

報告

[2171] 合成構造沈埋函設計指針の策定

小島 朗史\*1・川合 紀章\*2・水谷 誠\*3・松尾 義文\*4

1. はじめに

現在、第三港湾建設局では大阪港において港区と南港地区とを結ぶ海底トンネルを沈埋方式で建設している。長さ約100mの沈埋函(図-1)10函よりなる本トンネルの沈埋部には、我が国で初めて合成構造方式の沈埋函を採用している。沈埋函の設計に当っては、大規模海洋構造物に対する合成構造の設計基準等がないため、これまでの試験・研究実績を検討するとともに、<sup>1)</sup>構造載荷実験を行って、設計上の技術的信頼性を確認した。そしてそれらの成果を踏まえ、合成構造沈埋函設計指針(案)をとりまとめた。

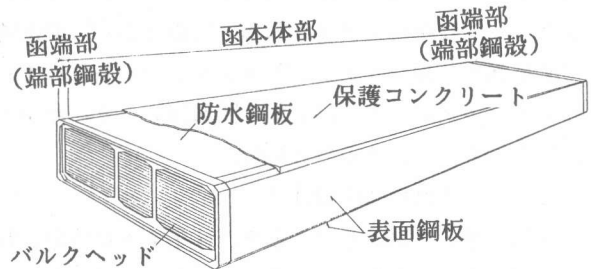


図-1 沈埋函の構成

2. 合成構造沈埋函の特徴

大阪港海底トンネルにおける合成構造とは、従来、水密性確保のために鉄筋コンクリート部材の表面に配されていた防水用の表面鋼板を強度部材としても有効活用するために、表面鋼板とコンクリートとをずれ止めを介して一体化した構造のことである。ずれ止めには表面鋼板に溶植したスターラップ及びスタッドジベルを用いることとした。上床版は施工上、コンクリートと表面鋼板との一体化が困難なため、鉄筋コンクリート構造とし、表面鋼板には防水機能のみを持たせることとした(図-2)。

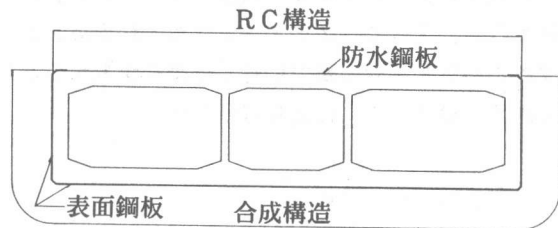


図-2 沈埋函の構造

3. 合成構造沈埋函設計指針の特徴

本設計指針は、10章よりなる。その章構成を表-1に示す。これらの内、特に本設計指針の特徴は、4章、5章、7章、9章であり、次節以降にそれらについて述べる。

3. 1. 断面算定の設計理論

はり部材載荷実験により、曲げ及び軸力に対する断面算定は、平面保持の仮定、コンクリート

\*1 運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所所長、(正会員)

\*2 玉野市企画財政部参与、工修

\*3 運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所技術開発課建設専門官、工修

\*4 運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所技術開発課係長

表-1 目次構成

1. 総則	6. 補剛材
2. 基本構造	7. 隅角部の設計
3. 設計の基本	8. ひび割れに対する設計
4. 断面算定の設計理論	9. 防食設計
5. ずれ止めの設計	10. 設計条件

の引張応力の無視、材料特性の非直線性等を前提とした鉄筋コンクリートの慣用設計理論によるものとした。また、せん断力に対する断面算定については、スターラップに作用する応力は、コンクリート標準示方書（許容応力度設計法）<sup>2)</sup>、道路橋示方書等に広く採用されている一般的なせん断補強筋の設計式すなわちコンクリートの負担する分を差し引いたせん断力に基づく斜引張鉄筋応力算定式により計算しても問題無いことがわかった。したがって、せん断力に対する設計は、道路橋示方書によるものとした。

