

合成構造沈埋函の開発

Development of Composite Type Immersed Tunnel Caissons

木村 秀雄^{*(1)} 関口 太郎^{*(2)} 小島 一雄^{*(3)} 盛高 裕生^{*(3)}
Hideo KIMURA Taro SEKIGUCHI Ichio KOJIMA Hiro MORITAKA

抄 録

合成構造とドライドックを必要としないプレファブ工法を二大コンセプトに、型枠、支保工を兼ねた剛性の高い鋼殻函体に洋上でコンクリート施工を行う新しい沈埋トンネルの函体製作工法の開発を行っている。このうち二重鋼殻に高充填性コンクリートを施工するサンドイッチ構造の沈埋函については、試験工事の実施、設計指針(案)の完成を以て開発を終了した。

Abstract

Nippon Steel Corporation is developing a new immersed tunnel caisson construction method on the basis of two key technologies; composite structure and prefabrication method which does not required a dry dock. In this new method, concrete is placed into the steel shell caisson with high rigidity, which serves both as a form and a support, on the sea. The development of immersed tunnel caisson of sandwich structure in which high-performance concrete is placed into the double-skin steel shell has been completed with the completion of test construction and the preparation of design guide.

1. はじめに

近年の臨海部開発の進展に伴い、大都市圏を中心にその形式の利点に注目して沈埋トンネルの計画が急増している。従来から沈埋函の製作方法は鉄筋コンクリート(RC)方式と鋼殻方式に分類されてきた。RC方式はドライドックで鉄筋コンクリートの沈埋函を製作する方式であり、鋼殻方式は造船所で鋼殻を製作した後、ドライドックではなく、海上で配筋し、型枠、支保工を組立て、コンクリートを打設して沈埋函を製作する方式である。かつて沈埋函の製作は鋼殻方式が主であったが、東京港トンネル(1976年)での大井ドライドック建設を契機に、施工が煩雑な鋼殻方式に代わってRC方式が主流となった。

鋼殻方式では鋼殻が外型枠及び止水機能を果たしているが、RC方式でも通常防水用に沈埋函の外周には厚さ6~8mmの鋼板を使用する。いずれの方式でも完成時の沈埋函の耐力は常時荷重に対して鉄筋コンクリートが受け持つように設計されており、沈埋函の外周にある鋼板は止水目的だけに使われている。

しかし、大阪港海底トンネル(1995年供用予定)では、設計の合理性を追求して国内では初めて鋼殻を構造部材と見なした合成構造方式の沈埋函がドライドックで製作されている。このような合成構造は鋼板の靱性によって破壊に至るまでの吸収エネルギーが大きく、耐震構造物に適しており、今後の沈埋函構造の主流となるものである(図1参照)。

又、今後の大量の沈埋函の需要に対して既存の製作用ドックは量

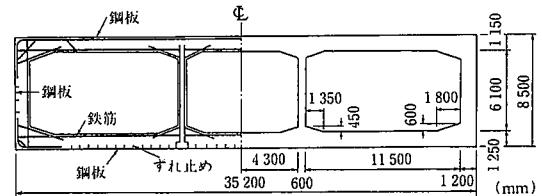


図1 大阪港海底トンネル沈埋函断面の概要

的に充分でなく、新たにドライドック用地を手当しようとしても、近隣にまとまった用地を確保することが極めて困難な状況になっている。

そこで新日本製鐵では、“合成構造”と“ドライドックを必要としないプレファブ工法”をコンセプトにしたSCS(Super Caisson Sinking)工法を考案し、実現に向けて研究開発を進めている。

2. SCS工法と合成構造沈埋函

SCS工法における基本的な沈埋函製作フローを図2に示す。工場で作製された鋼殻の小ブロックを、岸壁を有する陸上ヤードでスキッドウェイ上に大組立して鋼殻函体を完成させる。なお、鉄筋部分がある場合は陸上ヤードで配筋作業も行う。完成した鋼殻函体は半潜水式台船に引き出して固縛し、コンクリート打設現場まで輸送する。現場到着後、固縛材を撤去し台船に注水して鋼殻函体を浮上させ、岸壁に係留し、コンクリートを打設して沈埋函を完成させる。

