ジャッキダウン工法による大型水中 フーチングの施工 ——香港・青荃大橋—— チンチュン

大村秀雄*1・浅野雅行*2・佐藤英俊*3・山本茂治*4

概要 本稿は、海面下に施工する多柱基礎フーチングの工事記録である。従来は、① 締切り工を用いる、② 函体をドライドックで製作・曳航する、③ 水中コンクリートを使用する、等の施工法が用いられてきた。本工事では、ジャッキダウン工法と称する施工法を採用した。この工法は、フーチング外殻部をくいて気中製作し、海中の設計高さまで沈設した後にフーチング内部のコンクリートを打設する工法である。本工法の特徴は、フーチング外殻部の曳航などの工種をなくしたこと、外殻部を締切り工と型わくに併用したことにある。本工法の採用により、工期を大幅に短縮することができた。ここに、ジャッキダウン工法の計画段階での検討事項および施工の一部を報告する。

キーワード ジャッキダウン工法、多柱基礎、FEM 解析、PCパネル、水中型わく、沈設管理

1. ま え が き

青荃大橋は、香港新界地区の青衣島と荃湾ニュータウンを結ぶ道路橋である。青衣島は、香港の中心部から約 10 km の距離に位置し、市街地の極端な都市集中を緩和するため、20 万都市をめざしてニュータウンの建

設が盛んである。現在、40 階クラスの高層住宅が次々と建設中である。本橋は、青衣島への主アクセスとして計画されたものである。図—1 に架橋位置を示す。

本橋の橋脚は、海峡を横過する海上工区で多柱基礎が採用されている。本稿は、多柱基礎のフーチングをジャッキダウン工法を用いて施工したので、その概要を報告する。

2. 青荃大橋の概要

青荃大橋は、幅 260 m のランブラー海峡を横過する海上工区と、それにつながる陸上アプローチ部からなり、総延長は 1 015 m である。

海上工区は、中央径間長 160 m、側径間長 90 m の PC 3 径間連続箱げた橋で、航路限界（幅 122 m、高さ 20 m）を確保している。橋脚の基礎は、美観を考慮してフーチングの大部分が海面下に潜る多柱基礎となっている。

図—2 に海上工区の側面図、図—3 にフーチングの形状寸法を示す。

橋脚位置では約 20 m の水深があり、基礎ぐいは海底面から約 15 m 突出している。くいは、厚さ 8 mm の鋼管を永久ケーシングとして用い、リバース工法により海底下の岩盤を 5 m 掘削して根入れさせた。

3. フーチングの施工

海中に構築するフーチングということで、種々の施工

図—1 青荃大橋の位置

*1 おおむら・ひてお／前田建設工業㈱香港支店青衣北橋作業所所長

*2 あさの・まさゆき／前田建設工業㈱香港支店青衣北橋作業所工事課長

*3 さとう・ひでとし／前田建設工業㈱土木設計部

*4 やまもと・しげし／前田建設工業㈱香港支店青衣北橋作業所

図-2 側 面 図

図-3 フーチング形状

法の比較検討を行った。比較検討案を下記に示す。

- 1) ドライドック内コンクリート製函体製作，曳航据付け，くい打ち案（発注者案）
- 2) ジャッキダウン工法案
- 3) 二重締切り案
- 4) 一重締切り築島案

経済性，工期，施工条件等を考慮し，ジャッキダウン

工法が優れていると判断して発注者に提案，承認を得て施工を行った。図-4 に本工事の施工順序を，写真-1～写真-6 に施工中の状況を示す。

4. ジャッキダウン工法の検討事項および 検討結果

施工に先立ち，以下に示す本工法特有の問題点に対し

Construction of the Large Pile Cap in the Sea, using the Jack Down System —Hong Kong Tsing Tsuen Bridge—

By H. Ohmura, M. Asano, H. Satoh, S. Yamamoto

Concrete Journal, Vol. 26, No. 9, pp. 31~39, Sept. 1988

Synopsis Tsing Tsuen Bridge crosses the 260 m wide Rambler Channel. This is the largest prestressed concrete bridge in Hong Kong. The main piers are supported on 28 large diameter (2.1 m) bored cast in place concrete piles through pile caps. The pile cap is quite large being 6.6 m deep by 45 m long by 16 m wide. An elegant solution (Jack Down System) was used to overcome the problems of constructing the pile caps most of which are in the sea. The solution adopted was to concrete outer shell of the pile cap (the bottom and sides) above the water level. This assembly was then lowered using jacks onto the piles and circumferential gaps between the piles and the bottom slab sealed. In this report, the construction method and some technical advices are introduced.

