

(44) 鋼コンクリートサンドイッチ構造の沈埋函への適用

APPLICATION OF STEEL-CONCRETE COMPOSITE STRUCTURE TO IMMERSED ELEMENTS

南 兼一郎* 中島 由貴** 城代 高明***
 By Kenichiro MINAMI, Yoshitaka NAKASHIMA, Takaaki JYODAI
 中本 隆**** 高橋 正忠***** 谷河 正也*****
 Takashi NAKAMOTO, Masatada TAKAHASHI and Masaya TANIGAWA

Kobe Minatojima undersea tunnel, which was planned to improve access from the Port Island to the central area of Kobe city because of extending Port Island by reclamation, is immersed tube tunnel.

Minatojima Tunnel utilized a composite structure method for the immersed elements. Top slab and side wall of elements adopted Steel-Concrete Sandwich Structure, which is unified an outer and inner steel shell with concrete in between.

This paper describes the reason to chose the design concept, outline of the design and quality management for concrete, in applying sandwich structure to immersed elements in Minatojima Tunnel.

1. はじめに

神戸港内にある海上都市ポートアイランドは交通・ライフラインを単独の橋梁に依存してきたが、先般の震災及び拡張計画に鑑み、アクセス等の多重化及び交通容量の増大が喫緊の課題である。これを解決すべく、第二の道路として「港島トンネル」が計画された。本文では、港島トンネル沈埋部へのサンドイッチ構造適用に関し、経緯、設計概要、及び高流動コンクリートの品質管理等につき、報告する。

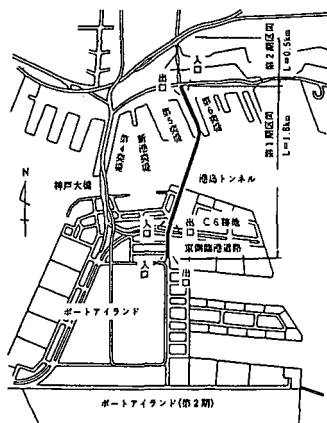


図-1 位置図

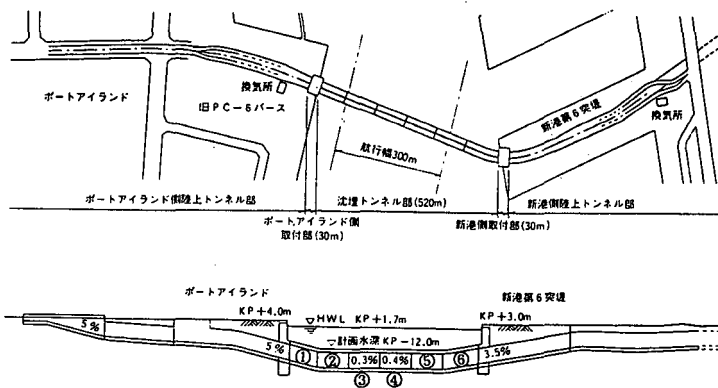


図-2 計画平面図及び計画縦断面図

* 工修 運輸省第三港湾建設局
 *** 運輸省第三港湾建設局
 **** (株)オリエンタルコンサルタンツ

** 工修 運輸省第三港湾建設局
 **** 工修 運輸省第三港湾建設局
 ***** 工博 (株)ニュー・エック

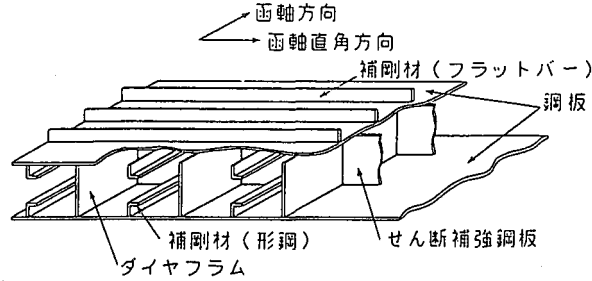


図-6 上床版鋼殻構造のイメージ

- ④コンクリートの流動阻害要因の削減：例えば、上床版を構成する上面鋼板からシアコネクタとして機能しない函軸直角方向のフラットバーを、上面鋼板外側に配置する。
- ⑤容易なコンクリート品質管理の実現：打設量管理等品質管理の都合で上床版の打設区画を自由に選択可能とする。

