

橋梁上部構造より見た橋梁基礎一下部構造

Some typical foundation structures—sub structures—from the
view point of the super structure of long span bridge

おく むら とし え
奥 村 敏 恵*

1. はじめに

最近我が国で工事中また実施計画が進行中の代表として、本四連絡橋公団の3つのルート、または東京湾横断道路の橋梁のような海域をわたる橋梁とか、東京湾、伊勢湾および大阪湾の湾岸沿いの道路路線に伴って建設される橋梁などがあげられ、この種の橋梁工事が、ここ十数年の歴史を経て、更に将来へとその展望が開けている。この場合海域または横断海峡または河川の船運航行の条件などに左右されて長支間化が望むと望まないにかかわらず条件づけられる社会的制約が課せられている。

幸いにして我が国のこれら長大橋、しかもその下部工事、上部工事を含めた技術的成果がここ20数年の歴史の中で着々と蓄積され、その可能性の幅を広げている。

あえて言えば世界のどの国にもひけをとらない、立派な技術的体験とその体系化に貴重な成果を生み出していることは十分ある種の自負を以て述べることができる。

しかし、これらの橋梁をとりまく我が国の自然環境条件は、橋梁支間の長大化に必ずしも恵まれているとは言えない。すなわち地震、台風などの自然の作用力を受ける条件は、ヨーロッパなどと比較すると極めてきびしいものがある。一方下部工事の設計、施工条件を支配する地盤の地質条件も、その長大化にはきびしい問題を投げかけており、この正しい事前評価を予備設計の段階において十分検討しておく必要がある。

すなわち、このような地盤条件に適した下部工事特にその基礎工の選択が、その成否に大きな影響を持つことを配慮し、過去の多くの事例を正しく活用し、その適切な利用を考えることが望まれる。このためには過去の事例を体系的に整理し、そのいずれかが対応する地点にからんでの橋梁基礎として、設置海面の状況、支持地盤の深さなどから考えて最適であるかを検討できる資料の整備も一つの手がかりになるものと考えられる。

筆者は長年上部工の設計、製作、架設にからんでの技術問題の解決にはいささかの関係を持った一人ではあるが、下部工は専門の立場から言えば門外漢の一人として眺めてきた次第であり、ここで意見を述べることは大変僭越なことと感じている。しかし上部工を正しい形で批判し、検討する立場におかれた多くの過去の経験から、下部工および

その基礎工の技術問題を、その通過点の一つの段階として聞き、ある種の感銘を持った一人として、与えられた課題にとり組むことを許容していただきたい。

なお、ここで述べるのはいささか適切ではないかと思うし、筆者の第三者的な見方ではあることをことわっておく必要があることを前提として述べることを許してもらいたい。すなわち、橋梁特に上部工は多くの場合、その設計が主体を占める場合が多いが、吊橋とか斜張橋のようないわゆるケーブル構造を採用する場合には、その架設工法の適否が、主体となるべきであって、その面からのその設計の正しい検討をすべきであると感じている。特に部材の接合方法が、その形状で支配される構造形、すなわち、吊橋の場合には補剛桁とよばれるものを、トラス形式にするか、箱形形式にするかの決断を下す場合に、その架設工法を支配する詳細設計にも目をくばるべきである。将来の使用期間において生ずると思われる事象を正しく評価し、設計どおりの構造が正しく具現される架設工法の採用が大切である。それによって詳細設計の重点をどこにおくべきかを考えておく必要がある。この場合下部工の工事ともからんで考えることも一つの方法である。英国のセバン橋が現在かかえている厳しい現実はこの種の考慮の欠如にも責めがあったと思う。筆者が昭和39年の秋現地に訪れ、ケーブル架設の終わった状態で工事事務所で所長と話し合ったときに感じた懸念—その詳細¹⁾については紙数の関係でここで述べるのは省略するが—が、その原因の一つであることを述べておきたい。

なお、次に述べることは、我が国の橋梁地点の現場における実状、すなわち架設地点の河川、または海峡の航行条件等を含めた社会的制約、または従来採用してきた工事の慣習にはなじまないものである。しかし、採用された建設手順は十分参考の価値があり、上、下部工一体としての柔軟な考え方の一つの手であると思われるので、あえて述べておきたい。

フランスのサンナゼル橋（斜張橋）では下部構造の工事にあたって、上部構造の架設を考え、一体として製作架設手順を考慮している点に注目してほしい。すなわち図—1、図—2に示すように橋脚打設と関連して側径間桁をとりつけ、川側すなわち側径間、主径間を支持する橋脚の打設に伴ってせりあげていき、所定の位置に桁をおさめる。一方図—3に示すようなタワーの建て方を用いている。

