

## (62) 撃込み鉋を用いたシアコネクタの 押抜き試験及び解析

李 晩在<sup>1</sup>・小林 剛<sup>2</sup>・田川 泰久<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 宮城工業高等専門学校 准教授 建築学科 (〒981-1239 宮城県名取市塩手字野田山48)  
E-mail: mjlee@miyagi-ct.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 日本ヒルティ(株) エンジニアリング本部 (〒224-8550 横浜市都筑区茅ヶ崎南2丁目6-20)  
E-mail: Go.Kobayashi@hilti.com

<sup>3</sup>正会員 横浜国立大学大学院 教授 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)  
E-mail: ytagawa@ynu.ac.jp

撃込み鉋で接合したL型シアコネクタの押抜き試験を行い、既往の頭付きスタッドの押抜き試験と比較することで、シアコネクタを撃込み鉋で接合する工法の適用性を検討した。試験結果、最大せん断耐力は等厚スラブ・デッキ付スラブのいずれの場合も撃込み鉋で決まり、撃込み鉋の破壊モードがせん断破壊か引抜けかで最大せん断耐力は20%程度違いが生じた。今回のようにシアコネクタの根元部分で耐力が決定する場合、デッキ付タイプによる低減は考慮しなくても良いと判断される。頭付きスタッドのせん断強度式との比較では、同じ高さのφ16mm頭付きスタッドは撃込み鉋型シアコネクタ2個で同程度以上の最大せん断耐力が期待でき、デッキ付スラブのφ19mm頭付きスタッドも撃込み鉋型シアコネクタ2個で同程度以上の最大せん断耐力が期待できる。

**Key Words :** *push-out test, composite beam, powder actuated nails, shear connector*

### 1. はじめに

合成梁において、シアコネクタは鉄骨梁とコンクリートスラブを一体化させる役割を持っている。鉄骨造小梁において、鉄骨梁とコンクリートスラブを一体化することにより得られる合成梁の利点は、以下のことが挙げられる。剛性や強度の向上、上フランジの局部座屈や横座屈などの不安定現象を拘束する効果がある。

現在、合成梁のシアコネクタとしては頭付きスタッドが日本国内で広く普及されている。しかし、頭付きスタッドは溶接によって接合されるため、溶接における接合欠陥が生じる可能性がある。そのため、溶接工の技術、施工時の精度に依存しなければならないという制約がある。その他にも、溶接を行うための電源の確保が必要であり、溶接箇所が多い場合に時間を要す。火花による火災や濡れた場所では感電の恐れがある等の欠点も挙げられる。

一方、溶接を利用しない別の方法が提案されている。それは図-1のL型のシアコネクタを専用の鉋撃ち機を用いて鉄骨梁に鉋留めする方法である。この方法の場合、電源が不要で、鉋撃ち機は片手での持

ち運びができるサイズである。また、溶接とは異なり、高い技量を必要とされず、複数箇所での同時作業も可能となる。また、感電や火災の恐れもない。しかし、鉋撃時の大きな音等の問題と我国の銃刀法の規制もあり、デッキプレートと鉄骨梁の接合を除き、日本の鉄骨構造建築においてほとんど利用されていない現状である。一方、ヨーロッパを中心として撃込み鉋の種々の活用が模索されており、今後、日本国内でも幅広い適用に対する期待度は高い。

本研究グループは、合成梁構造の下で撃込み鉋によって鉋留めされたシアコネクタがどのような力学的な性状を示すのか、ここ数年間で実験的な研究を通して検証している。

本研究では、撃込み鉋で鉋留めしたL型のシアコネクタを用いて押抜き試験を行い、その結果から得られた力学的特性を、頭付きスタッド溶接のせん断耐力などの推定式と比較検討することで、撃込み鉋でシアコネクタを鉋留めする方法の適用性を力学的に調べることを目的とする。また、押抜き試験を対称に有限要素法による弾塑性解析を行い、実験では解明できなかった撃込み鉋およびシアコネクタのせん断挙動を解析的に検討することを目的とする。

## 2. 押抜き試験

### (1) 試験計画

押抜き試験で用いた試験体のパラメーター一覧を表-1に示す。試験体のパラメータはシアコネクタの高さ、取付け向き、デッキプレートの有無とした。同パラメータを各3体ずつ設け、合計12体で押抜き試験を行った。押抜き試験体は(社)日本鋼構造協会の「頭付きスタッドの押抜き試験方法(案)」<sup>1)</sup>に準拠して製作した。試験体に用いたコンクリートのシリンダー圧縮試験結果と、シアコネクタや撃込み鉋の素材ミルシート値を表-1に示す。押抜き試験体は図-2に示すように等厚スラブとデッキ付スラブの2種類のスラブを用いた。等厚スラブのコンクリートブロック長さは文献<sup>1)</sup>に基づいて400mmとし、デッキ付スラブはデッキプレートの谷部が試験体の真中になるようにコンクリートブロックの長さを650mmとした。試験体は片側に2個のシアコネクタを4本の撃込み鉋で接合した。デッキプレートは撃込み鉋接合シアコネクタによってH形鋼に留め付けてある。

