 士宇^{*3}・孫 玉平^{*4}

要旨：本研究では、塑性ヒンジ領域に大きな円形開孔を有する RC 梁を補強する新しい工法を提案する。本工法は、開孔周辺にスパイラル型補強金物を設けることを特徴とする。提案工法の有効性を検証するため、1/3 スケールの梁試験体を計 9 体作成し、片振りの繰り返し曲げせん断実験を行った。その結果、本工法により補強された開孔梁では、耐力及び変形性能における補強効果が確認された。また、直径 150mm の超高強度スパイラル筋で補強した開孔梁は、無開孔梁とほぼ同等の力学的性状を示した。さらに、従来の斜め補強筋による補強は、定着部分が曲げ抵抗に寄与し、梁に早期せん断破壊を起こす恐れがあることを明らかにした。

キーワード：鉄筋コンクリート造開孔梁、塑性ヒンジ領域、開孔補強、終局せん断耐力、変形能力

1. はじめに

鉄筋コンクリート(RC)造の集合住宅などの大梁には、水道や電気設備などの配管を通すための貫通孔が設けられることが多い。配管を収納する方法として、開孔位置から大梁端部まで下がり天井にするか、配管を梁端部まで迂回させて天井の一部を下がり天井にするのが一般的である。柱面に近い梁の潜在的な塑性ヒンジ領域に十分な塑性回転能力を確保する観点から、日本建築学会の RC 構造計算規準¹⁾では、RC 造大梁における貫通孔を梁の両端から十分に離れた箇所に設けることを推奨している。しかしながら、開孔を柱面に近い梁端部に設けることができれば、下がり天井の幅が大幅に縮小され、室内空間の設計自由度が高くなることが明らかである。

これまでは、RC 造の有孔梁における貫通孔の補強方法は、斜め筋やコ型鉄筋などの複数の既製補強金物を使用し、孔周辺に組み合わせて補強する方法が一般的である^{2),3),4),5),6)}。しかしながら、補強金物の製作精度および補強作業の効率を向上させる観点から、1 貫通孔を 1 個の補強金物で補強する方法の方が望ましいと思われる。

本論は、上述の背景を踏まえ、塑性ヒンジ領域に貫通孔を設けた RC 梁に対してスパイラル型補強金物を用いた補強方法を提案し、提案工法の有効性を実験で検証すると同時に、提案工法で補強した開孔梁の終局せん断耐力に対して、従来の強度式^{1),7),8)}の予測精度を検証することを研究目的とする。

2. 実験計画

2.1 補強金物

本研究で提案したスパイラル型補強金物の形状を図-1 に示す。スパイラル型補強金物は、1 本の鉄筋を円形に曲げ、梁幅方向にスパイラル状に連続配置した一筆書

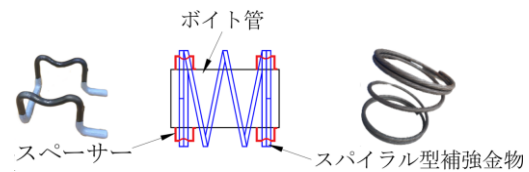


図-1 スパイラル型補強金物の形状

きの開孔補強材（以後、スパイラル筋と呼ぶ）である。スパイラル筋とコンクリートの付着力を向上させるため、スパイラル筋の端部を 1.5 巻きとした。取り付け時には、スペーサーのみを使用してボイド管に容易に固定できるため、補強作業の効率向上が期待される。

2.2 試験体

試験体の一覧を表-1、試験体の寸法及び配筋詳細例を図-2 に示す。本研究では、開孔周辺の補強詳細を実験変数として、約 1/3 スケールの梁試験体を計 9 体作成した。せん断スパン比を 1.0（せん断スパン 220mm）に設定した。また、梁と支圧板の接触面積を確保し、せん断スパンの要件を満たすために、支圧板の幅を 100mm に設定した。すべての試験体は 150mm × 250mm の矩形断面を有する。1 体の無開孔梁をプロトタイプ試験体とした。開孔梁は載荷点から左右 2 か所に円形開孔を設けており、開孔の直径はすべて統一で 80mm である。この直径は梁断面全高の約 1/3 に相当し、現行規準¹⁾で規定されている上限値に近い。