沈埋函に一部RC部材を含め、オープンサンドイッチ、サンドイッチ

*⁽¹⁾ 鉄構海洋事業部 土木事業開発部 掛長

*⁽²⁾ 鉄構海洋事業部 土木事業開発部

*⁽³⁾ 鉄構海洋事業部 土木事業開発部 部長代理

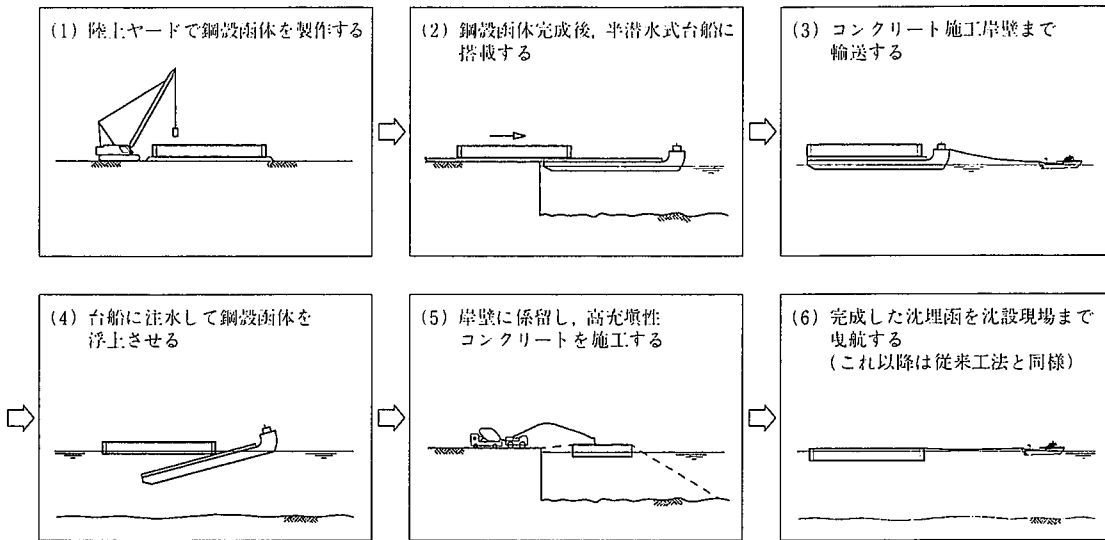


図 2 SCS工法の沈埋函製作フロー

表 1 合成構造沈埋函の形式と製作・施工上の得失

	沈埋函断面 鋼板配置模式図	構 造 形 式			浮上 打設	型枠 省略	鉄筋 省略	コンクリート充填性		備 考
		下床版	側 壁	上床版				普 通 コンクリート	高充填性 コンクリート	
(1)		オープン サンドイッチ 構造	オープン サンドイッチ 構造	RC構造	○	×	△	○	—	
(2)		オープン サンドイッチ 構造	オープン サンドイッチ 構造	オープン サンドイッチ 構造	×	×	△	○	—	
(3)		オープン サンドイッチ 構造	オープン サンドイッチ 構造	オープン サンドイッチ 構造	○	×	△	×	○	
(4)		オープン サンドイッチ 構造	オープン サンドイッチ 構造	オープン サンドイッチ 構造	○	×	△	○	—	
(5)		オープン サンドイッチ 構造	サンドイッチ 構造	オープン サンドイッチ 構造	○	×	△	×	○	
(6)		オープン サンドイッチ 構造	サンドイッチ 構造	オープン サンドイッチ 構造	○	○	△	○	—	B-タイプ
(7)		サンドイッチ 構造	サンドイッチ 構造	サンドイッチ 構造	○	○	○	×	○	A-タイプ

チ合成構造部材を適用する場合、表1に示すような構造形式が考えられる。これらからSCS工法での製作、施工を考えた場合に、その特徴が生かせるA-タイプ、B-タイプの二つの構造形式を開発対象とした。

2.1 合成構造沈埋函 (A-タイプ) の開発

本沈埋函は図3に示すように無筋構造で、部材断面の両側を鋼板で挟まれたサンドイッチ合成構造部材からなっている。両側の鋼板

は適当な間隔で剪断補強鋼材として機能する鋼ウェブで連結されている。コンクリートはこの閉断面に密実に充填、拘束され、抜け出しが防止されている。鋼板には鋼殻製作・輸送時の剛性確保、コンクリート打設時の補剛のためにリブ等は最小限必要となり、これらは鋼とコンクリートの一体性向上にも寄与する。これらは既往の実験、研究等で明らかにされているが、体系的に設計法としてまとめられたものはなかった。