撃込み鉋で接合されるL型のシアコネクタは、円形で等方性の頭付きスタッドと異なり、載荷方向によって力学的特性に違いが生じると考えられる。そこで、等厚スラブでは取付け向きの違いによる力学的特性を調べることにした。また、デッキ付スラブの場合、デッキプレート谷部の突起によりシアコネクタの取付け向きは一方向(試験体の場合、横向き)に限られてしまう。

等厚スラブに設けたシアコネクタは写真-1に示すように「縦向き」と「横向き」を実際の使用形式を参考にして取付けた。さらに、80mmと95mmの2種類の高さのシアコネクタを用い、高さの違いによるシアコネクタの強度、ずれ剛性を調べた。

### (2) 試験方法

押抜き試験は2,000kNラムスラー型万能試験機を用いて単調圧縮載荷試験を行った。1体目の等厚スラブの載荷時にコンクリートブロックがH形鋼から開いたため、2体目と3体目の等厚スラブ試験体は上下2段の開止めを、デッキ付スラブ試験体ではデッキプレートの谷部を含めて3段の開止めを設置した。開止めはSTKR400の60mm×60mm×3.2mmの角形鋼管2本とφ12mmの全ねじボルトでコンクリートブロックを挟んで開かないように固定した。試験体のセットアップ状況を図-3に示す。

荷重測定は万能試験機以外に、2枚のコンクリートブロックの下に設置した2個のロードセルでも行った。2個のロードセルの値に違いがほとんど無いため、実験結果は万能試験機の値を用いた。せん断方向の相対ずれ測定のために取り付けた変位計の設置位置を図-4に示す。

相対ずれは、シアコネクタが鉋留めされている箇所の水平位置に4個の変位計をコンクリートブロック側面に取り付けて行った。

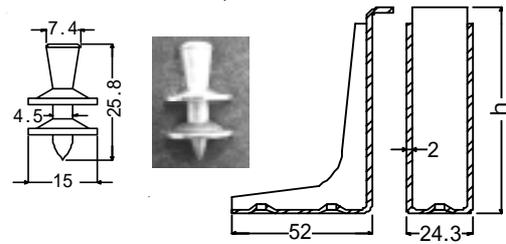


図-1 撃込み鉋とL型シアコネクタ

表-1 材料特性

(N/mm <sup>2</sup> )	コンクリート	(N/mm <sup>2</sup> )	シアコネクタ	撃込み鉋
圧縮強度	23.7	引張強度	高さ80mm 325	744
ヤング係数	22.6 × 10 <sup>3</sup>		高さ95mm 317	

表-2 パラメーター一覧

試験体	シアコネクタ	設置向き	デッキプレート
試験体1	80mm	横	無
試験体2	80mm	縦	無
試験体3	95mm	縦	無
試験体4	80mm	横	有

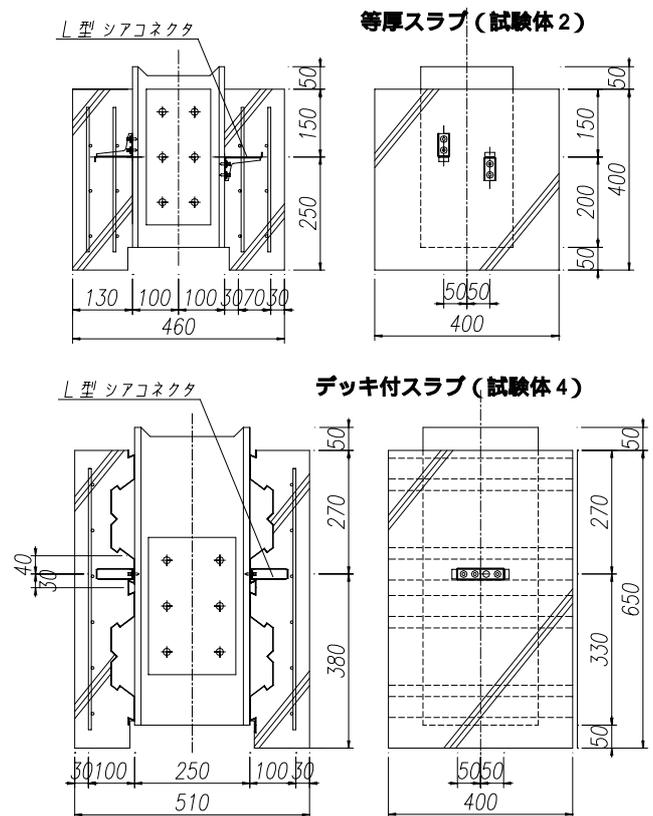


図-2 押抜き試験体

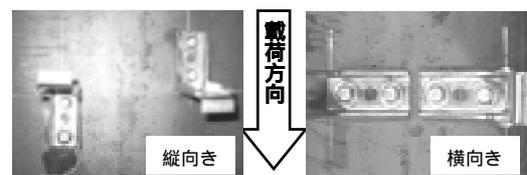


写真-1 シアコネクタの取付け向き

等厚スラブの測定位置は厚さ130mmコンクリートブロックの真中65mm位置で、デッキ付スラブの測定位置は厚さ80mmコンクリートブロックの真中40mm位置で行った。