コンクリートは設計基準強度 $F_c=21\text{MPa}$ のレディーミクストコンクリートを用いた。実験材令時のコンクリート圧縮強度 f_c は表-1 に示す。梁の主筋として、D13 異形鉄筋(SD345)を 4 本配置し、引張鉄筋比は 0.77%となっている。また、試験区間以外の部分には予期せぬ破壊を防ぐために D6 せん断補強筋(SD295)を配置したが、円孔の周辺には配置していない。

*1 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 大学院生 (学生会員)

*2 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 大学院生

*3 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 助教 博士(工学) (正会員)

*4 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 教授 工博 (正会員)

表-1 試験体一覧

試験体名	コンクリート強度 f'_c (MPa)	ヒンジ領域内			備考
		円孔	補強方法	補強筋材種	
NB	39.8	なし	なし	なし	無開孔
NB-O		あり			無補強
NB-O-DD-2	38.9	あり	斜め交差筋	D6 (SD295)	斜め交差筋(2組)
NB-O-DD-3			フープ筋		斜め交差筋(3組)
NB-O-DH	フープ直径 130mm				
NB-O-DS-13	スパイラル筋				スパイラル直径 130mm
NB-O-DS-15				スパイラル直径 150mm	
NB-O-US-13			U7.1 (SBPDN1275/1420)	スパイラル直径 130mm	
NB-O-US-15		スパイラル直径 150mm			
	38.8				
	38.9				

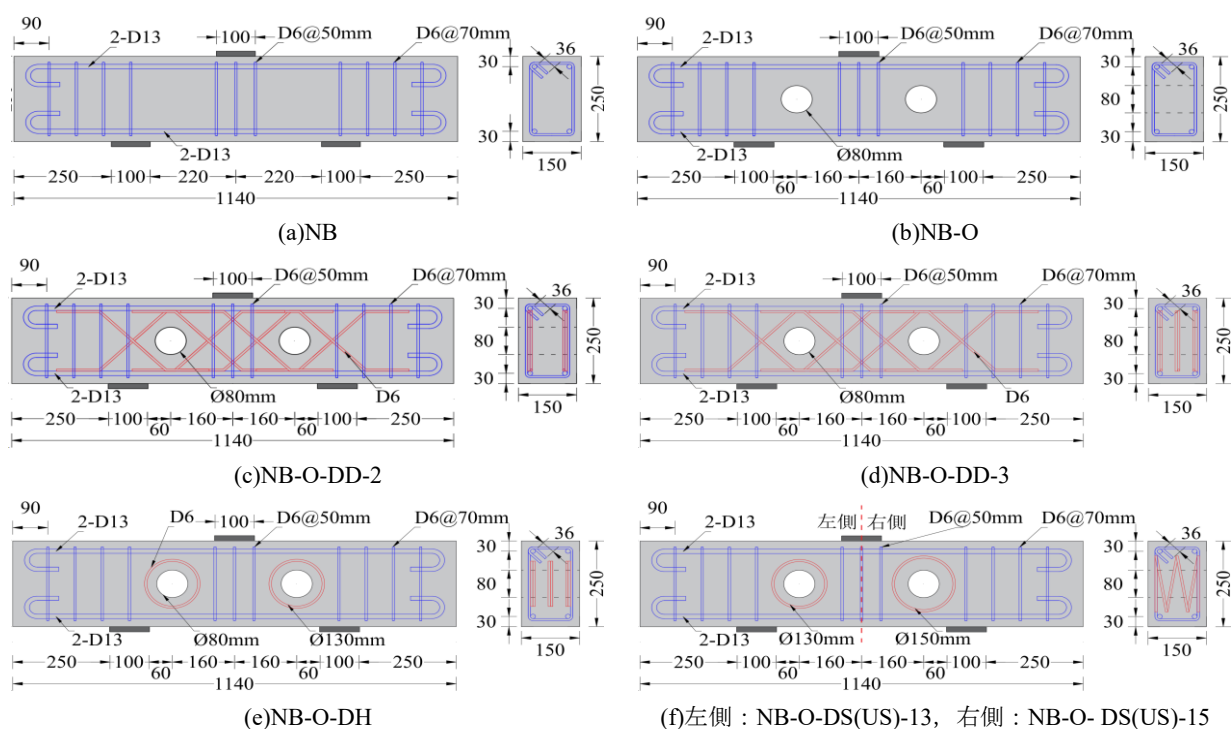


図-2 試験体の寸法と配筋詳細例

表-2 鉄筋材料試験結果

鉄筋	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
D13	402	576	1.75×10^5
D6	416	536	1.97×10^5
U7.1	1316	1437	1.79×10^5

