

合成構造方式沈埋函の構造実験結果 (速報)

運輸省 第三港湾建設局 神戸調査設計事務所

正会員 片岡 真二

正会員 高橋 浩二

運輸政策局 技術安全課

正会員 潮崎 俊也

1. はじめに

運輸省第三港湾建設局では、大阪港に沈埋工法による道路・鉄道（新交通システム“ニュートラム”）併用の海底トンネルを、平成7年度の供用を目指し、現在、建設中である。この海底トンネルの海底部は、10函の沈埋函を沈設して建設することになっている。ここでは、合成構造の考え方を取り入れた沈埋函の設計手法を確立するため、昨年より実施している一連の実験の内容について述べるものである。

2. 大阪港海底トンネルの基本計画

大阪港最大の埋立地である南港地区は、コンテナ埠頭、ライナー埠頭、フェリー埠頭のほか、人口4万人のポートタウン、国際見本市会場（インテックス大阪）、公園等が建設され、大規模な総合的港湾空間として整備されつつある。現在、南港地区と大阪都心部とを結ぶ交通路は港大橋経由の道路と住之江経由の鉄軌道（地下鉄+新交通システム“ニュートラム”）があるが、南港地区の開発に伴い増大が予想される自動車交通および旅客輸送需要に対応するためには新たな交通路の整備が必要である。このため、南港地区と大阪都心部とを直結する「大阪港・港区～南港地区連絡交通路」が臨港道路および鉄道・軌道の併用により最初に事業化されることとなった（図-1参照）。

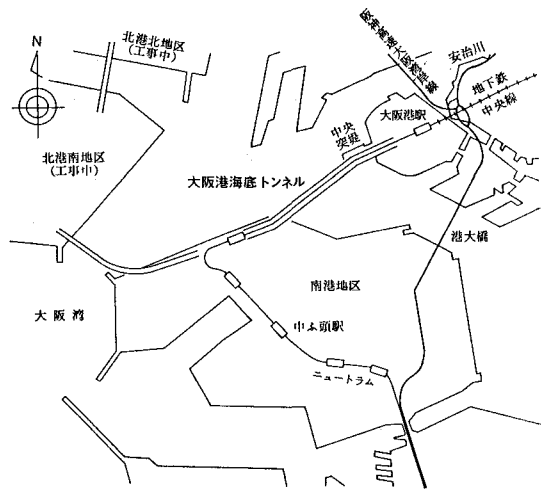


図-1 大阪港海底トンネル位置図

3. 沈埋工法の採用

“大阪港・港区～南港地区連絡交通路”は水深13m、幅400mの大阪港中央航路および泊地を斜めに延長1kmにわたって横断することになるため、施工方式として、沈埋トンネル、橋梁、シールドトンネルの3工法を比較検討した。この結果、本連絡路の施工方式として3工法のうち最も有利な沈埋トンネルが採用された。

本トンネルは全長が約2.2kmであり、延長約1kmの海底トンネル部、換気塔部、延長約2kmの陸上トンネル部から成り立っている。図-2、3に縦断計画図および沈埋函標準断面図を示す。沈埋部の断面構成は中央部に新交通システムを、左右に2車線道路を配置し、両外側には避難用の通路を設置している。このトンネルは、我が国では初の道路・鉄道併用トンネルとなるばかりではなく、沈埋部の断面積でも大規模トンネルに属するものである。この海底トンネル部は10函の沈埋函により建設することにしており、沈埋函1函当りの大きさは高さ×幅×長さ=8.6m×35.2m×約100mとなる。