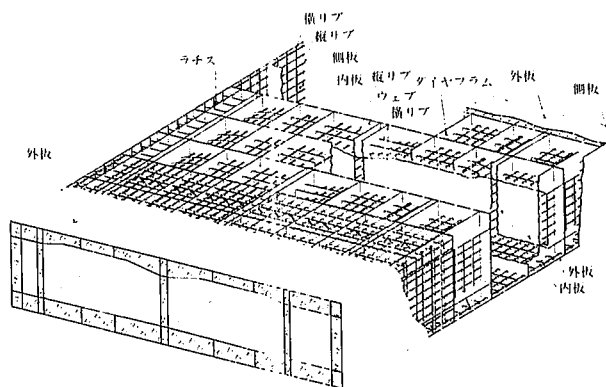


図3 合成構造沈埋函(A-タイプ)構造概要

又、閉鎖された二重鋼殻内へコンクリートを確実に充填する施工上の課題もあり、鋼殻内に打込むだけで、通常のコンクリート施工で不可欠な締め作業を不要にするコンクリート材料の開発が必須であったが、高粉末度の高炉スラグ微粉末と高性能減水剤とを適切に用いることにより、流動性に優れ、かつ高い材料分離抵抗性を有する締め不要コンクリート(高充填性コンクリート)が開発され、本沈埋函を可能にした。

この高充填性コンクリートは、東京大学工学部土木工学科コンクリート研究室岡村教授並びに新日本製鐵鉄鋼研究所鋼構造研究開発センターが共同で開発を進め、現在、ほぼ配合設計法を確立するに至っているが、二重鋼殻への充填施工は未だ実績がなく、鋼殻内へ閉塞することなく、隅々まで確実に充填し得るかは本構造形式成立の可否を支配する大きな課題であった。

そこで本工法を実証すべく、ミニ沈埋函ともいえる共同溝サイズで部材耐力の確認と併せて高充填性コンクリートの二重鋼殻内への施工性を把握するため、実物大の供試体による施工・載荷実験を行い、新日本製鐵君津製鐵所構内の電気暗渠建設工事の一部の工区に本構造を試験施工した。

設計法については、二重鋼殻構造研究会(三菱重工業(株)、日本鋼管(株)、(株)宮地鐵工所、新日本製鐵)から土木学会に研究委託を行い、鋼コンクリートサンドイッチ構造研究小委員会(岡村甫委員長)により設計指針の作成作業が行われた。この間、大型供試体の載荷実験により耐力算定式が検証されると共に、指針(案)を用いて沈埋函の試設計が行われた。

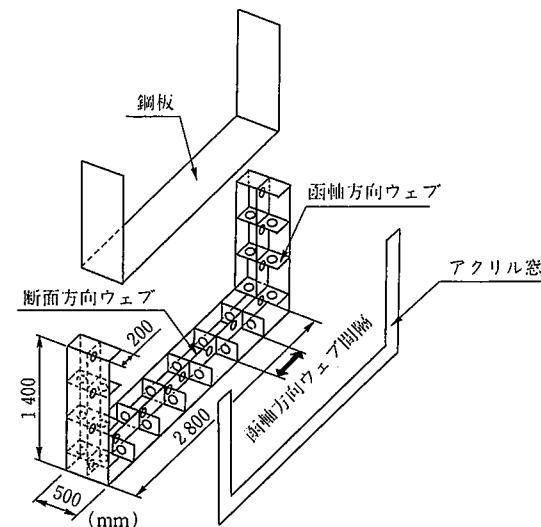
2.1.1 電気暗渠の試験工事

(1) 施工・載荷実験¹⁾

表2に示すように高充填性コンクリートの配合を一定にし、函軸方向ウェーブの開口面積率をパラメータに施工実験を実施した。混和材に高粉末度(6,000cm²/g)の高炉スラグを使用し、商業用コンクリートプラントで製造した。コンクリートの品質管理はスランプフロー値により行い、その値を60±5cmに設定した。

図4に型枠、図5に充填方法の概要を示す。パイプレーター等の

図 (mm)			
開口面積率	16.3%	25.2%	31.4%



寸法	1400mm×2800mm×500-200mm
内容積	0.52m ³
断面方向ウェーブ	開口形状: 100mmφの円形
	開口間隔: 400mm(基準)

図4 二重鋼殻型枠の概要

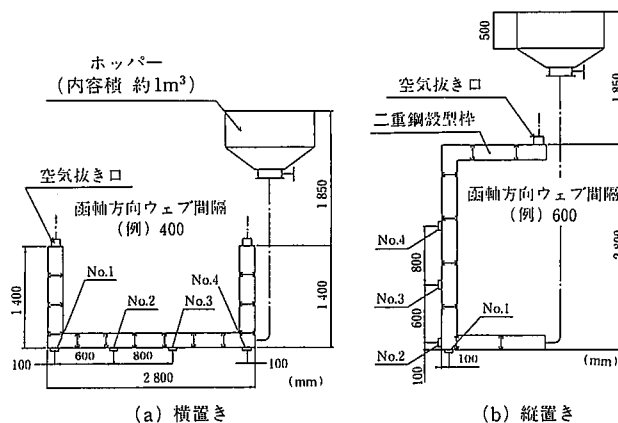


図5 充填方法の概要

締め用機具類は全く使用しないでコンクリートの自重だけを利用して充填した。充填状況は型枠両側のアクリル窓から観察し、同時に材料分離の発生の状況を調べるため充填口と空気抜き口より試料を採取し粗骨材のふるい試験を実施した。