### (3) 試験結果

#### a) せん断耐力 - 相対ずれ量関係

各試験体の押抜試験結果を表-3に示す。弾性ずれ剛性は最大せん断耐力の1/3の割線剛性とした。降伏せん断耐力は文献<sup>2)</sup>より、初期剛性に相当する直線とその直線以降その曲率が最大となる点における接線との交点に相当する耐力とし、頭付きスタッドと比較するものとした。

図-5に各パラメータのシアコネクタ1本当りのせん断耐力-相対ずれ量関係を示す。全ての試験体で荷重開始から一定の剛性を維持しながらせん断耐力は上昇した。降伏せん断耐力に達した後に剛性は徐々に低下しており、デッキ付スラブは等厚スラブよりやや大きい降伏後の剛性を示した。

等厚スラブの場合、開止めを施したAとB試験体は最大せん断耐力に達するまで10mm以上の大きな相対ずれ量を示したが、開止めを施していないC試験体は3mm程度の相対ずれ量で最大せん断耐力に達した。等厚スラブの破壊モードは全て撃込み鉋のせん断方向の引抜けであり、最大せん断耐力に達した後に耐力は徐々に低下した。

デッキ付スラブの場合、等厚スラブに比べて降伏後の剛性は大きく、最大せん断耐力も大きい値を示した。しかし、最大せん断耐力時の相対ずれ量は等厚スラブより小さい値を示した。デッキ付スラブの破壊モードに「撃込み鉋の引抜け」以外に「せん断破断」が同時に発生していることに起因すると考えられる。デッキ付スラブの場合、撃込み鉋が全てせん断破断した試験体は耐力が一気に低下したが、せん断破断と引抜けが共に発生した試験体は耐力が段階的に低下した。

#### b) 破壊モード

等厚スラブの破壊モードは3種類とも「撃込み鉋の引抜け」であった。写真-2に各試験体の破壊モードを示す。

横向きに取付けた試験体1では、シアコネクタの立上り部分はせん断方向に傾いており、底面は塑性変形を伴った。縦向きに取付けた試験体2と3では、シアコネクタの底面は鉋留めした部分が端抜けしように塑性変形しているが、立上り部分はほとんど傷んでない。デッキ付スラブ試験体4では、全ての撃込み鉋がせん断破断した場合と、撃込み鉋のせん断破断と引抜けの両方が発生した場合がある。デッキ付スラブ試験体4は降伏せん断耐力に達した時点で、デッキプレート真中の谷部のコンクリートでひび割れが発生した。

等厚スラブにおいて、開止めを用いなかったC試験体は、剛性が低下し始めるとともにコンクリートブロックの開きが顕著に現れた。

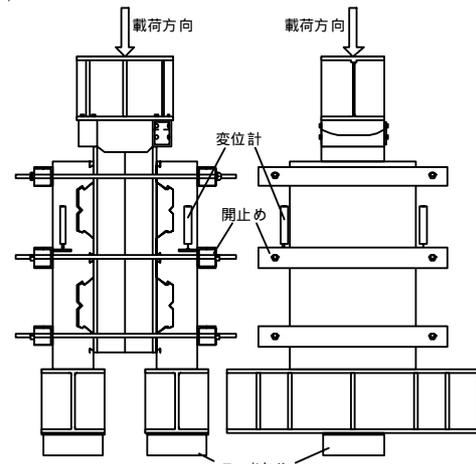


図-3 試験体セットアップ

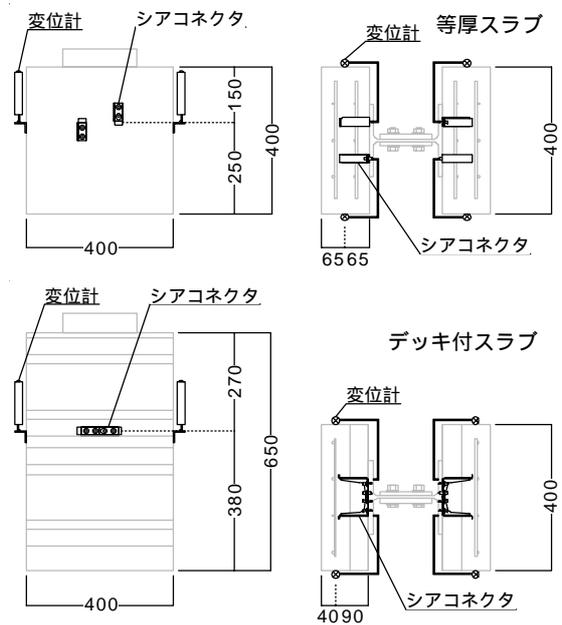


図-4 変位計の設置位置

表-3 試験結果

試験体	$Q_{max}$ (kN/本)	$\max$ (mm)	$Q_y$ (kN/本)	$y$ (mm)	$K_0$ (kN/mm/本)
1 - A	50.82	12.29	27.22	0.669	78.07
1 - B	48.24	14.22	25.52	0.731	60.84
1 - C	32.17	3.53	22.15	0.640	79.26
2 - A	43.90	12.83	24.18	0.577	75.04
2 - B	44.13	11.50	22.49	0.392	90.80
2 - C	32.26	3.07	18.51	0.410	77.92
3 - A	43.18	10.72	24.46	0.536	80.98
3 - B	42.90	10.13	24.61	0.591	89.38
3 - C	33.34	3.77	21.44	0.543	70.79
4 - A	60.68	6.14	32.96	0.421	135.30
4 - B	57.82	7.37	32.10	0.573	136.69
4 - C	59.54	7.74	30.17	0.408	118.49

