

(14) T型せん断補強材を有するオープンサンドイッチ構造の
せん断耐荷機構に関する解析的研究

AN ANALYTICAL STUDY ON SHEAR RESISTANT MECHANISM OF
OPEN-SANDWICH MEMBER WITH T-SHAPED SHEAR REINFORCEMENT

中井勝彦* 古内仁** 上田多門*** 角田與史雄****

By Katsuhiko NAKAI, Hitoshi FURUUCHI, Tamon UEDA, and Yoshio KAKUTA

In this study, a comparison between an experimental result and an analytical result for open-sandwich structure with T-shaped shear reinforcement is presented. The method to analyze this structure is a finite element method which can take non-linear characteristics of each material into account. An experimental study of open-sandwich beam is carried out to verify this analysis and to investigate the effect of T-shaped web as shear reinforcement. With this analysis, the influences of different type of T-shaped web, i.e. the height and the thickness of web plate and width of the upper flange, on its capacity are shown.

1. はじめに

近年、高強度、水密性、高靱性などの特徴を合わせ持つ鋼-コンクリートサンドイッチ構造を、各種構造物に適用しようとする試みが活発に行われている。このサンドイッチ構造は、外殻鋼板を片面だけに有するオープンサンドイッチ構造と、外殻鋼板を両面に有するボックスサンドイッチ構造の2種類に大別される。特に、オープンサンドイッチ構造を橋梁の合成床版として平面的構造物に適用すると、補強鋼材がコンクリート打設時の型枠を兼ねるため、施工の簡便化や工期の短縮化につながる。また、護岸用ケーソンや沈埋トンネルのような港湾構造物に適用すると、鋼板を構造物の内面に位置させれば外部の空気や水の出入りがない状況となるので、腐食に対する特別の配慮は不要となる¹⁾。

しかし、これらのオープンサンドイッチ構造に関する既往の研究は数少なく、耐荷性状は明らかにされていない。特にサンドイッチ構造は、スタッド、トラス型ジベル、あるいは連続したウェブ鋼板等をせん断補強材として有しているため、それらのせん断補強効果は、通常の鉄筋コンクリート部材とは異なると予想される。そこで本研究では、この構造の基礎的な研究として、比較的単純な構造でせん断補強効果が高いと考えられるT型のせん断補強鋼材（以下、T型ウェブと呼ぶことにする。）を部材軸方向に連続的に有するオープンサンドイッチ構造を対象とし、実際に曲げせん断載荷実験を行い、併せて有限要素解析の結果と比較することにより、せん断耐荷機構を明らかにすることを目的としている。

* 北海道大学大学院 工学研究科土木工学専攻

** 北海道大学助手 工学部土木工学科

*** 工博 北海道大学助教授 工学部土木工学科

**** 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科

2. 実験供試体

図1に示すように、本研究で用いる実験供試体は、せん断補強鋼材としてT型ウェブを部材軸方向に1列配置したオープンサンドイッチ構造はりである。表1に示すように、実験供試体は、T型ウェブの寸法の19.3