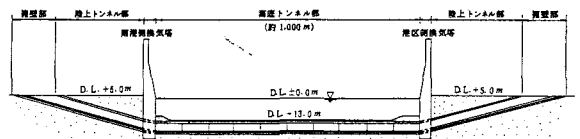


図-2 縦断計画図

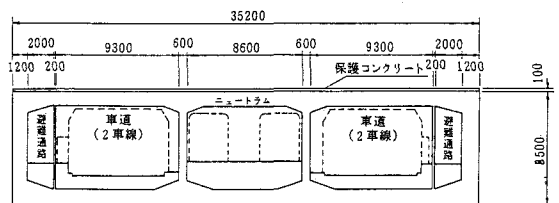


図-3 沈埋函標準断面図

4. 沈埋函の構造の検討

従来から沈埋函の製作方式はRC方式と鋼殻方式に分類されてきた。RC方式とは、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、通常、防水用に沈埋函の外周には厚さ6～8mmの鋼板を使用している。鋼殻方式とは、造船所であらかじめ鉄筋を組み込んだ鋼殻を製作したのち、海上でコンクリートを打設して沈埋函を製作する方式であり、鋼殻が型枠および防水機能を果たしている。この分類は、製作方式の相違によるものである。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防水機能だけに使われている（図-4参照）。

そこで、沈埋函の外周の鋼板を防水機能だけではなく他に有効活用できないかという発想のもとに、合成構造（Hybrid Structure）（沈埋函の外周の防水鋼板を常時荷重に対しても強度部材として評価し、コンクリートと一体化させて抵抗する構造）に関する技術的検討の必要性が認識された。しかしながら、我が国では道路橋等では合成構造の設計・施工実績はあるものの、本トンネルのような大規模な海洋構造物に適用した例はなく、また設計基準類では土木学会が1989年に取りまとめた「鋼・コンクリート合成構造の設計ガイドライン」があるが、これは中間段階のものであり沈埋函の設計基準として適用するには限界がある。世界的にみても沈埋トンネルへの適用を検討した例はあるものの実現には至っていないのが実情である。そこで、合成構造方式の沈埋函の製作の可能性を調査するため、RC構造および鋼殻構造との構造形式の比較を行った。この結果、以下の結論を得るに至った。

- (a) 沈埋函の側壁および底面の防水鋼板を強度部材として設計の面から有効活用が可能である。
- (b) 合成構造方式は、他の方式に比べて鉄筋量を減少させることが可能なため、経済性、施工性の面で有利となり得る。
- (d) 合成構造方式は、RC方式に比べ構造的にじん性が高く、耐震性の向上につながる。
- (e) 沈埋函に合成構造の設計法を適用するには、設計法の信頼性を技術的に確認するための実験が必要である。

以上の結果により、1989年10月より合成構造を採用した場合の技術的信頼性を確認するための構造実験を実施している。図-5は合成構造沈埋函のイメージである。合成構造方式の場合、沈埋函の側壁と底面の鋼板（厚さ10mm）はスタッドジベルによりコンクリートと一体化されており、鋼板側の鉄筋はない。また、スターラップは鋼板に溶植しており、スタッドジベルと同じずれ止め効果を期待している。

