

3 H工法による橋脚のせん断耐力に関する 実験的研究

伊藤 誠* 北沢 宏和* 渋谷 重彦*

要 約： 3H 工法による橋脚の設計では、鉄骨を鉄筋に換算して断面耐力を算出する。したがって、3H 構造は鋼・コンクリート複合構造でありながら、RC 構造として設計を行うため、せん断耐力の設計値はコンクリートおよびせん断補強筋の負担分の合計となり、H 形鋼のせん断耐力負担分は考慮されていない。しかしながら、SRC 構造においては鉄骨もせん断力を負担しているため、RC 構造に比べてせん断耐力が増加することはよく知られている。そこで、本研究では、せん断耐力に寄与する H 形鋼の鋼材量を評価するために、RC 構造、SRC 構造、3H 構造の 3 タイプの梁せん断実験を行った。その結果、最大耐荷力は RC 構造では 460kN、SRC 構造では 672kN(RC 構造+212kN)、3H 構造では 760kN(SRC 構造+88kN)であった。RC 構造と SRC 構造との最大耐荷力の差をみかけの H 形鋼のせん断耐力とすると、せん断耐力に寄与する H 形鋼の鋼材量は総ウェブ断面積の 60%に相当するという結果を得た。3H 構造では、スパイラル筋の影響が含まれるため、SRC 構造に比べ、さらに耐荷力が増加することを確認した。

キーワード： 3H 構造、せん断耐力、梁実験、H 形鋼

- 目 次：**
- | | |
|---------|---------------------------|
| 1. はじめに | 5. 既往の提案式との比較 |
| 2. 実験概要 | 6. せん断耐力に寄与する H 形鋼の鋼材量の評価 |
| 3. 実験方法 | 7. まとめ |
| 4. 実験結果 | |

1. はじめに

近年、コンクリート橋脚の省力化・急速施工を目的として、様々な鋼・コンクリート複合構造(SRC 構造)が開発されている。

一般に、これら SRC 構造では鉄骨もせん断力を負担するため、せん断補強筋降伏後の耐力増加が RC 構造に比べて大きいことがよく知られており、鉄骨の負担するせん断耐力を評価するために実験的研究がなされている。

「鋼管・コンクリート複合構造」では、鋼管の有無および PC 鋼より線の量をパラメータとしたせん断破壊実験¹⁾を行い、せん断補強鋼材である PC 鋼より線が引張破断後も、断面に配置された鋼管の効果によりせん断耐力が十分あることを確認しており、設計上、鋼管の断面積の 1/2 をウェブ断面積²⁾として、せん断耐力に抵抗する鋼材量としている。

また、「REED 工法」では、突起付き H 形鋼を複数本配置した SRC 梁と、それと同等の主鋼材比の RC 梁についてせん断破壊実験³⁾を行い、せん断補強筋降伏以降のせん断耐力の増加分は RC 構造より SRC 構造のほうがその割合が高いことを確認しているが、H 形鋼がせん断耐力に寄与する効果は設計上見込んでいない。

「3H 工法」⁴⁾では、コンクリートおよびせん断補強筋のみがせん断力を負担するものとして設計を行っているため、H 形鋼が負担するせん断耐力は考慮していない。すなわち、3H 工法に関する設計方法では、3H 橋脚が本来有するせん断耐力を過小評価していると考えられる。

SRC 部材の設計せん断耐力算定式については、鉄筋コンクリ

ート部分と鉄骨部分のせん断耐力の和とする累加強度式⁵⁾やせん断スパン比および鉄骨比の影響を取り入れた提案式⁶⁾などがある。

しかしながら、これらの評価式は断面内に 1 本の H 形鋼を埋め込んだ柱状構造物を対象としており、「REED 工法」や「3H 工法」のように、断面に複数本の H 形鋼が配置された構造に対して提案されたものではない。