*東京大学 名誉教授

論 説

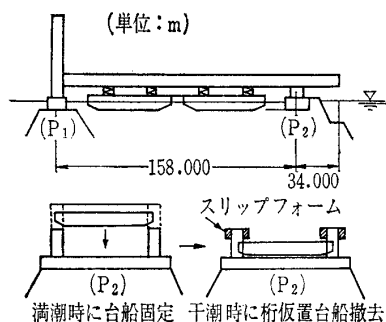


図-1 サンナゼル橋のサイドスパン桁の仮置き

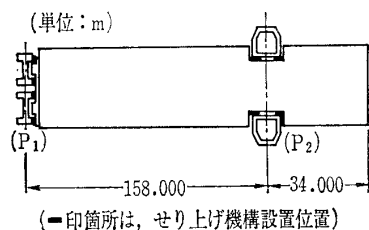


図-2 サンナゼル橋の桁の仮置き時の平面配置

これは一例にすぎないが、上部構造、下部構造をその架設工事にあたって別なものとしなない考え方も存在することに注目してほしい。

2. 海中基礎の例示

特に我が国を主体として実施され、または計画されてい

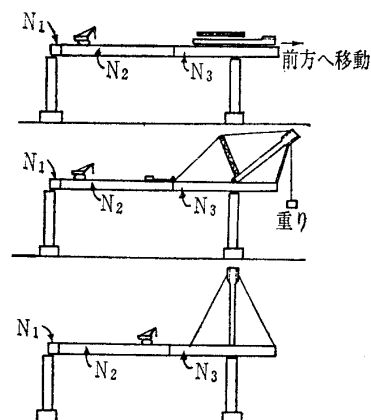


図-3 サンナゼル橋のタワーの建方要領図

る海中基礎の事例についてあげてみたい。門外漢の筆者がここで述べることは、計画にあたって多くの工夫をこらし、工事にあたって幾多の困難を克服された先達の労苦を称える意味もあることを述べておきたい。なお、筆者がその建設を検討する委員会に関係をし、また別の形であるがその工法の推進にいささかの関係を持ったものを取りあげたことをことわっておきたい。しかし、今後我が国の若い技術者が当面する問題の中で、先達の工夫の歴史をひもとき、その原点にかえてその原論文またはその建設にあたって苦勞された先達の話をきくことによって、本当に実のある生きた技術の本質をつかんでいただくことが、今後建設が

表-1 下部構造の主要諸元

橋名	形式	支間長 橋長 (m)	基礎番号	下部構造寸法 長×幅×高 (m)	最大水深 (m)	最掘削深 (m)	基礎種別	下部工主要数量		
								掘削 (m³)	コンクリート (m³)	
									プレバックド	普通
下大津井瀬戸橋	張単出径間吊橋	230+940+230 橋長 1400	1 A	74~190m²×75	—	—	トンネルアンカー	15 900	—	2 000
			2 P	19×56×22	—	—	圧気ケーソン	20 300	—	18 500
			3 P	19×56×14	—	—	直接基礎	22 300	—	14 900
			4 A	68×54×49.2	—	—	直接基礎	98 000	—	114 650
櫃石島橋	3連続径斜張間橋	185+420+185 橋長 790	1 P	27×28×8.04	—	—	直接基礎	4 200	—	17 700
			2 P	25×46×36.4	-25	8	設置ケーソン	24 200	32 200	9 500
			3 P	29×46×33.4	-20	5	設置ケーソン	32 300	10 800	27 300
			4 P	28×28×10	—	—	直接基礎	32 400	—	17 200
岩黒島橋	3連続径斜張間橋	185+420+185 橋長 790	1 P	28×28×10	—	—	直接基礎	32 400	—	16 300
			2 P	18×46×23.5	-12	3	設置ケーソン	9 620	12 700	6 800
			3 P	22×46×32.5	-20	4	設置ケーソン	37 200	25 000	8 400
			4 P	36×32×19	-10	4	設置ケーソン	26 700	14 100	18 400
羽高佐架島橋	2連続径斜張間橋	125+137 橋長 262	1 P	24×34×16	—	—	圧気ケーソン	10 800	—	16 500
			1 P	12×34×7	—	—	直接基礎	4 800	—	13 300
			2 P	30×40×10	—	—	直接基礎	4 200	—	17 700
			3 P	25×40×14.5	—	—	直接基礎	9 300	—	14 650
与島橋	3トラス連続橋	175+245+165.3 橋長 585.3	4 P	33×30×29	—	—	直接基礎	68 700	—	10 400
			1 A	71×54×56	—	—	直接基礎	9 500	—	137 000
			2 P	23×57×20	-9	1	設置ケーソン	21 000	13 600	12 800
			3 P	23×57×20	-3	7	設置ケーソン	41 700	12 500	12 800
北瀬戸備大讃橋	3連続径吊間橋	274+990+274 橋長 1 538	4 A	79×62×97	-6	4	設置ケーソン	54 000	35 400	253 500
			5 P	27×59×42	-24	8	設置ケーソン	32 000	48 100	15 500
			6 P	38×59×60	-36	14	設置ケーソン	121 700	117 000	16 900
			7 A	82.5×59×125	-23	27	設置ケーソン	594 000	233 000	186 000

(注) 支持層はいずれも花崗岩である。

予想される長大橋工事の成功につながるものと信ずるからである。すなわち長大橋は下部工、特に難しい海底地盤の地質にからんでより適切な工法を見つけ出すことが、上部工の生きた設計・製作・架設工事につながるものと考えからである。

その意味において筆者のここで述べる事例が何らかの示唆を与えることができれば幸いである。

2.1 設置ケーソン基礎

表一に本州四国連絡橋公団児島坂出ルートで施工された下部構造の主要諸元を示す。設置ケーソン工法が主体を占めている。昭和37年頃かと記憶しているが、三井造船㈱の友人より、遅ればせながら、橋梁工事の受注に参加させてもらいたいが、よい手順はないだろうかかと相談を受けた。このときやはり土木技術者になじみを持つことが一つの途であり、そのためには下部構造に造船技術で得た経験を生かす途を提案するのが良策ではないかと答えた。これは三井造船㈱の根拠地の一つの三井玉野造船所の近くで、近い将来瀬戸大橋の架橋工事が行われるが、ここに鋼ケーソン工法を考えることが一つの方法である。