表-3 材齢 28 日のシリンダー圧縮試験結果

コンクリート	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
No.1	39.9	3.2	2.82×10^4
No.2	39.9	3.2	2.78×10^4
No.3	39.6	2.85	2.92×10^4
平均値	39.8	3.08	2.84×10^4

表-1 と図-2 に示すように、本研究の比較対象である補強方法は、従前の斜め交差筋補強(孔あたり 2 組, 3 組), 円形フープ補強(重ね継手, 長さ: 0.5 巻分), およびスパイラル筋補強の 3 種類である。提案工法の補強効果

を検討するため、スパイラル筋の種類と直径も実験変数とした。スパイラル筋の材質には、異形鉄筋 D6 または超高強度鉄筋 U7.1 を用いた。直径は 130mm と 150mm の 2 種類にした。表-2 と表-3 に、試験体に使用した鉄筋およびコンクリートの材料試験結果を示す。

2.3 試験方法

荷重装置図を図-3 に示す。試験体は単純支持され、鉛直方向の油圧ジャッキで片振りの繰り返し曲げせん断力が加えられた。荷重は油圧ジャッキの先端に取り付けたロードセルによって検出された。柱面に近い梁の潜在的な塑性ヒンジ領域における曲げせん断応力状態を再現するため、せん断スパン比を 1.0(せん断スパン 220mm)に設定した。荷重点および支点は、拘束を取り除くためにローラー支承とし、梁と支圧板との接触面積を確保するため、幅 100mm の支圧板を設置してせん断スパンの要件を満たした。また、ピンローラー支持を再現するため、

図-3の左側支圧板の上にテフロンシートを敷いた。

載荷は部材角 R (Drift ratio) で制御し、部材角は梁中央たわみとせん断スパンの比で定義した。載荷プログラムを図-4に示す。梁スパン中央のたわみは3台の変位計で測定した変形から支点の変形分を差し引いた値とした。引張鉄筋および開孔補強材のひずみは図-3に示す位置(赤点)に貼付したひずみゲージによって計測された。さらに、斜め交差筋補強を施した試験体では、梁スパン中央位置の斜め筋の定着長部分にもひずみゲージ(S5, S6)を貼付し、その部分が曲げ抵抗に対して寄与しているかを確認した。

3. 実験結果と考察

3.1 破壊状況

最終破壊状況を図-5に、最大ひび割れ幅を図-6にそれぞれ示す。図-5より分かるように、無開孔梁 NB は主に曲げひび割れの進展が見られ、部材角 4.0% 附近でせん断耐力に達し、曲げ降伏後のせん断破壊の破壊性状を示した。一方、無補強の有孔梁および従来の斜交差筋で補強された有孔梁では、部材角 0.75% までに円孔の接線方向に沿ったせん断ひび割れが明確に現れ、そのひび割れは発生後すぐに拡大してせん断破壊に至った。それに対して、フープ筋とスパイラル筋補強の試験体は、円孔周辺と梁に生じるせん断ひび割れ幅を有効に抑制し、曲げひび割れはさらに進展していた。提案工法による塑性ヒンジの回転能力の向上が確認された。

図-6に示すように、最大せん断ひび割れ幅について、無補強試験体と斜め交差筋補強を施した試験体では、部材角 0.5% あたりから、部材角の増加に伴ってひび割れ幅

が大きく増大し、0.75% から 1.0% の部材角で急増し、せん断破壊に至る。フープ筋およびスパイラル筋による補強された試験体では、せん断ひび割れ幅が比較的に低く抑制されていた。

一方、超高強度(U7.1)スパイラル筋で補強された試験体では、スパイラル筋直径の違いによって破壊状況が異なることが明らかになった。スパイラル直径が 130mm の場合、スパイラル筋の拘束範囲が小さく、ひび割れは拘