Keywords : Jack Down System, multi pile foundation, FEM analysis, precast concrete panel, shuttering in the water, control of lowering

図-4 フーチング施工順序

写真-1 スラブ型わく

写真-2 くい位置のスラブ開口部

て検討を行った。

- 1) スラブの検討
- 2) 側壁の検討
- 3) くいとスラブ間の止水方法、浮力に対する検討
- 4) 基礎ぐいとスラブとのクリアランスの検討
- 5) ジャッキおよび油量同調装置の検討
- 6) 測量方法の検討

主な検討内容を詳述する。

4.1 スラブの検討

スラブは、平面寸法が45.2×16.0mで厚さが85cm、しかもφ2300mmの開口部が28箇所あり、剛性の低いたわみ性構造である。本工事では、8台の油圧ジャッキを使用してスラブを吊り下ろすので、ジャッキ間にストローク差（以下、不等沈設）が生ずると、スラブ内に不静定力が発生する。不等沈設の程度によっては、スラブの耐力を超えるおそれがあるばかりでなく、ジャッキに過大な反力が作用し、その能力を超える危険性があった。そこで、スラブを安全にジャッキダウンできるよう

写真-3 PCパネル建込み

写真-6 脚柱部施工

写真-4 ジャッキダウン前全景

写真-5 ジャッキダウン後全景

に、スラブの耐力およびジャッキダウン中のスラブの解析を行った。これらの結果をもとにジャッキダウン中の沈設管理を行うことにした。

(1) スラブの耐力

スラブは、開口部で区切られた直交する2方向のRCばりで構成されていると仮想し、はりごとに各断面で曲げ耐力およびせん断耐力を算定した。また、吊り点位置では、押抜きせん断耐力を算定した。本橋はBS 5400 (British Standard) に従って設計されており、架設時の設計計算はすべてR.E (Resident Engineer) の承認を受けなければならないので、耐力の算定もBS 5400に従った。コンクリートおよび鉄筋の特性値を示す。

$f_{cu}=45 \text{ N/mm}^2$ (Characteristic strength of concrete cube)

$f_y=425 \text{ N/mm}^2$ (Characteristic strength of reinforcement)

図-5にはり構成とジャッキ位置、図-6に押抜きせん断耐力算定断面を示す。

(2) スラブの解析

スラブは、図-4に示した施工順序に従い、種々の応力状態となる。これらについて、各施工段階ごとにFEM解析を行った。解析に用いたコンクリートの物性値を下記に示す。

コンクリートのヤング係数

$E_c=26 \times 10^3 \text{ MPa}$ ($2.65 \times 10^6 \text{ tf/m}^2$)

コンクリートのポアソン比 $\nu=0.2$

ヤング係数が日本で用いている値より小さいが、これは香港のC.E. Manual (Civil Engineering Manual) の値を適用している。C.E. ManualはBritish

Standardの規定が香港の特殊条件に適合しない部分を規定している。香港のコンクリートは、ヤング係数が小さいこと、乾燥収縮が大きいことに特徴がある。

荷重は、自重のほかに、ジャッキダウン中に各吊り点

コンクリート工学

図—5 はり構成およびジャッキ位置

図—6 押抜きせん断算定断面

に相対レベル差が生ずることを考慮し、吊り点ごとに単位量として 10 mm の強制変位を与えて解析し、この解析結果を沈設管理のデータとして使用した。

図—7 に、8 台のジャッキで吊り上げた状態、すなわち自重のみが作用している状態でのスラブのたわみを示す。最大 7 mm 程度のたわみが生じている。

表—1 に、吊り点位置の押抜きせん断耐力と、自重のみが作用している状態での吊り点反力を示す。吊り点反

表—1 吊り点反力および押抜きせん断耐力 (単位: t)

	吊り点反力	押抜きせん断耐力
No. 2, 3, 6, 7	235	443
No. 1, 4, 5, 8	198	351

図—7 スラブたわみ図

図—8 はり③の曲げモーメント分布
(単位: t·m)

図—9 はり③のせん断力分布 (単位: t)

力の値には荷重係数を含んでいない。

図—8, 9 に、はり③の自重による曲げモーメント、曲げ耐力、せん断力、せん断耐力を示す。はりに作用する断面力は、はり幅内の各要素に作用する断面力を集計して算出した。図中の断面力には安全係数 1.32 ($r_{f3} \times r_{fL} = 1.15 \times 1.15$) を含んでいる。安全係数の値は BS 5400 に従った。

表—2 に、吊り点 No. 3 に他の吊り点に対して -10 mm の強制変位を与えた場合、吊り点 No. 4 に -10 mm の強制変位を与えた場合の各吊り点反力の変化を示す。不等沈設の影響が非常に大きいことが容易に判断できる。