そこで、本研究では、H 形鋼を複数本埋め込んだ梁試験体によるせん断破壊実験を行い、せん断耐力に寄与する H 形鋼の鋼材量を評価した。せん断耐力に寄与する H 形鋼の鋼材量を定量的に評価できれば、設計上、H 形鋼が負担するせん断耐力を見込むことが可能となる。その結果、せん断補強筋量を減らすことができ、3H 工法による橋脚の建設費用を削減することが可能になると考えられる。

2. 実験概要

せん断耐力に寄与するのは中空断面においてウェブ相当の壁部であるとして、図 1 に示すように、壁部の一部を取り出した形を試験体断面として試験体を製作した。

梁試験体は RC 構造、H 形鋼を埋め込んだ SRC 構造、スパイラル筋を巻き付けた H 形鋼を埋め込んだ 3H 構造の 3 体とした。

実験は 2 点支持 1 点集中荷重で実施し、それぞれの構造における最大耐荷力を比較し、耐力増加分をみかけの鉄骨のせん断耐力であるとした。

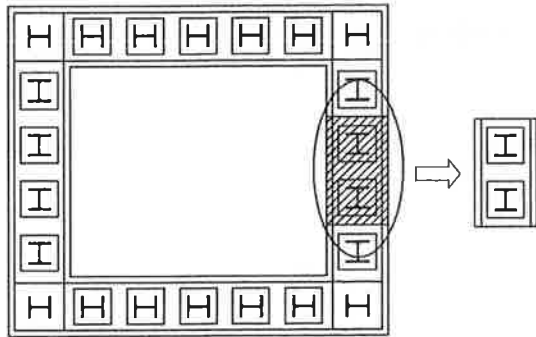


図1 梁試験体のモデル概念図

3. 実験方法

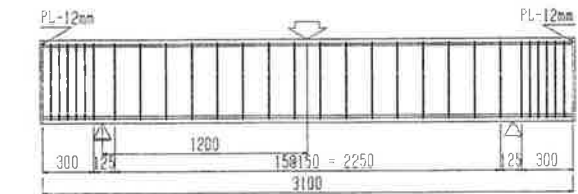
3.1 試験体形状

試験体は、壁厚が 1.0m の中空断面橋脚を 1/4 に縮小し、試験体幅を 250mm とした。また、SRC 断面および 3H 断面については H 形鋼間隔が壁厚と同じになるように H 形鋼を 2 本配置した。そのため断面高さは 500mm とした。RC 断面の試験体についても同様の寸法とした。

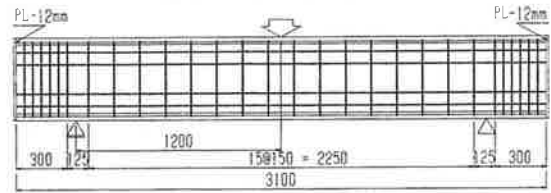
図 2(a), 2(b)および 2(c)にそれぞれ、RC 構造の TEST-01 試験体、SRC 構造の TEST-02 試験体、および 3H 構造の TEST-03 試験体の断面を示す。3 タイプともに図 3 に示すようにせん断スパン 1200mm とし試験体の長さは 3100mm とした。

3.2 試験体材料

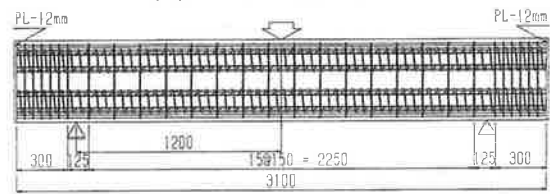
各試験体に使用した鋼材の物性値を表 1 に示す。引張鉄筋には D16(USD785)を 6 本、圧縮鉄筋には D13(SD345)を 2 本配置した。また、スターラップについては D6mm(SD295)を 150mm ピッチで配置した。また、各試験体に使用したコンクリートの物性値を表 2 に示す。それぞれの値は 3 本のテストピースの平均値である。