### 3. 2. ずれ止めの設計

表面鋼板とコンクリートとを一体化するためのずれ止めには、原則として実績が豊富なスタッドジベルを用いたが、せん断補強筋としてのスターラップを表面鋼板に溶植する構造とすること、スターラップの鉄筋径がスタッドジベルの軸径とほぼ同程度となること等からスターラップもずれ止めとして評価することとした。このため、溶接により鋼板に取り付けたスターラップの押し抜きせん断実験を行い、スターラップと同程度の軸径のスタッドジベルのせん断耐力と同等以上の評価を行って問題無いことを確認した。また、はり部材載荷実験結果によると、合成構造のスターラップの挙動は鉄筋コンクリートのもと同様の傾向を示しており、破壊後の観察でも特に問題となるような変形は生じていないことから、斜引張応力と水平せん断力の共同作用に対しても問題無く抵抗できること、異種のずれ止めを混合して用いたことによる影響も特に無いことが確認できた。よって、スターラップもずれ止めとして有効利用することとした。

ずれ止めは水平せん断力に対して設計するものとし、スタッドジベル及びスターラップの許容せん断耐力は式(1)により算出した。

$$Q_a = 60 d^2 \sqrt{\sigma_{c,k}} \quad (1)$$

$Q_a$  : 許容せん断耐力[kgf/本]

$d$  : ずれ止めの径[cm]

$\sigma_{c,k}$  : コンクリートの設計基準強度[kgf/cm<sup>2</sup>]

式(1)は、スタッドジベルの許容せん断力式として広く実用化されている道路橋示方書の式  $Q_a = 30 d^2 \sqrt{\sigma_{c,k}}$  に対し、係数を2倍(30→60)にしてある。これは沈埋函においては橋梁と異なり、繰り返し荷重の影響を無視できるため、安全率の評価を半分にした(道路橋示方書では6、式(1)では3)ためである。<sup>3)</sup> はり部材載荷実験の結果でも、ずれ止めの安全率が3の供試体では、載荷荷重が設計荷重(鋼材の降伏時)を越えてもずれ止めの破壊等の現象は見られず、更にコンクリートが圧壊するまで実験を引続き行ったがずれ止めのせん断破壊は生じなかった。また、載荷各段階の実験値荷重も理論値とほぼ同程度であり、しかもRC供試体と同程度以上の耐力を有することが確認できた。

### 3. 3. 隅角部の設計

本沈埋函で採用した構造形式は、側壁及び下床版が合成構造、上床版がRC構造であるため、その隅角部は合成構造とRC構造の取合い部分となる。隅角部の構造については、側壁鋼板を上床版側まで延伸させ、スタッドジベルにより確実に定着させることとした(図-3)が、これは、定着長を上床版側まで取った場合と側壁上端部で止めた場合の両者で隅角部強度確認実験を実施し、後者では隅角部対角線方向に生じたひび割れが拡大して、隅角部が引き裂かれるような破壊を呈したので、前者に改良したものである。なお、隅角部の内部応力に対してはRC構造のラーメン部材接点部の設計に準じて設計を行うものとした。<sup>4)</sup>

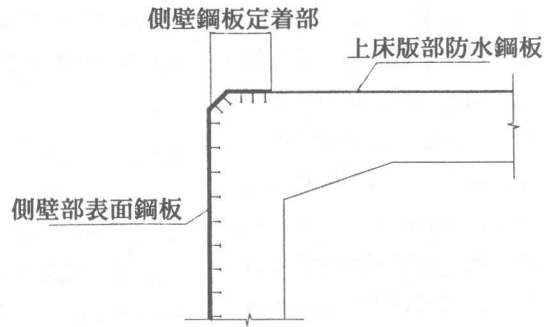


図-3 側壁上部の隅角部の構造

### 3. 4. 防食の設計

本沈埋函では表面鋼板を強度部材として使用しているため、十分な防食を施す必要がある。防食工法としては、実績及び信頼性から電気防食とし、メンテナンス及び経済性から流電陽極方式を採用した。ただし、表面鋼板は永久構造の主部材として重要な働きを持つことから電気防食の設計耐用年数を100年とした。また、防食率については「港湾の施設の技術上の基準・同解説」に基づき90%とし、残りの10%については腐食しろを見込んだ。腐食しろについては完成後の維持補修が困難であることから、同基準により求められた腐食しろに対して3倍程度の安全率とした。

