# 論文 連続繊維シートと鋼管により開孔補強された既存梁のせん断耐力評価

中村洋行<sup>\*1</sup>·鈴木英之<sup>\*2</sup>·福山 洋<sup>\*3</sup>·上田正生<sup>\*4</sup>

要旨:既存梁にあと抜きで設けられた開孔部を補強する方法として,連続繊維シート と鋼管を用いた工法を提案した。その効果を検証する目的で,実大の梁試験体を用い た構造実験を実施した。鋼管を開孔部に入れ,適切に定着された炭素繊維シートを開 孔部周囲へ貼ることで鋼管が横拘束され,大きな補強効果が得られることが実験によ って明らかとなった。靱性保証指針式を基本とし,炭素繊維シートと鋼管による補強 効果を採り入れたせん断耐力式を提案し,実験耐力を良好に評価できることを示した。 キーワード:連続繊維シート,鋼管,既存梁, RC 造,開孔補強,せん断耐力

#### 1. はじめに

大都市圏における既存建築物の有効利用の観 点から,建築物のリニューアルに伴う用途変更, いわゆるコンバージョンが進められようとして いる。その際,設備機器のリニューアルに伴い, 鉄筋コンクリート造の既存梁へのあと抜き開孔 を要求されることがある。既存梁にコアカッタ 一等で開孔を設けることで梁の断面が欠損し, 場合によってはあばら筋の一部を切断するため, 梁のせん断性状が著しく低下することとなる。 現在,コンバージョンの対象となる建築物は, 建設された年代を考慮すれば耐震性の観点から も補強が必要であることが多く,耐震補強と同 時に開孔部の補強を行う必要がある。しかし, 施工性を考慮した効果的な補強方法の提案は少 なく,またその補強効果も明確でない。

耐震補強等の工事では施工性の良さから炭素 繊維等の連続繊維シートが使われることが多い。 連続繊維シートは部材の外周部を閉鎖型に巻き 付けられるか,あるいはその端部が確実に躯体 へ定着されることで,十分な補強効果を発揮す る。しかし,既存梁にはスラブが付いているこ とがほとんどであり,独立柱のように閉鎖型に



図-1 連続繊維シート定着金物

巻き付け補強することは困難である。

筆者らは,連続繊維シートをコンクリート躯体へ合理的に定着する目的で図-1 に示す形状の金物を考案した。この金物は連続繊維シートを折り返して,金物の表面側に貼り付けることでシートを定着するという特徴を持つ。

本論では既存梁へのあと抜き開孔を想定した 有孔梁に,この金物を用いて炭素繊維シート(以 下,CFシート)および炭素繊維プレート(以下, CF プレート)を定着し,さらに鋼管を組み合わ せた補強方法を提案する。そして,実大スケー ル梁の加力実験により補強効果を確認し,その 耐力の評価方法を提案することを目的とした。

# 2. CF シートと鋼管による開孔部のせん断補強

有孔梁のせん断終局耐力の計算において靱性 保証指針[1]ではアーチ機構の負担せん断力を

*1	(株)コンステック技術総括本部 理事 工修 (正会員)	
*2	安藤建設(株)技術研究所 上席研究員 博士(工学) (正会員)	
*3	(独)建築研究所構造研究グループ 上席研究員 工博 (正会員)	
*4	北海道大学工学研究科 教授   工博  (正会員)	

零としている。また、CFシートをせん断補強に 使用し、トラス機構によってその効果を十分に 発揮させるためには、CFシートの高い引張強度 に釣り合う圧縮力を負担する要素が必要である。 しかし開孔部分にはコンクリートが無いため、 CFシートだけによる補強には限界がある。一方 で、鋼管は単純に横圧縮するよりも、周囲が拘 束されている方が、圧縮強度が高くなる[2]。図 -2にCFシートと鋼管による開孔補強の模式図 を示す。本論では引張強度が高いCFシートと、 横拘束されることでより大きな圧縮力の負担を 期待できる鋼管の相乗効果を利用した開孔部の 補強方法を提案するものである。