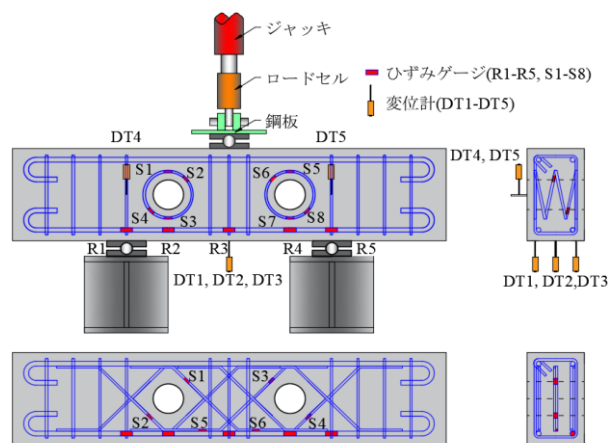


図-3 載荷装置図

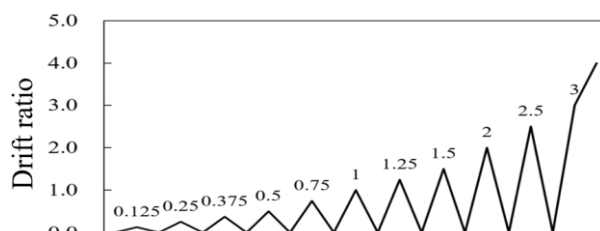
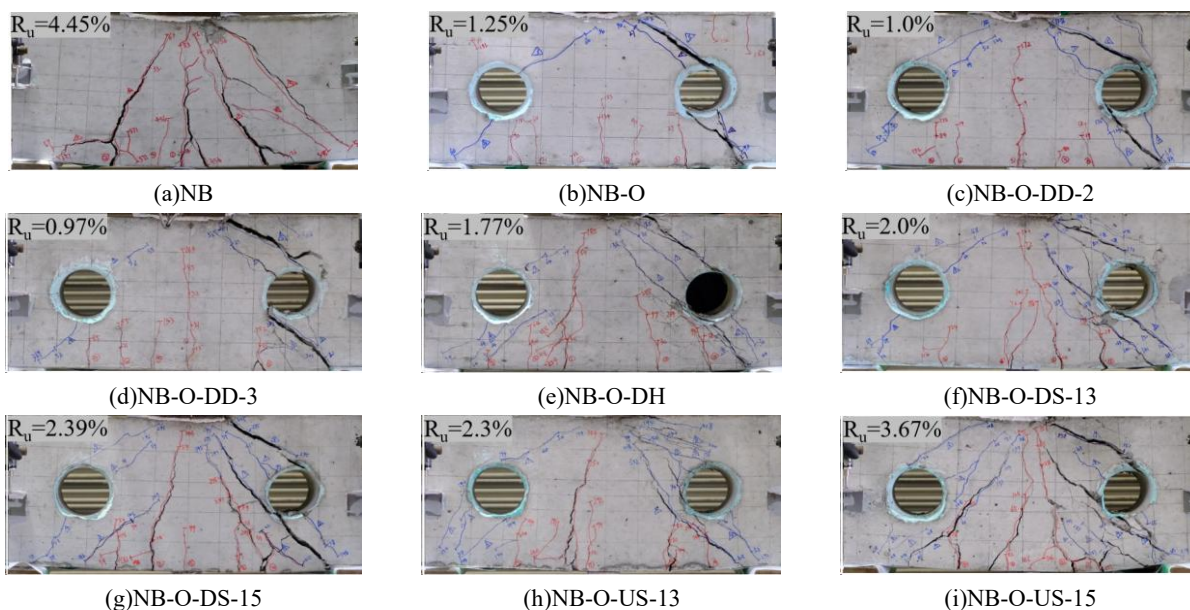
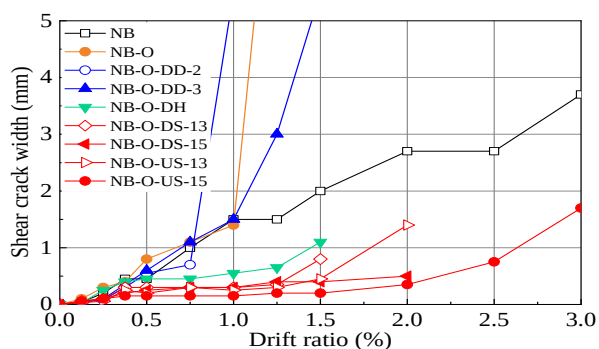


