

報告 鋼コンクリートサンドイッチ構造を採用した神戸港港島トンネル 沈埋函の設計法

渡辺英夫*¹、佐藤正一*²、稲垣紘史*³、鈴木雄三*⁴

要旨：神戸港港島トンネルの沈埋函では、施工性および経済性等の向上を計るために、鋼コンクリートサンドイッチ構造がわが国で初めて採用された。採用にあたっては本構造に関する課題解決および構造の信頼性を確認する必要があったため、各種の構造実験を実施して設計法を確立した。本報告は、沈埋函の構造、構造実験の概要および設計法について報告するものである。

キーワード：沈埋函、鋼コンクリートサンドイッチ構造、構造実験、設計法

1. はじめに

神戸港では、ポートアイランド（第2期）等の整備・利用に伴い、今後増大する交通量を円滑に処理するためにポートアイランドと既成市街地とを結ぶ神戸大橋に続く第2の道路として、沈埋トンネルの建設が計画されている。沈埋区間の延長は約520mで6函の合成構造方式沈埋函から構成される。合成構造方式の沈埋函としては、側壁と下床版にオープンサンドイッチ構造が採用されている大阪南港トンネル〔1〕がある。本沈埋函の2～6号函では大阪南港トンネルの合成構造方式に対して、さらなる施工性の向上、工期短縮ならびに経済性の向上をめざして、上床版と側壁にわが国で初めての鋼コンクリートサンドイッチ構造（以下、フルサンドイッチ構造と呼ぶ）を採用することとした。本構造の設計法に関しては、土木学会：鋼コンクリートサンドイッチ構造設計指針（案）〔2〕（以下、サンドイッチ指針と呼ぶ）があるが、本沈埋函への適用にあたっては各種の問題点があったため、各種の構造実験と検討を実施して設計法を確立した。本報告では、沈埋函の構造、設計上の課題、構造実験および設計法の概要について述べる。

2. 沈埋函の構造および施工法の概要

本沈埋函の標準断面図を図-1に示す。上床版と側壁は鋼板とそれに挟まれたコンクリートがシアコネクタにより一体となって挙動する『フルサンドイッチ構造』、下床版は部材外側の鋼板とコンクリートを一体化した『オープンサンドイッチ構造』、隔壁と中壁はRC構造である。なお、フルサンドイッチ構造は、沈埋函軸方向に約3m間隔で配置したせん断補強鋼板（ダイヤフラムと呼ぶ）と沈埋函軸直角方向に約3m間隔で配置したせん断補強鋼板（せん断補強鋼板と呼ぶ）からなる鋼殻構造に高流動コンクリートを充填して施工される。

沈埋函の構造形式の選定にあたっては、部材の種類（上床版、側壁、下床版）と合成構造の種類（オープンサンドイッチ構造、フルサンドイッチ構造）とを組合せた各種の構造形式について比較検討し、施工性の向上、工期短縮ならびに経済性の向上に優れたものを採用した〔3〕〔4〕。

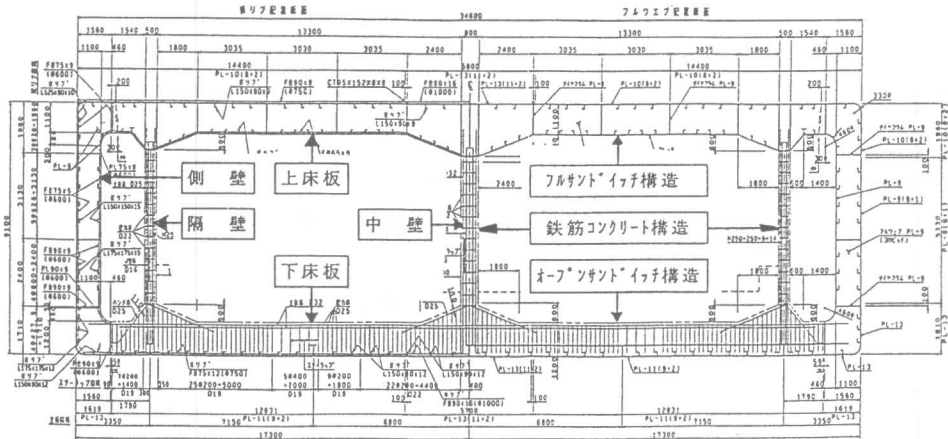
*1 (株)オリエンタルコンサルタンツ東京事業本部総合技術部特殊構造室長、工修（正会員）

