床スラブとの合成効果に期待した鉄骨梁横補剛工法

ーシアコネクタの性状と FEM 解析ー

Improvement of a Lateral Bracing Method for H-shaped Steel Beams Using Bracing Effects of Reinforced Concrete Slab -Properties of the Shear Connectors and Finite Element Methods -

五十嵐治人*1 相羽均修*2 土方勝一郎*3

概 要

鉄骨梁の横座屈を防止するために、シアコネクタで合成された床スラブを横補剛材とし て積極的に評価する鉄骨梁横補剛工法「YZ 補剛工法」を 2019 年に開発し、この程、シアコ ネクタの配置制限の緩和、床スラブの開口制限の緩和を可能とするなど 4 点の工法の改良 を行った。これに関するフレーム構造実験の結果は、詳細を既報¹⁾にて報告している。

YZ 補剛工法は、シアコネクタの性能(せん断剛性、せん断耐力、回転剛性、曲げ耐力)の評 価が重要である。本報は、既報で報告しなかった要素実験によるシアコネクタの性能の評価、 および妥当性を確認した性能の評価方法に基づいて検討を行った有限要素法(以下、FEM)解 析結果について報告する。この結果、既往のシアコネクタの性能の計算式は概ね妥当であり、 かつ安全側に評価できることが分かった。また、各要素の性能を既往の算定式に基づいて行 った FEM 解析は、実験結果を適切、かつ安全側に評価できることが分かった。

kev words:鉄骨梁、横座屈、床スラブ、フレーム実験、シアコネクタ、FEM 解析

1. はじめに

鉄骨梁の横座屈を防止する手段として、現在は横補剛 材の設置が行われている。これに代えて、梁とシアコネク タで一体化された床スラブの効果を積極的に評価するこ とで、横補剛材を省略する「YZ 補剛工法」(以下、本工法) を 2019 年に開発し、2023 年の改良によって適用範囲を拡 大した。この時に実施したフレーム構造実験結果の詳細 は既報¹⁾に示している。 錢高組における本工法の適用実績 (施工中も含む)を表-1に示す。

クタのせん断剛性、せん断耐力、回転剛性、および曲げ耐 力の評価が重要である。これについて、フレーム構造実験 骨のウェブ上に1列配置でピッチは105mmとした。 に先立ち、これらを確認する押し抜きせん断実験、曲げ実 験を行った。本報はこの結果、およびこれにより適用性が 確認された算定式を用いて実施した FEM 解析による実験 結果の再現について報告する。

2. 押し抜きせん断実験

シアコネクタのせん断剛性、およびせん断耐力を確認 するため、押し抜きせん断実験を実施した。試験体概要を 図-1に示す。上面、正面、側面、計3方向からの姿図、 およびシアコネクタのコーン破壊面の拡大図を各々示す。

*1 Haruhito IGARASHI	技術本	部技征	将研究所
*2 Masanobu AIBA	技術本	部技征	将研究所
*3 Katsuichirou HIJIKATA	顧問	博士	(工学)

縮尺は 5/9 を想定し、シアコネクタは実大でφ19 を使用 するとして、試験体は φ10 を使用した。長さは径の5倍 の 50mm とした。これは、本工法における最低の長さであ る。加力は、1000kN 万能試験機を用いて、梁を想定した 鋼材頂部に材軸方向に荷重を与えた。想定する破壊モー ドは、シアコネクタの端抜破壊である。これは、梁に横座 屈が生じて材軸直交方向に変形しようとした際、シアコ ネクタが変形する方向の端あきが小さいため、被りコン クリートが半円のコーン状に破壊するものである。した 本工法は、床スラブとの合成効果を発揮するシアコネがって、実際のシアコネクタの変形は梁材軸直交方向で ある。シアコネクタの配列はフレーム実験と同様で、梁鉄

表-1 工法の適用実績

No.	用途	階数	延床面積	No.	用途	階数	延床面積
1	店舗	4	36, 623	9	倉庫	5	18, 422
2	事務所	10	10, 171	10	倉庫	4	37, 473
3	倉庫	4	14, 530	11	倉庫	4	126, 507
4	倉庫	2	26, 555	12	倉庫	4	59, 840
5	倉庫	3	23, 683	13	倉庫	4	156, 323
6	倉庫	4	9, 597	14	倉庫	4	38, 587
7	倉庫	5	18, 237	15	店舗	2	64, 913
8	倉庫	2	43, 962				