ここで、部材の外周に貼られた CF シートに よって、完全なトラス機構を形成するためには、 上下の主筋を含めるように閉鎖型に巻き付ける 必要がある。しかし、スラブが付いている場合 は上端主筋の上側に CF シートを定着すること は困難である。本工法ではスラブの下側に定着 金物を用いて CF シートを定着している。その ため、上端主筋と定着金物間の水平方向のせん 断耐力、つまり既存のあばら筋で抵抗するスラ ブ付け根で割り裂かれるせん断耐力以上の補強 効果は期待できない。

## 3. 実大実験による補強効果の検証

#### 3.1 試験体

CF シートと鋼管による補強効果を確認する 目的で加力実験を行った。試験体一覧を表-1 に, 試験体形状図を図-3 に示す。試験体は中層建物 の最も梁せいが小さくなる最上階の梁を想定し

表−1 試験体および実験結果一覧

た実大モデルとした。本実験は開孔部を有する 梁のせん断性状を把握することを目的としてい るため,梁部材の曲げ降伏よりもせん断破壊が 先行するように計画した。そこで,せん断スパ ン比を 1.68 とし,主筋には SD490 材を使用し



表-2 材料試験結果

					鋼材		降伏強度	弾性係数			
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	主筋	D22 SD490	523	190000		
試験体名	B-N	B-O	B-ST	B-CF	B-ST-CF	あばら筋	D6 SD295A	331 <sup>*1</sup>	178000		
開孔部	無し	有り(190.7¢)				鋼管	STK190.7-12	342	195		
鋼管補強	—	無し	有り	無し	有り	連続約	載維 <sup>*2</sup>	引張強度	弾性係数		
繊維補強	—	無し		有り		CFシート	厚さ0.167mm	3400	230000		
コンクリート圧縮強度	27.7	28.7	29.7	30.3	31.0	CFプレート	50x1.2mm	2400	156000		
最大耐力(kN)	-272	178	266	282	397	<u>*1:0.2%オフセット法 *2:カタログ値 単位(N/mm<sup>2</sup>)</u>					
同上変形角(x10 <sup>-3</sup> rad.)	-5.0	2.5	5.0	9.7	10.0	表−3 加力サイクル					
破壊状況	せん断破壊	開孔部せん断破壊				相対変形角	Cycle数	相対変形角	Cycle数		
世通 bxD=400x625mn	<sub>聶</sub> bxD=400x625mm せん断スパン比a/D=1.68					1/800rad.	±1	1/100rad.	±1		
要因 主筋上端, 下端共	፵ 主筋上端, 下端共4-D22(SD490) pt=0.67%					1/400rad.	±1	1/67rad.	±1		
<sup>「」</sup> あばら筋2-D6(SD	̄ あばら筋2−D6(SD295A) @150 pw=0.11%					1/200rad	+1	1/50rad	+1		



図−5 最大耐力時のひび割れ状況

た。開孔はスパン中央に設け、その孔径は190.7 φとした。これは梁せい D の 0.31 倍であり、概 ね 150φの配管にロックウール等を巻き付けた 場合に施工上必要な直径でもある。

B-N は比較用の無開孔梁試験体,B-O は有孔 梁で開孔部が無補強の試験体である。B-ST, B-CF,および B-ST-CF が開孔部に補強を施した 試験体であり,それぞれ,鋼管補強,CF 補強, 鋼管と CF 補強とした。試験体は梁せい 625mm 梁幅 400mm の矩形断面であるが,スラブ厚を 120mm と仮定し,開孔部の補強はこのスラブを 想定した位置より下側で行った。なお,本来は 有孔埋め込み深さ 7da(da:アンカーボルト径)の ケミカルアンカーで定着金物を固定するが,本 試験体では通しボルトを使用した。表-2 に使用 した材料の試験結果を示す。

# 3.2 加力および計測

加力方法は、上下の加力スタブが平行を維持 したまま水平力を載荷する建研式とし、表-3の 加力サイクルに従って正負交番繰り返し載荷を 行った。ただし、せん断破壊後に最大耐力の80% まで低下したサイクルを最終載荷とした。スタ ブ間の相対変位,開孔部周囲の変形等を変位計 で計測し,主な鉄筋,CFシートおよびCFプレ ートのひずみをひずみゲージにて計測した。