函軸方向ウェーブの開口面積率、間隔について充填性の実験結果を整理したものを表3に、粗骨材のふるい試験結果の一例を図6に、充填実験状況を写真1に示す。試験結果より高充填性コンクリートを用いた二重鋼殻への施工は、函軸方向ウェーブの開口面積率、間隔を適切に行えば材料分離を起こすことなく充填できることを確認した。

又、写真2に示すように実施工を擬して実物大の供試体(梁部材、

表2 高充填性コンクリートの配合

水結合比 ^{*1} W/(C+S _g) (%)	細骨材率 s/a(%)	単位量 (kg/m ³)				
		水 W	セメント C	スラグ S _g	細骨材 S	粗骨材 ^{*2} G
31.5	49.1	178	179	385	807	788

*1 高性能減水剤添加量=(C+S_g)×2.5%

*2 粗骨材(砕石)の最大寸法20mm

表 3 充填実験結果

(a) 横置き			
函軸方向 ウェーブ 開口面積率	函軸方向ウェーブ間隔		
	400mm	600mm	∞ (ウェーブナシ)
16.3% (100mm ϕ)	●	●	○
25.2% (125mm ϕ)	●	○	
31.4% (140mm ϕ)	○		
(b) 縦置き			
函軸方向 ウェーブ 開口面積率	函軸方向ウェーブ間隔		
	400mm	600mm	∞ (ウェーブナシ)
16.3% (100mm ϕ)	●	●	○
25.2% (125mm ϕ)	○	○	
31.4% (140mm ϕ)	○		

●：充填不能 ○：充填可能

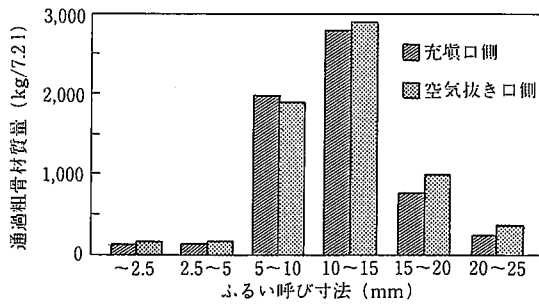
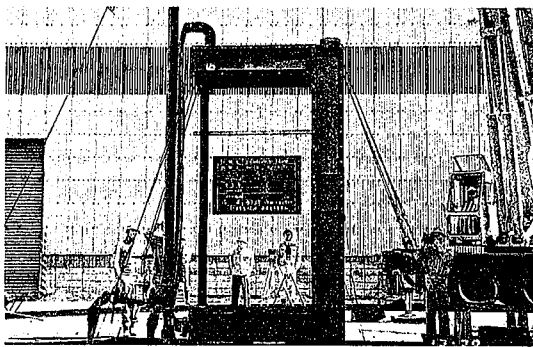
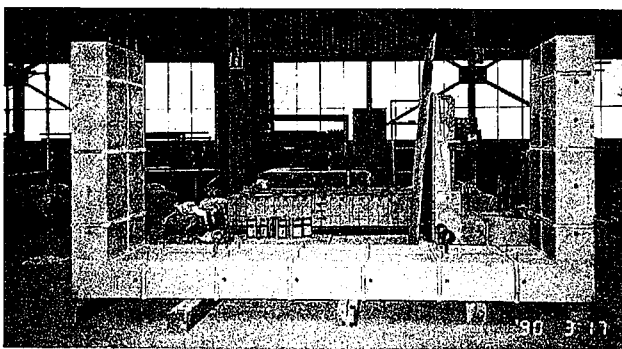


