

(12) 未充填部を有するサンドイッチ部材の基本的な力学性状

MECHANICAL PROPERTIES OF INCOMPLETELY FILLED COMPOSITE  
STEEL AND CONCRETE SANDWICH MEMBERS

清宮 理\* 木村秀雄\*\* 渡辺英夫\*\*\*

By Osamu KIYOMIYA, Hideo KIMURA and Hideo WATANABE

When concrete with high flowability is cast into compartments of sandwich members, there is danger that the concrete is not filled completely in these compartments. To know influence of incompletely filled parts to mechanical properties of the sandwich members, loading tests are carried out. In the test specimens, unfilled part is between the upper steel plate and the flange of steel angles. Through the loading tests, decrease of strength of incompletely filled sandwich members is at most 20 % in it is made clean that comparison with a completely filled sandwich member. Failure mechanisms as to bending moment and shear is not appreciable different between them.

1. はじめに

沈埋函の主要構造部材に鋼・コンクリートサンドイッチ構造を適用した沈埋函の建設が計画されている。この構造では、普通コンクリートでの施工が困難な上床版と側壁部材等には高流動コンクリートが充填施工される。『鋼コンクリートサンドイッチ構造設計指針(案)』等<sup>1)2)</sup>では、鋼殻内部にはコンクリートが完全充填されて鋼殻とコンクリートが一体になって挙動することを前提として構造設計を行うこととなっている。施工管理を十分に行えば未充填部の発生は防止できるが、万一充填が十分でないことも想定される。しかしながら、未充填部の存在するサンドイッチ構造の力学特性には不明な点が多い。そこで、沈埋函(図-1参照)の上床版を対象として、コンクリートの未充填部を有するモデルはり部材の供試体を用いた載荷実験を行い、未充填部が曲げ耐力とせん断耐力に及ぼす影響について調べた。

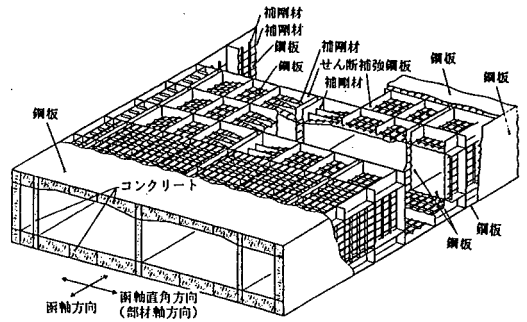


図-1 サンドイッチ部材による沈埋函構造

\* 工博 運輸省港湾技術研究所構造強度研究室長 \*\*工修 新日本製鐵株式会社鉄鋼海洋事業部掛長  
\*\*\* 工修 (株)オリエタルコンサルタンツ東京事業部特殊構造室長

## 2. 実験の概要

### 2.1 供試体の製作

図-2に供試体の概要を示す。曲げ載荷実験用の供試体寸法は、長さ=360cm、高さ=30cm、幅=25cmである。また、せん断載荷実験用の供試体寸法は、長さ=160cm、高さ=30cm、幅=25cmである。せん断補強鋼板の配置方向は、部材軸に対して直角方向（ダイヤフラムタイプ）と、平行方向（フルウェーブタイプ）の2種類とした。供試体の縮尺は実物の約1/3である。ダイヤフラムタイプでのせん断補強鋼板の間隔は、曲げ供試体で中央部が100cm、その両側で60cmである。鋼板とコンクリートの一体化は山形鋼により行う。山形鋼の寸法はL50x50x6であり30cm間隔に配置した。曲げ供試体における上下の鋼板とウェブの板厚は3.2mm、ダイヤフラムの板厚は4.5mmである。せん断供試体（フルウェーブタイプ）では、上側鋼板とウェブの板厚は4.5mm、下側鋼板の板厚は19mmである。上下鋼板の板厚の差異は、沈埋函では函軸直角方向が構成部材の主方向となるため、上床版のせん断設計では函軸直角方向（供試体の部材軸方向）に配置したせん断補強鋼板によって全せん断力を分担させている。このため、実際の沈埋函では上床版の曲げ耐力はせん断耐力を大きく上回っておりせん断破壊が先行することはないが、本実験では引張側の鋼板板厚を増厚してせん断破壊を生じる供試体とした。未充填部は、コンクリート打設時に発泡スチロールを山形鋼位置に埋設して模擬した。未充填の大きさは、図-3に示すように圧縮側の山形鋼に対しては高さの0, 10, 50, 100%の4ケースとし、引張側の山形鋼に対しては高さの50%とした。この数値を未充填率（未充填深さ/山形鋼の高さ）とここでは定義する。