#### 3.3 実験結果

表-1 中に実験結果の一部,図-4 にせん断力 (Q)-相対変形角(R)関係,図-5 に最大耐力時に おける写真を示す。全ての試験体が主筋の降 伏以前にせん断破壊した。開孔を設けた試験 体は開孔部周囲の破壊が著しかった。

無開孔のB-Nは負加力時の-272kN(-1/200rad.) で材端部の1D~1.5Dの範囲がせん断破壊し た。開孔を設けたB-Oは178kN(+1/400rad.) で開孔部がせん断破壊した。それに対し,CF 補強を施したB-CFの最大耐力は282kN,鋼管 補強を施したB-STは同じく266kNであり,ど ちらも耐力の増加が見られた。鋼管とCFシー トの両者を施したB-ST-CFはさらに耐力が高 くなり,その増加分はB-Oに対するB-CFの増 加分の104kNと,同じくB-STの増加分の88kN を足した値よりも大きく,耐力上はCFシート と鋼管を組み合わせた相乗効果が確認された。 図-4中の矢印は最大耐力から1/50rad.まで の耐力低下を表している。これによるとCFシ ートで補強されたB-CFの耐力低下が155kNだ ったのに対して、鋼管補強のB-STは58kNと少 なかった。同じくB-ST-CFの低下は219kNであ り、これはB-CFとB-STの耐力低下の値を足し あわせた値に近かった。

# 3.4 開孔部の変形と鋼管の負担力

図-6 に鋼管補強を施した試験体の開孔部分 における 45°方向の圧縮ひずみと部材に作用 したせん断力の関係を示す。鋼管補強された B-STとB-ST-CF は最大耐力時の対角方向のひ ずみがそれぞれ 1.5%と 2.2%であった。

一方で、これらの試験体に使用したのと同じ材料の鋼管を、長さ 50mm に切断し、圧縮
 試験機で横方向に圧縮した。図-7 に荷重(P)
 一直径方向圧縮ひずみ(ε)関係を示す。

図-8 に鋼管を横圧縮した時に形成される降 伏線の仮定を示す。ここに示したのは鋼管の断 面であり、実際には鋼管の長さ方向に降伏線が 形成されているものとする。同図 a は水平方向 の拘束が無い場合である。円周上に4箇所の降 伏線を仮定すると、鋼管を横圧縮した時の降伏 荷重 *"Py*は降伏線理論により式(1)で表される。

ここで、 $\eta$ :形状係数、 $L_{st}(mm)$ :鋼管の長 さ、t(mm):鋼管の厚さ、 $\sigma_y(N/mm^2)$ :鋼管の 降伏強度、r(mm):厚みの中心における鋼管の 半径である。

式(1)による降伏強度と全塑性強度の計算値 を図-7中に示す。これによると、降伏荷重の 18.4kNまでは弾性であり、その後、剛性を低 下させながらも荷重は増加し、圧縮ひずみ 1.5%時では全塑性荷重に達していた。

図-6 より, B-ST および B-ST-CF の鋼管は 最大耐力時には圧縮方向のひずみが 1.5~2% 時であり,この時,鋼管の断面は全塑性強度



a.水平方向の拘束無し b.水平方向の拘束有り 図-8 鋼管断面の降伏線の仮定

に達していたと考えられる。

梁の開孔に鋼管を入れた時,鋼管は周囲のコ ンクリートで拘束される。鋼管周囲のコンクリ ートに割裂ひび割れが発生すると拘束力は開放 されるが,開孔の周囲を CF シートで補強した 場合はひび割れ発生後も拘束力を期待できる。 そこで,図-8b に示すように水平方向の変位を 拘束し,8 箇所の降伏線が形成されると仮定す ると,横拘束された鋼管の降伏強度 *stPc*は式(2) で表される。

$$_{st}P_{c} = \eta \cdot \frac{4\sqrt{2} \cdot L_{st} \cdot t^{2} \cdot \sigma_{y}}{3r}$$
(2)