$Q_{max}$ : 最大せん断耐力 (kN/本)

$\max$ : 最大せん断耐力時のずれ量 (mm)

$Q_y$ : 降伏せん断耐力 (文献<sup>2)</sup>より) (kN/本)

$y$ : 降伏せん断耐力時のずれ量 (mm)

$K_0$ : 弾性ずれ剛性 (文献<sup>1)</sup>より) (kN/mm/本)

開止めを用いたAとB試験体は、コンクリートブロックの開きが顕著に見られるようになったのは、最大せん断耐力に達した後である。

(4) 考察

a) パラメータの影響

シアコネクタの取付け向きの違いによって弾性ずれ剛性に大きな違いは見られなかった。一方、シアコネクタを横向きに取付けた試験体の最大せん断耐力は、縦向きに取付けた試験体より1割以上の大きい値を示した。縦向きに取付けたシアコネクタは図-6のように「梘子の原理」によって撃込み鉋が抜けやすくなるため、最大せん断耐力は低下したと考えられる。

シアコネクタの長さの違いによって弾性ずれ剛性・最大せん断耐力はほとんど違いが見られなかった。一方、最大せん断耐力時の相対ずれ量は長いシアコネクタで1割以上小さい結果が得られた。シアコネクタの破壊モードは撃込み鉋で決まるため、縦向きに取り付けたシアコネクタは降伏後の大変形領域では、シアコネクタの長さの影響を受け、長いシアコネクタの方が短いシアコネクタより抜けやすくなったと考えられる。

開止めの無い試験体の剛性は開止めを有す試験体より早期に低下しており、開止めの無い試験体の最大せん断耐力は開止めを有する試験体より2割以上小さい値を示した。

デッキ付スラブの初期剛性は等厚スラブより高く、降伏後の剛性も等厚スラブより緩やかに低下した。デッキ付きスラブの最大せん断耐力は等厚スラブより2割程度大きい値を示した。デッキ付きスラブの破壊モードは「撃込み鉋のせん断破断」であるため、「撃込み鉋の引抜け」の等厚スラブより大きなせん断耐力を示した。しかし、最大せん断耐力時の相対ずれ量は等厚スラブがデッキ付スラブより大きい値を示した。

b) 頭付きスタッドのせん断強度式との比較

今回の実験値と頭付きスタッドの終局せん断強度の計算値を表-4に示す。文献<sup>3)</sup>より式(1)および式(2)を用いて頭付きスタッドφ19×80mm、φ16×80mmのせん断強度を算出した。

等厚スラブ

$$q_u = \frac{1}{2} A_{sd} \sqrt{F_c E_c} \quad \dots(1)$$

デッキ付スラブ

$$q_u = \left( \frac{0.85}{\sqrt{n_d}} \right) \left( \frac{b_d}{h} \right) \left( \frac{l_d}{h} - 1.0 \right) \left( \frac{1}{2} A_{sd} \sqrt{F_c E_c} \right) \quad \dots(2)$$

但し、 $\left( \frac{0.85}{\sqrt{n_d}} \right) \left( \frac{b_d}{h} \right) \left( \frac{l_d}{h} - 1.0 \right) \leq 1.0$  とする。