3. サンドイッチ合成構造の設計概要

基本的に準拠した「土木学会：鋼コンクリートサンドイッチ構造設計指針(案)」は、限界状態設計法で記述されているが、1号函で適用した設計法に留意し許容応力度設計法を基本とした上で、終局耐力を照査する記述で、「港島トンネル沈埋部合成構造設計指針(案)」を策定した。その際に、幾つかの課題につき構造実験を実施し、その結果を反映した。

以下に、今回の設計の基本的な考え方の要点を示す。

- ①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慣用理論の適用法が確認されたので、引張鋼板を引張鉄筋と見なしその応力度を許容応力度以下とした。
- ②せん断力に対する設計：コンクリートの平均せん断応力度が許容せん断応力度を超える場合は、函軸方向に配されたダイヤフラムはせん断耐力向上への寄与が小さいことも考慮し、函軸直角方向（サンドイッチ部材としての部材軸方向）に配したせん断補強鋼板で全せん断力を分担させるものとした。
- ③ずれせん断力に対する設計：鋼板とコンクリートの一体化のため鋼板にシアコネクタ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での鋼板とコンクリートの接合面に作用する全ずれせん断力に対し、この間に配された山形鋼とダイヤフラムで抵抗させるものとした。
- ④施工時応力の扱い：コンクリート打設時の残留応力が耐力に与える影響は軽微であるので、合成断面の算定でこれを無視した。

4. 高流動コンクリートの役割と配合

鋼殻とコンクリートが合成構造として完全に一体化するためには、鋼殻内部の密閉空間を十分充填した上で、なお且つ被覆する表面鋼板に均一に可能な限り接近する性能が、コンクリートに要望される。従って、降伏値が大きく、流動勾配が小さく、流動距離が大きい、材料分離がなく、且つブリージングが極僅かな配合が望まれる。また、パラストとしての役割も担うので、今回は比重を2.3~2.35とした。他方、これら以外の性能は汎用的なコンクリートと同程度で十分と判断した。

表-2 実験の目的(課題)と種類

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	・隅角部の形鋼の適用性の確認：シールド法、補剛材の配置方法 ・耐力及び破壊形態
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 ・大型のガットリフ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

幾つかの充填実験を重ね、コンクリート性能の主要管理基準を、V75ロート値で5～15sec、スランプフロー値で62～72cmと設定した。実際に工事に使用される配合は、既存の研究成果を参考に、水・粉体容積比 (V_w/V_p) で88～90%、モルタル中の粗粒細骨材容積率 (S_f/M) で42～44%とした。細骨材の含有微粒分も考慮した現場配合の一例を次に示す。

表－3 現場配合の一例（細骨材の微粒分を考慮）

水・粉体容積比 (%) $W/(C+Sg)$	細骨材率 (%) S/a	粗骨材容積 (l/m^3)	水・粉体容積比 (%) V_w/V_p	モルタル中の 粗粒細骨材容積率 (%) S_f/M	単位量 (kg/m^3)					高機能AE減水剤 ($C+Sg$)×%
					水 W	セメント C	薄スラグ* 微末 Sg	細骨材 S	粗骨材 G	
30	50	300	88~90	42~44	176	176	411	778	777	1.3

このような充填性能を追求する視点は、従来の高流動コンクリートの開発の主要な視点である間隙通過性能の追求とは、異なるものである。充填実験の初期の段階では、右相異につき明確な区別の認識がなく、製造に際し材料分離の予防に腐心し、粘性を高くし流動距離を押さえる傾向があった。

5. 高流動コンクリートの厳密な品質管理の必要性

言うまでもなく、合成構造は鋼とコンクリートという異材を有機的に一体化するものであるが、今回は鋼殻設計の立場及びコンクリート打設の立場、これら立場間で意見の隔たりが存在した。前者は、表面鋼板とコンクリートの隙間の予想される程度に応じて所要の補強を要すことを理由に、充填可能な程度の明確化を希望越した。他方、後者は、隙間の許容される程度に応じて品質管理を検討することを理由に、未充填の許容程度の明確化を希望越した。

ところで、全体コスト節減の立場から、鋼材はコンクリートに比し桁違いに高価であるので、コンクリート価格が多分に上昇しようとも、1トンでも鋼材を削ぎ落とすことが優先される。従って、未充填に対し、予め鋼材で補強するのではなく、可能な限り充填すべくコンクリートの品質管理を徹底することを選択した。

6. 品質管理の概要

高流動コンクリートの流動性状は、細骨材の微粒分量・表面水の変動及び気温等に極めて敏感に左右されるので、従来の常識を大きく越える厳密な品質管理が要求される（ミキサー車1台毎の品質試験等）。特に流動性状を維持する寿命とも言える制限時間があり、これを経過すると急速に流動性が低下する。従って時間管理を誤って打設すると補修困難な未充填が発生する可能性が大きく、またかかる不具合時には躊躇せず中止しなければ損害が拡大し収拾困難に至る。