一連の実験は1990年夏頃までに終了する予定である。以下、合成構造沈埋函の構造概要および実験の内容について述べる。

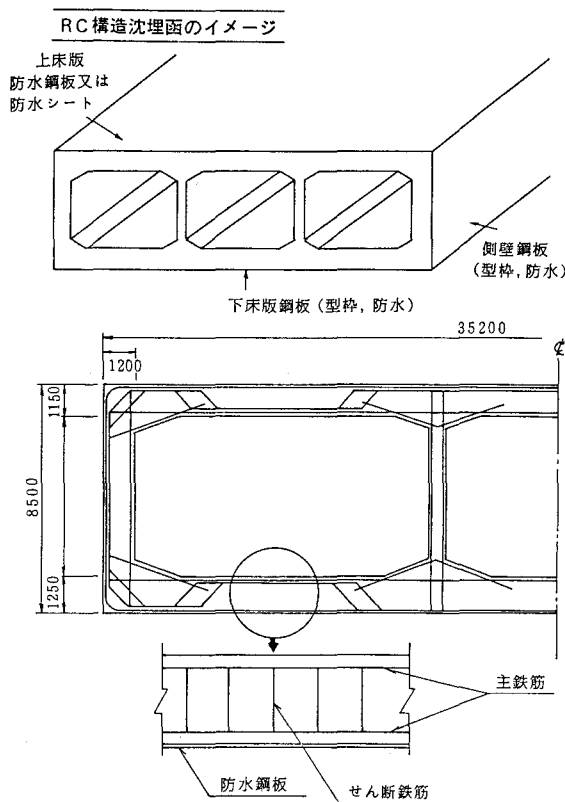


図-4 RC構造沈埋函のイメージ図

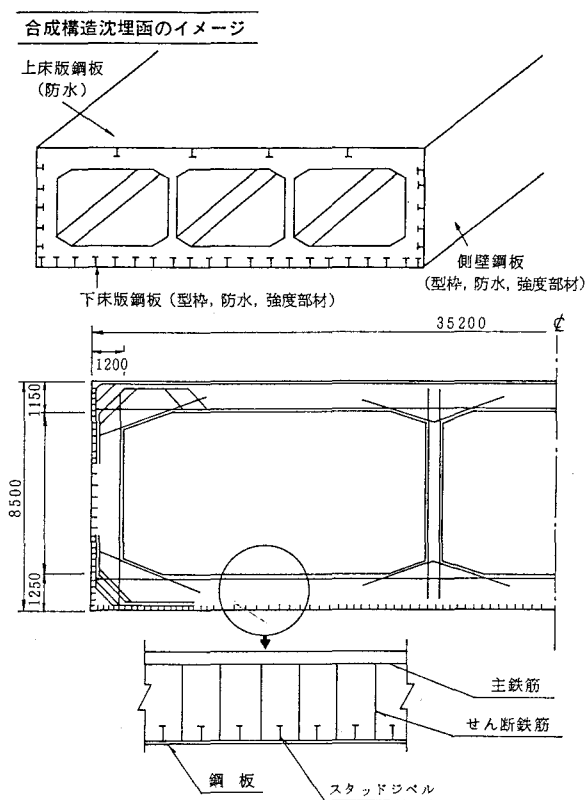


図-5 合成構造沈埋函のイメージ図

表－１ 合成構造沈埋函 設計法主要項目

項 目	主 な 内 容
基本構造	(1) 函体外周表面に鋼板を配置し、鉄筋コンクリートと一体化する。 (2) 表面鋼板に防水機能をもたせる。 (3) 表面鋼板には施工方法に応じた強度、剛性をもたせる。
設計の基本	部材の設計は原則として許容応力度法によることとし、終局強度及びひびわれ幅のチェックを別途行う。
断面算定の設計理論 横断面の設計	(1) 曲げ、軸力に対する断面算定 —— 完全合成理論（ＲＣの慣用設計理論）による。 (2) せん断力に対する断面算定 —— “ (3) 表面鋼板の応力度算定 —— 二軸応力度照査を行う。
断面算定の設計理論 面軸方向の設計	表面鋼板、軸方向鉄筋、コンクリートの合成断面として断面算定を行う。
ずれ止めの設計	(1) ずれ止めにはスタッドジベルを用い、表面鋼板に溶接したスターラップもずれ止めの機能を兼ねる。 (2) ずれ止めは、ずれ止め取付部に作用するせん断力に対して設計する。 (3) ずれ止めの許容せん断力は、安全率3を標準として道路橋示方書を準用する。
隅角部の設計	(1) 隅角部は、確実に応力が伝達されるように設計する。 (2) 隅角部内部は、鉄筋コンクリートの設計に準じて補強を行う。
ひびわれに対する設計	

5. 合成構造沈埋函の構造概要

現在、もっとも普及した合成構造物として挙げることはできるのは、コンクリート床版と鋼板とを合成して作る鋼合成版であろう。設計の考え方は「道路橋示方書鋼橋編（日本道路協会）」に示されている。

合成構造沈埋函では「道路橋示方書」の考え方を基本として、表－1の設計方針により設計を行うこととした。表－1の詳細な説明は別の機会に譲るとして、合成構造による沈埋函の設計法の主要な考え方をまとめると、次の3点になる。

- ①防水用に使用されていた鋼板を常時荷重に対しても強度部材として評価し、主鉄筋量に相当する鋼板の厚さを確保する。
 - ②スターラップは鋼板に溶接して定着させるとともにスタッドと同等のずれ止め効果を期待する。
 - ③ずれ止めを使用するスタッドおよびスターラップの許容せん断力は安全率を3とする。
- これらの点について、以下、具体的に内容を述べることにする。