表—2 不等沈設による反力の変化

(単位: t)

	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8
No. 3 (-10 mm)	-11	64	-83	36	1	-19	34	-22
No. 4 (-10 mm)	1	-11	36	-33	0	1	-22	28

(注) +: 増加, -: 減少

表—3 検討時不等沈設の組合せ

	No. 1 (-10 mm)	No. 2 (-10 mm)	No. 3 (-10 mm)	No. 4 (-10 mm)	No. 5 (-10 mm)	No. 6 (-10 mm)	No. 7 (-10 mm)	No. 8 (-10 mm)	自 重
組合せ-1		○	○			○	○	○	○
-2	○			○	○			○	○
-3	○			○		○	○		○
-4			○	○	○	○			○
-5			○	○		○			○
-6			○	○			○		○
-7			○						○
-8				○					○

実際のジャッキダウン中には、各ジャッキ間のストローク差による不等沈設の組合せの数は無数にあるが、検討段階では、表—3 に示す不等沈設の組合せを抽出し、不等沈設量を -10 mm として、スラブの断面力(安全係数 1.32 を含む)を算定した。この断面力がスラブの耐力以下であることを確認した。

4.2 側壁の検討

計画段階で、プレキャストコンクリートパネル(以下 P C パネル)案と場所打ちコンクリート案の2案を検討した。

スラブ打設後、型わく支保工を組み、側壁を打設する場合場所打ち案は、工程的に不利であること、および、厚さ 250 mm、高さ 4.4 m でテーパのついている側壁の表面仕上げ面が P C パネル案より劣ることがあげられた。構造面からは、スラブと一体構造とした場合には、ジャッキダウン中のスラブのたわみにより側壁にゆがみが生じ、損傷を受けるおそれがあった。そこで、スラブとの取付け、壁と壁との取付けがフレキシブルな構造にやすく、かつ工程的に有利な P C パネル案を採用した。

本工事の P C パネル工を以下に示す。

- 1) パネル割りは、重量、ハンドリング性および美観上のジョイントの位置を考慮して、幅を 3 m とした(図—3 参照)。1 パネルの重量は 8.3 t で、1 フーチングに 38 パネル使用した。
- 2) パネルの製作は、現場の製作ヤードで行い、運搬・据付けはクレーン船で行った。
- 3) パネルの支持は、切ばり・腹起し形式で行い、波による偏圧を対面のパネルに伝えないように柱材を多くした(図—10 参照)。
- 4) スラブとパネルの取付け、およびパネルとパネルの取付けは、ボルト結合とした(図—11 参照)。
- 5) ダウン後、内部をドライにしてコンクリート打設を行うため、ジョイント間の完全な水密性が要求された。止水構造は、図—11 に示すようにラバー止水を用いた。タイプ-B は、パネルの長さ調整部で計 10 箇所設置した(図—3 参照)。

ジャッキダウン中には、パネル間のず

図-10 PCパネルの支持

図-11 ボルト結合および止水構造

れはみられなかった。また、ドライアップ後には、漏水はなかった。

4.3 くいとスラブとの隙間の止水方法および浮力に対する検討

ジャッキダウン終了後、くいとスラブとの隙間を止水し、ドライアップする本工法では、止水材に完全な水密性が要求された。また、ドライアップ時の浮力に対して、第1層目のコアコンクリート打設時には下向きの力に対しても耐える強度が要求された。図-12 に、くいに作用する力の変化を示す。

本工事では、止水材料として、表-4 に示すセメントグラウトを使用した。フーチング外殻部をジャッキで支持した状態で、くいとスラブとの間に鋼製ウエッジを打ち込み、固定してグラウト注入を行った(図-15 参照)。

くい1本당りに作用する力は、ジャッキ撤去時は下向

図-12 くい 28 本に作用する力 (単位: t)

表-4 セメントグラウト配合表

水セメント比 W/C	単位量 (kg/m³)		
	水 W	セメント C	混和剤 Methocel J 12 MS, Dehydratine 80
0.45	580	1288	11.25

(注) $\sigma_f = 320 \text{ kgf/cm}^2$ (100 mm 立方供試体)

きに最大 77 t、ドライアップ時は上向きに最大 106 t (H.W.L.), 第1層目のコンクリート打設時には下向きに最大 115 t (L.W.L.) である。鋼製ウエッジのウエッジ効果を無視して、グラウトの平均付着応力度に換算すると、それぞれ、1.4 (下向き), 1.9 (上向き), 2.1 kgf/cm^2 (下向き) となる。ドライアップ後、第1層目のコンクリート打設まで、潮位の変動により、付着応力度は 0.7 (下向き)~1.9 kgf/cm^2 (上向き) と、約1か月間、繰返しを受ける。