この場合、基礎全体をつつみ込む全形型枠（ケーソン）をドライドックで建設し、これを浮上させ、基礎位置まで曳航し、このケーソン内に水を入れながら、正確な位置に沈設する工法が考えられ、このためには現場に即した曳航、沈設についての問題点を整理するのが手はじめの仕事ではないかと答えた。

これに応じて簡単な模型実験を東大の船舶工学科の乾教授の水理実験室で行われた。当時、瀬戸大橋の委員会に関係していたこともあり、架橋地点は比較的支持力の大きな花崗岩が露頭している点、多くの島の影響で2～5ノットの複雑な潮流が流れている点、船舶の往来が激しく、その動きは複雑である点、水深の変化もあり掘削・コンクリート打設は海から行わねばならない制約がある点などを考慮すると、海中型枠工法

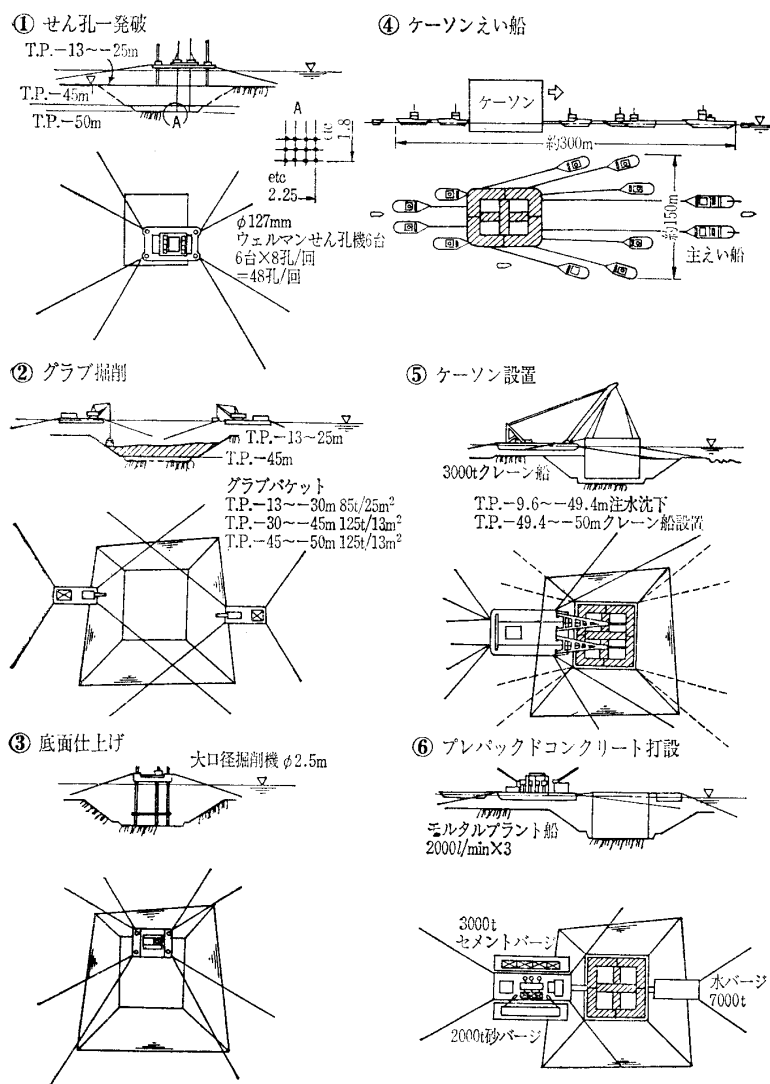


図-4 設置ケーソン工法施工要領

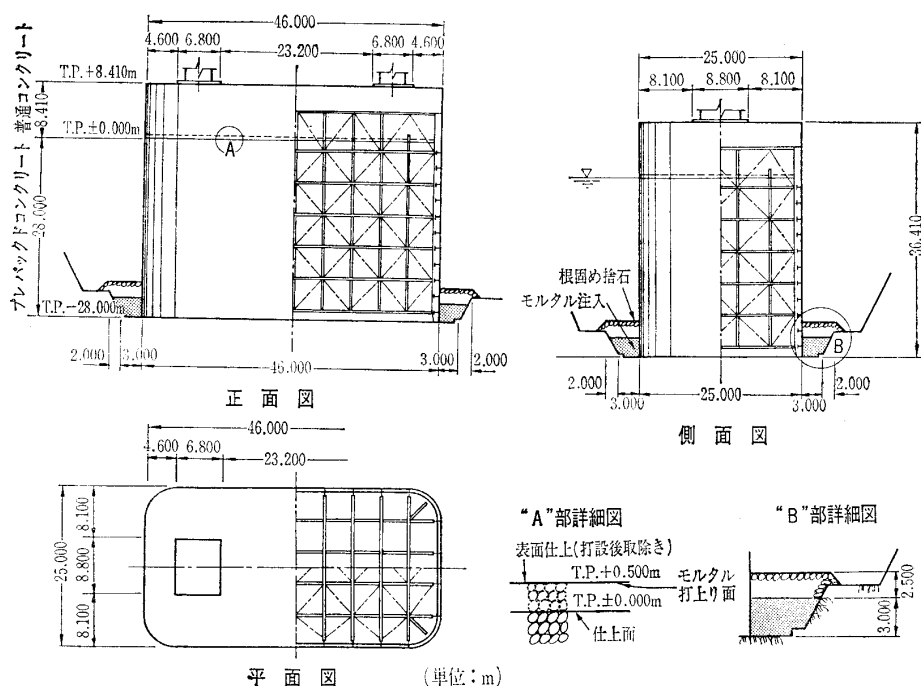
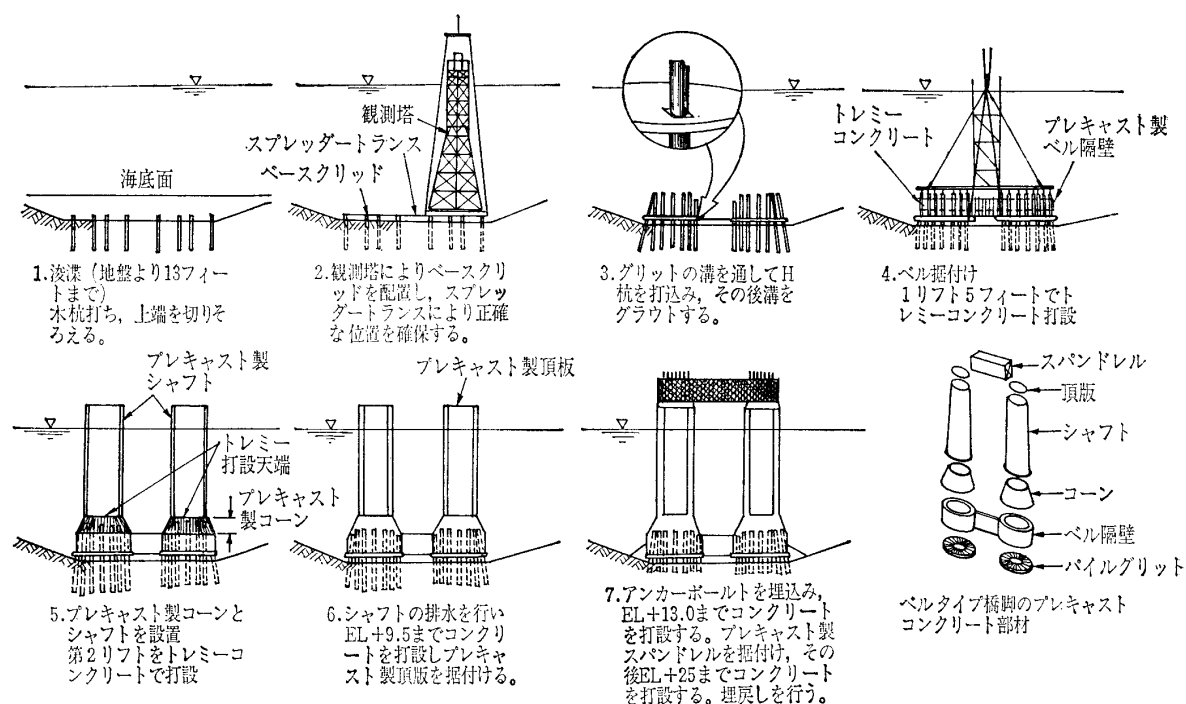


図-5 橋脚の構造図

論 説



図—6 ベル型基礎の施工例

調査年月日 昭和45年 8月22日～9月12日 標高 O.P.+4.160m

標高 (m)	層厚 (m)	柱状 図	土質 名	標準貫入試験					N 値
				N 値 (回)	10cmごとの 打撃回数	10 cm	20 cm	30 cm	
3.960	0.20		コンクリート						
1.860	2.10		捨て石および コンクリート片						
-0.240	2.10		アスガラ (盛土)	6	2	2	2		
				9	2	2	3		
				19	4	4	5		