(1) 強度部材としての鋼板

図－4のＲＣ構造の沈埋函の外周に使用する鋼板は防水用のため厚さは6～8mmである。これに対し、図－5の合成構造の沈埋函では10mm以上の厚さになる。この厚さが必要な理由は、まず、強度の点から図－4の断面のうち鋼板側に必要な鉄筋量を全て鋼板に期待すると図－5の鋼板の最低厚さは9mm（SM50Y）必要となる。さらに、沈埋函は海底に埋設されるため腐食の問題が発生する。この腐食に対して電気防食による対策では土中での効率は90％程度しか期待できず、残り10％に対しては他の何らかの対策が必要である。仮に、この10％に対し腐食しろで対応するとすれば、腐食速度は海底泥層中0.03mm/年¹⁾であるから、トンネルの耐用年数100年に対し0.3mmの腐食しろを必要とする。この結果、鋼板の最小厚さは10mmとなる。

一方、鋼板はジベルやスターラップ、施工時に必要な補鋼材などを取り付ける溶接の熱により歪みを生じるため、対策が必要となる。この溶接歪みは一般に鋼板の厚さ8mmを境界として発生量が変化するとと言われ、8mm以上の厚みがあれば歪み取り対策は軽減される。施工性の点から8mm以上の厚みがあるほうが望ましい。

以上の条件により、鋼板の厚さを10mmとした。しかしながら、鋼板の厚みは鋼板の製造精度や腐食などの考え方により大きく左右されるため、細部設計に向けて慎重な検討を行う予定である。

(2) スターラップによるずれ止め効果

せん断応力度に対し補強するスターラップは、複鉄筋断面であれば主鉄筋に固定して配筋するのが一般的である。ところが、合成構造沈埋函のように、主鉄筋の役割を鋼板に期待する場合はスターラップを固定する主鉄筋がないため固定の方法が問題になる。このため、スターラップを固定する方法として鋼板にスタッド溶接することにした。この結果、次の様な利点を得ることができる。

はり部材の場合、せん断応力度による斜引張ひびわれは中立軸近くから発生する。このため、スターラップに作用する引張力は中立軸近辺に集中し、コンクリートとスターラップ筋との付着を考慮すると鋼板との溶接部に伝達される引張力は小さいと考えられる。このため、スターラップはせん断応力度に対する補強とスタッドとしてのずれ止めを兼ねることが可能となった。

(3) ずれ止めの許容せん断力の安全率

合成げたのずれ止めにはスタッドが一般的に使用されている。ずれ止めの設計は作用している各種荷重の組み合わせによって発生する、鋼げたと版コンクリートとの間のせん断力が最も大きくなる場合に対し行っている。このスタッドの安全率は、押し抜きせん断試験の結果から、スタッドの高さHと軸径dの比H/dにより次のように決められている。

① $H/d \geq 5.5$ の場合

破壊はスタッドのせん断破壊により発生することから降伏に対しては安全率は3以上を確保する。

② $H/d < 5.5$ の場合

破壊はコンクリートの割裂により発生することから破壊に対しては安全率は6以上を確保する。

これらの安全率の値は、残念ながら疲労に対する応力照査を行っていないので、橋梁等繰り返し荷重が作用する構造物を想定し、疲労破壊に対しても安全性を有するように配慮したものと考えられる。沈埋函では構造物自身の函体重量が自動車や鉄道による動的荷重に対して占める割合は非常に大きいため、繰り返し荷重を考慮するまでもない。このような場合は、道路橋示方書で示されている安全率は再考の余地があるといえよう。

一方、沈埋函では、橋梁等に比べ鋼とコンクリートとの間に作用するせん断力はかなり大きく、スタッド量も相当量になると考えられる。また、沈埋函の内側はRC構造となるため、従来の沈埋函と同様の鉄筋量になる。このため、施工性を考慮すると、スタッド量が少ないほど鉄筋やスターラップの組立て、コンクリート打設などの点で有利となると考えられる。

以上のことを踏まえて、沈埋函のような静的荷重を受ける構造物に対するずれ止め効果の安全率の検討を行った結果、合成構造沈埋函では安全率を3としても問題がないと考えられる。