## 4. 構造実験内容

設計指針策定に当っては、技術的信頼性確認のため、表-2の構造実験を行った。以下に、各々の実験内容を示す。

表-2 実験の種類と目的

載荷実験の種類	実験目的(設計上の課題)
はり部材載荷実験	<ul style="list-style-type: none"> <li>●鉄筋コンクリート慣用設計理論の適用性の確認</li> <li>●すれ止めの破壊に対する安全率を3とすることに対する安全性の確認</li> <li>●破壊時の挙動の把握</li> </ul>
押抜きせん断実験	<ul style="list-style-type: none"> <li>●スタッドジベル、スターラップのせん断耐力の確認</li> <li>●コンクリート打設方向による影響の確認</li> <li>●実験供試体(隅角部、函断面)に用いる小径のすれ止めに対する耐力値の照査</li> </ul>
隅角部強度確認実験	<ul style="list-style-type: none"> <li>●合成構造とRC構造の接合部となる部位における鋼板、鉄筋の配置方法の確認</li> <li>●破壊形態の確認</li> </ul>
函断面載荷実験	<ul style="list-style-type: none"> <li>●沈埋函全体としての破壊形態の確認</li> </ul>

#### 4. 1. はり部材載荷実験

沈埋函の下床版を部分的に取り出したはり供試体（実物大、縮小模型）により、せん断及び曲げ載荷実験（2点載荷）を実施した。せん断実験については鋼板位置が引張側、曲げ実験については鋼板位置が圧縮側と引張側の両方に対して行った。曲げ試験供試体の形状を図-4に示す。また、比較のため、RCはり供試体についても同様の載荷実験を行った。実験の結果、供試体表面（前面と背面）に貼り付けたひずみゲージより、図-5の断面ひずみ分布を得た。この図から、合成構造はり供試体のひずみは、RC構造のひずみとほとんど一致して分布していることがわかる。よって、合成構造沈埋函の設計に対しRC慣用設計理論を適用できるものとした。

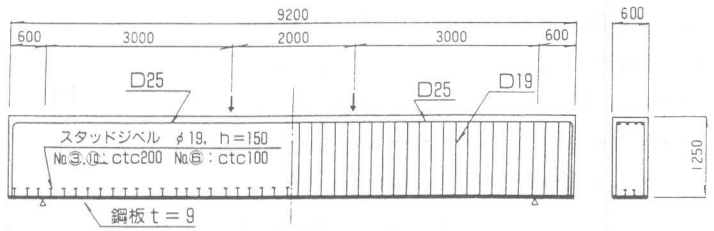


図-4 はり部材載荷実験供試体

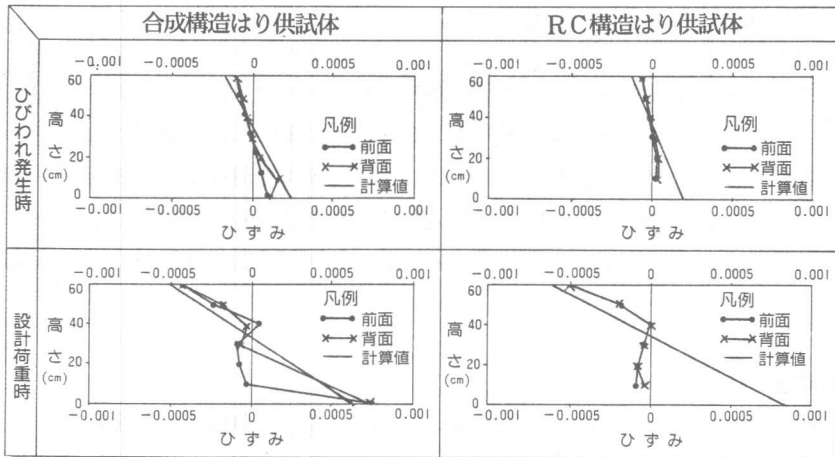


図-5 断面ひずみ分布図

#### 4. 2. 押し抜きせん断実験

ずれ止めとしてスタッドジベルを用いた場合とスターラップを用いた場合について、それぞれA下床版、B上床版、C側壁を想定したコンクリート打設方向で作成した供試体（図-6、図-7）で押し抜きせん断実験を行った。