図 6 ふるい試験結果の一例



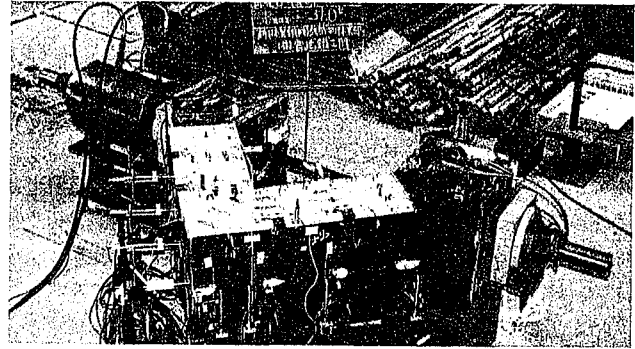
(a) 充填中の状況



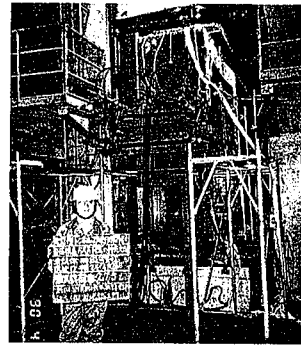
(b) 木製型枠脱型後

写真 1 充填実験状況

隅角部、函断面供試体)を製作して載荷実験を行った。鋼とコンクリートの合成は特に端部の拘束効果のみを期待し、鉄筋コンクリー



(a) 隅角部供試体



(b) 函断面供試体

写真 2 載荷実験

トの設計法を準用した合成構造として設計し、耐荷力を確認した。

(2) 試験工事²⁾

電気暗渠の函体構造の概要を図7に、試験工事の状況を写真3に示す。鋼殻は内外の鋼板、450mm 間隔に配された200mm 径の円形

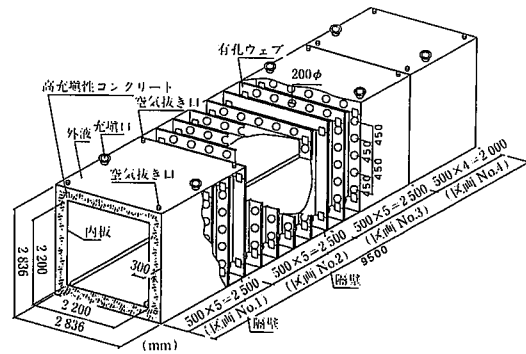


図 7 試験工事函体概要図

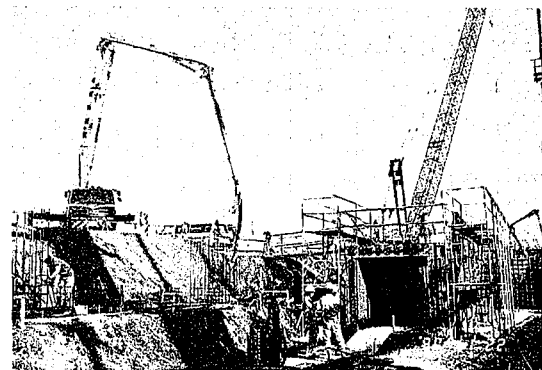


写真 3 試験工事の状況

の開口部を有するウェブ、及び充填区画を仕切るための隔壁で構成され、各区画毎に充填口と空気抜き口を設けている。

施工は各区画毎に行った。側壁部の施工では当初両側から充填を行う予定であったが、両側壁のコンクリート面の差異が2 cm 前後と極めて均等に充填されており、底板部の施工で使用した充填口をそのまま用いて充填した。頂版部の施工ではコンクリートの自重による圧力を補うために高さ500mmの充填管を設置し、空気抜き口及び他方の充填口からコンクリートをオーバーフローさせ、充填口に盲フランジ、空気抜き口にキャブを取付けて一区画分の施工を終了させた。

これら各区画への充填を繰り返して函体は完成され、高充填性コンクリートの使用により、その自重だけで二重鋼殻内の隅々まで施工できることが実証された。

2.1.2 設計法と施工法³⁾

(1) 鋼コンクリートサンドイッチ構造設計指針(案)

土木学会の承認を得て本設計指針(案)の概要を紹介する。指針(案)は限界状態設計法に基づき、以下の7章から成る。

(i) 総則

本指針(案)の適用の範囲は、図8に示す鋼板とそれに挟まれたコンクリートが一体となって挙動する合成構造であり、沈埋涵の構造部材に適用される場合を念頭に置いて設計の基本が示されている。

(ii) 設計の基本

設計の前提として、鋼板に囲まれた空間にコンクリートが確実に充填されていることとしており、コンクリートの打設には細心の注意を払う必要がある。又、施工が適切に行えるよう十分に配慮して設計を行う。

表4に示すように、限界状態の検討に用いる安全係数について標

準的な値が示されている。

(iii) 材料の設計用値

コンクリートについてはコンクリート標準示方書、鋼材については鋼構造設計指針による。なお、鋼構造設計指針に規定される材料強度は材料係数で除した値を材料の設計用値とする。

(iv) 荷重

コンクリート標準示方書による。

(v) 構造解析

コンクリート標準示方書による。

(vi) 限界状態に対する検討

(a) 施工時の安全性の検討

終局限界状態の検討は、軸方向力、曲げモーメント、剪断力、ねじりモーメントに対して行う。合成前の鋼殻の終局限界状態の検討は鋼構造設計指針(安全率は部材係数、構造解析係数、荷重係数及び構造物係数を掛け合わせたものとみなす)、合成後は本指針の供用時の安全性の検討による。