図-4 載荷プログラム

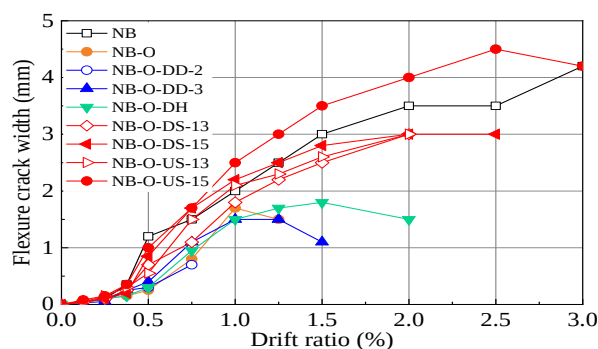


注、開孔孔梁の曲げひび割れとせん断ひび割れをそれぞれ赤線と青線で示した。

図-5 最終破壊状況

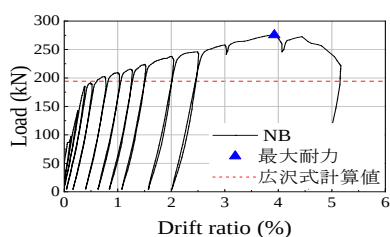


(a)最大せん断ひび割れ幅

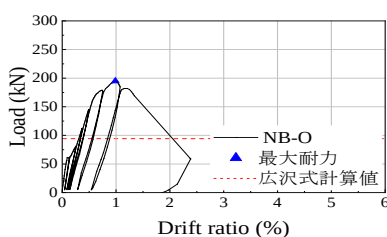


(b)最大曲げひび割れ幅

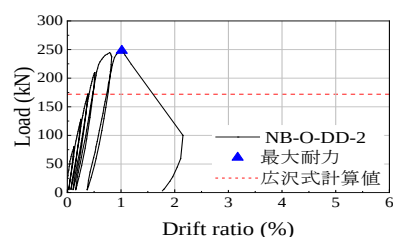
図-6 最大ひび割れ幅



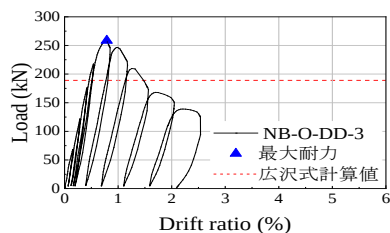
(a)NB



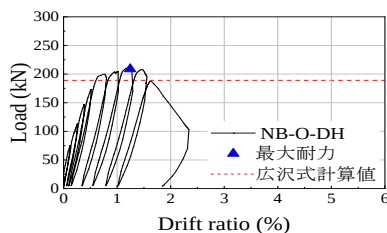
(b)NB-O



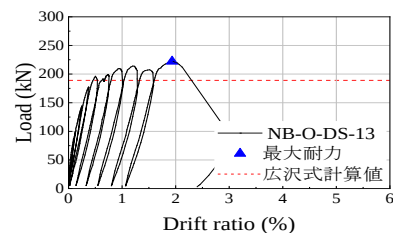
(c)NB-O-DD-2



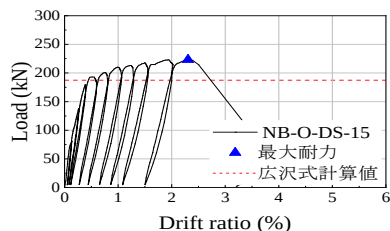
(d)NB-O-DD-3



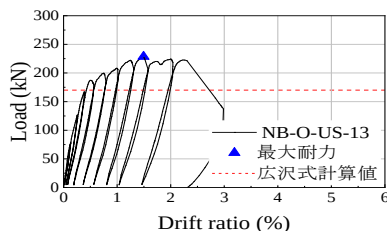
(e)NB-O-DH



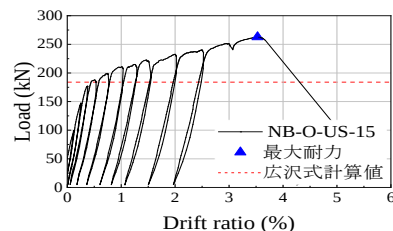
(f)NB-O-DS-13



(g)NB-O-DS-15



(h)NB-O-US-13



(i)NB-O-US-15

図-7 荷重—部材角関

束領域内ではほとんど生じておらず、代わりにスパイラル筋の外側に多数現れた。一方、スパイラル直径が150mmの場合、孔周辺に生じたひび割れの幅は部材角2%までも0.5mm程度にとどまり、終局時は孔の上下両側の接線方向に補強用スパイラル筋と交わすせん断ひび割れが拡大する形となり、より高い変形性能を示した。

3.2 荷重変形関係

図-7に全試験体の荷重—部材角関係の実験結果を示す。図-7より分かるように、RC梁のヒンジ領域に大きな円孔を設けることにより、梁の耐力と変形能力は大幅に低下することが確認された。補強しない開孔梁では、

部材角が1%まで最大耐力を示した後、せん断破壊に至り、変形性能は無開孔RC梁の4分の1程度に留まった。また、従来の斜め交差筋補強を用いた開孔梁では、耐力が無補強梁より高いものの、補強筋の組数に関わらず、部材角約0.75%で最大耐力を示し、部材角が1.0%前後にてせん断ひび割れの急拡大により耐力が低下し、せん断破壊に至った。

一方、フープ筋およびスパイラル筋で補強された開孔梁は、いずれも曲げ先行型の破壊モードを示した。また、スパイラル筋で補強された試験体は部材角2.0%を超える変形能力を有した。特に、スパイラル直径150mmの超