(a) TEST-01 -RC 構造-



(b) TEST-02 -SRC 構造-

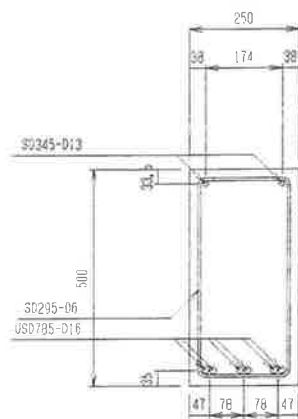


(c) TEST-03-3H 構造-

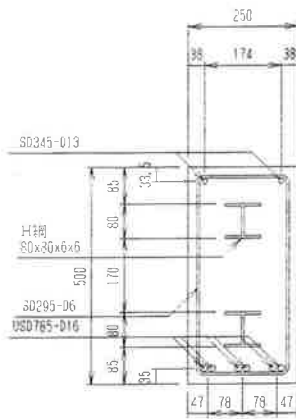
図3 試験体の形状 (側面図)

均値である。

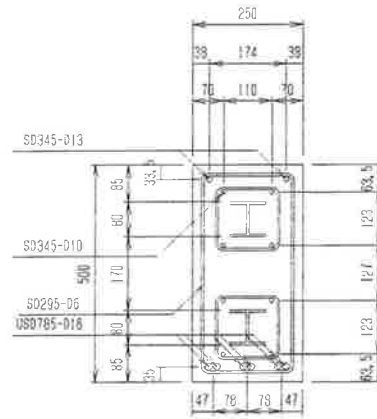
SRC 構造である TEST-02 および 3H 構造である TEST-03 試験体に用いた H 形鋼の形状は、 $t = 6\text{mm}$ の鋼材 (SM490A) を用いて工場製作し、 $80 \times 80 \times 6 \times 6$ とした。また、3H 構造である TEST-03 試験体の H 形鋼周りには $\phi 5\text{mm}$ のスパイラル筋 ($\square 140 \times 140\text{mm}$) と軸方向鉄筋 D10(SD345)を配置している。



(a) TEST-01 -RC 構造-



(b) TEST-02 -SRC 構造-



(c) TEST-03 -3H 構造-

図2 試験体形状(断面図)

表1 使用した鋼材の物性値

	降伏応力度 (MPa)	引張強度 (MPa)	降伏ひずみ (μ)	降伏ひずみ 0.2%offset (μ)	ヤング係数 (GPa)	備考
引張鉄筋 D16 (USD785)	934	1052	4678	6679	200	TEST-01~03 に使用
圧縮鉄筋 D13(SD345)	366	511	2024	---	181	
スターラップ D6(SD295)	327	494	1805	3802	181	
H形鋼 T=6mm(SM490A)	359	515	1887	3886	190	TEST-02,03 に使用
軸方向鉄筋 D10(SD345)	392	542	2144	---	183	TEST-03 に使用
スパイラル筋 $\phi=5$ mm(SPDN1429)	1429	1470	7217	---	198	

3.3 載荷方法

載荷にはアムスラー型 2000kN 万能試験機を用い、せん断スパンを 1200mm とする 1 点集中載荷とした。また、載荷は単調増加とした。

4. 実験結果

図 4 に各試験体の荷重-変位関係を、図 5 に各試験体の破壊状況を示す。

TEST-01 試験体は、載荷荷重 80kN 付近で曲げひび割れが観察され、350kN 付近でスターラップ筋が降伏し 450kN でせん断破壊に至った。TEST-02 試験体の曲げひび割れ発生荷重は 90kN 付近、破壊荷重は 680kN であった。なお、H 鋼とコンクリートとの付着切れ (335kN 付近および 500kN 付近) が観察された。TEST-03 試験体では曲げひび割れは 100kN 付近で観察され、破壊荷重は 760kN であった。なお、TEST-03 試験体では、H 形鋼とコンクリートとの付着切れは破壊荷重まで観察されなかった。また、TEST-02 および TEST-03 試験体にはコンクリートの圧壊が生じていた。