(b) 施工時の使用限界状態に対する検討

変位、変形に対する検討を施工時の安全性の検討と同様に行う。

(c) 供用時の安全性の検討

a) 曲げモーメント及び軸方向力に対する安全性の検討

終局限界状態の検討はコンクリート標準示方書に準じ、通常のRCの場合と同様に行う。ただし、圧縮補強鋼板は局部座屈後の残留強度で評価する。

部材軸方向に配置された補剛材は引張及び圧縮補強鋼板としてよく、又、部材軸方向に配置された剪断補強鋼板は剪断補強鋼板としての引張応力の影響を考慮し、引張及び圧縮補強鋼板としてよい。

b) 剪断力に対する安全性の評価

剪断補強のない場合の剪断耐力は、通常のRC棒部材の剪断耐力と同様な方法で、シアコネクタによる剪断ひびわれ発生強度の減少を考慮したスレンダービームもしくはディープビームの剪断強度式で算定する。

剪断補強鋼板が部材軸方向にだけ配置される場合は、トラス機構に基づいてコンクリートの圧縮斜材の破壊時の耐力もしくは剪断補強鋼板の降伏時の耐力として算定する。コンクリートの圧縮斜材の強度は斜め圧縮破壊強度もしくはディープビームの剪断強度とし、部材軸方向に配置された剪断補強鋼板の間隔による強度低下を考慮する。剪断補強鋼板中の引張斜材の強度は、剪断補強鋼板の主引張力と部材軸とのなす角度は60°、コンクリートの圧縮斜材と部材軸とのなす角度は30°もしくは $\cot^{-1}(a/z)$ (ここで、a:支承前面より載荷点までの距離、z:圧縮応力の合力の作用位置から引張補強鋼板の図心までの距離)の大きい方の角度として算定する。

剪断補強鋼板が部材軸直角方向にだけ配置される場合も、剪断補強鋼板の間のコンクリートを圧縮斜材とするトラス機構が形成され、シアコネクタによる剪断ひびわれ発生強度の減少を考慮したスレンダービームもしくはディープビームの剪断強度式でコンクリートの圧縮斜材の強度を算定する。

部材軸方向に配置されている剪断補強鋼板と部材軸直角方向に配置されている剪断補強鋼板とが混在する場合は、各々の剪断補強鋼板のみを考慮して算定される剪断耐力のうち大きい方を耐力としてよい(図9参照)。

c) ねじりに対する安全性の検討

鋼殻のねじり耐力もしくはコンクリート部のねじり耐力のうち大

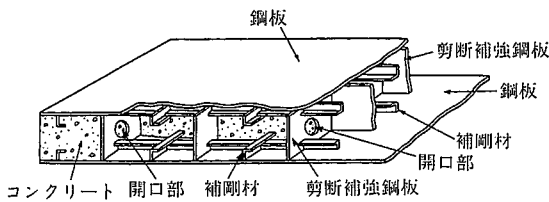


図8 鋼コンクリートサンドイッチ構造

表4 標準的な安全係数

	材料係数		部材係数		構造解析係数	荷重係数	構造物係数
	コンクリート	鋼材	曲げ	剪断			
施工時の鋼殻の終局限界状態	—	1.05	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0
施工時の鋼殻の使用限界状態	—	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
施工時の合成構造の終局限界状態	1.3	1.05	1.15	1.15~1.3 ^{*1}	1.0	1.0~1.2 ^{*2}	1.0
施工時の合成構造の使用限界状態	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
供用時の終局限界状態	1.3	1.05	1.15	1.15~1.3 ^{*1}	1.0	1.0~1.2 ^{*2}	1.1
供用時の使用限界状態	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

