論文 梁端部 RC に S を埋め込んだ合成梁の接合部強度に関する研究

高木 仁之*1・内田 祐己*2・中嵜 鉄平*3・白石 一郎*4

要旨:本研究は,梁端部 RC に S を埋め込んだ合成梁の埋込み長さに関係して生じるテコ作用による鉄骨面 支圧力の緩和を図るため,鉄骨部材のウェブ部分にスリットを設け,その剛性を低下させテコ作用による RC 部の応力軽減を図る構法の開発に向けた基礎的な挙動を検討する。すなわち,本構法は埋め込み工法と 非埋め込み工法の中間的要素をもたせた構法の開発を目指すことを目的に,①埋め込み鉄骨ウェブスリット の効果,②鉄骨ベースプレートの効果の実験を行い強度および破壊性状を検討しそれぞれの効果を確認した。 キーワード:混合構造,梁端接合部,埋込み長さ,スリット,テコ作用,破壊性状

1. はじめに

近年,混合構造の典型的な構造の一つとして,鉄筋コン リート(RC)造の柱と鉄骨(S)造の梁を組み合わせた構造骨 組み柱 RC 梁 S 混合構造(RCS 構造)の研究開発が積極的 に行われている。RCS 構造の技術課題は,RC 柱と S 梁 の異種構造部材間の接合部であり,RC 柱梁端と S 梁を 直列結合する接合部の研究は,西村,鈴木ら¹⁾により応 力伝達機構の理論的な解明が成されるに至っている。

本研究は、直列的に結合する梁端部 RC に S を埋め込 んだ合成梁を対象とし、埋込み長さに関係して生じるテ コ作用による鉄骨面支圧力の緩和を図るため、鉄骨部材 のウェブ部分にスリットを設け、その剛性を低下させテ コ作用による RC 部の応力軽減を図る構法の開発に向け た基礎的な挙動を検討する。すなわち、本構法は埋め込 み工法とベースプレートを用いた露出柱脚に見る非埋 め込み工法の中間的要素をもたせた構法の開発を目指 すことを目的としている。鉄骨部材のウェブ部分にスリ ットを設け、鉄骨部材の剛性を低下させテコ作用の応力 軽減を図り、RC に埋め込んだフランジは鉄骨の定着の 役割を持たせる。これにより埋込み長さを浅く、かつ、 テコ作用を小さくした分のせん断補強筋量の低減化を 図ることにより、接合部の込み入った配筋を押さえ施工 性の向上が図れる。本論は、2章では埋め込み鉄骨ウェ ブスリットの効果の実験,3章では既往研究の埋め込み 接合部せん断挙動の解析,4章では鉄骨ベースプレート の効果の実験から構成する。

2. 埋め込み鉄骨ウェブのスリット効果の実験概要

2.1 試験体

2 章の研究で用いる試験体は,図-1に示すような平 面的に長大なスパンをもつ 3~5 層程度の低層物流施設 *1 明治大学 理工学部建築学科准教授 工博 (正会員) *2 明治大学 理工学部建築学科 大学院 *3 日本工業大学 工学部建築学科 大学院 *4 日本工業大学 工学部建築学科 教授 工博 (正会員) のト字型柱梁接合部を想定した縮小モデル試験体であ る。試験体数は総数6体とし、その諸元を**表-1**に示す。 図-2に配筋図を兼ねて、試験体の形状を示す。RC部の 試験体の寸法は、断面350mm×350mm、長さ500mmである。 また、鉄骨はH-200×200×8×12を用いる。

試験体のパラメータは鉄骨部材の埋込み長さとスリ ットの有無である。埋込み長さは、鉄骨部材せいの 1.0,1.5,2.0倍(それぞれ200,300,400[mm])、スリット 幅は30[mm]として、埋込み末端部分までとした。また、 埋込み末端部分には、鉄骨部材のウェブと同じ厚さ (=8[mm])のスチフナを溶接し、埋込み先端部分には鉄骨 の抜け出しを抑制するためにフランジと同じ厚さ (=12[mm])の定着プレートが溶接されている。RC部材の 主筋にはネジ鉄筋を用いることで、鉄筋両端部にプレー トナットを取り付け、プレートナットで定着させ、施工 性を上げている。