主席研究員 研究員



図-1 押し抜きせん断実験試験体概要







表-3 試験体一覧

表-2 材料定数

 $\sigma_{\scriptscriptstyle B}$

 E_c

 σ_v

Es

 σ_y

 E_s

20. 8 (N/mm²)

25.0 (kN/mm^2)

395. 7 (N/mm²)

188. $3 (kN/mm^2)$

408. 1 (N/mm²)

198. 4 (kN/mm^2)

補強筋

無し

コンク

リート

D6

Φ10

試験体名

P1



図-3 解析時シアコネクタ の *q*-δ算定方法

これにより、隣り合うシアコネクタのコーン破壊面は 重複する。重複しない場合のコーンの水平投影面積は 4926mm²、重複した場合は4880mm²であるため、重複により 水平投影面積は約1%減少することとなる。

材料定数を表-2に示す。コンクリート強度は、建物の 床を想定して最低、かつ最も安全側と考えられる 21N/mm² とした。スラブ筋は実大で D10~D13 を使用するため D6、 材質は SD295 とした。試験体一覧を表-3に示す。試験体 数は 2 体で、パラメータは端抜破壊面近傍の補強筋の有 無とした。試験体は、CT鋼を用いて 1/2 ずつ作製し、こ れらを接合することでH形鋼を形成する様にした。コン クリートの打設方向は、実際の構造物の床と同様に、シア コネクタの頭部側からとした。 また、加力したせん断力を全てシアコネクタの軸部に 負担させるため、コンクリートとCT鋼の間にテフロン シートを敷き、付着による応力伝達が起きない様にした。 加力サイクルを図-2 に示す。テフロンシートに加えて、 コンクリートと鋼材の付着を完全に切るため、10kN まで の載荷を3回実施した後、押切加力とした。解析に使用し た端抜耐力q_{a3}²⁾を式(1)に、文献³⁾によるシアコネクタの せん断力q-ずれ変形δ関係の算出方法を図-3 に各々示す。 q_{a3}の計算値を図-2中に示す。なお、FEM 解析においては、 最大耐力q_{a3}経験後は、解析が不安定とならない程度の負 勾配と仮定した。これらにより得られた解析仮定と、実験 結果の荷重Q-ずれ変形δ関係を比較した結果を図-4に示 す。実験結果は、最初の 10kN までの 3 サイクルの載荷結 果を除いて示す。これらによると、以下のことが言える。

・初期せん断剛性について、実験結果は解析仮定の 2~3 倍と高い値を示した。

・最大耐力について、実験結果は式(1)による端抜耐力の 約1.2倍と、良い対応を示した。

 ・端抜破壊面近傍の補強筋による、せん断剛性、端抜破壊 耐力の向上の効果は見られなかった。

以上より安全側の検討を行うために、FEM 解析に使用するシアコネクタの端抜耐力は式(1)による値、 $Q - \delta$ 関係は $\mathbf{2} - \mathbf{3}$ に示す仮定に従うこととする。

3. 曲げ実験

ウェブ直上に1列配置とした場合のシアコネクタの回 転剛性、および曲げ耐力を確認するため、曲げ実験を実施 した。試験体概要を図-5に示す。上面、正面、側面、計 3方向から見た姿図を示す。縮尺は、押し抜き実験と同様 に5/9を想定した。加力は、H形鋼のフランジ部分を直接 載荷とした。シアコネクタが取り付く位置には t=9mm の リブプレートで補強し、シアコネクタが取り付いた部分 の上フランジの局所的な応力集中を防いだ。材料定数は 表-2と同等である。解析時に使用した回転剛性算定式を 式(2)に示す。これは文献⁴⁾に示されているシアコネクタ が 1 列配置の場合の算定式を、スラブ剛性を無限大とし て変換したものである。FEM 解析において最大曲げモーメ ントM_{sc}を経験した後は、解析が不安定にならない程度の 負勾配と仮定した。加力サイクルを図-6に示す。