施工に先立ち、実物の約 1/3 スケールの供試体でグラウトの付着強度試験を行い、上記の荷重に対してグラウトが安全であることを確認した。図-13 に実験結果を示す。実際のグラウトは周囲をスラブで拘束されているので、実験では、グラウト注入時の型わくに鉄板を使用して拘束条件をモデル化した。最大平均付着応力度は 7.1 kgf/cm^2 であった。

図-14 グラウト用型わく案

グラウトの型わくは数案考えられた。図-14 に、代表的な3案を示す。第1案は、水中作業が多いこと、ブ

ラケットをくい 28 本に対して精度よく水平にセットすることが困難であることがあげられた。第 2 案は、ラバーチューブの入手が困難であること、グラウト重量（1 箇所当り 1.0 m³）に対して強度面で不安があり、確実性がないことがあげられた。本工事では第 3 案を用いた。

第3案は、ジャッキダウン前に、スラブ底面に合成繊維製のシートを取り付けておき、ダウン後に潜水夫の水中作業により、くに巻き付けてグラウトの漏れを防ぐ構造である。実際に海中で実物大の型わくを用いてグラウト注入実験を行い、改良を加えて 図一15 の構造とした。改良点を下記に示す。

- 1) 鋼製締付けベルトの厚さおよび締付け方法
- 2) くいと締付けベルトとの間にスポンジを使用
- 3) ダウン中に型わくを傷めないよう、シートを巻き上げて固定する方法

型わくは、そのセット作業が水中作業となるので、作業能率、作業精度が気中作業より格段に悪くなることを考慮して、できるだけ簡易化した。くい 28 本の型わくセットおよびグラウト作業は 4 日間で終了した。写真—7 に水中実験後の型わく状況、写真—8 にジャッキダウン前の型わく取付け状況を示す。

ドライアップ後、第1層目コンクリート打設までグラウト部での漏水は1箇所もなかった。

5. 沈設管理

沈設管理は、ジャッキダウン中に8台のジャッキを同調させて不等沈設を制御し、不静定力を最低限に抑えるため重要な管理項目である。

図-15 シート型わく詳細図

写真—7 水中実験後の型わく状況

写真—8 ジャッキダウン前型わく取付け状況

スラブの上下方向の相対変位の計測にあたっては、連通管を設置し、各吊り点位置ごとにマノメータを設け、ジャッキ1ストローク (350 mm) ごとに相対変位を測定した。計測結果は、スラブの解析結果、耐力計算結果をファイルしたマイクロコンピュータを用いて解析し、ジャッキのストローク調整にフィードバックした。

6.5 m (気中 3.5 m, 海中 3.0 m) の距離をジャッキダウンするのに 10 時間を要したが、海中の設計高さに 5 mm 以内の精度で据え付けることができた。

6. あとがき

海面下に施工するフーチングということで、種々の検討を行い、無事に施工を完了することができた。

計画段階では、ジャッキダウン中の不等沈設の影響を小さくするため、内側に隔壁を設けて剛性を高めることが考えられた。しかし、この場合、沈設後の内部の配筋が複雑になること、スラブの剛性が低くても沈設管理を的確に行えば安全であるとの検討結果をもとに、ジャッキダウン工法により施工を行った。

スラブの検討は FEM 解析で行ったが、最終的には直交する RC ばりとして耐力との比較を行ったので、格子ばりのモデルでも解析しておく必要があったと考えられる。

今後、海峡、運河あるいは河川に架橋される橋りょうでは、美観を考慮してフーチングを水面下に施工するケースが増えることが予想される。本工事で採用したジャッキダウン工法は、このような水中フーチングの新しい施工法の一つであると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 大村秀雄：特殊工法 (ジャッキダウン工法) による 杭頭水中フーチングの施工、橋梁と基礎, Vol. 22, No. 6, 1988.6

国際会議ニュース

繊維補強セメント・コンクリートに関する国際会議 Int. Conf. on Recent Developments in Fibre Reinforced Cement and Concretes

日 時：1989 年 9 月 18 日～20 日

場 所：Cardiff (U K)

主 催：ウェールズ大学カーディフ校
(委員長は Dr R N Swamy)

内 容：標記に関するもの (詳細は下記へ問合せのこと)。

論文申込：11 月 30 日までに英文概要を下記へ送付。

連絡先：(Conference Secretary)

Dr B BARR,
School of Engineering,
University of Wales, College of Cardiff,
Newport Road,
CARDIFF CF 2 1 TA,
S Wales, U K