使用した鋼材の材質は全てSS400である。板厚(t)19mmの鋼板の降伏強度は、 $\sigma_{sy}=2767\text{kgf/cm}^2$ 、 $t=3.2\text{mm}$ は $\sigma_{sy}=2995\text{kgf/cm}^2$ 、 $t=4.5\text{mm}$ は $\sigma_{sy}=3556\text{kgf/cm}^2$ である。コンクリートは、早強コンクリートと呼び強度 $240\text{kgf/cm}^2$ 、粗骨材は碎石で最大寸法20mmである。高流動コンクリートは使用していない。コンクリートの打設は梁を横向きに置いて行う。

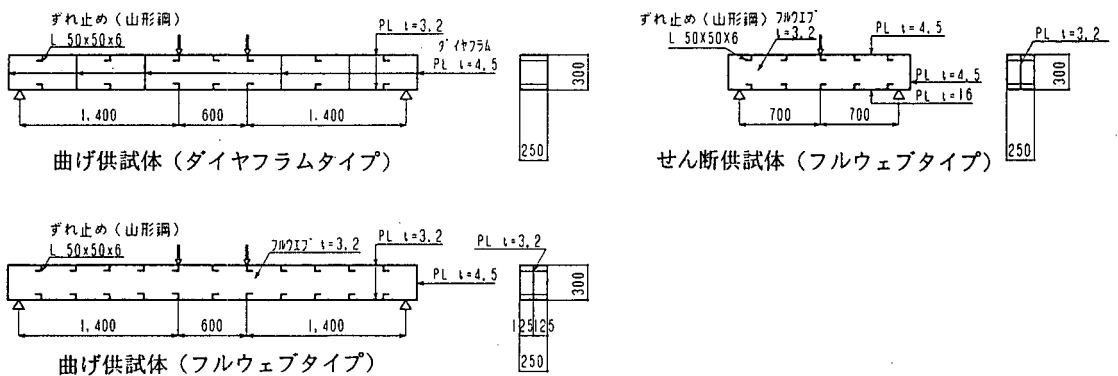


図-2 供試体構造図

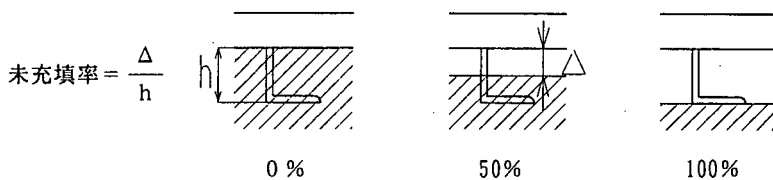


図-3 未充填率の定義

### 2.2 実験ケース

実験ケースを表-1に示す。曲げ載荷実験では、未充填率を0%, 50%および100%とし、せん断載荷実験では0%, 10%, 50%および100%とした。また、せん断載荷実験では供試体の引張側における未充填の影響を調べるた