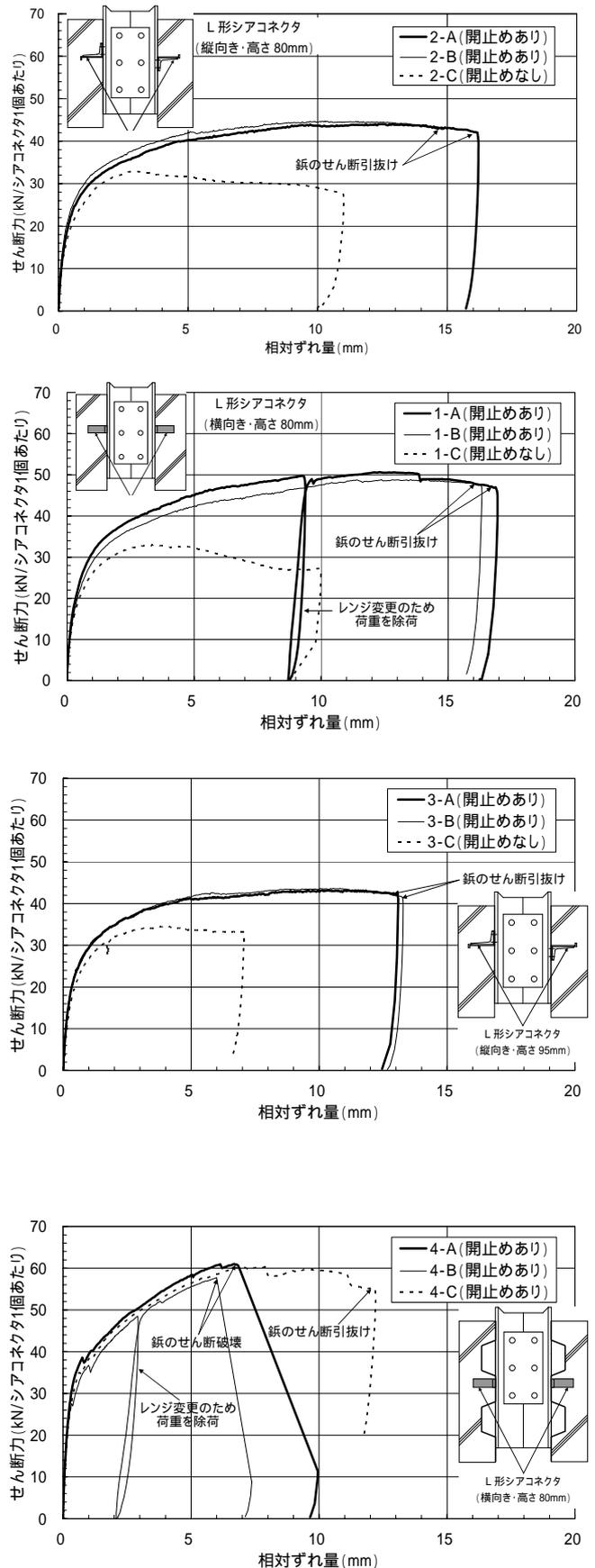
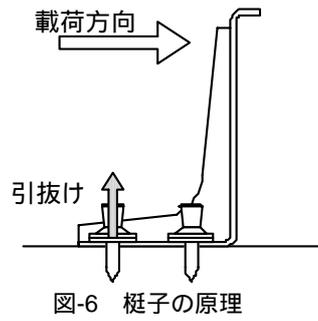


図-5 せん断耐力-相対ずれ量関係

デッキ付スラブの計算値が等厚スラブの値を上回る場合は、等厚スラブの値をデッキ付スラブの計算値とした。等厚スラブの場合、φ16の頭付スタッドの終局せん断耐力は撃込み鉋接合シアコネクタの2倍を下回る値を示した。デッキ付スラブの場合、φ19の頭付スタッドの終局せん断耐力は撃込み鉋接合シアコネクタの2倍を下回る値を示した。



### 3.有限要素解析

#### (1) 解析条件及び解析モデル

解析手法は汎用ソフトLUSASVer.14.3を用い、二次元非線形弾塑性有限要素解析を行った。解析モデルに使用した各部材の材料物性値を図-7に示す。

鉄骨梁(SS400)の降伏応力は $\sigma_y=296.5\text{N/mm}^2$ 、ポアソン比は $\gamma=0.3$ 、ヤング係数は $E=2.05 \times 10^5\text{N/mm}^2$ とし、コンクリートスラブの圧縮強度は $F_c=23.7\text{N/mm}^2$ 、ヤング係数は $E=22.6 \times 10^3\text{N/mm}^2$ とした。

シアコネクタ接合部の要素分割状況を図-8に示す。解析モデルには4節点二次元平面応力要素を用いた。解析条件として、シアコネクタと鉄骨梁の接合は、本来、撃込み鉋接合であるが、撃込み鉋軸部に相当する断面を剛接合と仮定した。

試験体の破壊は撃込み鉋で決まり、コンクリートスラブとデッキプレート、あるいはコンクリートスラブとシアコネクタは実験終了後も一体のままであるために接触条件は使わず、コンクリートスラブとシアコネクタおよびコンクリートスラブとデッキプレートの付着は剛体と仮定した。コンクリートスラブには圧縮力のみ発生するので、コンクリートスラブ内の鉄筋は省略した。各試験体と解析モデルを図-9に示す。全ての解析モデルは試験体の対称性を考慮し、試験体の半分のみ解析対象とした。境界条件は、スラブの最下端をY方向に固定し、鉄骨梁の最上端から鉛直方向に荷重を与えた。鉄骨梁とスラブの間、あるいは鉄骨梁とデッキの間は要素と要素を離すことで撃込み鉋にのみせん断耐力が伝達され、水平ずれが発生するようにした。

#### (2) 解析結果

実験結果と解析結果を表-5に示す。初期剛性は最大せん断耐力の1/3の割線係数であり、降伏せん断耐力は初期剛性と最大曲率点での接線との交点の値である。また、各解析モデルと各試験体のせん断耐力 - 相対ずれ量関係を図-10に示す。