			シルト	18	5	6	7		
-3.940	3.70		まじり砂	17	5	6	6		
				21	6	7	8		
			細砂まじり シルト	24	8	7	9		
-6.240	2.30		シルト	10	3	4	3		
				14	4	5	5		
			シルト	11	4	3	4		
-9.040	2.80		まじり細砂	10	3	3	4		
-10.140	1.10		シルト	9	4	3	2		
				5	1	1	1		
			粘 土						
-24.040	13.90								
-26.170	2.13		砂まじり粘土	7	2	2	3		
-27.440	1.27		砂まじり粘土	7	2	2	3		
-28.640	1.20		粘土まじり砂	25	8	8	9		
				24	8	8	8		
				7	2	2	3		
			シルト質粘土	7	2	2	3		
				8	3	2	3		
				9	3	3	3		
-33.140	4.50			10	3	3	4		
				11	3	4	4		
			シルト	50/3	—	50/3	—		50/3
			まじり礫	50/5	—	50/5	—		50/5
-35.590	2.45			50/6	—	50/6	—		50/6
				50/7	—	50/7	—		50/7
				50/9	—	50/9	—		50/9
				50/8	—	50/8	—		50/8
			礫まじり砂	50/10	—	50/10	—		50/10
				50/7	—	50/7	—		50/7
-40.240	4.65			50/14	—	50/14	—		50/14
-41.090	0.85		粘 土	11	3	4	4		