	$L_a = 15$		
3			2
1.500.4	加力		
100000		•	
		SWA BURNE	ĉ



$\pi \cdot {}_{sc}D^2 \cdot E \cdot B^2 \cdot t_f^3$		
$\kappa_{\beta} = \frac{16\ell_e \cdot \ell_p \cdot t_f^3 + 2B^3 \cdot \pi \cdot {}_{sc}D^2}{16\ell_e \cdot \ell_p \cdot t_f^3 + 2B^3 \cdot \pi \cdot {}_{sc}D^2}$	(2)	
$p_{sc} = \frac{2p_c \cdot L_a}{L_b} \dots \dots$	(3)	
$p_{sy} = \frac{2p_y \cdot L_a}{L_b} \dots \dots$	(4)	
$A_c = \pi \cdot l_e(l_e + D) = \pi \cdot 43(43 + 19)$) = 8	
$p_c = \Phi \cdot {}_c \sigma_t \cdot A_c = 7894(N)$	$p_y =$	
$M_{sc} = 2p_c \cdot L_a = 1184(\text{kN} \cdot \text{mm})$	M_{sy}	
図-5 曲げ実験試験体概要		

各々のサイクルのピーク荷重は、シアコネクタにコーン 破壊耐力 p_c^{50} 、軸部引張耐力 p_y が作用すると想定した際の 載荷荷重 p_{sc} 、 p_{sy} 、およびその 1/2 の荷重を採用した。

これらの荷重の算定式を各々式(3)、(4)に示す。各々の サイクルは3回ずつ繰り返した。これは、同一回転角を経 験することによる回転剛性の低下を確認するためである。

図-7 に実験結果、および式(2)による回転剛性、コーン破壊耐力、軸部破壊耐力の計算値を比較した結果を示す。

図中、縦軸は曲げモーメントで p_{sc} 、 $0.5p_{sy}$ に対応する曲 げモーメントとして、各々 M_{sc} 、 $0.5M_{sy}$ の位置を示す。こ れらの算定式、値は**図**-5 中に示す。結果的に、 p_{sy} に相当 するサイクルまでは載荷できなかった。これによると、以 下のことが言える。





記号 $p_c: シアコネクタのコーン破壊耐力$ p,:シアコネクタの軸部破壊耐力 A_c:シアコネクタのコーン面積 B:フランジ幅(=150mm) E:鋼材ヤング率(= 205 kN/mm²) *t_f*:フランジ厚(= 9mm) D:シアコネクタ頭部径(=19mm) ℓ_n :シアコネクタピッチ(= 105mm) ℓ:シアコネクタの有効長さ (= 43 mm)La:シアコネクター フランジ端間距離(= 75mm) σν:シアコネクタの 引張強度(= 408.1 N/mm²) Lb:シアコネクター 加力点間距離(= 295.5mm) 371(mm²) $\frac{\pi \cdot {}_{sc}D^2 \cdot \sigma_y}{\cdot} = \frac{\pi \cdot 10^2 \cdot 408.1}{\cdot}$

 $p_y = \frac{n + s_c b}{4} = \frac{n + 10}{4} = 32054(\text{N})$ $M_{sy} = 2p_y \cdot L_a = 4808(\text{kN} \cdot \text{mm})$



- ・最終的な破壊形式は、想定通りのコーン破壊であった が、実験結果最大曲げモーメントMmaxに相当するせ ん断力は、式(3)を基に得られた計算値の約2.1倍で あった。また、式(4)を基に得られた軸部引張耐力の 約0.51倍であった。
- *M_{sc}*時、0.5*M_{sy}*時のサイクルとも、荷重の繰り返しによる剛性低下は見られなかった。
- ・実験結果の初期回転剛性は、式(2)の値に対して約2.8
 倍であった。またM_{sc}時、0.5M_{sy}時とも同様の剛性であった。
- ・シアコネクタ耐力は、既往の計算値によって安全側に 評価できた。回転剛性は、既往の計算値によれば実際 よりも低く評価することとなり、実際よりも横座屈 しやすい状態として解析することとなる。