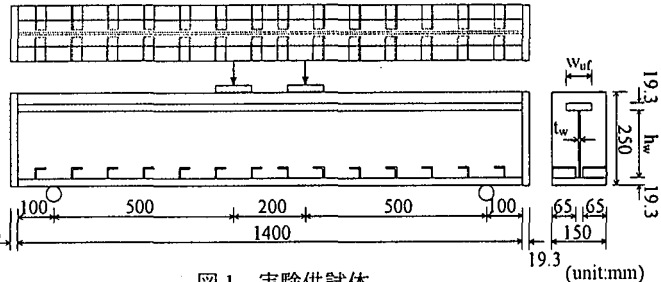


図1 実験供試体

違いがせん断補強効果およびせん断耐力に及ぼす影響を調べるため、計5体用意した。その内容は、ウェブ鋼板の厚さを3.2、4.5、6.0mmと変化させた供試体の3体、ウェブ鋼板の高さを15.14、18.14cm（上フランジ上のコンクリートのかぶり厚はそれぞれ、6.0、3.0cm）と変化させた供試体の2体、上フランジの幅を3.0、7.0cmと変化させた供試体の2体である。いずれの供試体についても、部材幅15cm、部材高さ25cm、スパン120cmで、せん断スパンー有効高さ比（ a/d ）は2.0で統一されている。また、鋼板とコンクリートとの合成効果を高めるために、下フランジ上面には30×30×13mmのシアコネクタを10cm間隔で配している。これらの供試体に用いられているコンクリート部材と鋼材の材料特性値も、併せて表1に示す。載荷方法は、図1に示すように静的2点載荷とし、荷重段階ごとにスパン中央でのたわみ、コンクリート、ウェブ鋼板、上下フランジ鋼板のひずみを計測した。現在までのところ、1体の供試体（H457）についてのみ載荷実験を終えている。

表1 実験供試体諸元

specimen	t_w (mm)	h_w (cm)	w_{ur} (cm)	f_{wy} (MPa)	f_{sy} (MPa)	f'_c (MPa)
H327	3.2	18.14	7.0	207	617	-
H457	4.5	18.14	7.0	232	617	35.7
H607	6.0	18.14	7.0	214	617	-
H453	4.5	18.14	3.0	232	617	-
L457	4.5	15.14	7.0	232	617	-

t_w : thickness of web plate f_{wy} : yield strength of web plate

h_w : height of web plate f'_c : compressive strength of concrete

w_{ur} : width of upper flange f_{sy} : yield strength of flange

3. 解析概要

本研究で用いた有限要素解析プログラム「WCOMR」は、鉄筋コンクリート壁部材の解析のために開発されたものであるが、サンドイッチはり部材用に改良されたプログラム²⁾を用いている。本解析において、要素の種類は大きく3つに分けられる。コンクリート要素、上下フランジ鋼板・ウェブ鋼板・ダイヤフラムに適用される2次元弾塑性要素、上下フランジ鋼板とコンクリート・ダイヤフラムとコンクリートの境界面において、応力伝達を担うと同時にすべりを考慮するための接合要素である。コンクリート要素は、ひび割れの影響を平均的に捉え、連続体に置き換えられるよう平均応力-平均ひずみ関係を採用した分散ひび割れモデルを用いている。また、載荷方法は、はり供試体に直接強制変位を与えている。解析に用いた実験供試体の鋼材、コンクリート部材の要素分割それぞれを図2に示す。また、図2中の太線は接合要素の分布を表している。

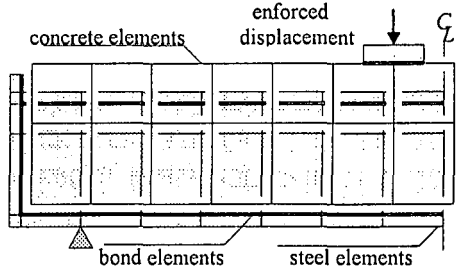


図2 要素分割図

4. 実験結果および解析結果

4.1 実験結果

載荷試験を終了した供試体 H457 の結果についてのみ述べることにする。図3のひびわれ図に示すように、シアコネクタから発生したひびわれ間に形成されているコンクリート圧縮斜材が載荷点付近と支点付近で圧壊し、表面のコンクリートが剥離したことから、せん断圧縮破壊したと考えられる。最大荷重は762kNに達した。

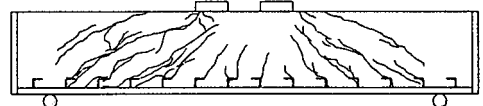


図3 ひびわれ図 (H457)

ひびわれ発生状況について述べると、曲げひびわれは荷重80kN、主な斜めひびわれは荷重350kN前後で発生し、いずれもシアコネクタから伸びている。ウェブ鋼板は500kN付近から降伏が始まり、最大荷重に達するまでには、ほぼせん断スパン全域にわたって降伏が認められた。また、最大荷重以降は、上フランジには載荷点付近で、下フランジには支点付近で局所的な降伏が認められた。