*1 地震時の検討に際しては、ここに示した値の1.2倍とする。

*2 永久荷重に対しては1.0~1.2、主たる変動荷重に対しては1.1~1.2、従たる変動荷重及び偶発荷重に対しては1.0とする。

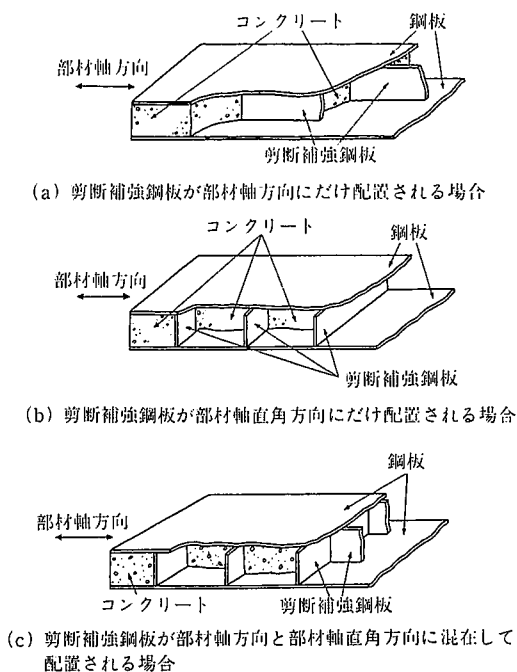


図 9 剪断補強鋼板の配置

きい方とする。

(d) 供用時の使用限界状態に対する検討

変位、変形に対する検討をコンクリート標準示方書に準じて行い、シアコネクタによるひびわれ発生モーメントの減少を考慮する。

(vii) 構造細目

(a) 鋼板

直接コンクリートに接している部分を除いて鋼板には防食対策を施す。

(b) 剪断補強鋼板

両端で引張及び圧縮補強鋼板に定着されていなければならない。

(c) 隅角部

隅角部に接合する部材の引張、圧縮及び剪断補強鋼板を隅角部に延長し、接合する他のそれぞれの鋼板に全強度が伝達できるよう接合されていなければならない(図10参照)。

(d) シアコネクタ

鋼板とコンクリートの一体性を保つため、曲げモーメントが0となる断面と最大曲げモーメント作用断面との間の区間に配置されるシアコネクタの剪断耐力の総和が最大鋼板引張力の剪断力よりも大きくなるように配置する。

形鋼をシアコネクタに用いた場合の設計剪断伝達耐力式には、シアコネクタの回転拘束とシアコネクタ間隔の影響が考慮されている(図11参照)。

部材軸直角方向の剪断補強鋼板をシアコネクタとして用いる場合

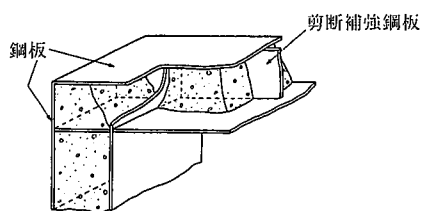


図 10 隅角部

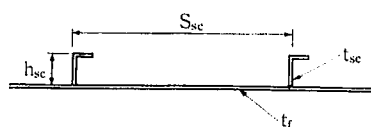


図 11 形鋼を用いたシアコネクタ

は、剪断補強鋼板として作用する引張応力度を考慮した設計剪断伝達耐力式が示されている。

又、部材端部などで鋼板とコンクリートとの間のすべりが拘束されることが期待される場合はシアコネクタを配置しなくてもよい。

(e) 鋼板の最小板厚

一般には最小板厚を 8 mm としよ。

(f) 鋼板の最小間隔

コンクリートが隅々まで十分に充填されるように定める。

(g) 鋼板の開口部

コンクリート打設など施工上の要求から設ける開口部は必要最小限にし、開口部周辺は適切に補強する。

(2) 施工法

指針(案)にはコンクリート充填施工要領(案)が資料として添付されている。充填方法は以下の二通りである。

(i) 隔室充填方式

隔室への充填は隔室の上側の鋼板もしくは剪断補強鋼板の中央部付近に設けられた打設孔から行い、必要に応じて空気抜き孔を配置する。高充填性コンクリートを用いた場合でも、上側鋼板の下面に気泡が閉じ込められやすいことが実験によって確認されている。このため上側鋼板には空気抜き孔を設け、コンクリートが隅々まで空隙なく充填されるように工夫する。空気抜き孔の配置については、図12のような配置が現在のところ最も良好な結果を与えられ。

施工中の充填の確認は上側の鋼板の四隅に設けられた空気抜き孔からオーバーフローさせ、充填後は上側鋼板が鋼板の場合は打設孔、空気抜き孔は溶接等により密閉する。

(ii) 横移動充填方式

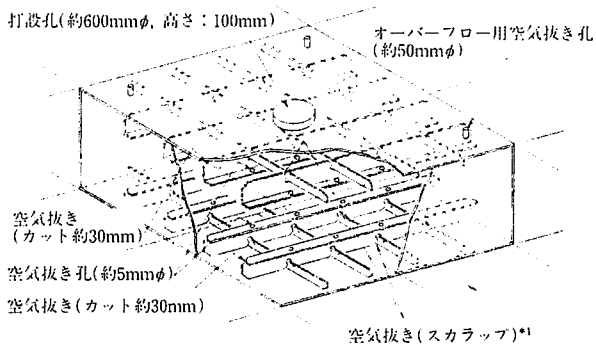
打設孔とオーバーフロー用の空気抜き孔を有する独立した隔室を設けられない場合は剪断補強鋼板に開孔部を設け、コンクリートを横移動させ、流動面の勾配を利用して空気を押し出しながら充填する。充填に用いるコンクリートは締固めを必要としないもので、充填前に横移動させても所定の品質を確保するために必要な流動性と材料分離抵抗性を有していることを試験により確認する。又、充填中にコンクリートの打設を一次中断すると次の押し出しが困難になることがあるため、コンクリートの打設は連続して行う。