TEST-02 および TEST-03 試験体の最大耐荷力以降の荷重-変位関係を比較してみると、TEST-02 に比べ、TEST-03 試験体では最大耐荷力以降の荷重の低下割合が小さい。これは、スパイラル筋によりコンクリートが拘束され、この拘束されたコアコンクリートが破壊に至っていないことがその理由であると考えられる。

表 3 に各試験体での曲げひび割れ発生荷重、せん断ひび割れ

表2 コンクリートの物性値

試験体名称	強度(N/mm ²)	ヤング係数(kN/mm ²)
TEST-01	31.2	21.7
TEST-02	32.0	21.8
TEST-03	34.2	22.9

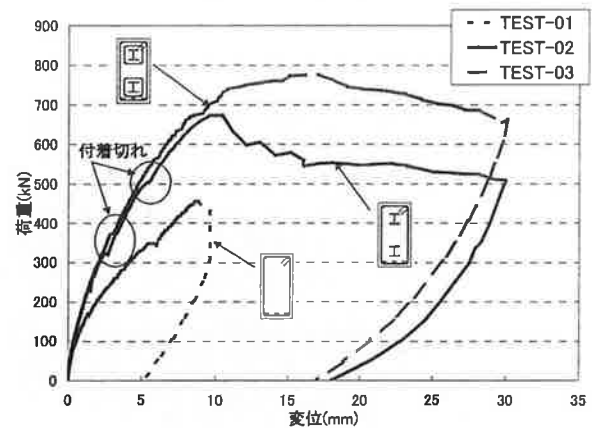
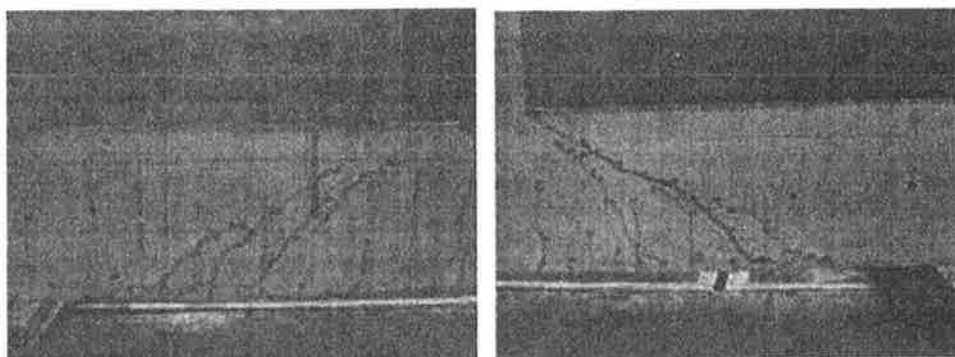