*2 (財)沿岸開発技術研究センター第一調査研究部長、工修

*3 運輸省第三港湾建設局長、工修

*4 運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所長

沈埋函の施工は、Aドックでの鋼殻組立→浮上・ドックシフト→Bドックでの鋼殻内へのコンクリート打設（底版：普通コンクリート、床版・隔壁・中壁：高流動コンクリート）→浮上・曳航→沈設・埋戻しの順序で行う計画である。

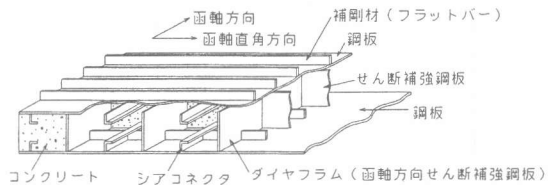


図一 沈埋函の標準断面図

3. 合成構造に関する実験概要

3.1 設計上の課題

フルサントイッチ構造部材の設計は、2. に示した全ての施工段階と供用時に対して行う。その内容は、鋼殻とコンクリートとが一体となる前の鋼殻構造の設計と、一体となった後の合成構造の設計からなる。すなわち、鋼殻構造の設計は鋼殻組立時・浮上曳航時・高流動コンクリート施工時の荷重作用に対して、フルサントイッチ構造の設計は供用時荷重に対して行う。



図二 上床版の鋼殻構造のイメージ

設計にあたっては、サントイッチ指針が参考となるが、本沈埋函への適用にあたっては以下のような課題が抽出された [5]。

- ① シアコネクタの設計法：設計に使用するシアコネクタの寸法が、サントイッチ指針作成の際に参考とされている実験のものより大型となるため、ずれせん断耐力や配置間隔の影響を実構造に合わせて実験による確認を要する。
- ② 隅角部の補強構造：隅角部はせん断力や曲げモーメントが大きく、応力集中も起こりやすいため、構造上の弱点とならないような構造ディテールでなければならない。しかし、サントイッチ指針には設計方法や構造ディテールが規定されていないため、検討を要する。
- ③ 施工時応力の取扱い：高流動コンクリート充填時に鋼殻には型枠としての作用応力（板曲げ応力および膜応力）が生じる。この応力はコンクリート硬化後の合成部材に残留するが、取扱いが明らかでないため検討を要する。
- ④ 設計上の技術的信頼性の確認：本構造の適用が実構造物に対しては初めてであるため、組み立てた設計手法によって設計された構造が安全なものとなっているかどうかの確認を要する。
- ⑤ 高流動コンクリートの充填性：フルサントイッチ構造を実現するためには、閉塞された鋼殻内（特にシアコネクタ・ダイヤフラムと鋼板の接合部付近）に高流動コンクリートを確実に充填しなければならないが、本構造に対する最適配合、フレッシュ時の性質、充填性、充填方法、品質

管理の方法などが明らかでないため、充填実験に基づく検討を要する。

3.2 合成構造に関する基本実験

上記の課題を解決するため、①山形鋼ずれ止めせん断実験、②隅角部強度確認実験、③はり部材曲げ載荷実験、④施工時応力影響確認実験、⑤高流動コンクリートの充填性実験を実施し、そこで得られた知見を設計へ反映させることとした。ここでは、構造実験に関する記述のみを行う。

(1) 山形鋼ずれ止めせん断実験 表-1 実験の目的(設計上の課題)と実験の種類

鋼板(SS400, 板厚9mm, 幅40cm)に設計使用サイズ(山形鋼(SS400, 150×90×9)を溶接しコンクリート($\sigma_{28}=399\text{kgf/cm}^2$)に埋め込んだ2面せん断型の供試体を製作し、ずれせん断実験を行った[6]。供試体の形状寸法を図-3、ずれせん断耐力の一覧を表-2に示す。

構造実験の種類	実験の目的(設計上の課題)
形鋼ずれ止めせん断実験	・大きなサイズの山形鋼のずれせん断耐力の確認: 載荷方向と形鋼の向きの影響、形鋼の配置間隔の影響、寸法効果
隅角部強度確認実験	・隅角部の構造ディテールの適用性の確認: サークルハンチ寸法、補剛材の配置方法 ・耐力および破壊形態
はり部材載荷実験	・RC慣用理論の適用性の確認: 設計荷重時の安全性、構造挙動の把握 ・大型のフルサンドッチ構造はり部材の構造挙動、耐力
施工時応力影響確認実験	・施工時(高流動コンクリート充填時)の板曲げ応力が終局曲げ耐力に及ぼす影響