## 4. せん断終局耐力の評価

### 4.1 耐力式の提案

本実験の結果より,開孔部に鋼管を挿入す ることで部材のせん断耐力が上昇することが 明らかとなった。靱性保証指針式[1]では,開 孔の大きさによってコンクリートが負担する 圧縮力を低減している。そこで,開孔部に入 れた鋼管が圧縮力の一部を負担するとし,そ の効果を計算式に採り入れることで,有孔梁 のせん断終局耐力の評価を試みる。

式(3)に CF シートと鋼管による補強効果を 採り入れた有孔梁のせん断耐力式を提案する。

$$V_{u} = \min\{V_{u1}, V_{u2}, V_{u3}\}$$
(3)  

$$V_{u1} = \mu_{op} \cdot (b_{e} \cdot j_{e} \cdot {}_{w}p \cdot {}_{w}\sigma + {}_{cf}b_{e} \cdot {}_{cf}j_{e} \cdot {}_{cf}p \cdot {}_{cf}\sigma)$$

$$+ C_{ar1} \cdot \tan\theta$$
(4)

$$V_{u2} = \frac{1}{3} (b_e \cdot j_e \cdot {}_w p \cdot {}_w \sigma + {}_{cf} b_e \cdot {}_{cf} j_e \cdot {}_{cf} p \cdot {}_{cf} \sigma + C_{ar2})$$
(5)

$$V_{u3} = C_{ar2} / 2$$
 (6)

$$\begin{split} \mu_{op} &= \min \left( 2 \ , \ \frac{2 - \left(2.2 + \alpha\right) \cdot \xi_r}{1 - 1.7 \xi_r} \right) \\ C_{ar1} &= \min \left\{ \begin{cases} {}_{st} P_c & ( \mathfrak{M} \hat{\mathbb{T}} \hat{\mathcal{E}} \mathbb{H} \vee \mathcal{S} \mathbb{H} \hat{\mathcal{G}} ) \\ \left( \nu \cdot_c \sigma_B - \frac{5 \left( {}_w p \cdot_w \sigma + {}_{cf} p \cdot_{cf} \sigma \right) }{\lambda} \right) \cdot \frac{b \cdot D}{2} \\ \end{array} \right. \\ C_{ar2} &= \min \left\{ \begin{cases} \lambda (1 - 2\xi_r) \cdot \nu \cdot_c \sigma_B \cdot b_e \cdot j_e + {}_{st} P_c \\ \lambda \cdot \nu \cdot_c \sigma_B \cdot b_e \cdot j_e \\ \end{array} \right. \\ w p &= \frac{a_w}{b_e \cdot s} \\ w p &= \frac{a_w}{b_e \cdot s} \\ v &= 0.7 - {}_c \sigma_B / 196 \\ s &= b_e / (N_s + 1) \\ \xi_r &= \frac{H}{j_e} \\ \end{cases} , \quad \alpha &= G / H \end{split}$$

ここで, $\mu_{op}$ :トラス機構のコンクリート圧 縮束の角度による係数, $b_{e, c}b_{e}$ :既存のあばら筋, および CF シートによるトラス機構に関与する 断面の有効幅(mm),  $_{vp, cp}$ :あばら筋比, CF シート補強比,  $_{v\sigma,cf\sigma}$ :あばら筋降伏強度, CF シート設計強度(=1610N/mm<sup>2</sup>),  $C_{arl}, C_{ar2}$ :鋼管を 考慮したコンクリートの有効圧縮強度(N),



 $s_{I}P_{c}$ :鋼管の横圧縮耐力であり式(2)による(N),  $\theta$ : アーチ圧縮束が材軸となす角度(rad.),  $j_{e}$ ,  $c_{Je}$ :あばら筋,および CF シートによるトラス機 構の有効せい(mm),  $\lambda$ :トラス機構の有効係数,  $\nu$ :コンクリート圧縮強度の有効係数,  $c\sigma_{B}$ : コンクリート圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>), b:梁幅(mm), H:開孔径(mm), G: 孔の両脇の CF シートの内 法間隔(mm),  $a_{W}$ : あばら筋一組の断面積(mm<sup>2</sup>), s:既存あばら筋の間隔(mm),  $N_{s}$ :中子筋の本数, L:梁の内法スパン(mm),  $c_{M}$ : CF シートの層数,  $c_{f}$ : CF シートの厚さ(mm),  $c_{W}$ : CF シート1枚 の幅(mm)である。