め未充填率50%の供試体を製作した。

表-1 実験ケース

未充填 位置	未充填率	曲げ 載 荷 実 験		せん断 載 荷 実 験
		せん断補強鋼板の配置方法		
		フルウェブタイプ	ダイヤフラムタイプ	フルウェブタイプ
圧縮側	0%	●W00%	●D00%	●W00%
	10%	—	—	●W10%
	50%	●W50%	●D50%	●W50%
	100%	●W100%	●D100%	●W100%
引張側	50%	—	—	●WL50%

### 2. 3 載荷方法と計測項目

曲げ載荷実験は2点支持・2点載荷（載荷点間隔は60cm）とし、せん断スパン比は4.7である。せん断載荷実験は2点支持・支間中央1点載荷とし、せん断スパン比は2.33である。載荷は静的単調載荷とし、コンクリートのひびわれ発生荷重と鋼材の初期降伏荷重で一旦除荷しその後終局まで載荷を行った。鋼材降伏までは荷重漸増方式で、その後は変位制御方式で載荷を行った。測定項目は、油圧ジャッキの荷重、供試体のたわみ、鋼板（上下鋼板、ウェブ）のひずみ、コンクリートのひずみおよびひびわれ幅である。

## 3. 実験結果

### 3. 1 曲げ載荷実験の結果

破壊形態はダイヤフラムタイプ、フルウェブタイプのいずれの供試体でもほぼ同様の結果となった。表-2に実験結果の一覧を示す。図-4に未充填率100%の供試体でのひびわれ状況を示す。終局に至る挙動は、初めに曲げスパン中央部の山形鋼から曲げひびわれが発生し、続いてせん断スパン部の山形鋼からひびわれが発生・進展した。ひびわれの発生は山形鋼に集中しているが、フルウェブタイプでは、載荷点間で山形鋼と山形鋼の間にも曲げひびわれが発生した。その後せん断スパン部での曲げひびわれはせん断ひびわれに進展した。引張側鋼板の降伏後は、供試体の鉛直変位が急速に進み、圧縮側鋼板が座屈した。曲げスパン中央部の圧縮域のコンクリートが圧壊して終局状態に至った。図-5に供試体の載荷荷重とスパン中央部の鉛直変位の関係を示す。ダイヤフラムタイプ、フルウェブタイプとも未充填率の違いによる破壊形態の相違は見られなかったが、それぞれのタイプとも未充填率が大きくなるほど曲げ耐力は低下した。曲げ耐力は、ダイヤフラムタイプ、フルウェブタイプとも100%未充填供試体で完全充填供試体の約80%に低下した。ただし鋼材降伏後も、載荷荷重は低下することなく良好なじん性が得られた。