4. 有限要素法法解析

4.1 解析モデル概要

FEM 解析を用いて、正負漸増交番繰り返し載荷実験結果 解析モデルを図-8 に示す。解析コードは Midas-FEANX⁷の再現を試みた。解析は一方単調漸増載荷で、材料非線形、を使用した。各部材は実状に合わせて以下の要領でモデ 幾何学的非線形解析とした。実験の詳細は既報¹⁾に示す。 ル化した。



表一4 材料定数						
コンク	$\sigma_{\scriptscriptstyle B}$	21. 1 (N/mm²)	<u> ተ 10</u>	σ_y	$439(N/mm^2)$	
リート	E _c	24.7 (kN/mm^{2})	ΨIŪ	Ec	$201 (kN/mm^2)$	
DA	σ_y	$336 (N/mm^2)$	DC	σ_y	$350(N/mm^2)$	
D4	Es	$169 (kN/mm^2)$	D0	Es	$175 (kN/mm^2)$	
t9	σ_y	$352 (N/mm^2)$	t9	σ_y	$378 (N/mm^2)$	
1	Es	$208 (kN/mm^2)$	2	Es	$205 (kN/mm^2)$	
t12	σ_y	$339(N/mm^2)$	t16	σ_y	$348 (N/mm^2)$	
	Es	$208 (kN/mm^2)$		Es	211 (kN/mm²)	

t9①:F22、F23、F24 に使用 t9②:F21 に使用

材料試験結果を表-4に、試験体一覧を表-5に示す。表 中の「開口」は図-9にて後述する。鉄骨、鉄筋、コンクリ ート、シアコネクタの材料定数は、全て表-4に従った。 解析モデルを図-8に示す。解析コードは Midas-FEANX⁷¹ を使用した。各部材は実状に合わせて以下の要領でモデ ル化した。 鋼材:シェル要素で、梁のみ非線形、他は線形、梁の非 線形特性は文献⁸⁾と同様とした。

シアコネクタ:前述の仮定による曲げばね、せん断ばね 床スラブ:鉄筋の性能を含んだ複層シェル要素

また、床スラブと柱の接触部分は接触要素を設けた。当 接する場合はほぼ剛性無限大、離れる場合はほぼ剛性0と なる様、定義した。床スラブの開口は実状に即してモデル 化した。開口位置を図-9に示す。開口の仕様の詳細は文 献¹⁾に示している。スラブ厚は2種類あるが、何れも厚さ 方向の中心となる位置に要素を定義した。

大梁フランジの初期不整の形状を図-10 に示す。上下 フランジがともに逆となる位相とし、最大の初期不整値

表-5 試験体一覧

	~ ~ ~	Meanson LT.	20				
名称	形状	λ,	$r_{\rm f}/r_{\rm w}$	ts	開口		
F21	BH-496×138×9×9	1.41	FB/FC		なし		
F22	BH-484×184×9×12	0.99	FB/FB	44			
F23	BH-516×170×9× 9	1.17	FC/FC	(86)	A		
F24	BH-484×184×9×12	0.99	FB/FB	100	B		
備考	λ _b :横座屈細長比、規準となる横座屈モーメント M。は S 規準式 ⁶⁾ による						
	r _f (r _w):フランジ(ウェブ)の幅厚比ランク						
	ts:スラブ厚(mm) 開口阁、 ⑧は図ー9 による						
	スラブ筋:ts=44 は D4@80、ts=100 は D6@120						
	F21、F22、F23 の梁上のスラブ厚は 86mm						



(F21、F22、F23、F24) 図-12 実験結果と解析結果の比較

は内法スパンの 1/1000、逆対称曲げであることを考慮して、スパン中央で0となるように与えた。

コンクリートの非線形材料モデルを図-11 に示す。鋼 材の復元力特性はバイリニアモデルとした。シアコネク タの端抜耐力、せん断剛性、回転剛性は前述した算定式に よる値とした。材軸方向のせん断耐力q_sは式(5)によって 算出した。コンクリートヤング率E_c、コンクリート強度σ_B は何れも材料試験結果の値を用いた。