図-9 に梁寸法の取り方を示す。靱性保証指 針式では *G*=1.2*H* と仮定した計算式を示して いる。ここでは, CF シート間の内法間隔を *G* とし, *G*/*H*>1.2 の場合は μ op を低減した。

コンクリートは塑性変形によってその有効 圧縮強度を低減させるが、横圧縮された鋼管 は降伏することによって、その荷重を維持す ることが可能である。ただし、そのためには 鋼管が横拘束されている必要がある。特に開 孔が梁せい方向に偏芯している場合や開孔周 囲の鉄筋量が少ない場合は、CF シート等によ って鋼管の周囲のコンクリートごと拘束され ている必要がある。

#### 4.2 提案式の妥当性

図-10 に本研究で実施した試験体の実験値 と計算値の比較を示す。式(3)による計算値は, 有開孔無補強の B-O を始めとして,鋼管補強, CF 補強,およびその両者の補強を施した試験 体のせん断終局耐力を精度良く評価していた。

無開孔梁の B-N は計算値よりも小さい耐力 で破壊した。文献[3]によればせん断終局耐力 におよぼすスケール効果の原因の一つとして, 部材寸法と骨材径の比の関係があるとしてお り,特にアーチ機構の負担せん断力に影響を 与えるとしている。

図-11 に各試験体のせん断終局耐力計算値 における負担分の内訳を示す。本実験ではせ ん断性状の把握を主たる目的としたため,主 筋比と比較してあばら筋量が極端に少ない。 このため B-N は計算上,コンクリートが負担 するアーチ機構の負担分が大きい。一方で, 有孔梁はコンクリートが負担するアーチ機構 の負担が無く,さらに鋼管の横圧縮強度には 縮尺の影響が無い。つまり,無開孔無補強の B-N は最もスケール効果が表れやすく,実験 値が計算値を下回った原因の一つである可能 性がある。しかし,それを考慮しても計算値と 実験値が大きく乖離しており,無開孔梁の実 験耐力が低くなった理由は明確ではない。

本実験による試験体はいずれも式(4)から算 出される Vu1 で耐力が決定している。比較的 せん断補強筋量が多い場合は Vu2 または Vu3 で耐力が決定されることがあるが,その場合 の鋼管の効果については今後の課題である。

# 5. まとめ

- 1)既存梁へのあと抜き開孔部の補強方法とし て連続繊維シートと鋼管を使用した工法を 提案した。
- 2)開孔部に鋼管を挿入することによって、開 孔部のせん断耐力を高くすることが可能で あった。さらに連続繊維シートと組み合わ せることで、その効果を高めることが可能 であった。
- 3)連続繊維シートと鋼管による補強効果を組み込んだせん断終局耐力式を提案し、限られた試験体の中ではあるが、有孔梁のせん断終局耐力を 精度良く評価できた。

## 参考文献

[1]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・同解説,1999.8 [2]中村洋行・福山洋・藤本効・浅野芳伸・高橋茂 治・加藤貴久・鈴木英之・上田正生:鋼管と炭 素繊維シートによる既存梁開孔部の補強~プ リズム形試験体による圧縮実験~,日本建築学

会大会講演梗概集 C-2, pp.567-568, 2006.9

[3]田村真利・白井伸明・森泉和人・安達洋・青山 博之:超大型寸法を考慮した RC 梁のせん断強 度の寸法効果(その1~2),日本建築学会大会 講演梗概集 C-2, pp.283-286, 1997.9

## 謝辞

本研究はリダブル工法研究会(建築研究所, ベターリビング,奥村組,安藤建設,コンステ ック,川ロテクノソリューション,三菱化学産 資)における活動成果の一部をまとめたもので ある。研究会各位に謝意を表する。