表-2 山形鋼のずれせん断耐力

ケース名	実験要因			コンクリートの圧縮強度 $\sigma_{28}(\text{kgf/cm}^2)$	実験値 (tf)	計算値 (tf)	実験値 計算値
	向き	個数	間隔				
A-1-(a)	上	1	-	399	81.8	116.9	0.70
A-1-(b)	下	1	-	399	75.0	117.0	0.71
A-2-(a)	上	2	60cm	399	180.0	191.5	0.94
A-2-(b)	下	2	60cm	400	149.0	192.0	0.78
A-3-(a)	上	2	90cm	418	187.8	213.5	0.88
A-3-(b)	下	2	90cm	418	159.9	212.3	0.75

本実験の結果より以下のことが確認された。

- ・実験値は計算値(文献[2]における安全係数をすべて1.0とした場合)に比べて、山形鋼が1個の場合で約30%、2個の場合で約20%小さい。

- ・山形鋼の刃先が上向き(前面が支圧面)の場合の耐力は、下向きの場合に比べて約10%小さい。
- ・山形鋼を60cmまたは90cm間隔で2個配置した場合の耐力は、1個の場合の耐力の2倍程度となり、配置間隔の影響は見られない。

(2) 隅角部強度確認実験

フルサンドイッチ構造の上床版と側壁が結合する隅角部を対象に、模型供試体(縮尺1/1.5)を製作し、実構造の設計曲げモーメント分布を考慮して実験を行った。供試体の形状寸法を図-4に、最大荷重時のひびわれ状況を写真-1に示す。また、各種荷重段階における実験値と計算値の比較結果を表-3に示す。

本実験の結果より以下のことが確認された。

- ・鋼板の引張応力度が許容応力度、降伏点応力度および最大荷重到達時の実験値はRC慣用理論による計算値とほぼ一致する。
- ・隅角部のサークルハンチ部には、支圧破壊は生じない。
- ・ひびわれは山形鋼の刃先から生じる。最大荷重は隅角部付け根の鋼板の引張降伏で決定され、

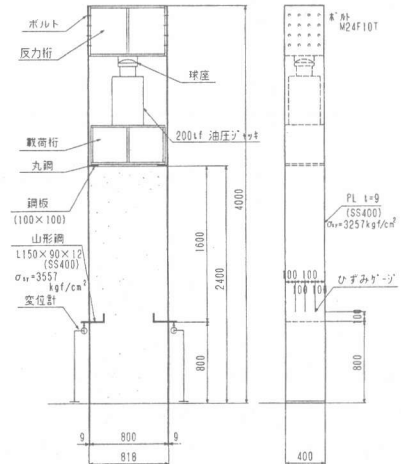


図-3 供試体の形状寸法

耐力は確保される。

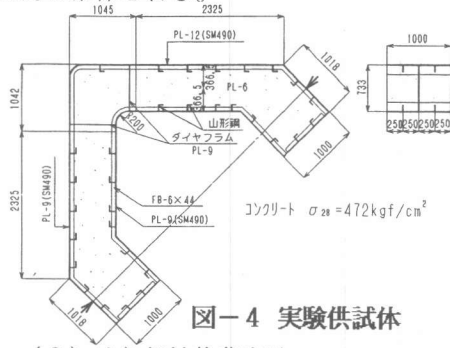


図-4 実験供試体

(3) はり部材載荷実験

沈埋函上床版の支間部を対象とした実物大のはり供試体を製作し、2点載荷による曲げ試験を行った。供試体の形状寸法を図-5に、各種荷重段階における実験値と計算値の比較結果を表-4に示す。

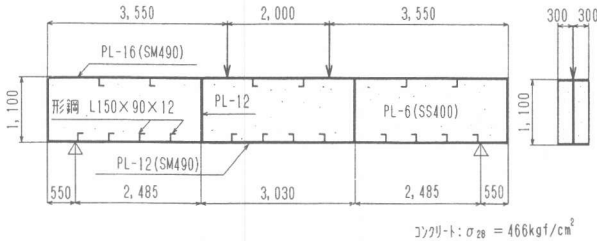


図-5 実験供試体

本実験の結果より以下のことが確認された。

- ・鋼板引張応力度が許容応力度、降伏点応力度および曲げ破壊に到達する時の載荷荷重の実験値は、RC慣用理論による計算値とほぼ一致する。
- ・支間中央の設計荷重時における断面内のひずみ分布は、ほぼRC慣用理論と一致する。
- ・山形鋼をシアコネクタとして使用しても、鋼板とコンクリートの間には安全性を損なうようなずれは生じない。
- ・すなわち、本構造はRC構造と同等以上の耐荷性能を有しており、RCの慣用理論に基づいて設計することができる。