 $q_s = \frac{\pi \cdot {}_{sc} D^2}{8} \sqrt{\sigma_B \cdot E_c} \quad \cdots \cdots (5)$

梁上のシアコネクタは、加力方向が式(5)による耐力、 加力直交方向は式(1)による端抜耐力とし、直交梁上のシ アコネクタはこの逆とした。せん断剛性は、加力方向、端 抜け方向とも同一とした。

また、端抜破壊はスラブが無い側にせん断変形した場 合のみ考慮し、スラブがある側に変形した場合は式(5)に よる耐力とした。

4.2 解析結果と実験結果の比較

図-12に、試験体4体の曲げモーメントM-回転角 θ 関係について解析結果と実験結果を比較したものを示す。M、 θ は左右の梁端の平均値とした。図中、横軸は梁の降伏曲 げモーメント M_y 、全塑性曲げモーメント M_p の計算値を示 す。縦軸は M_p 時回転角 θ_p の計算値、および、降伏後に耐力 M_y を保持する必要のある回転角として、表-5 において 幅厚比ランク FC である F21、F23 は $3\theta_p$ 、FB である F22、 F24 は $5\theta_p$ の位置を各々示す。これらによると以下のこと が言える。

- ・試験体4体とも、初期剛性に関しては実験結果と解析 結果は良い対応を示した。床の開口の影響は、実験結果 では殆どなかったが、解析結果でも同様であった。また、 開口の近傍よりスラブの破壊が進行する傾向も見られ なかった。
- ・最大耐力は、解析結果は実験結果に対して 10%程度低い傾向を示した。これは、直交梁上のシアコネクタは実験、解析とも端抜破壊を生じているが、解析では端抜耐力を実状よりも低く評価していること、実験では梁の上端フランジとスラブとの間に摩擦が生じて応力伝達していることが推測されるが、解析ではこの点を考慮していないことが原因として考えられる。
- ・F21、F23 は FC 部材であるが FB 部材に要求される $3\theta_p$ まで、F22、F24 は FB 部材であるが FA 部材に要求される $5\theta_p$ まで、降伏耐力 M_y を保持することが実験で確認した が、この傾向は解析によっても再現することが出来た。 したがって、今回のフレーム実験結果は信頼できるも のと考えられる。

5. まとめ

1 列配置とした場合のシアコネクタのせん断剛性、せ ん断耐力、回転剛性、曲げ耐力を確認する実験結果につ いて、既往の算定式との比較検討を行った。この結果、 既往の算定式による値は、全て実験結果に対して安全、 かつ良い対応を示すことが分かった。続いて、この結果 を用いて合成梁の正負交番繰返し漸増載荷実験に対す る、実験結果と有限要素法による解析結果の比較検討を 行った。この結果、試験体4体とも、解析結果は実験結 果を概ね妥当、かつ安全側に評価できることが分かっ た。

【謝辞】

この開発は、矢作建設工業(株)と共同で実施したもの です。開発を進めるにあたり、貴重なご助言、ご協力を頂 いた各位に深甚なる謝意を表します。

【参考文献】

- 1)相羽他:床スラブとの合成効果を考慮した鉄骨梁横補 剛工法 -YZ 補剛工法の改良-、錢高組技報 No. 48-02、pp. 9~14、2023
- 2)各種合成構造設計指針・同解説2010、pp. 47~48 4.5.2 式(26)
- 3)赤尾他「頭付きスタッドの押抜き挙動に及ぼすコンク リートの打込み方向の影響」日本鋼構造協会テクニカ ルレポートNo. 35、pp. 25~34、1996.11
- 4)鋼構造物の座屈に関する諸問題2013、pp.86~87、5 章 付録5.1、5.2、2013
- 5)各種合成構造設計指針・同解説2010、p.236 (1)式、(2) 式
- 6)鋼構造設計規準-許容応力度設計法-2005、p.11(5.16)式
- 7)Midas社:FEA-NX 2023 R1(v350)
- 8) 五十嵐他:床スラブとの合成効果を考慮した鉄骨梁横 補剛工法、錢高組技報 No. 44-02、pp. 15~20、2019