高強度のSBPDN筋U7.1を使用した試験体は部材角3.5%以上の変形性能を示し、終局までは無開孔梁とほぼ同じ力学的性状を有することが図-5と図-7より伺える。

3.3 ひずみ履歴

図-8と図-9にはすべての試験体の主筋最大ひずみおよび補強筋のひずみ履歴をそれぞれ示す。主筋の降伏ひずみは図中で赤色の破線で示す。すべての試験体の引張主筋(SD345)はほぼ同様のひずみ履歴を示し、部材角0.5%から1.0%で降伏ひずみを超える。斜め交差筋で補強された試験体では、斜め交差筋の長定着部分のひずみ(例えば、図-9(a)中のS5とS6)が伸びており、定着部も主筋が一体となって曲げ変形に抵抗していることが推測される。そのため、該当試験体の曲げ抵抗力がほかの試験体より大きく、せん断破壊が発生しやすくなったと考えられる。

一方、塑性ヒンジ領域に大きな円孔を設けたRC梁において、フープ筋およびスパイラル筋を使用することで塑性ヒンジの回転能力を向上させた。スパイラル筋補強の効果が最も優れていた。スパイラル筋のひずみは部材角2.0%に達するまで1500 μ 以下で維持され、特に超高強度SBPDN筋は大変形まで弾性段階を保持していた。スパイラル直径150mmの超高強度SBPDN筋では、部材角が4.0%に達してもひずみは2000 μ 以下で維持されており、開孔周辺のせん断ひび割れの拡大を効果的に抑制したと伺える。

4. せん断強度式の検討

塑性ヒンジ領域に貫通孔を有するRC梁に関する研究は少なく、終局せん断耐力の評価に関するデータが不足しているため、既存の終局せん断強度式の精度について

検討する必要がある。本文では、検討対象とする開孔梁の終局せん断強度式として、広沢式¹⁾、MCSD式⁷⁾及びMansur式⁸⁾の計3式を用いた。広沢式およびMCSD式は、試験体の実験結果に基づいて導出された実験式であり、せん断スパン比(1.0~3.0)および孔径(はりせいの1/3以下)の範囲内で、有孔梁の終局せん断強度を精度よく評価できるとされている。一方、Mansur式は、ACI規準を基に修正された理論式である。以上の式は、式(1)、式(2)および式(3)で表される。記号の持つ意味については、関連文献を参照されたい。

広沢式($Q_{su,1}$) :

$$Q_{su,1} = \left\{ \frac{0.092k_u}{M^{0.12}} \left(1 - 1.61 \frac{H}{D} \right) + 0.85 \sqrt{\Sigma p_{s1} \cdot \sigma_{sy}} \right\} b j \quad (1)$$