そこで、発注者が監督に際し施工者の施工方法を的確に評価することが可能なように、大規模な施工管理実証実験を実施し、この結果を踏まえ「品質管理指針（案）」を策定した。右指針は、次の視点等からISO9002に準拠することとした。

- ①施工の可否を左右する要素から属人的なものを排除することを、即ち、施工の可否が特定個人の経験・能力に依存するのではなく、誰もが指針に従えば打設可能とならしめることを、指向する。
- ②直接的な目視確認及び未充填の補修が原則困難であるので、予め合意された所要の施工プロセスが正確に実施されることが極めて重要である。そのプロセスの的確な実施如何につきエビデンスを残し保証できる。
- ③施工プロセスにつき膨大なエビデンスを残すことは一見余分な労力を要するようだが、工事に対する発注者と施工者の責任所在が明確化され、結果として対等かつ正確なコミュニケーションが期待できる。

参考までに、同指針（案）の主要目次及び提案された品質文書の一覧を次頁に示す。

前述のとおり時間管理のミスは甚大な事故に至りかねない。そこで施工実証実験では次の制限時間を設定した。

①混練から打設終了までの制限時間：９０分、②一打設区画（３台のミキサー車で打設）に要する制限時間：５０分、③現場荷卸時品質管理から打設開始までの制限時間：１５分

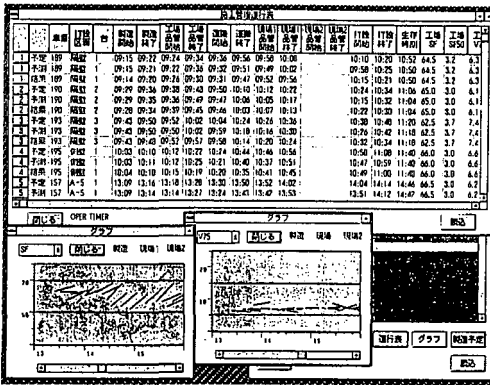
これに対し、混練開始から打設終了までの７カ所のチェックポイントで通過時刻を採取し、実際と予定との差異及び次ポイント以降の通過時刻の予測を瞬時に分析し各担当者宛に同報し、制限時間を遵守した。

表－４ 品質管理指針(案)の主要目次

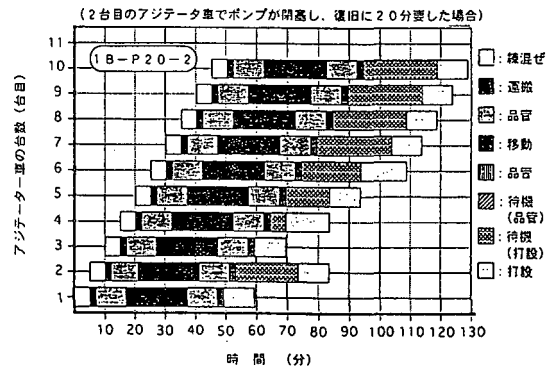
- | | |
|--------------|------------------|
| 1. 基本方針 | 9. コンクリートの追跡性の管理 |
| 2. 用語の定義 | 10. 工程の管理 |
| 3. 品質システム | 11. 試験・検査の管理 |
| 4. 組織及び要員と責任 | 12. 試験及び検査器具の管理 |
| 5. 文書管理 | 13. 不具合・不適合品の管理 |
| 6. 教育・訓練・資格 | 14. 是正処置及び予防処置 |
| 7. 修正方配合の管理 | 15. 品質記録の管理 |
| 8. 生コン工場の管理 | 16. 統計的管理手法 |

表－５ 品質システム文書一覧

- | | |
|---------------|--------------------|
| 1. 品質管理指針 | 9. 箇先管理手順書 |
| 2. 文書管理手順書 | 10. 不適合材料の処置手順書 |
| 3. 作業手順書 | 11. 不適合コンクリート処置手順書 |
| 4. 作業フロー図 | 12. 最終検査手順書 |
| 5. 修正方配合設定手順書 | 13. 製造・運搬・打設指示書 |
| 6. 現場配合設定手順書 | 14. その他チェックリスト |
| 7. 材料試験手順書 | |
| 8. 品質試験手順書 | |