6. 合成構造実験の内容

沈埋函に作用する断面力を示すと図-6になる。合成構造の設計手法を適用するのは側壁部と下床版部であることから、実験の内容としては部材としての挙動を確認する実験、合成構造とRC構造との混合部分となる隅角部の強度確認実験、全体の破壊モードを確認するための実験を行えば、合成構造沈埋函の設計法を確立できると考えられる。さらに、合成化をスタッドジベルにより図ることにしたため、スタッドジベルのせん断耐力を確認することにした。

したがって、実験の内容は表-2の3種類とした。以下、内容を説明することにする。

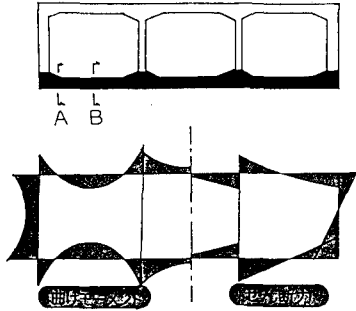


図-6 沈埋函に作用する断面力図

表-2 実験の目的と種類

載荷実験の種類	実 験 目 的	供試体数、スケール
はり部材載荷実験	・設計荷重時の部材強度および挙動の確認（ジベルの配置、曲げ・せん断に対する挙動の確認） ・破壊時の挙動の把握（圧縮側鋼板の座屈、破壊形態、破壊安全率の確認）	9体 1/1
隅角部強度確認実験	・設計荷重時の部材強度の確認 （隅角部補強鉄筋、引張鉄筋の定着長、鋼板の応力発生状況、側壁側鋼板の上床版側定着による影響の確認） ・破壊形態の確認	1体 1/1.5
函断面載荷実験	・沈埋函全体としての破壊形態の確認	1体 1/3

(1) はり部材載荷実験

図-6の断面力が作用している沈埋函断面の下床版に着目して実験を行った。表-3に供試体の種類を示す。

供試体は9種類から構成されている。表-3の対象範囲のうちA部は沈埋函の外側にある鋼板に対し正の曲げおよびせん断、B部は負の曲げが作用する部分である（図-6参照）。また、スタッドジベルの安全率というのは鋼とコンクリートとのずれ止めにたいする安全率の値であり、道路橋示方書で示されている値である6を基準にして、1/2の3、1/4の1.5に相当するものである。

供試体のスケールは、曲げ破壊実験に対しては沈埋函車道部の下床版と実物大とし、せん断破壊実験はせん断スパン高さ比を少なくとも2程度になるよう載荷試験機的能力を考慮して決定した。供試体を図-7に示す。

表-3 はり部材供試体の種類

No	対象断面	鋼板位置		スタッドジベルの安全率			試験の種類	
		引張側	圧縮側	6	3	1.5	せん断	曲げ
①	A	○	—	—	○	—	○	—
④		○	—	○	—	—	○	—
⑦		○	—	—	—	○	○	—
RC-1		—	—	—	—	—	○	—
②	B	—	○	—	○	—	—	○
⑤		—	○	○	—	—	—	○
③	A	○	—	—	○	—	—	○
⑥		○	—	○	—	—	—	○
RC-2	A	—	—	—	—	—	—	○
		—	—	—	—	—	—	○

注. N0.⑦供試体は、スタッドジベルをつけないケースである。

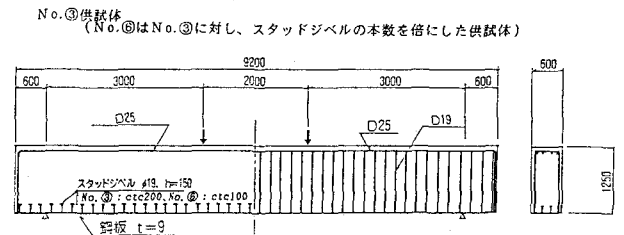
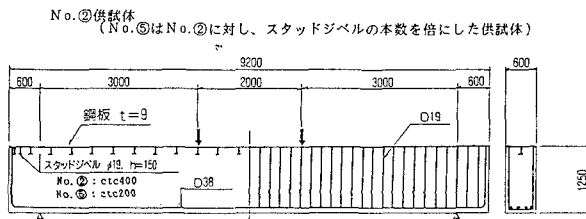
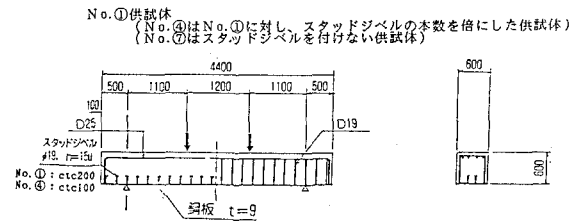