MCSD式($Q_{su,2}$) :

$$Q_{su,2} = \frac{1.75}{Qd^{1.0}} b d f_t \left(1 - 1.61 \frac{H}{D} \right) + 2 a_s \sigma_{sy} \sin \theta_s \quad (2)$$

Mansur式($Q_{su,3}$) :

$$Q_{su,3} = \frac{1}{6} \sqrt{F_c} b (d - H) + a_s \sigma_{sy} \sin \theta_s \quad (3)$$

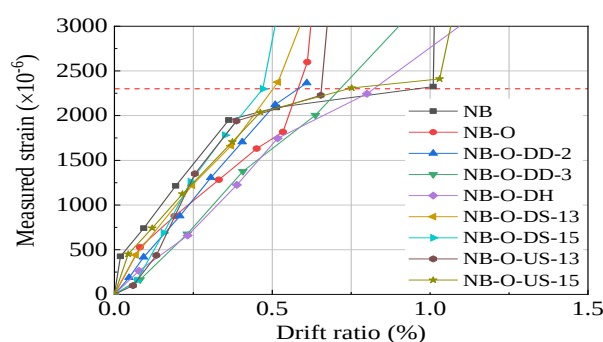


図-8 主筋の最大ひずみ(包絡線)

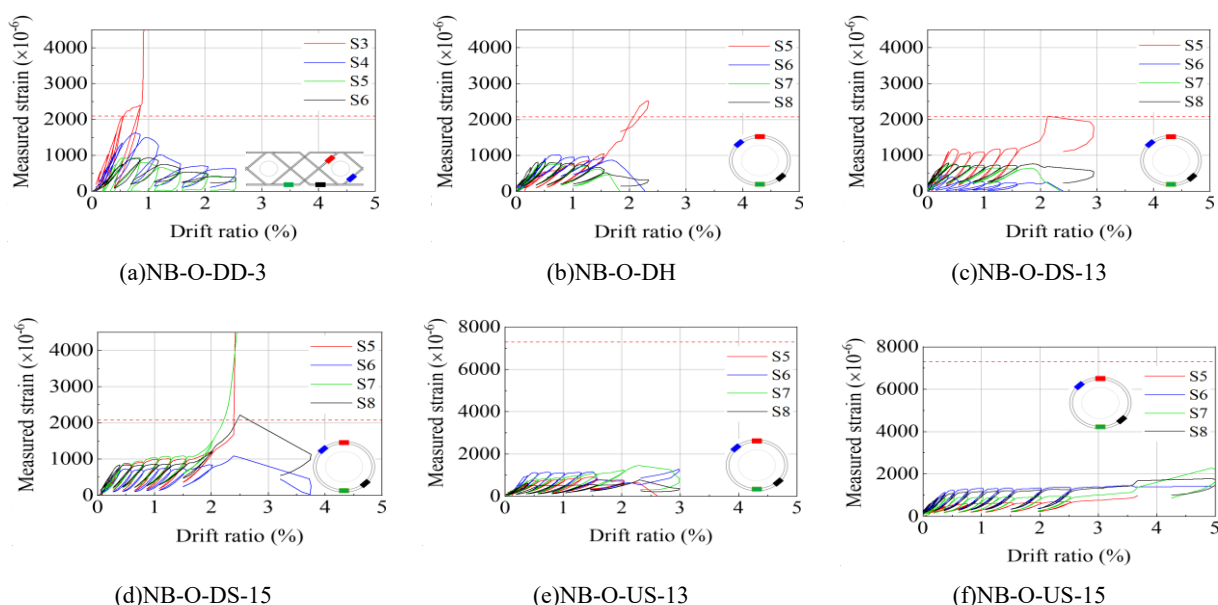


図-9 破壊側の補強筋のひずみ

表-4 セン断耐力の実験値と計算値の比較

試験体名	実験結果	広沢式		MCSD 式		Mansur 式	
	$Q_{u.exp}$ (kN)	$Q_{su.1}$ (kN)	$Q_{u.exp}/Q_{su.1}$	$Q_{su.2}$ (kN)	$Q_{u.exp}/Q_{su.2}$	$Q_{su.3}$ (kN)	$Q_{u.exp}/Q_{su.3}$
NB-O-DD-2	124.00	86.04	1.44	80.38	1.54	59.09	2.10
NB-O-DD-3	129.75	94.96	1.37	99.01	1.31	77.72	1.67
平均値			1.40		1.43		1.88
標準偏差			0.05		0.16		0.30
NB-O-DH	103.75	94.96	1.09	99.01	1.05	77.72	1.33
NB-O-DS-13	111.00	94.88	1.17	99.01	1.12	77.70	1.43
NB-O-DS-15	111.63	94.88	1.18	99.01	1.13	77.70	1.44
NB-O-US-13	114.25	85.36	1.34	79.26	1.44	57.95	1.97
NB-O-US-15	131.38	92.97	1.41	94.53	1.39	73.25	1.79
平均値			1.24		1.23		1.59
標準偏差			0.13		0.17		0.27

表-4 にはせん断強度の実験結果($Q_{u.exp}$)と3式による計算結果を比較している。また、補強方法ごとにせん断耐力計算値の平均値および標準偏差を算出した。なお、図-9 より分かるように、SBPDN 筋のひずみが降伏ひずみに達することはなく、ひずみは0.2%以下であった。したがって、SBPDN 筋の応力度の上限は、破壊時の孔周囲補強筋のひずみにヤング係数を乗じて求めた応力として計算した。

表-4 より、塑性ヒンジ内に開孔を有する RC 梁について、Mansur 式の計算値は一貫して実験結果を過小評価する傾向が見られた。斜め交差筋で補強された場合、広沢式および MCSD 式の計算値は、試験体の実験結果を40%安全側に評価している、特に広沢式は標準偏差が最小であることが確認された。一方、フープ筋およびスパイラル筋で補強した試験体のせん断耐力は、両式により高精度で安全側に評価することが可能であった。一方、SBPDN 筋で補強された有孔梁のせん断耐力計算において、破壊時の応力値を用いた計算結果は降伏強度より低かった。せん断耐力時の SBPDN 筋の応力値の取り扱い方については、さらなる検討が必要である。