各解析モデルの初期剛性は各試験体とほぼ一致しているが、降伏せん断耐力および最大せん断耐力は実験結果より解析結果の方が若干大きくなった。

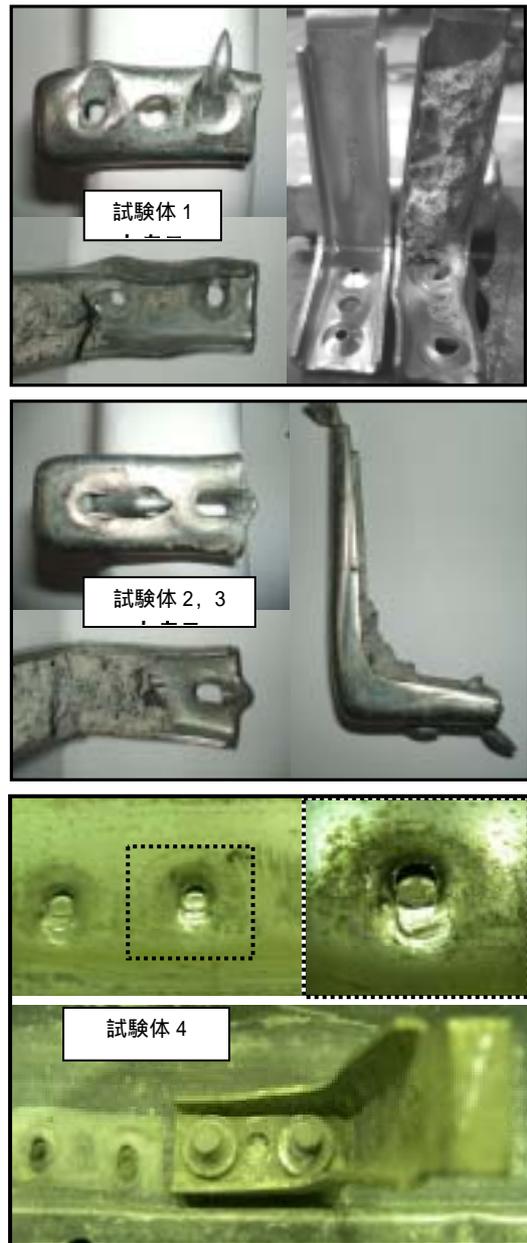


写真-2 各試験体の破壊モード

表-4 実験値および計算値

	$Q_{max}$ (kN/本)	$Q_{19}$ (kN/本)	$Q_{16}$ (kN/本)	$Q_{19}/Q_{max}$	$Q_{16}/Q_{max}$
試験体1	49.53	103.75	73.57	2.09	1.49
試験体2	44.02			2.36	1.67
試験体3	43.04			2.41	1.71
試験体4	59.35			1.75	1.24

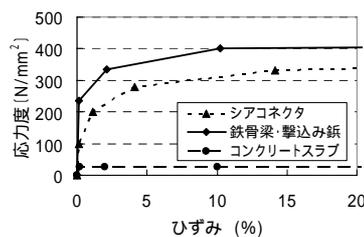


図-7 各材料の物性値

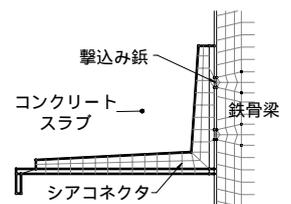


図-8 要素分割状況

解析結果の全体的な傾向は実験結果をおおむね再現できたと考えられる。図-11に各試験体におけるせん断力20kN時のY方向の応力分布を示す。載荷による押抜き試験体のせん断力は鉄骨梁からシアコネクタを介してコンクリートスラブに流れていることが確認できる。

シアコネクタの先端部より根元部からスラブへ応力が多く集中していることが判る。等厚スラブ試験体1, 2, 3は応力がシアコネクタからスラブへ流れているが、デッキ付きスラブ試験体4はせん断力がシアコネクタだけでなく、デッキプレートを介してコンクリートスラブに流れていることが判る。また、スラブ厚さの薄いデッキプレートの谷部では応力が集中していることが判る。

a) シアコネクタ設置向きとの比較

図-12に解析モデル1と解析モデル2のせん断力20kN時のX方向ひずみ分布を比較した。解析モデル1では鉄骨梁材軸と横向きに並んでいる2本の撃込み鉋には当然ながら同じせん断力が作用することに対し、解析モデル2では上端の撃込み鉋に曲げ圧縮力が、下段の撃込み鉋に引抜けが発生していることが判る。

等厚スラブ試験体2のように縦向きに設置したシアコネクタには「梔子の原理」によって、片方の撃込み鉋に引き抜けが発生する現象が解析結果で再確認できた。したがって、撃込み鉋2本とも同様な応力状態である試験体1の最大せん断耐力は、片方に引抜けが発生する試験体2の最大せん断耐力を上回った実験結果が得られたと考えられる。

写真-1に載荷方向とシアコネクタの取付け向きを示す。また、写真-2のように載荷方向によって等厚スラブ試験体1と試験体2の撃込み鉋の引抜け方向など、破壊状況が異なることが分かる。

b) シアコネクタ高さの比較

図-13に解析モデル2と解析モデル3のせん断力20kN時のY方向ひずみ分布を比較した。解析モデル2と解析モデル3においてシアコネクタ先端部およびスラブのひずみ分布はほとんど違いが見られなかった。実験でも、等厚スラブ試験体2及び試験体3の破壊モードは撃込み鉋の引抜けで決まり、シアコネクタの高さによる違いはほぼなかったことが解析結果でも確認できた。

c) デッキプレート有無の比較

図-14にシアコネクタの同じ向きである解析モデル1と解析モデル4のせん断力20kN時のY方向ひずみ分布を比較した。解析モデル1はシアコネクタの根元から先端にわたってひずみが分布していることに対し、解析モデル4はシアコネクタ以外にもデッキプレートや鉄骨梁にひずみが集中していることが判る。このような現象はデッキプレートと鉄骨梁の間に位置する撃込み鉋に大きなせん断力が作用することを意味する。