図-7 はり部材載荷実験供試体

(2) 隅角部強度確認実験

沈埋函の隅角部には上床版側隅角部と下床版側隅角部があるが、下床版側隅角部については側壁および下床版とも合成構造であることから設計および強度などの点に問題はないと考えられる。ところが、上床版側隅角部は側壁（合成構造）と上床版（RC構造）の混合構造となるため、設計手法、強度、破壊モードなど確認をしておく必要がある。このため、図-8に示す4体の供試体を使用して実験を行った。供試体のスケールは実物大が望ましいが、載荷荷重が大きく荷重制御の面でやや複雑になることから 1/1.5とした。

図-8からも分かるように、供試体は側壁部の鋼板の定着長さおよび上床版の防水鋼板の有無による影響を把握できる構造とした。

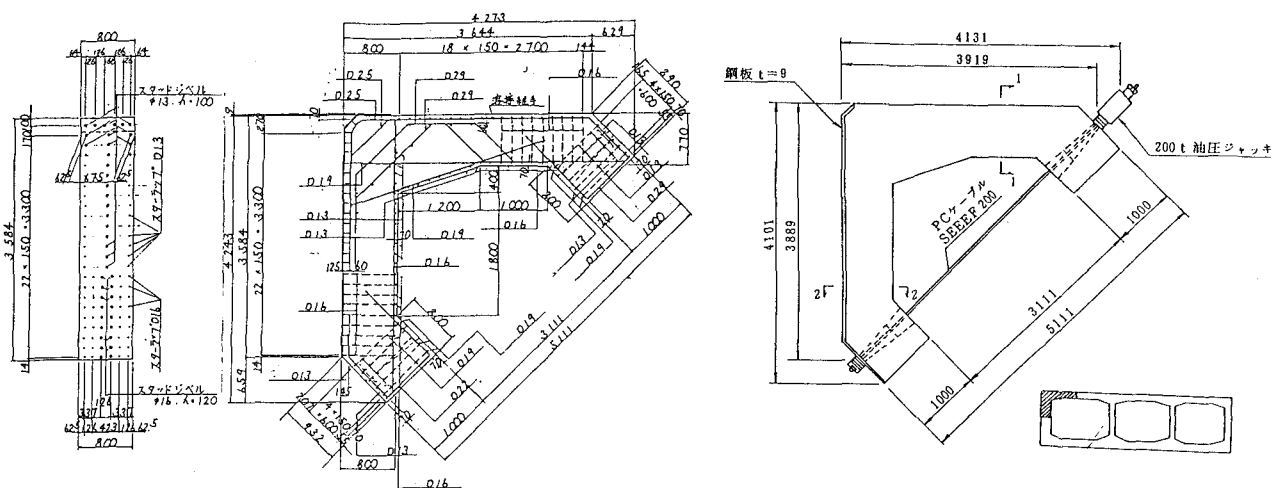


図-8 隅角部強度確認実験供試体

(3) 函断面強度確認実験

沈埋函の断面は構造的に3つのBoxから形成されているが、1 Boxに断面構造を単純化して実験を行うことにした。函断面による破壊実験の目的は沈埋函全体としての破壊モード、上床版の防水鋼板の有無による影響などの確認を行うことである。荷重は沈埋函に発生する断面力（曲げモーメント、せん断力）の状況とほぼ同等になるよう上下床版、側壁とも2点载荷とした。供試体を図-9に示す。2体の供試体の相違は、防水鋼板の有無、側壁の鋼板の定着位置である。