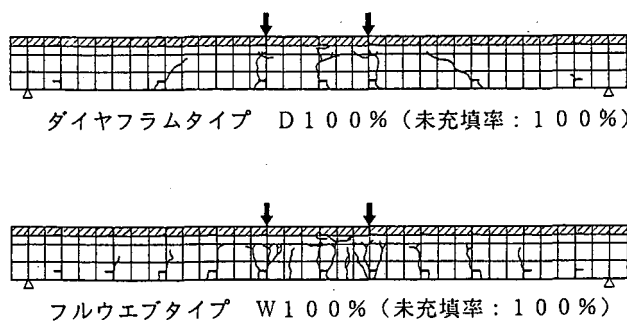


図-4 ひびわれ図

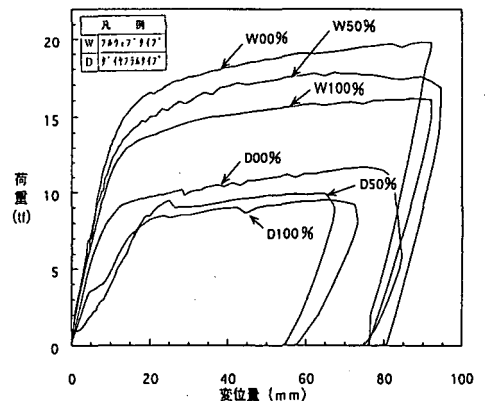


図-5 荷重～変位曲線

### 3. 2 セン断載荷実験の結果

載荷に伴う各供試体の破壊に至る挙動はほぼ同一であった。初めにスパン中央部に曲げひびわれが発生し、せん断スパンの中央付近の引張側の山形鋼からの斜め方向にせん断ひびわれが発生した。載荷点付近の上側鋼板がコンクリートより剥離した。載荷点直下のせん断補強鋼板の中央付近で鋼材が降伏し、その後下側鋼板が降伏した。さらに上側鋼板に座屈が観察され、ウェブコンクリートの圧縮破壊となった。図-6に示すようにいずれの供試体でも斜めせん断ひびわれは、下側鋼板の山形鋼から載荷点直下または隣接する山形鋼に向かって、 $\theta=30\sim 40^\circ$  の角度で生じていた。支点からのせん断ひびわれは顕著でなかった。荷重～変位曲線を図-7に示す。未充填率が大きいほどせん断耐力は低下した。圧縮側の一様な未充填の大きさ（未充填率）と最大荷重の関係はほぼ直線的な傾向にあり、未充填率の増加に伴って最大荷重は減少した。未充填率が100%であると最大荷重は70%ほどに低下した。また、下フランジ側に未充填を有する場合には圧縮側に未充填を有する場合よりも最大荷重は減少した。この主な要因は本構造において鋼板とコンクリートとを一体化する役割は上側鋼板よりも下側鋼板の山形鋼の方が大きく、山形鋼の周囲に未充填が存在すると、山形鋼のずれせん断剛性と耐力の低下の影響がでたものと推定される。また、せん断補強鋼板の斜め圧縮応力（はり高さの中心位置）の方向はこれにほぼ直交する $\alpha=60^\circ$  となっている。以上述べたとおり、一様な未充填が存在する場合でも、曲げ圧縮領域のコンクリートが圧縮弦材、下側鋼板が引張弦材、ウェブコンクリートが斜め圧縮部材、せん断補強鋼板が斜め引張部材としての力を伝達しており、トラス機構が成立していることが確認できた。