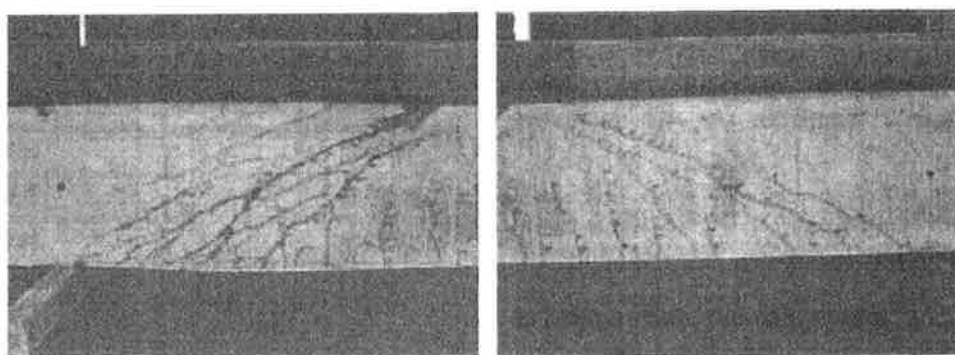
図4 荷重-変位関係

表3 各試験体の破壊荷重

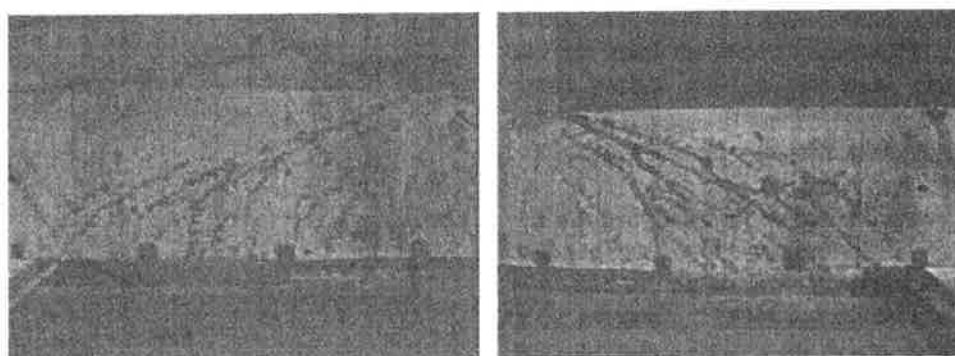
試験体名称	構造	圧縮強度 (N/mm ²)	曲げひび割れ発生荷重 (kN)	せん断ひび割れ発生荷重 (kN)	せん断耐力		P _{exp} / P _{cal}
					実験値 P _{exp} (kN)	計算値 P _{cal} (kN)	
TEST-01	RC 構造	31.2	80	220	460	390	1.18
TEST-02	SRC 構造	32.0	90	250	672	740	0.91
TEST-03	3H 構造	34.2	100	280	760	740	1.03



(a) TEST-01 -RC 構造-



(b) TEST-02 -SRC 構造-



(c) TEST-03 -3H 構造-

図5 試験体ひび割れ発生状況

発生荷重およびせん断耐力（破壊荷重）をまとめて示す。せん断耐力については実験値と計算値を比較して示す。

せん断耐力を比較すると、TEST-01 試験体では $P_{exp}/P_{cal} = 1.18$ であった。実験値が計算値を上回った理由として、計算値がスターラップの降伏までをせん断耐力としているのに対し、実験は1本が降伏しても、ただちに荷重低下には至らず、帯鉄筋降伏後、応力が再分配されること、および主鉄筋のダウエル

効果によるものと考えられる。TEST-02 および TEST-03 試験体についてのせん断耐力の計算値は、土木学会式⁵⁾にならない、鉄筋コンクリート部分と H 形鋼部分のせん断耐力の累加とした。ただし、H 形鋼は2本配置されているので、H 形鋼2本分のウェブ面積がせん断力に抵抗する鋼材量と仮定した。TEST-03 試験体についてスパイラル筋がせん断耐力に寄与する効果については考慮していない。

TEST-02 試験体では $P_{exp}/P_{cal} = 0.91$ となり、実験値は計算値を下回る結果となった。また、TEST-03 試験体では $P_{exp}/P_{cal} = 1.03$ と実験値はほぼ計算値どおりであった。

5. 既往の提案式との比較

既往の研究において提案されているせん断耐力式と本実験のせん断耐力との比較を行う。比較結果を図6に示す。

比較対象としたのは、土木学会の強度累加式⁵⁾および村田の提案式⁶⁾である。これらの提案式は、H形鋼が複数本配置された場合を対象としたものではないが、本研究では、ウェブ面積を2本分としてせん断耐力を計算した。

図をみると、本実験のせん断耐力は村田の提案式よりもかなり低い値を示している。また、土木学会式と比較すると、同等 (TEST-03) もしくは低い値 (TEST-02) を示している。