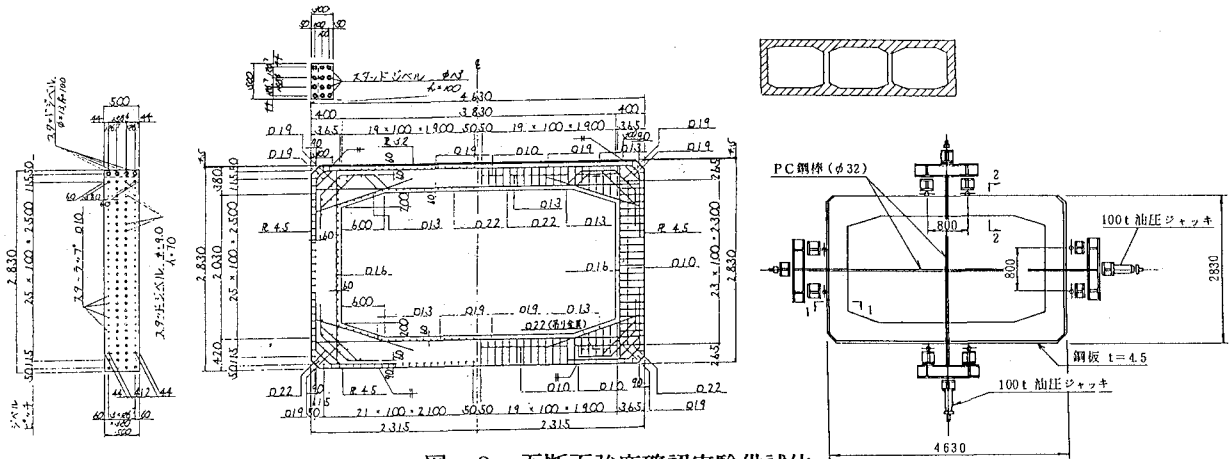


図-9 函断面強度確認実験供試体

(d) 押し抜きせん断試験

スタッドおよびスターラップによりずれ止めを図ることになっていることから、これらのせん断耐力を確認するため押し抜きせん断試験を42体の供試体を使用して実施した。コンクリートの打設方向によりずれ止めの耐力が異なることから、「鋼・コンクリート合成構造の設計ガイドライン」に従って打設方向別に行った。ここでは紙面の都合上、試験の内容を割愛する。

7. 実験の結果

結果の詳細は別の機会に報告する予定であるが、一連の実験の主要な結果をまとめると、次の2点になる。

① ひび割れ幅

合成構造供試体のひび割れ幅はRC供試体のひび割れ幅より大きくなる傾向にある。今後、RC構造沈埋函と同様の考え方によるひび割れ幅の制御設計を行うのであれば、何らかのひび割れ対策が必要である。

② スターラップのずれ止め効果

スターラップは斜引張応力とずれせん断力と同時に受けることになるが、両者を兼用しても問題はない。ただし、今後の課題として、

① 補鋼材の取扱

沈埋函の施工上、たわみや歪み防止のため補鋼材を鋼板に取り付ける必要がある。補鋼材が合成に与える影響を確認しておく必要がある。

② スターラップのずれ止め効果

スターラップがせん断補強とずれ止めを兼用することに対して実験では何ら問題はなかったが、机上で強度の確認が必要である。

8. 終わりに

大阪港海底トンネルは、大阪湾臨海部に建設される大規模沈埋トンネルとしては初めてのものである。地震・沈下による地盤の挙動、鋼板の腐食など技術的に予測が難しい部分も多いため、今後とも種々の検討を重ね、合成構造沈埋函の設計・施工手法を取りまとめる予定である。これらの結果等についてはいずれかの機会に公表する。

なお、合成構造沈埋函の実験にあたっては、長尾義三日本大学教授を委員長とする本委員会と、構造の問題を専門に検討する構造専門委員会（委員長：園田恵一郎大阪市立大学教授）で内容を審議していただいた。この場を借りてお礼を申し上げる。

（参考文献）

- 1) 港湾の施設の技術上の基準・同解説、(社)日本港湾協会、平成2年2月、上P237～253