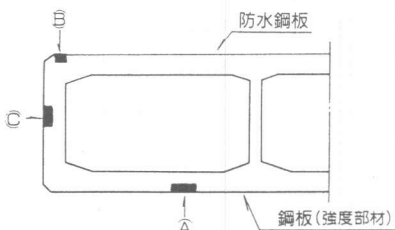


図-6 供試体の抽出位置相当図

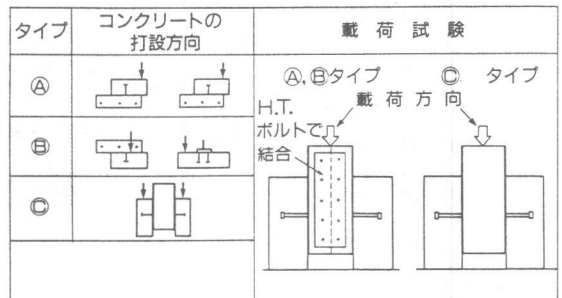


図-7 コンクリートの打込み方向と供試体形状

その結果を道路橋示方書の許容せん断力算定式により算定したせん断耐力と比較し、表-3に示す。これによると、実験値と推定値はほぼ同じ値を示しており、許容せん断耐力は、道路橋示方書の許容せん断力算定式により評価してよいことが分かった。また、スターラップのせん断耐力が、それと同径のスタッドジベルと同等のせん断耐力を有することも確認できた。

さらに、実験時の荷重～せん断変位図(図-8)から、ずれ止めの破壊に対する安全率を3としても降伏点に対して十分安全性は確保されていることが確認できた。

#### 4.3. 隅角部強度確認実験

RC構造と合成構造の混合構造となる上床版と側壁の接合部を取り出してモデル化した模型供試体(1/1.5縮小)に、作用する常時荷重の状態を考慮して図-9のとおり载荷して強度を確認した。実験の結果、鋼板を側壁相当部で止めた供試体では、隅切り部に発生したひび割れが発達し、最終的には引き裂かれるような破壊の形態を示した。一方、側壁鋼板の定着位置を上床版側まで伸ばした供試体では隅切り部からの有害な(脆性破壊となる)ひび割れは発生せず、隅角部での破壊は生じなかった(写真-1)。

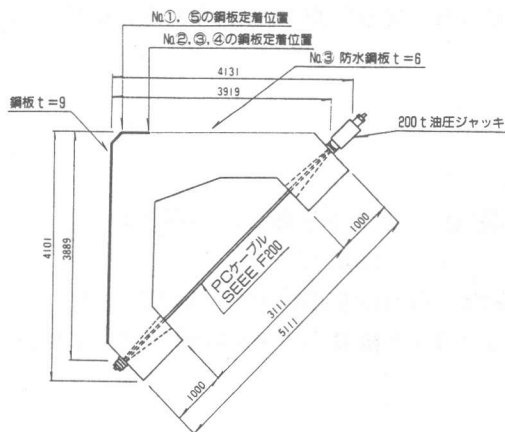


図-9 隅角部強度確認実験供試体

表-3 押し抜きせん断実験の結果

ずれ止め種類	コンクリート打設方向によるタイプ	ずれ止め1本当りのせん断耐力[tf]	道路橋示方書より推定した1本当りのせん断耐力 $Q_u$ [tf]
スタッドジベル	下床版に相当 (A)	14.1	12.7
	上床版に相当 (B)	13.5	12.3
	側壁に相当 (C)	14.7	12.8
スターラップ	下床版に相当 (A)	15.1	12.4
	上床版に相当 (B)	11.7	12.4
	側壁に相当 (C)	13.3	12.6