5. 結論

本論ではヒンジ領域に大きな円孔を設けた RC 梁に対して、スパイラル筋補強の有効性を検討するための曲げせん断実験を行うと同時に、現有のせん断強度式の評価精度を検討した。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 提案したスパイラル筋により補強された開孔梁は、従来の斜め交差筋補強の試験体より高い変形能力を示した。直径 150mm を有する超高強度 SBPDN 筋スパイラルを用いた試験体は、部材角 3.5%まで無開孔梁と同等の力学的性状を示した。
- (2) 従来の斜め交差筋補強法における定着長部分が曲げ抵抗に寄与するため、試験体の早期抵抗力は他の

補強手法の試験体より高かったものの、部材角 1.0%付近で早期のせん断破壊を誘発した。

- (3) 広沢式による終局せん断耐力の計算値は比較的精度よく本試験の実験結果を評価できた。

謝辞

本実験の試験体に使用した SBPDN 筋は高周波熱錬(株)より御提供頂いた。ここに記して謝意を示す。

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，2018
- 2) 前口剛洋，ほか：定着部を有する簡易補強材を用いた RC 造有孔梁の補強効果に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 15, No.2, pp.619-624, 1995.7
- 3) 駿河良司，ほか：鉄筋コンクリートはり端部に適用可能な開口補強方法. コンクリート工学，Vol.40(8)，pp.20-26, 2002.8
- 4) 山本俊彦，豊田将文：高強度開口補強金物を用いた鉄筋コンクリート造有孔梁のせん断耐力に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 17, No.2, pp.625-630, 1995.7
- 5) Mansur, M. A. et al.: Effects of creating an opening in existing beams, ACI Structural Journal, Vol. 96, No. 6, pp. 899-906, 1999
- 6) Ali, S. R. M and Saeed, J. A.: Shear capacity and behavior of high-strength concrete beams with openings, Engineering Structures, Vol. 264, 2022
- 7) Wang, Wen-dong: Manual of Concrete Structural Design. China Architecture & Building Press, 2012. (In Chinese)
- 8) Mansur, M. A. and Tan, K. H. : Concrete beams with openings - analysis and design, CRC Press, 1999