図—7 土質柱状図 (図—8 E点)

意を表したい。特にコンクリートプラント船²⁾、掘削システム、超大型シンカーウインチ、ケーソン位置の測量、ディスプレイを中心とする作業管理装置等の開発、現場工事における細心にわたった多くの努力がその影にあることを忘れてはならない³⁾。この点で工事に積極的に取り組み、多くの成果をつくりあげるに身をもって専心された杉田秀夫さんをはじめとした多くの技術者の努力と協力の賜物であることにも敬意を表したい。なお図—4に設置ケーソン工法施工要領、図—5に橋脚の断面の一例を示す^{2), 3)}。

2.2 ベル型海中基礎

前例と同じプレハブ化した大型海中構造の工法としてベル型 (Bell-type pier, 杭基礎の上に海中構造を被らせるタイプの構造) でよく用いられている一例として図—6に示すものがある。高橋脚部の下部工に用いられており、円形プレキャスト RC シェルの大分割水中組立によるもの、鋼製とつくり型のシェルを用いるもの、あるいは大黒埠頭橋で施工された杭頭位置が水面下48mで長方形鋼シェルを用いたもの等がベル型海中基礎の典型的な例である。なおデンマークのリトルベルト橋では、水深20m弱の杭頭に巨大なRC+PCフローティング空気ケーソンを被せる工法が採用されている。

2.3 築島式基礎

2.3.1 築島式減圧ニューマチックケーソン基礎

この工法は港大橋の2基の橋脚の基礎に40m×40mの平面寸法と34mのく体長を持つニューマチックケーソン基礎として採用されたものである。

この基礎工の特徴は図—7の土質柱状図に示すように途中に粘土層を含んでおり、N値50以上を示す礫まじり砂地

が必然と考えたからである。現在千葉工大教授、当時本州四国連絡橋公団の指導的立場にあった浅間敏雄さんの情熱がこの工法推進に大きな役割を演じられたことを記して敬

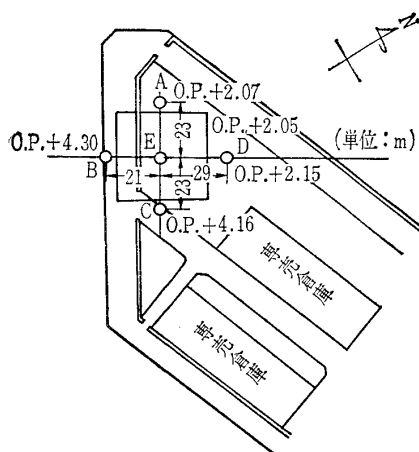


図-8 地質調査箇所図

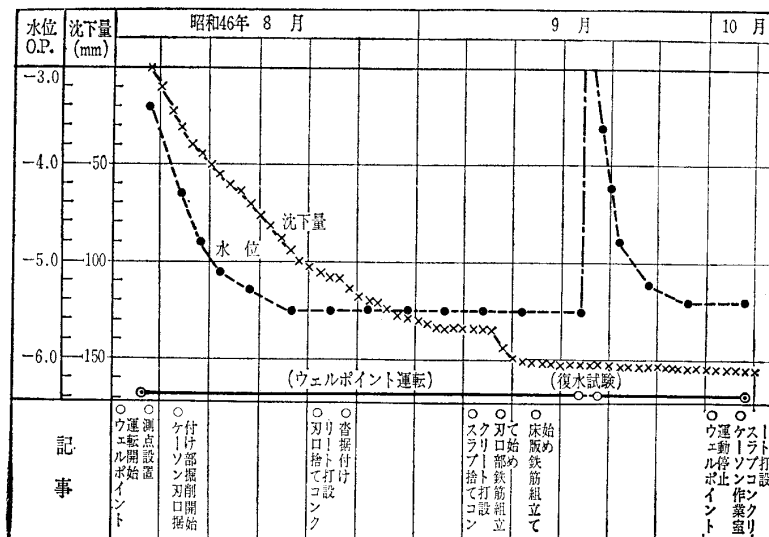


図-9 締切り内地盤沈下状況および水位観測

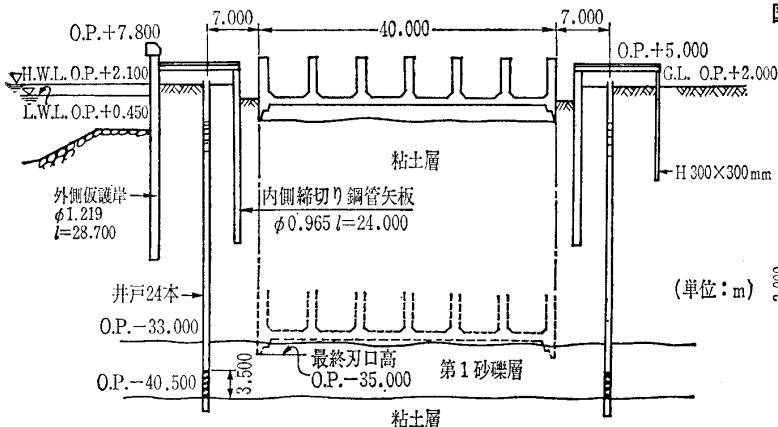


図-10 揚水井戸設置断面図

盤は標高-35m余にあり、いわゆる軟弱地盤上のケーソン基礎である点が特徴である。この橋のような巨大なケーソンを障害物の多い軟弱地盤上に設けるには多くの施工上の問題点を解決しなければならなかった。すなわち、