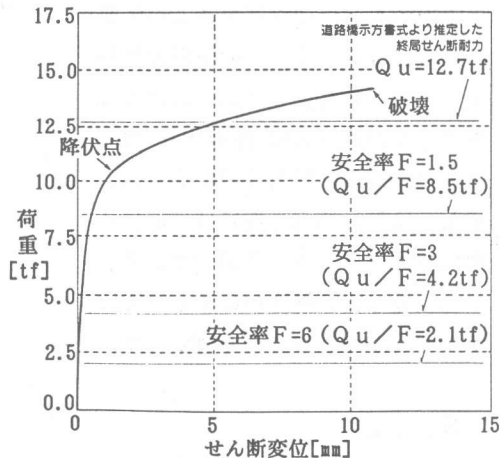
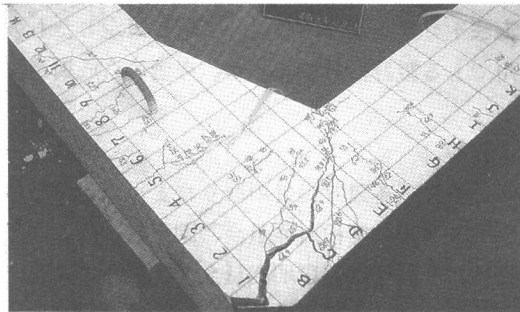


図-8 スタッドジベルの荷重～せん断変位



鋼板を側壁相当部で止めた供試体



鋼板を上床版側まで伸ばした供試体  
写真-1 隅角部ひびわれ状況

#### 4. 4. 函断面載荷実験

沈埋函横断面を1室箱断面にモデル化した模型供試体(1/3縮小模型)に、沈埋函に作用する常時荷重の状態を考慮して図-10のとおり2方向載荷を実施し、鋼板、鉄筋の配置の妥当性を確認した。破壊状態まで載荷した結果、RC構造となる上床版のスパン中央部で鉄筋が降伏した後、コンクリートの圧縮破壊が生じて破壊した。しかし、問題となるような破壊形態(脆性破壊)ではなかった。また、隅角部のひずみは、通常のRC構造物の隅角部における内部ひずみの分布と同傾向であり、補強鉄筋はRC構造物に準じて設計することができることを確認した。

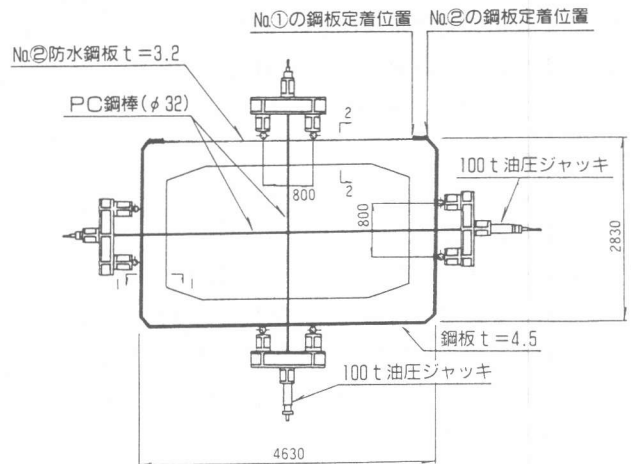


図-10 函断面載荷実験供試体

#### 5. まとめ

港湾の沖合展開、豊かなウォーターフロント開発の要請の高まりとともに、沈埋トンネル建設の需要は今後ますます増加すると思われる。それに伴い鉄筋量の大幅な削減を可能にした経済的な合成構造は沈埋函の構造形式として重要な位置をしめると考えられる。本設計指針は、大阪港海底トンネル沈埋函の設計に際し策定したものである。本来、大阪港海底トンネルのみに適用できる設計指針であるが、今後の合成構造沈埋函の設計に当たって大いに参考とならう。

#### 謝辞

最後に、本設計指針の取りまとめに当たっては、長尾義三日本大学教授を委員長とする大阪港南港トンネル技術検討委員会、園田恵一郎大阪市立大学教授を委員長とする大阪港南港トンネル技術検討委員会構造専門委員会でご審議していただきました。皆様ご多忙中の身ながら、貴重な時間を割いて頂いたことを感謝し、ここに記します。

#### 参考文献

- 1) 日本港湾協会編：港湾施設の技術上の基準・同解説，(社)日本港湾協会，1989.2
- 2) 土木学会編：コンクリート標準示方書，(社)土木学会，1986.10
- 3) 日本道路協会編：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，(社)日本道路協会，1990.2
- 4) 日本道路協会編：道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋編，(社)日本道路協会，1990.2