図－７ 時間管理画面の一例



図－８ 数値シミュレーション結果の一例

また、コンクリート輸送の各段階で種々のトラブルが発生した場合、それが如何なる影響を及ぼすか具体的に学習するために、数値シミュレーションを実施した。

7. 内部鋼板の耐火・防食

鋼板が露出するので、内壁の耐火・防食対策が新たに必要となる。国内でトンネル耐火に関する明確な基準が無いので、我が国既往最大火災事故となった日本坂トンネル事故での温度上昇曲線を基準とし、これに対し内壁鋼板表面温度を耐力低下が発生する350度を越えないよう、珪酸カルシウムを主成分とするショットクリートを所要厚（30mm）の仕様とした。また、防食に関しては、フリーメンテナンスのニーズに対し、飛沫帯防食を参考に、「ジソクリッチャイト70μm及びエポキシ樹脂120μm×2層」の被覆仕様とした。

8. 最終継手構造への適用（大阪港南港トンネル）

港島トンネルより先行している大阪港南港トンネルは、潜水作業を削減するなど施工の安全を向上する観点から、「Vブロック」タイプ最終継手の採用を予定している。これは、当初端部鋼殻の延長として設計したので鋼殻構造であったが、これを下床版も含めサンドイッチ化を図り、設計を変更したところ、製作費で約10%程度の節約が可能になった。

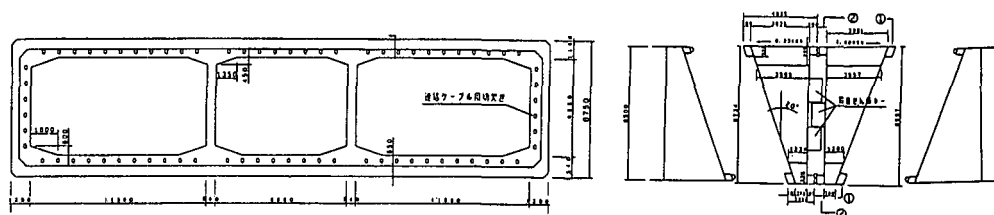


図-9 Vブロック標準断面図

9. おわりに

高流動コンクリートは、厳密な品質管理には多大な人員、労力及び時間を要するので、難易度が高く高価な技術との印象を強めている。今後、自動全量試験等品質管理分野の技術開発が強く期待される。

また、米国では沈埋函製作の洋上打設が普及しているが、本構造は永久型枠も兼ねており洋上打設を容易に実現でき、全体コストに占める割合の大きいドック費用の大幅な削減が期待できる。

今回のサンドイッチ構造の沈埋トンネルへの適用に際し、コンクリート材料・構造両専門委員会（前者委員長：藤井京都大学教授、後者委員長：園田大阪市立大学教授）で熱心にご審議頂いた。その際に賜った多数の助言は、時期尚早との懸念で一度は失速しかかったこのプロジェクトに、大きな浮力を付与させるに至った。ここに記して深甚な謝意を表する次第である。

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）、平成4年7月
- 2) 中島：沈埋トンネル、コンクリート工学、1995.1
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 渡辺、佐藤、稲垣、鈴木：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、コンクリート工学協会第17回コンクリート工学講演会、1995.6
- 7) 南、吉川、岸本、中島：鋼コンクリートのサンドイッチ合成構造を用いた沈埋函の試設計、土木学会第50回年次学術講演会、1995.9
- 8) 清宮、木村、渡辺：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、土木学会第3回合成構造の活用に関するシンポジウム、1995.11
- 9) 運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所：港島トンネル沈埋部合成構造設計指針（案）、1995.3
- 10) 岡村、前川、小澤：ハイパフォーマンスコンクリート、技報堂出版、1993.9
- 11) 小門、鈴木、輪湖、佐藤：沈埋トンネル・フルサンドイッチ構造部への充填を対象とした粉体系高流動コンクリートの諸特性について、コンクリート工学協会第17回コンクリート工学講演会、1995.6
- 12) 久木田育穂：ISO9001にもとづく品質監査ガイドブック、日刊工業新聞社、1992.11
- 13) 久米均：品質保証の国際規格 ISO規格の対訳と解説 第2版、日本規格協会、1994.9
- 14) 久米、輪湖、小島、佐藤：沈埋トンネル・フルサンドイッチ構造部を対象とした高流動コンクリートの施工実験について、コンクリート工学協会第17回コンクリート工学講演会、1995.6
- 15) A.Gursoy: Immersed Steel Tube Tunnels: An American Experience、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