以上より、H形鋼を複数本配置した場合のせん断耐力は、H形鋼の本数分だけ耐力評価できるものではないと考えられる。また、村田の提案式では、複数段配置した場合のせん断耐力を過大評価することになると考えられる。

6. せん断耐力に寄与するH形鋼の鋼材量の評価

断面内にH形鋼を配置した鋼・コンクリート複合部材のせん断耐力を複合構造物設計・施工指針(案)⁵⁾にならひ、せん断耐力は単純累加として以下のように考える。

$$P = P_c + P_s + P_H (+P_{spiral}) \quad (1)$$

ここで、

- P : せん断耐力
- P_c : コンクリートが負担するせん断耐力
- P_s : スターラップが負担するせん断耐力
- P_H : H形鋼が負担するせん断耐力
- P_{spiral} : スパイラル筋が負担するせん断耐力

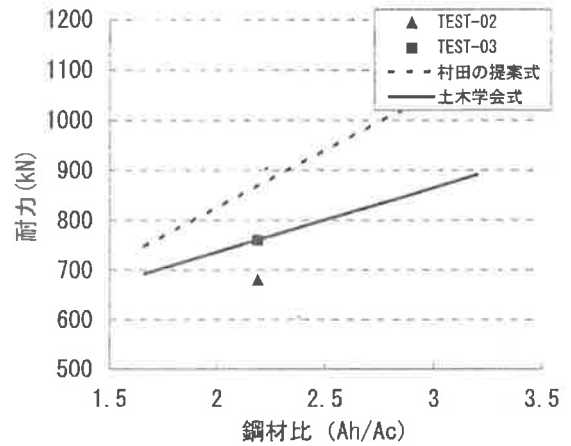
よって、H形鋼が負担するせん断耐力は(1)式を変形し、次式で表される。

$$P_H (+P_{spiral}) = P - (P_c + P_s) \quad (2)$$

(2)式を基に TEST-02 については P_H 、TEST-03 については $P_H + P_{spiral}$ を計算した。 $P_c + P_s$ は鉄筋コンクリート部材のせん断耐力を意味するので、RC構造である TEST-01 の実験結果 (460kN) とした。よって、TEST-02 では、 $P=672\text{kN}$ より、実験から推定される H 形鋼が負担するせん断耐力は $P_H = 212\text{kN}$ 、TEST-03 では $P=760\text{kN}$ より、 $P_H + P_{spiral} = 300\text{kN}$ となった。

それに対し、既往の提案式にならひ、H形鋼のウェブ部分のみがせん断力を負担するとし、H形鋼2本分のウェブ部分の全断面積が有効であると仮定すると、H形鋼が負担するせん断耐力の計算値は $P_{Hcal} = 338\text{kN}$ となる。

実験から推定される P_H と P_{Hcal} を比較すると、TEST-02 では P_H は P_{Hcal} を下回っており、計算値の 63% となっている。



※鋼材比 (Ah/Ac) は H 鋼の断面積 / 試験体の断面積

図6 既往の研究式との比較

よって、複数の H 形鋼を配置した SRC 構造では、総ウェブ面積のうち、63%程度がせん断耐力に寄与している鋼材量であると推定される。

また、TEST-03 では $P_H + P_{spiral}$ は P_{Hcal} の 88% となっている。ただし、TEST-03 ではスパイラル筋が配置されており、スパイラル筋による拘束効果、スパイラル筋自身が負担するせん断耐力といった影響が含まれている。