① 軟弱地盤上に設置するためにおこるケーソン沈下時の不同沈下、傾斜および刃口周辺地盤の支持力の検討

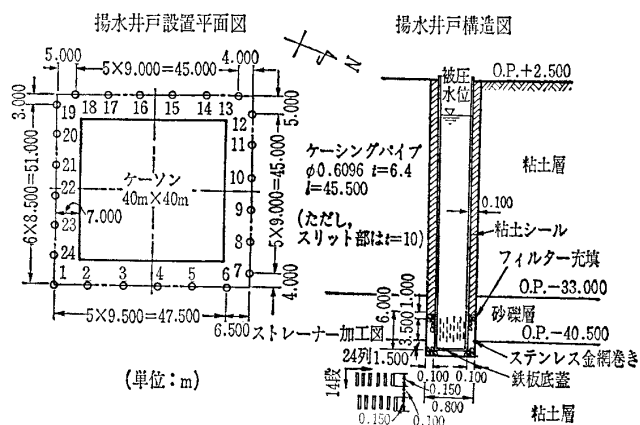


図-11 揚水井戸設置図

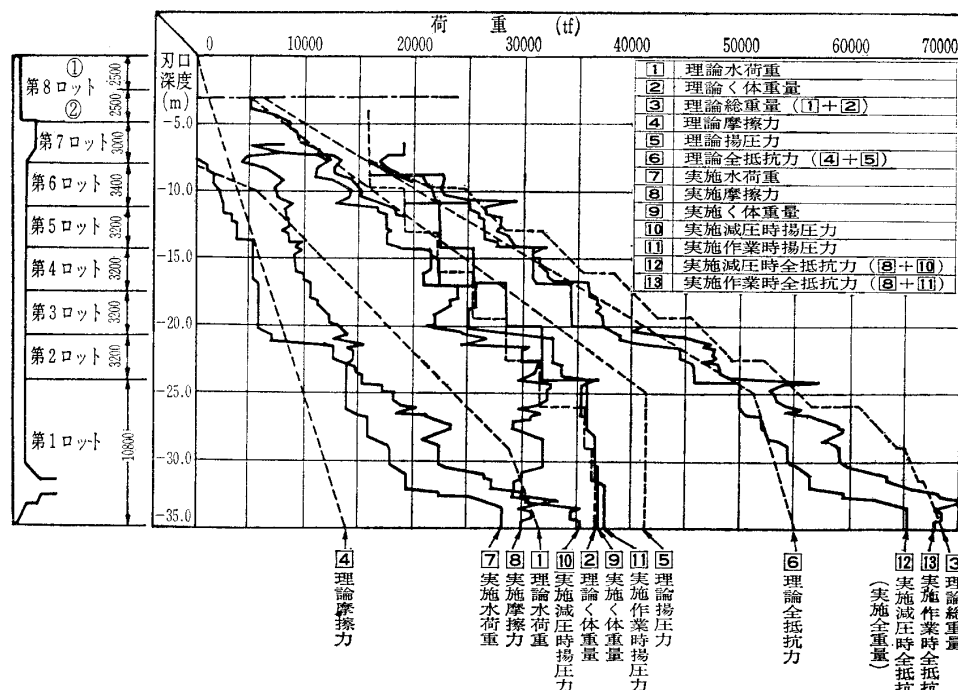


図-12 理論沈下図および実施沈下図

論 説

- ② 周辺構造物に与える影響の想定
 ③ 函内掘削作業の省略化と潜函夫の健康上の理由による作業気圧の低減工法の採用、などである。

このため図-8に示す5箇所地質調査を実施し、A, B, C, D点では主として第1砂礫層および沖積粘土層の強度特性の確認、E点では支持層の確認を行った。一方機雷調査、現地揚水試験、障害物調査(海上、陸上)、鋼管杭の試験打ち等を行い、この結果に基づいて施工計画を立てた所に注目すべき点がある⁴⁾。

なお地盤改良としてのパイプロンコンポーザーの施工と作業室刃口直下の各障害物を撤去したことによる影響を軽減するため初期構築時のく体荷重(作業室コンクリート重量+砂セメント重量)に相当する重量をあらかじめ在来地盤にプレロードとして砂荷重を載荷するとともに、後述のウェルポイントによる地下の低下工法を併用して沈下板を設置し、沈下状態が安定するのを確認したうえで作業室コンクリートを打設している(図-9)。

なお、特筆すべき点としては図-10に示す外側、内側に鋼管矢板による2重締切りを行い、その中間に図-10、図-11に示す揚水井戸を設置し、函内気圧を1気圧減じた2.5気圧におとして施工した点である。なお実施運転に入るにあたっては、浸透流解析に基づくくみあげ流量と水頭差の関係の電気アナログ実験を行い、一方現地透水係数の調査と併行して、井戸本数、揚水量の決定を行った。これらの準備をもとにして、24本の群井としてのアナログ実験の対比、揚水停止後の水位回復状況を管理上のチェックポイントとした。図-12に理論沈下図および実施沈下図の対比を示す。順調に工事を進めることができたことが示されている点に注目してほしい。