空気抜き孔の配置については、図13のような配置が現在のところ最も良好な結果を与えられ。充填の確認は隔室充填方式と同様に行う。

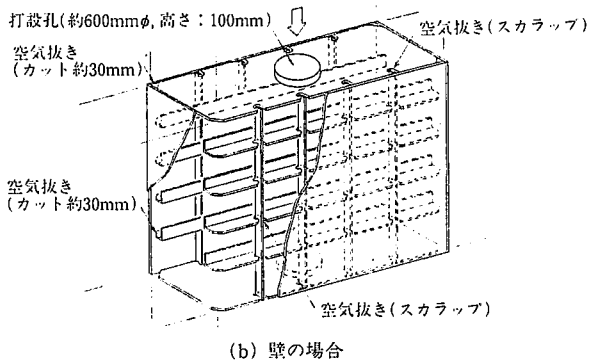
2.2 合成構造沈埋函(B-タイプ)の開発

A-タイプの沈埋函が全てサンドイッチ構造からなり、高充填性コンクリートでの施工を前提としているのに対し、図14に示すように、本沈埋函は上下床版をオープンサンドイッチ構造として普通コンクリートでの施工を可能にしている。鋼殻はその剛性により浮上状態でのコンクリート打設が可能でドライドックは必要としない。

サンドイッチ構造の側壁部の設計は鋼コンクリートサンドイッチ設計指針(案)によるとして、オープンサンドイッチ梁部材の力学的



*1 空気抜き用のカットの大きさは最大根付材寸法の1.5倍程度とする(各図共通)
(a) 床版の場合



(b) 壁の場合
図 12 隔室充填方式の例

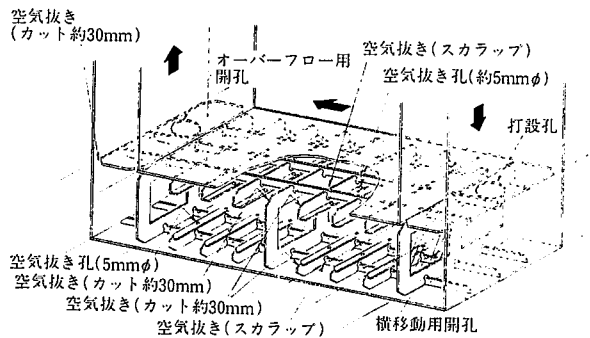


図 13 横移動充填方式の例

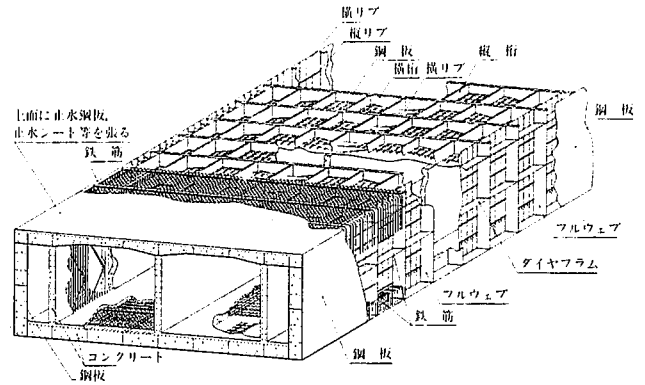


図 14 合成構造沈埋函(B-タイプ)構造概要図

特性、形鋼ずれ止めの耐荷力の確認、サンドイッチ・オープンサンドイッチ構造が接合される隅角部構造に関して、1992年度から運輸省港湾技術研究所と二重鋼殻構造研究会とで共同研究を進めており、1994年度までに設計指針の作成を目指して作業中である。

3. おわりに

合成構造沈埋函は鋼板による水密性の確保、配筋量の減少、型枠、支保工の省略による工期短縮、又ドライドック等の仮設費を圧縮して従来のRC方式の沈埋函より函体の全製作費を低減できるなど多くの利点がある。

鉄筋工、型枠工等の建設労働者数は今後とも不足基調であると予想され、従来方式の沈埋函を見直し、建設工事の機械化、省力化、工期短縮を図る本沈埋函は時代の要請に応えるものと確信している。

参考文献

- 1) 義若 ほか：スラグ系締固め不要コンクリートの二重鋼殻構造への充填施工実験。土木学会第45回年次講演会講演概要集，第5部，1990，p.730
- 2) 義若 ほか：ハイブリッド式躯体構造の実証試験工事。土木学会第46回年次講演会講演概要集，第6部，1991，p.248
- 3) 土木学会コンクリート委員会鋼コンクリートサンドイッチ構造研究小委員会：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