3H 構造における設計上の H 形鋼のせん断耐力負担分は、TEST-03 の実験を基に評価すべきであるが、上述したようにスパイラル筋を配置した影響が含まれており、本実験だけではその影響が不明瞭である。そこで、スパイラル筋を配置していない TEST-02 の実験結果を基に評価することにした。本実験結果より、3H 構造における H 形鋼が負担する設計せん断耐力として以下の式が考えられる。

$$V_H = f_y \cdot A_w \cdot 0.6 \quad (3)$$

ここで、

- V_H : H形鋼が負担する設計せん断耐力
- f_y : H形鋼の設計せん断降伏強度
- A_w : 配置されている H 形鋼のウェブ断面積の総和

7. まとめ

3H構造橋脚におけるせん断耐力に寄与するH形鋼の鋼材量を評価するために、RC構造、SRC構造、3H構造の梁のせん断破壊実験を行い、以下の結果を得た。

- ① SRC構造試験体では、RC構造試験体と比較して約200kNのせん断耐力増加が、3H構造試験体では約300kNのせん断耐力増加がみられた。3H構造では、スパイラル筋の影響があるため、SRC構造に比べてさらに耐荷力が大きい。
- ② H形鋼のウェブ部分がせん断力に対して抵抗するとすると、SRC構造では総ウェブ断面積の約60%相当がせん断耐力に

寄与する鋼材量であることが分かった。

- ③ 3H工法による橋脚におけるH形鋼が負担する設計せん断耐力は総ウェブ断面積の60%とした。

今回の実験ではH形鋼を2本配置しただけであったが、今後は本数や鉄骨比などをパラメータとした梁のせん断実験を行う予定である。

謝 辞

本実験を計画するにあたり、独立行政法人土木研究所構造グループ(基礎)・福井次郎氏をはじめ、3H工法研究会メンバーの方々には多くのご助言を頂きました。ここに記し、感謝いたします。

参考文献

- 1) 渡辺将之・今泉安雄ら：鋼管・コンクリート複合構造部材の正負交番載荷試験，土木学会論文集 No.627, V-44, pp.113-132, 1999.8
- 2) 日本道路公団：設計要領第二集，pp.5-47-5-66, 平成12年1月
- 3) 原夏生・河野一徳ら：突起付きH形鋼とプレキャスト型枠を用いた鉄骨コンクリート複合構造橋脚の構造性能に関する研究，土木学会論文集 No.662, V-49, pp.149-168, 2000.11
- 4) 国土交通省土木研究所，(財)先端建設技術センター，他11社：プレハブ・複合部材を用いた山岳部橋梁の下部工の設計・施工技術の開発に関する共同研究報告書-3H工法設計・施工マニュアル(案)改定版-，共同研究報告書第261号，2001年3月
- 5) (社)土木学会：複合構造物設計・施工指針(案)，コンクリートライブラリー90, pp.84-132, 1997年10月
- 6) 村田清満：複合構造を適用した鉄道高架橋の設計法に関する研究，鉄道総合技術論文誌特別第42号，pp.14-60, 2000年7月

EXPERIMENTAL STUDY ON SHEAR STRENGTH OF H-SECTION STEEL SET IN BRIDGE PIER BUILT BY HYBRID HOLLOW HI-PIER(3H) METHOD

M.Ito, H.Kitazawa, and S.Shibusawa

In the design of bridge pier by Hybrid Hollow High-pier (3H) method, the shear strength of H-section steel is not considered. However, it is well known that the proof strength of SRC structure increases after stirrup yielded. Therefore, in order to consider the shear strength of H-section steel in the design, the experiments of beams subjected to shear force were conducted. Three specimens (RC-type, SRC-type, 3H-type) were tested, and the maximum shear strengths were evaluated.

As a result of comparison, the shear strength of SRC-type was larger than RC-type by 212kN, and the shear strength of 3H-type was larger than SRC-type by 88kN. Therefore, the increase of shear strength, compared to RC-type, is accounted as shear strength of H-section steel. However, the increase of shear strength of 3H-type, which contains the spiral bar, not considered as shear strength of H-section steel in the design. It is assumed that web of H-section steel bears against the shear force, 60% of area of web section is effective to shear strength.