(4) 施工時応力影響確認実験

高流動コンクリート施工時に、鋼殻には型枠作用による板曲げ応力と膜応力が発生し、コンクリート硬化後は合成部材に残留する。この残留応力がフルサンドイッチ構造部材の終局耐力に与える影響(鋼板の座屈、剛性および耐荷力の低下等)が明らかでないため、初期応力として圧縮応力または引張応力を導入した模型はり供試体を用いた2点載荷による曲げ載荷試験[7]を行った。

本実験の結果より以下のことが確認された。

- ・鋼板の施工時圧縮応力を想定した実験では、鋼板の座屈による供試体全体の剛性低下を示すたわみの増大や耐力の低下は無く、その耐力はサンドイッチ指針による計算値より安全側となっている。

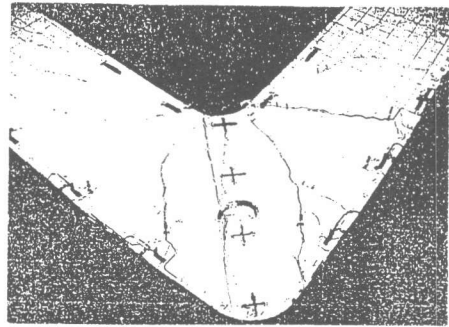


写真-1 隅角部ひびわれ状況

表-3 実験値と計算値の比較

		許容応力時	鋼材降伏時	最大荷重時
上床版	実験 (tf)	100	185	224
	計算 (tf)	94.8	195.3	221.2
側壁	実験 (tf)	90	150	224
	計算 (tf)	76.7	154.6	179.6

表-4 実験値と計算値の比較

		許容応力時	鋼材降伏時	最大荷重時
荷重 (tf)	実験値	116	220	305
	計算値	113.1	225.9	274.8
	比率	(1.03)	(0.97)	(1.11)
変位 (cm)	実験値	1.099	2.389	17.08
	計算値	0.913	1.834	-
	比率	(1.20)	(1.30)	-

・鋼板の施工時引張応力を想定した実験では、初期引張応力が耐荷力に及ぼす影響は見られなかった。また、その他の挙動（初期剛性、荷重変位関係）に関しても顕著な影響はなく、わずかに曲げひびわれ後の剛性が低下する傾向のみが見られた。

3.3 充填不良の影響に関する実験

フルサンドイッチ構造は、鋼殻と内部コンクリートが合成構造として完全に一体化された構造であるため、使用するコンクリートは密閉された鋼殻内部へ十分充填されるものでなければならない。このため、高流動コンクリートの配合や打設方法と充填性の関係に関する各種の施工実験を行い、性質を明らかにした。また、鋼殻内部や山形鋼周囲の充填状況がフルサンドイッチ構造へ及ぼす影響に関して、山形鋼ずれどめせん断実験、はり部材実験および解析検討等を行い傾向を把握した。

充填不良に関しては、当プロジェクトに対して検討された高流動コンクリートおよび施工管理方法によれば、構造的に影響のないコンクリートが施工される見通しが得られている。

4. 合成構造沈埋函の設計法

上記3. に示した構造実験結果および試算検討等に基づいて、詳細設計に際して『神戸港港島トンネル沈埋部合成構造設計指針（案）』を策定した。以下に、フルサンドイッチ構造設計上の主な要点を示す。

① 設計法の書式：フルサンドイッチ構造に対する設計の考え方は、基本的にサンドイッチ指針に準じている。同指針には部分安全係数法の書式（限界状態設計法）が採用されているが、本沈埋函の設計では従来設計法との整合性や荷重係数の設定などに関する問題があったため、設計荷重作用時の検討は大阪南港トンネルの合成構造設計指針 [8] に準じて、許容応力度設計法を基本とし、終局荷重作用時は終局耐力（曲げ、せん断およびシアコネクタのずれせん断）を照査する体系とした。本設計法では照査すべき状態を明確にし、安全性の検討方法はサンドイッチ指針や実験結果を反映させて規定した。

② 軸方向力と曲げモーメントに対する設計：はり部材載荷実験結果からRC慣用理論の適用性が確認されたため、引張鋼板を引張鉄筋とみなしその応力度を許容応力度以下とすることとした。

③ せん断力に対する設計：サンドイッチ指針を参考にして、以下のように設計方法を定めた。コンクリートの平均せん断応力度 τ_m が許容せん断応力度 τ_{sa} (=4.5kgf/cm²、 σ_{ck} =300kgf/cm²の場合) を超える場合には、沈埋函軸直角方向（フルサンドイッチ合成部材としての部材軸方向）に配置したせん断補強鋼板（板厚 t_w ）で全せん断力を分担させるものとした。

$$t_w = S / [\sin^2 \alpha (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot Z \cdot \sigma_{sa}] \quad \text{-----} \quad (1)$$