実験では、デッキ付きスラブ試験体4のせん断耐力は等厚スラブ試験体1より大きく、せん断力に対する相対ずれ量も小さい結果が得られた。

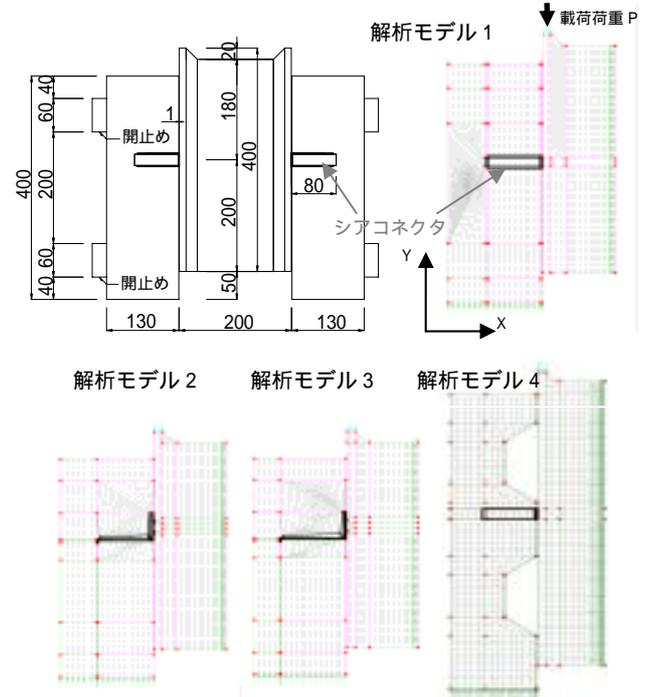


図-9 試験体と解析モデル

表-5 結果一覧

試験体	$Q_u$	$u$	$Q_y$	$y$	$K_0$
1-A	50.8	12.3	27.2	0.7	78.1
1-B	48.2	14.2	25.5	0.7	60.8
2-A	43.9	12.8	24.2	0.6	75.0
2-B	44.1	11.5	22.5	0.4	90.8
3-A	43.2	10.7	24.5	0.5	81.0
3-B	42.9	10.1	24.6	0.6	89.4
4-A	60.7	6.1	33.0	0.4	135.3
4-B	57.8	7.4	32.1	0.6	136.7
解析	$Q_u$	$u$	$Q_y$	$y$	$K_0$
1	55.1	10.2	29.1	0.5	88.4
2	50.6	14.2	25.2	0.3	77.9
3	49.2	15.8	25.3	0.4	89.4
4	65.3	5.2	35.9	0.3	137.5

$Q_u$ : 最大せん断耐力 (kN),  $u$ : 最大せん断耐力時のずれ量 (mm)  
 $Q_y$ : 降伏せん断耐力 (kN),  $y$ : 降伏せん断耐力時のずれ量 (mm)

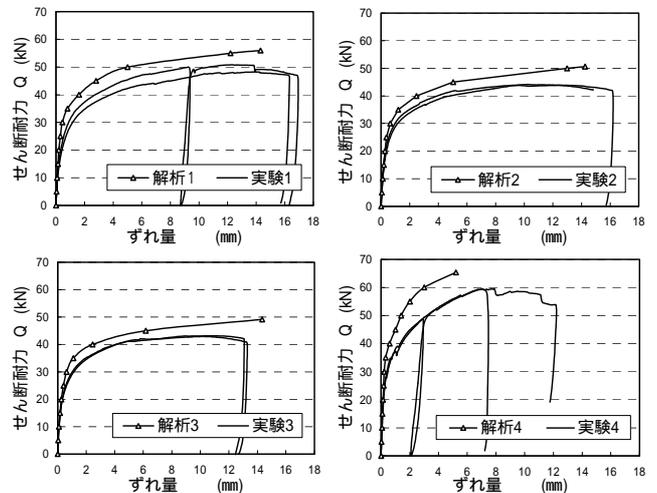


図-10 せん断耐力-相対ずれ関数

また、等厚スラブ試験体1の破壊形式は撃込み鉋の引抜けであることに対し、デッキ付スラブ試験体4の破壊形式は撃込み鉋のせん断破断となった。したがって、実験結果と同様な傾向が解析でも得られた。写真-2にデッキ付き試験体4のせん断破壊された撃込み鉋の破断状況を示す。