4.2 実験結果と解析結果の比較

図4に示す各荷重段階毎に計測したスパン中央でのたわみA、コンクリートの主圧縮ひずみB、ウェブ鋼板の主引張ひずみC、上フランジの軸方向ひずみD、下フランジ上下面の軸方向ひずみE、Fについて、荷重との関係をそれぞれ図5から図10に示す。さらに、有限要素解析結果との比較をするため、計測位置に対応するガウスポイントにおいて得られた解析結果も併せてそれぞれの図に示す。図5に示すように、剛性は若干小さいが、本解析結果は実験供試体の変形性状を概ね捉えていると言える。また、図6、7に示すように、ウェブコンクリートの主圧縮ひずみ、ウェブ鋼板の主引張ひずみの増加傾向はほぼ一致している。

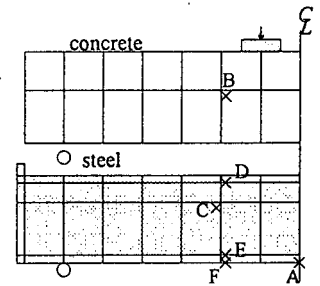


図4 たわみ及びひずみ計測位置

しかしながら、下フランジ下面において軸方向ひずみの増加が一致している(図10参照)が、上フランジ下面(図8)および下フランジ上面(図9)においては、実験値の方が大きくなっている。これらは

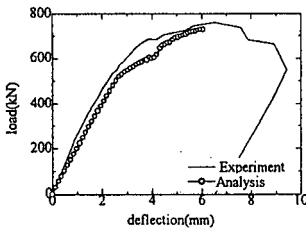


図5 荷重-たわみ A

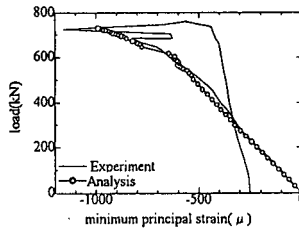


図6 荷重-主圧縮ひずみ B

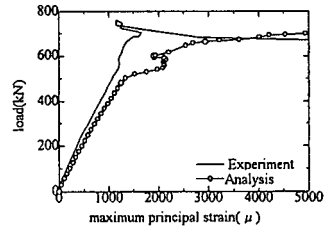


図7 荷重-主引張ひずみ C

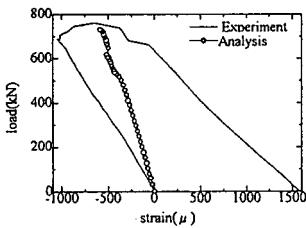


図8 荷重-軸方向ひずみ D

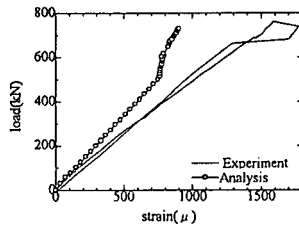


図9 荷重-軸方向ひずみ E

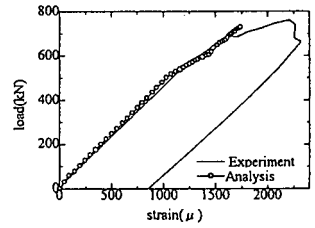


図10 荷重-軸方向ひずみ F

それぞれ、上フランジ下面と下フランジ上面に分布させている
 接合要素の特性に起因すると考えられる。現在、有限要素解析
 に取り入れている接合要素には、コンクリートのひびわれ面で
 のせん断力伝達モデルを改良したもの²⁾で、鋼板とコンクリー

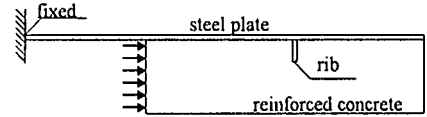


図 11 PULL-OUT TEST

トの境界面でのすべり性状を考慮したものを用いている。このモデルでは、図 11 に示すような Chin³⁾の実
 験結果で得られたすべり量に一致するようにした。なお、この実験は、鋼板をコンクリート面に沿って一
 方向に引き抜く形式で行われており、コンクリートは鋼板による拘束力を受けていない。しかし、本研究
 で対象としているオープンサンドイッチ構造においては、コンクリート部材が上下フランジに挟まれている
 ため、拘束された状態にあると考えられる。また、リブの形状や、リブから発生するひびわれの分布の
 しかたにも違いがあるため、これらの影響を考慮した接合要素モデルを新たに構築する必要がある。