ここに、S：せん断力、Z：圧縮応力の合力の作用位置から引張応力の合力の位置までの距離、 α ：トラス機構を形成するせん断補強鋼板中の引張斜材が部材軸となす角度（60°）、 θ ：コンクリートの圧縮斜材と部材軸となす角度で、30° もしくは $\cot^{-1} (\alpha / z)$ のうちの大きい方の値とする。 σ_{sa} ：せん断補強鋼板の許容引張応力度（SM490Y材：2100kgf/cm²）

沈埋函軸方向に配置されたダイヤフラムは部材のせん断耐力向上への寄与は小さいため、沈埋函軸直角方向に配置したせん断補強鋼板で全せん断力を分担させることとした。なお、コンクリートの斜め圧縮破壊を防ぐために、 τ_m は τ_{sa} (=19kgf/cm²、 σ_{ck} =300kgf/cm²の場合) 以下とした。

④ ずれせん断力に対する設計：鋼板とコンクリートとの一体性を確保するために、鋼板にシア

コネクタ（山形鋼）を適当な間隔で配置する。このシアコネクタの設計は、部材軸方向の曲げモーメントの反曲点間における鋼板とコンクリートとの接合面に作用する全ずれせん断力 H_d に対して、この間に配置された山形鋼とダイヤフラムによって抵抗させるものとした。

$$\sum_{i=1}^{nsc} S_{sca_i} / H_d \geq 1.0 \quad \text{-----} \quad (2)$$

ここに、 L ：設計荷重作用時の最大曲げモーメント作用断面と曲げモーメントが0となる断面との間の区間、 H_d ：区間 L における鋼板とコンクリートとの間で単位幅あたりに作用する設計せん断力、 S_{sca_i} ：単位幅あたりの個々のシアコネクタの許容せん断力、 nsc ：区間 L における単位幅あたりのシアコネクタの総数

山形鋼に関するずれせん断実験の結果、サンドイッチ指針による計算値は、実験値に比較して大きくなるため、本実験で得られた耐力（表-2のA-1-(b)の値）に対して安全率3を見込んで許容ずれせん断力を設定した（ $L=150 \times 150 \times 12$ の場合： $S_{sca}=25 \text{tf/m}$ 、ただし、 $\sigma_{ck}=300 \text{kgf/cm}^2$ 、配置間隔 $\geq 60 \text{cm}$ 、鋼板の板厚 $\geq 8 \text{mm}$ 、山形鋼の材質はSS400）。

⑤ 隅角部の設計：隅角部の強度確認実験で、十分な安全性が確認されたため、図-1、4に示した構造ディテールによるものとし、隅角部内に対する安全性の照査は不要とした。

⑥ 施工時応力の扱い：施工時応力影響確認実験の結果、コンクリート打設時の残留応力が合成部材の耐力に及ぼす影響はわずかであるため、供用時の合成断面の算定においては施工時応力の影響は無視することとした。

4. おわりに

各種の構造実験および構造検討等の実施により、フルサンドイッチ構造の設計法を策定することができた。フルサンドイッチ構造で設計された2、3号函は平成6年11月から函体製作が始まり、平成7年秋には鋼殻内へのコンクリート打設を開始する予定である。

なお、本構造の検討、実験および設計指針（案）作成にあたっては、神戸港港島トンネル専門委員会（委員長：園田恵一郎大阪市立大学教授）で審議していただいた。ここに記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 小泉、安井、渡辺、田中：日本初の道路・鉄道併用沈埋トンネル 臨港交通施設・大阪南港トンネルの設計・施工、コンクリート工学、1993.6
- 2) 土木学会：鋼コンクリートサンドイッチ構造設計指針（案）、平成4年7月
- 3) 鈴木雄三：合成構造沈埋トンネルの開発について、運輸省第三港湾建設局『沈埋トンネル国際セミナー』講演集、1994.11
- 4) 中島由貴：沈埋トンネル、コンクリート工学、1995.1
- 5) 小島、川瀬、高橋、渡辺：フルサンドイッチ合成構造沈埋函の設計概要、土木学会第49回年次学術講演会、1994.9
- 6) 清宮、木村：形鋼によるズレ止めの耐荷力について、土木学会第49回年次学術講演会、1994.9
- 7) 山脇、園田、鬼頭：鋼・コンクリートサンドイッチ梁の圧縮鋼板の終局強度特性に関する実験的研究、土木学会第49回年次学術講演会、1994.9
- 8) 運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所：合成構造沈埋函設計指針（案）、平成4年7月