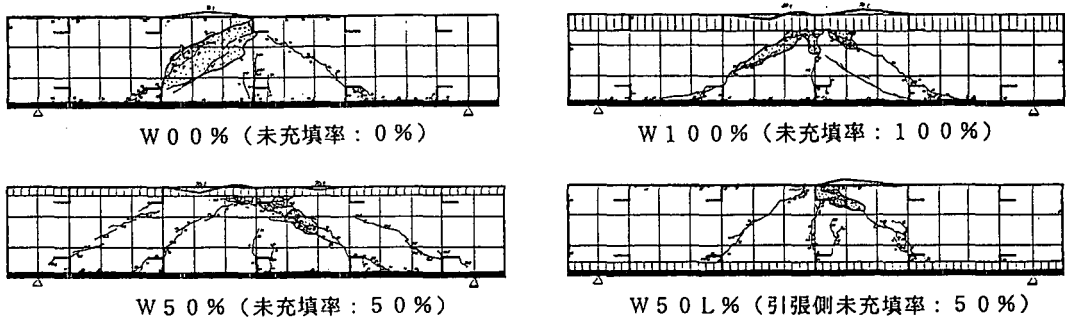


図-6 ひびわれ図（フルウェブタイプ）

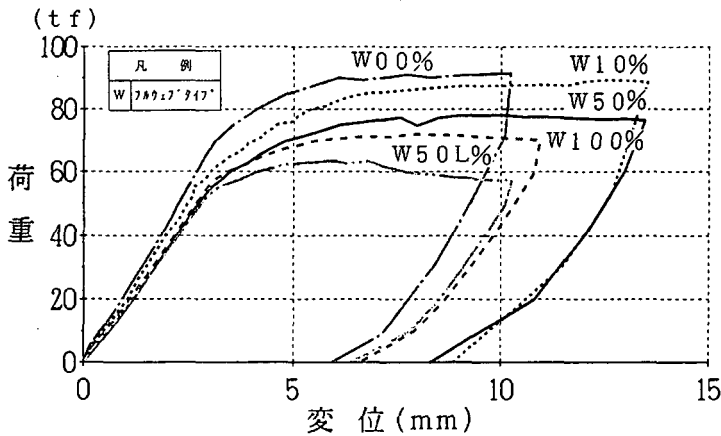


図-7 荷重～変位曲線

#### 4. 計算値と実験値との比較

##### 4.1 曲げ耐力に関する比較

曲げ耐力の計算は、断面切断法により行った。この際未充填部分の圧縮抵抗は考慮せず通常の複鉄筋コンクリートとして計算した。計算に用いた材料の強度は、材料試験値から求めた値を使用した。表-2に計算値と実験値との比較を示す。フルウェブタイプでは最大荷重で実験値が計算値を20~30%上回っているが、ダイヤフラムタイプでは実験値と計算値はほぼ一致している。フルウェブタイプで計算値より実験値が上回っている理由は、計算ではウェブを考慮していないためである。図-8に未充填率と最大荷重との関係を示す。計算値と実験値は比較的一致しており、今回の計算法により未充填の影響を良く説明できることが分かった。

表-2 実験値と計算値の比較

	未充填率	ダイヤフラムタイプ°			フルウェブタイプ°		
		0%	50%	100%	0%	50%	100%
ひび割れ	計算値(tf)	1.83	1.51	1.24	1.83	1.51	1.24
発生荷重	実験値(tf)	1.40	2.80	2.70	2.00	1.20	1.60
許容応力	計算値(tf)	4.43	4.29	4.29	5.71	5.57	5.43
度 荷重	実験値(tf)	4.90	5.00	4.50	7.00	6.10	6.10
降伏応力	計算値(tf)	8.71	8.43	8.29	11.00	10.57	10.29
度 荷重	実験値(tf)	8.00	7.70	7.50	11.60	10.10	9.80
最 大	計算値(tf)	10.86	10.00	9.71	14.86	14.00	13.29
荷 重	実験値(tf)	11.60	9.90	9.50	19.80	17.70	16.10

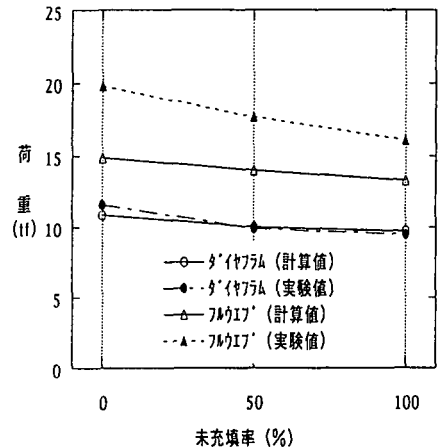


図-8 未充填率と載荷荷重の関係

##### 4.2 せん断耐力に関する比較<sup>4)</sup>

せん断耐力の計算値は、鋼コンクリートサンドイッチ構造設計指針(案)に示されるウェブコンクリートの斜め圧縮破壊耐力の計算式により算出した。この際の材料強度は実験値を使用し、部材係数を1.0とした。圧縮側に未充填がある場合には、コンクリート上面から下側鋼板までを有効高さとした。実験値と計算値の比較を表-3に示す。両者の最大荷重はほぼ一致した。未充填率と最大荷重の関係を図-9に示す。未充填率が大きくなるに従って最大荷重は低下傾向にある。今回の計算方法によれば未充填によるせん断耐力の低下を考慮できることが分かった。