2.2 試験体の設計

試験体は RC 梁端部において曲げ破壊先行型としてせん断設計する。すなわち, RC 梁端部におけるモーメントが降伏モーメント M_y時の降伏荷重 P_yを短期許容せん断力としてせん断補強筋量を決定する。なお,埋め込み鉄骨部の両端に集中配筋させたせん断補強筋はスリットの効果を見やすくするため配筋していない。

使用コンクリートは設計基準強度 24N/mm²とし,実強 度で約 30N /mm²である。

使用鉄筋は、梁部分には主筋として 4-D25(SD345), せん断補強筋比 0.4%として D6(SD235)@40 を用い、スタブ部分には主筋として 4-D22(SD345), 帯筋として D6(SD235)@30 を用いる。

2.3 実験方法

(1) 加力方法

加力方法は、図-3に示すように試験体を鉛直に立て、 梁端部から1000[mm]の位置において水平力の正負交番 漸増繰り返し載荷試験とする。正負繰返し点を変形角(そ れぞれ1/400,1/200,1/100,1/50,1/30)で行い、各ステップと もに1/30を除き2回ずつ繰返し載加する。

(2) 測定項目

測定項目は、図-2に示す水平加力点位置の変位 (DGCH010の変位計),鉄骨埋込み末端部回転角(DGCH011 と DGCH012 の変位計による伸縮),RC 梁端部回転角 (DGCH013 と DGCH014 の変位計による伸縮)および鉄筋 の歪み(図中・印位置)は、せん断補強筋,RC 梁脚部に おける主筋と鉄骨露出脚部のフランジについて行う。

3. 実験結果

3.1 破壊性状

埋込み長さが 1.0D, 1.5D, 2.0D の各試験体は, どれも スリットの有無で同様の破壊性状を示した。写真-1に, スリットの有無別に加力終了時の試験体の破壊状況を 示す。スリットの有無に関係なく,初期ひび割れは,鉄 骨の埋込み末端部付近に曲げひび割れが生じた。加力終 了時を見比べると,どちらの試験体も鉄骨埋込み部を中 心としてひび割れが生じている。ひび割れ発生数はスリ ットの有無であまり変化なかったが,ひび割れの大きさ や幅はスリットが無い試験体の方が,スリットが有る試 験体に比べて大きく,スリットを設けることによりテコ 作用によるコンクリート圧壊が軽減したとみられる。

すなわち,埋め込み鉄骨部にスリットを設けることに より剛性が低下し,これにより支圧力が軽減されたと考 えられる。また,スリットによる支圧力の軽減は,埋込 み長さが長い程,顕著に表れている。

3.2 最大耐力

図-4 (a~c) に、試験体の荷重 - 変形関係を埋込み 長さが等しいものに対しスリットの有無別に示す。表-2に、各試験体の最大耐力を示す。各試験体ともにスリ ットがある場合、埋込み長さにかかわらず最大耐力が 5 ~7[%]上昇していることがわかる。埋め込み長さの比較 では、スリットの有無にかかわらず 0.5D 短くなる毎に最 大耐力が 20k N ずつと減少していることがわかる。

また,最大耐力時には,埋込み範囲のせん断補強筋に 添付した歪は急激に増加し降伏歪みを大きく超えた。RC 脚部主筋の歪値は,降伏歪みに対して,30~55[%]程度 であり,いずれの試験体も降伏歪みに達していない。同 様に,埋込み切り換え脚部鉄骨フランジの歪値は,降伏 歪に対して30~50[%]程度であった。以上のことから, 図のように最大耐力を迎えると荷重 - 変形関係が頭打 ち状態になるのは,テコ作用によるせん断力の増大が



図-1 柱梁端 RC·梁S 混合構造



図-2 試験体形状

表一1 試験体諸元

試験体名	スリット	埋込み長さ
1.0DNS		1.0D(=200[mm])
1.5DNS	なし	1.5D(=300[mm])
2.0DNS		2.0D(=400[mm])
1.0DAS		1.0D
1.5DAS	あり	1.5D
2.0DAS		2.0D



図-3 加力装置

せん断補強筋を降伏させた結果と言える。

図-5に、一例として埋込み長さが2.0D(スリット無し)の試験体における荷重 - 回転角関係を示す。回転角は図-2に示した位置で測定した。測定した回転角は、それぞれ鉄骨部材脚部の回転角(赤線)と RC 脚部の回転角(黒線)を示している。全ての試験体においてスリットの有無にかかわらず最大耐力以降において鉄骨脚部の回転角が RC 脚部の回転角を大きく上回る。これは、テコ作用によりせん断破壊が進展し、埋込み鉄骨の抜け出しによることが原因と推察されるが、あまりスリットの優位性は認められなかった。