2.3.2 築島式地下連続壁併用円形逆巻基礎

最近筆者がある意味で深い関係を持った大規模なLNG地下タンクや原油貯蔵タンクに施工実績を持ち、現在では深さ90m位のものも、高い精度で施工可能となっている地下連続壁を止水壁工法として使用する提案であり、軟弱地盤の基礎工として一つの適性を持った工法と言える。現在計画中の北海道白鳥大橋主塔基礎に適用しようと考えられている。前節の工法と対比するには興味のあるものである。図-13⁵⁾に示すように海上部に築島を設け、その内部に地下連続壁を円形に構築し、これを止水壁としてディープウェルをかけながら、1ロット(5~6m程度)をドライで掘削して内巻コンクリート壁を打設する工程を順次繰り返し、底版コンクリート打設を終了した後、隔壁コンクリートを

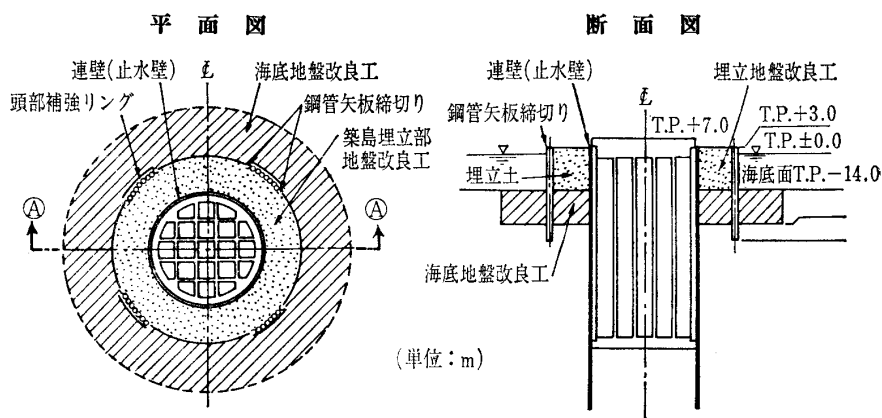


図-13 地下連続壁併用円形逆巻基礎の概念図

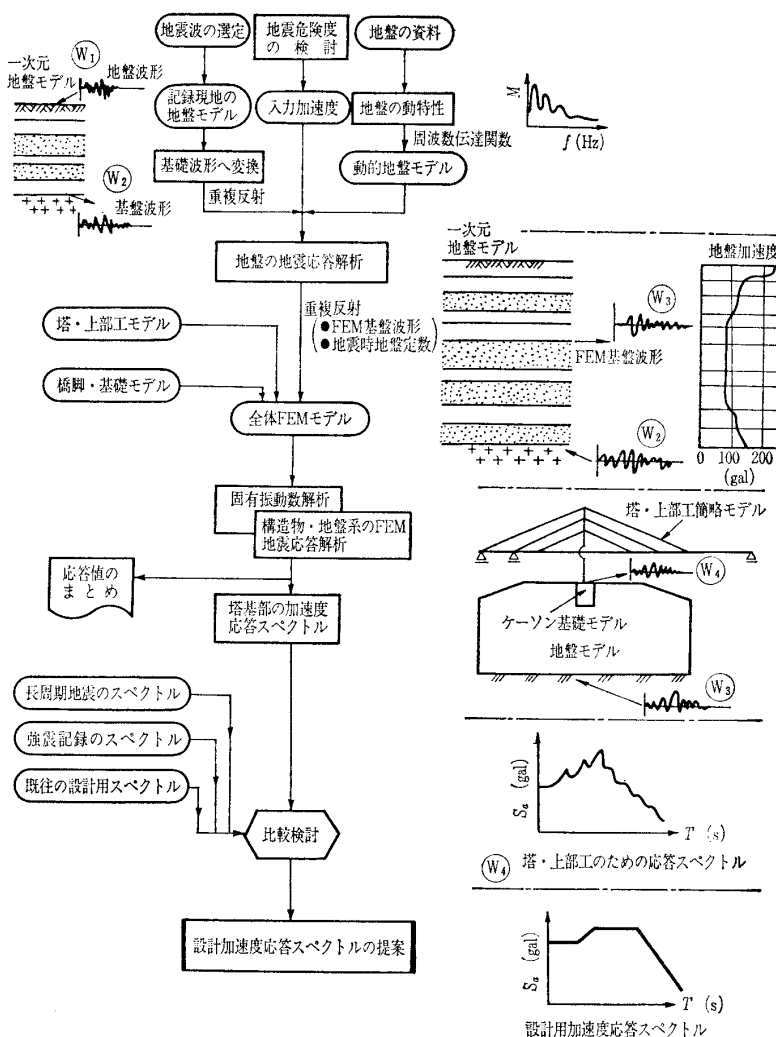


図-14 設計スペクトルを求めるフローチャート

下から打ち上げ最後に頂版コンクリートを打設する工法である。

この工法は、築島などの仮設工が大規模となるが、地下連続壁を止水壁としてドライ掘削ができることから、支持層の確認が容易である。また、機械掘削の作業能率が良い

ことなどの利点がある。

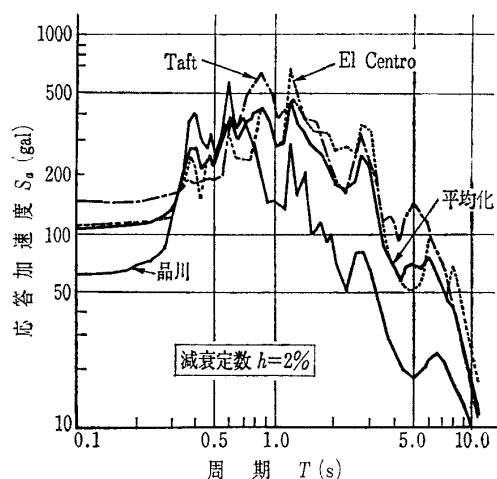
3. 橋梁基礎の耐震設計

橋梁の耐震性状の正しい判断を下す場合、本節に関連した問題意識が重要なかぎをにぎっていると思う。特に長大橋では、一次の固有周期が長く、しかも多くの場合橋軸方向の一次の振動は、下部構造—橋梁基礎—とからんで考えると、橋梁全体の Sway の振動モードであり、これが耐震設計上支配的となる。このためには比較的長い固有周期に対し、信頼性の高い地震荷重としての応答スペクトルを検討することが前提となる。

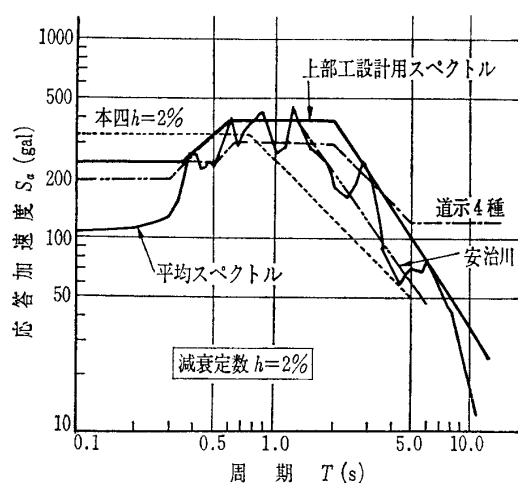
このためには入力地震波—継続時間も考慮すべきである—、地盤モデル、入力加速度、地震入力の岩盤深度、力学モデル、解析法（例えばモード重ね法による時刻歴応答解析）などについて、解析にあたっての正しい評価および判断を下すことが大切である。昭和49年ころではなかったかと思うが、道路協会での東京湾横断道路橋検討委員会で、川崎側に橋梁構造を採用する場合の検討をするまとめ役をつとめた。この時委員の一人であった白石俊多さんよりサンフランシスコ湾横断橋の耐震設計計算の話を開いた。