#### 4. まとめ

撃込み鉋を用いたシアコネクタの押抜き試験と有限要素解析から、以下の知見が得られた。

- (1) 降伏せん断耐力や弾性ずれ剛性はパラメータによる明確な差は見られなかった。一方、最大せん断耐力は等厚スラブ・デッキ付スラブにおいても撃込み鉋で決まり、破壊モードが撃込み鉋のせん断破断か引抜けかで最大せん断耐力は2割程度の違いが生じる。
- (2) 今回の実験では、等厚スラブ・デッキ付スラブにおいて、開止めが2段と3段で違ったため、この破壊モードや最大せん断耐力の違いが生じたと考えられる。今回のようにシアコネクタの根元部分で耐力が決定する場合、(2)式のような低減式は、デッキ付タイプにおいても不要であると考えられる。
- (3) 頭付きスタッドの終局せん断強度式との比較では、同じ高さでφ16mmの頭付スタッドに対してはシアコネクタ2個で同程度以上の最大せん断耐力が期待でき、デッキ付スラブではφ19mm頭付スタッドにおいてもシアコネクタ2個で同程度以上の最大せん断耐力が期待できる。

今回の実験では撃込み鉋で鉋留めしたL型のシアコネクタに関して、十分な耐力が得られた。しかし、等厚スラブで2段、デッキ付で3段という開止めの違いが影響していると考えられるため、今後は開きを完全に拘束した状態での実験を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) 日本鋼構造協会：頭付きスタッドの押抜き試験方法（案），1996.11
- 2) 日本ヒルティ(株)：発射撃込み鉋の性能試験品質性能報告書，2004.3
- 3) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説，1985

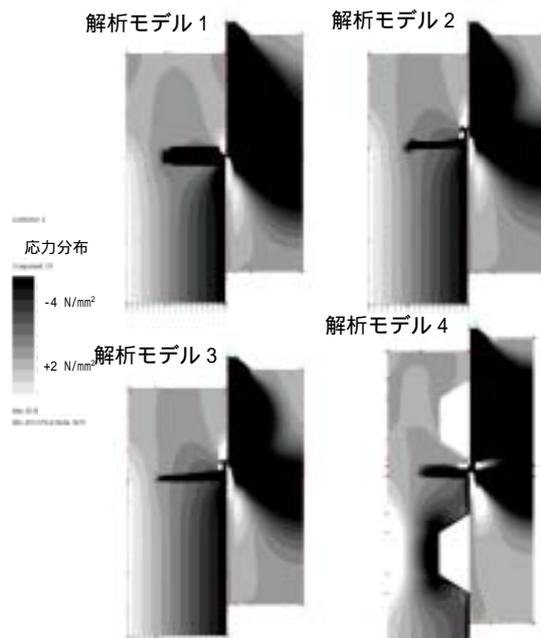


図-11 Y方向の応力分布(せん断力 20kN)

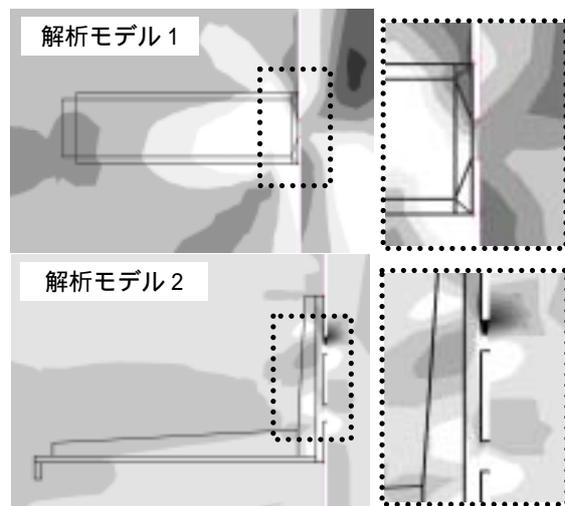


図-12 X方向のひずみ分布(せん断力 20kN)

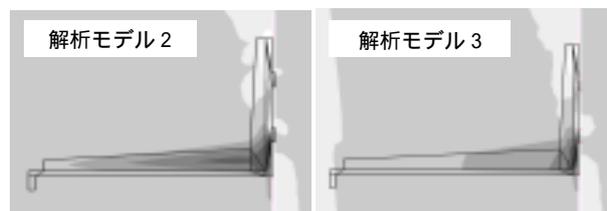


図-13 Y方向のひずみ分布(せん断力 20kN)

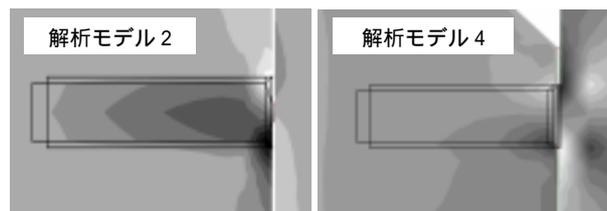


図-14 Y方向のひずみ分布(せん断力 20kN)

## Push-out Test and Numerical Analysis of Shear Connector using Powder Actuated Nails

Manjae LEE Go KOBAYASHI and Yasuhisa TAGAWA

In composite beam, steel beam is combined with concrete slab by using shear connector. At present, welding headed stud is popular as shear connector in composite beam. However, the aim of this study is to investigate mechanical performance of shear connector using powder actuated nails. With push-out tests of shear connector, we compare experimental results of this shear connector with welding headed stud. This shear connector got enough shear capacity.