3.3 既往の研究によるせん断強度評価法

西村¹⁾は、図-6のような応力伝達機構に基づき,鉄 骨埋込部のRC部せん断強度を式(1)のように誘導してい る。この式(1)による計算値と実験値の比較を図-8に 示すが、同図には、図-7のテコ作用の支圧力を三角形 分布とする鈴木ら¹⁾の提案式の結果も併せて示す。図よ り、両計算値はやや小さく評価されているが、埋め込み 長さによる傾向を概ね捉えた傾向となっている。また、 本研究の試験体は埋め込み接合端部に集中補強筋が配 置されていないため、アーチ機構耐力を見込めないとし たトラス機構のみの耐力計算値では、過小評価となる。 次項でこの機構の形成について有限要素法による数値 解析を試み検討する。

3. 4 応力伝達機構に関する検討

ここでは,鉄骨埋込部において,既往の研究で仮定さ れるトラス機構,アーチ機構の形成について解析的に検 討する。

(1) 支圧力分布

図-9に示す解析モデルを用いて2次元非線形 FEM 解 析²⁾を実施した。解析はコンクリートおよび鉄骨が長方形要素, 主筋およびせん断補強筋は線要素モデルであり,材料特 性として鉄筋は bi-linear 型,コンクリートは等価1軸モデル に基づく応力-ひずみ関係とした。また,コンクリートと鉄骨 は完全付着と仮定した。



図-5 荷重-回転角関係



(c) 埋め込み長さ1.0 D

図-4 荷重-変形曲線





(i) スリット無し

(ii) スリット有り



表-2 最大耐力 (kN)

討驗休	スリット		右り/毎1	
时间大学	無し	有り	有り/ 悪し	
2.0D	121.3	130.0	1.07	
1.5D	102.6	110.1	1.07	
1.0D	80.3	84.5	1.05	

解析結果の支圧力分布を図-10に示すが,支圧力分 布は低荷重域では三角形分布で,終局に近づくほど三角 形から長方形分布となる。

(2) 応力伝達機構

図-11に示す支圧力分布による斜めストラット機構の形成について検討する。まず、図に示す支圧力を図のような梁外側から作用する外力に置き換えた。下図は、 主圧縮応力度分布を表しており、外力が集中荷重から長 方形分布になるにしたがい圧縮ストラットの角度が大 きくなる傾向となっている。このような傾向は図-12 に示す線材ストラットモデルとおよそ対応している。

以上のような解析結果より,支圧力によって鉄骨埋込 部での斜めストラット伝達機構の形成が確認される。



図-8 実験値と計算式の最大耐力の比較









 $_{J}Q_{u}$: 鉄骨埋込部のせん断耐力 $_{T}Q$: トラス機構によって決定される耐力 $_{A}Q$: アーチ機構によって決定される耐力 $_{F}Q$: 摩擦によって決定される耐力

図-6 応力伝達機構と抵抗機構(西村の研究)







4. 鉄骨ベースプレートの効果の実験

4.1 実験概要

2章の実験では,鉄骨埋込部でのテコ作用に起因する せん断破壊が顕著であった。そこで,次の①~③に示す 事項の実験を行う。①2章の実験試験体よりもウェブに 大きなスリットを設けテコせん断力を低下させるもの, ②せん断破壊に起因した鉄骨の抜け出しを防止するた めに接合部境界面のウェブ部分リブプレートから曲げ 補強定着筋を配置(図-13(②)参照)したもの,③ 鉄骨脚部にベースプレートに相応するエンドプレート

(図-13(③)参照)を設けたもの,以上3種類の方法にて検討する。曲げ補強定着筋の配置については,曲 げ補強筋を定着配筋することで,埋め込み鉄骨部の定着 をより向上させようと考えた。

4.2 試験体概要

試験体は,表-3に示す総数4体である。鉄骨埋込部 の状況を図-13に示す。試験体 M-1は,スリット幅を 2章の30[mm]から120[mm]とし,埋込み長さは,鉄骨部 材せいの1.5倍(=300[mm])とする。試験体 M-2は M-1 に対して,鉄骨と RCの曲げ定着をより良くするために 定着プレートと末端部リブプレートを結ぶ曲げ補強定 着筋を配置する。試験体 M-3 は M-1 に対して,鉄骨のエ ンドプレートを梁主筋により定着させる。試験体 M-4 は M-2と M-3を組み合わせた試験体とする。また,エンド プレートは、ウェブと同じ厚さ(=8[mm])を RC 断面に覆 うようにスチフナを溶接し,埋め込み先端部分には鉄骨 の抜け出しを抑制するためにフランジと同じ厚さ (=12[mm])の定着プレートを溶接している。