表-3 実験値と計算値の比較

	未充填位置	圧 縮 側				引張側
		未充填率	0%	10%	50%	100%
曲げひびわれ	実験値(tf)	12.5	10.9	11.1	13.5	6.5
発生荷重	実験値(tf)	62.4	55.0	55.1	55.4	52.5
せん断補強	実験値(tf)	89.8	86.9	—	—	—
鋼板降伏荷重	ひずみ( $\mu$ )	—	—	1200	1279	1279
下フランジ	実験値(tf)	92.0	89.3	78.1	71.9	63.5
降伏荷重	計算値(tf)	90.2	82.7	76.0	64.7	—
最 大 荷 重	実験値(tf)	92.0	89.3	78.1	71.9	63.5
	計算値(tf)	90.2	82.7	76.0	64.7	—

注1) 未充填率50%以上では下フランジは降伏ひずみ ( $\epsilon_{sy}=1319\mu$ )まで到達しなかった。

注2) 最大荷重はウェブコンクリートの圧壊で決定される。

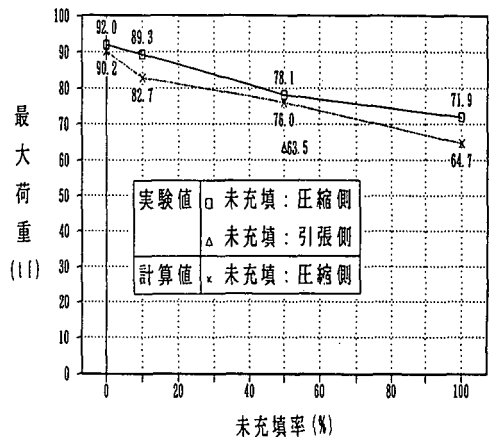


図-9 未充填率と最大荷重の関係

## 5. 結論

### (A) 曲げ載荷実験

いずれの供試体も、曲げひびわれが山形鋼より集中的に発生した。下側鋼板の降伏、上側鋼板の座屈が生じた後、曲げスパン内のコンクリートが圧壊した。未充填率が大きくなると曲げ耐力は減少し、100%の未充填率では完全充填に対して20%ほど最大荷重が低下した。しかし、今回設定した未充填率の範囲では、未充填率の違いによる破壊形態の相違は見られなかった。

断面切断法で、未充填部分の圧縮抵抗を無視して曲げ耐力を計算し、実験値と比較したところ、ダイヤモンドタイプについてはほぼ両者が一致した。フルウェブタイプについては、計算値の方が実験値より20~30%小さくなった。しかしながら、今回の計算法によれば未充填を考慮した曲げ耐力を計算できることが分かった。

### (B) せん断載荷実験

フルウェブタイプの各供試体ともせん断スパンの中央付近の山形鋼から載荷点に向かってせん断ひびわれが生じた。このせん断ひび割れの角度は、30~40度であった。ウェブコンクリートの圧縮破壊で終局に至った。圧縮側の未充填率の増加とともに最大荷重は低下した。耐荷機構はトラス理論により説明できそうである。『鋼コンクリートサンドイッチ指針(案)』の斜め圧縮耐力の算定式を用いたせん断耐力は、実験値にほぼ一致した。計算において圧縮側の未充填の影響は有効高さをコンクリート上面から下側鋼板まで取ることで考慮した。

また、引張側に一樣な未充填部がある場合には、圧縮側にある場合に比べて最大荷重は小さくなった。

### [参考文献]

- 1) 土木学会：鋼コンクリートサンドイッチ構造設計指針(案)，コンクリートライブラリー 73, 1992
- 2) 運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所：神戸港港島トンネル沈埋部合成構造設計指針(案)，内部資料，1995.3
- 3) 横田弘、清宮理：鋼コンクリートハイブリッド梁の力学特性に関する研究、土木学会論文集, No. 451/V, pp. 149-158
- 4) 上田多門、ナレス パタラトーン アヌーア ヤーヤ ビン：サンドイッチタイプの合成構造部材の終局せん断強度、第2回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集、土木学会、pp. 143-148, 1989.9