4.3 解析結果

すべての供試体の有限要素解析結果をもとに、ウェブ鋼板の厚さ
 や高さ、上フランジの厚さの違いが、供試体の変形状、耐力に与
 える影響を見るため、それぞれ項目ごとに比較を行う。

(1) 変形状

まず、図 12 に示すウェブ鋼板の厚さによる比較を行う。たわみが
 2~3mm 付近において、剛性が低下する（ウェブが降伏し始める）
 点に着目すると、H327、H457、H607 の順にウェブが厚くなるほど
 対応する荷重もたわみ量も大きくなる。また、ウェブの高さによる
 比較（図 13）を同じ観点で行うと、対応するたわみ量は同じ大きさ
 だが、荷重はウェブの高さが大きい供試体（H457）の方が大きい。
 これと対照的に、上フランジ幅による比較（図 14）を行うと、対応
 する荷重は同じ大きさだが、たわみ量は上フランジ幅の小さい供試
 体（H453）の方が大きいことがわかる。

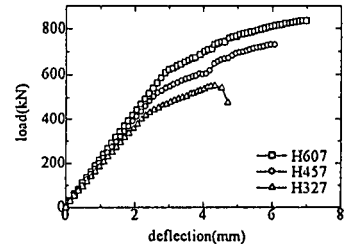


図 12 荷重－たわみ曲線

＜ウェブの厚さ＞

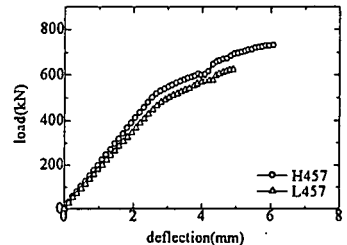


図 13 荷重－たわみ曲線

＜ウェブの高さ＞

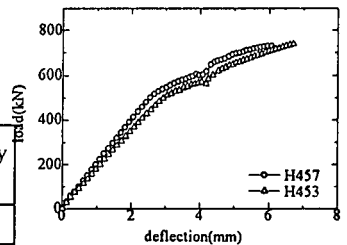


図 14 荷重－たわみ曲線

＜上フランジ幅＞

(2) 終局耐力

表 2 は、実験と解析の両方から得られたせん断耐力と、計算による
 曲げ耐力を示している。

解析結果によると、ウェブ鋼板が厚く、高いほど耐力が大きいと
 言える。上フランジ鋼板の幅は今回の解析では耐力に影響を及ぼさ
 ないが、幅が大き過ぎ
 るとコンクリート部分
 は分断されやすく、逆
 に小さ過ぎるとウェブ
 鋼板に応力を伝え難く
 なり、耐力が小さくな
 ると考えられる。

表 2 破壊耐力

specimen	Experiment (kN)	Analysis (kN)	Flexural capacity (kN)
H327	-	549	919
H457	762	730	928
H607	-	834	938
H453	-	738	670
L457	-	623	737

5. まとめ

- 1) 有限要素解析により破壊性状を概ね把握することができ、実験と解析の両面から T 型ウェブのせん断補強効果が認められた。
- 2) 今回の有限要素解析結果から、ウェブ鋼板が厚く、高さが高いほど耐力が大きくなることが明らかになった。また、上フランジ鋼板の幅は耐力に影響を及ぼさない結果が得られた。
- 3) コンクリートの拘束圧およびひびわれの影響を考慮できるように、接合要素を改良する必要がある。

謝辞

本実験を進めるに当たり、材料の手配ならびに提供して頂いた新日本製鐵の広沢規行氏、また、実験に際して多大なる御助力を頂いた北海道大学・木村勉技官、同大学構造工学講座ならびにコンクリート工学講座の教職員、学生の方々に、この場をお借りして深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 土木学会構造工学委員会、鋼・コンクリート複合構造研究小委員会：合成構造用鋼材の利用に関する調査研究報告書、1993 年 3 月
- 2) ナレス パンタラトーン：鉄筋コンクリートはりにおけるせん断抵抗機構の有限要素解析、東京大学博士論文、1991 年 3 月
- 3) Chin Chee-Kiong : Experimental Study on Plate Shear Connector for Composite Construction , Thesis No.ST-88-8 , Asian Institute of Technology , April 1988