試験体への加力は,2章の実験と同様に,スタブ高さ 1000mmの地点で,鉄骨部に正負交番漸増繰り返し載荷 をした。

4.3 実験結果および考察

表-3に最大耐力,代表的な試験体の最大耐力時にお ける破壊状況を写真-2に示す。エンドプレートを配置 した試験体では,RC 主筋が降伏し曲げ破壊型先行であ った。

鉄骨埋込部スリットの有無による荷重一変形曲線を 図-14に示す。2章の試験体(1.5DAS)に対し、より 大きなスリット設けた試験体(M-1)は耐力が110kNから90kNに大幅に減少し2章の傾向と相反する結果とな る。このことは破壊性状の写真を見るようにウェブ切り 欠き開始部分に抉るようなせん断ひび割れが生じており、ウェブを極端に減少させた結果において鉄骨自身の せん断抵抗がなくなったものと推測される。また、図-15は、鉄骨埋込部に曲げ補強定着筋を配置した影響を 示すが、スリットを大きくとり曲げ補強定着筋を配した M-2では曲げ補強定着筋の無いM-1に比べて耐力は増加



図-12 線材ストラットモデル(模式図)

表-3 試験体一覧

試験体			最大耐力	
名	エンドプレート	曲げ補強筋	(kN)	
M— 1	無し	無し	90	
M-2	無し	有り (4-D25)	124	
M — 3	有り(8mm)	無し	208	
M-4	有り(8mm)	有り (4-D25)	223	



(b) 試験体 M-4



図-13 試験体全体図







図-15 曲げ補強筋の有無による影響



図-16 エンドプレートの有無による影響



図-17 荷重-回転角 試験体 M-3

したが,同様な破壊が生じたため128kNの耐力に留まる。 エンドプレート有無による影響を図-16に示す。図 より M-1 に対しエンドプレートを配置した M-3 は, 耐力 が 208kN と大幅に向上した。この理由は、ウェブ切り欠 き部のせん断耐力不足をエンドプレートを介して直接 RC 部にせん断力伝達されたと推察される。すなわち, 鉄骨部から RC 部へのせん断摩擦作用や主筋のダボ作用 によりせん断力が伝達され圧縮ストラット機構の形成 がなされたことによると判断される。また、図ー17に 示す荷重--回転角関係の図より,主筋をエンドプレート に定着することにより鉄骨の抜け出しを抑制する働き も同時に果たす。エンドプレートおよび曲げ補強定着筋 を有する M-4 は, M-3 と同様に RC 脚部の曲げ降伏先行 後、応力中心間距離の増大に伴い耐力は 223kN とやや上 昇し、本試験体の中で良好な性状を示すことが認められ る。

5. まとめ

本研究は埋め込み工法と非埋め込み工法の中間的要素をもたせた構法の開発を目指した基礎的な実験を行ったもので、埋め込み鉄骨部のウェブ部分にスリットを設け剛性を低下させ、テコ作用の応力軽減を図り、かつ RC に埋め込んだフランジは鉄骨の定着の役割を持たせようとしたものである。実験結果よりスリット幅の大小は耐力に影響を与え、スリット幅の比較的小さいときはテコ作用を低減しスリットの無しのものよりも耐力が増加したが、スリット幅のより大きい場合は鉄骨自身のせん断強度が低下し耐力は減少する。改善策としては、エンドプレートを RC 主筋と緊結することで良好なせん断力伝達機構が形成されることを確認した。



写真-2 破壊状況

[謝辞]本研究に当たり,定着プレートナット工法による鉄筋等の材料を東京鐵鋼(株)より提供して頂きました。ここに深く感 謝致します。

[参考文献]

 1) 鋼コンクリート接合部設計指針の確立に向けて、日本建築 学会 構造委員会、鋼コンクリート合成構造運営委員会、2009
2) ATENA: Computer Program for Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures ATENA, PROGRAM DOCUMENTATION, Cervenka Consulting, Revision Oct. 31, 2005