軟弱地盤—この話によると、地震入力地盤深度を1000m以上と深くとっており、固有周期の長い橋梁の耐震設計に正しい一つの石を投げているのに深い感銘を持つと同時に、昭和32年イリノイ州立大学のニューマーク教授の耐震にからんだ講義でいささか疑問に持っていたことに対する一つの答が出たように感じたことを思い出している—の正しい耐震設計手法開発に期待を寄せていた。ただ、ここでことわっておきたいことは、筆者自身耐震設計手法の開発の正しい情報を得るのは、少し専門がはずれている点もあっていささか失礼な言葉となっていることを許していただきたい。本年3月、阪神高速道路管理技術センター湾岸線委員会⁶⁾に出席し、東神戸水路橋の設計で見事にこの回答が出されているのに感銘を受けた。ここに許していただき、その大要を記したい。前提条件としては、

①上部工の設計は応答スペクトル法によるとして、塔基部での応答波形からスペクトルを求める。②上、下部工、地盤の全体 FEM により地盤と構造物の動的相互作用を考慮して塔基部の応答波形を算出する。③深度約1000mの岩盤から地震を入力し、重複反射理論による地震応答解析を行う。これにより FEM 基礎への入力波形を算出する。

図—14はそのフローを示し、図—15はそのフローに従って塔基部での応答波形から求めたスペクトルであり、図—16はこれに種々の考察を加えて地震荷重として作成したスペクトルを示す。



図—15 塔基部の加速度応答スペクトル



図—16 上部工設計用スペクトル

4. ま と め

与えられた命題が、筆者にとって難しいことも多いので十分責を果たしたとは言えない感がある。したがって借物が多いが、その開発に対しての努力と勉強の積み重ねが大切であることを示す一例として読んでいただければ幸いである。参考にさせていただいた文献に対し深い感謝を表したい。

参 考 文 献

- 1) 奥村敏恵：技術とその取組み方，東京電機大学編，「学苑」，第50号，1985. 12.
- 2) 本州四国連絡橋公団第二建設局編：児島坂出ルート プレバックドコンクリート施工記録，
- 3) 本州四国連絡橋公団第二建設局坂出工事事務所編：工事記録南北備讃瀬戸大橋下部工，1985. 3.
- 4) 阪神高速道路公団編：港大橋工事誌，土木学会，1975.
- 5) 美馬 孝・石原 勝・佐藤謙二・小笠原章：3径間2ヒンジ補剛吊橋 白鳥橋の計画・設計，橋梁，1985. 11.
- 6) 阪神高速道路管理技術センター湾岸線技術委員会：東神戸水路橋上下部工検討報告書，1986. 3.

(原稿受理 1986. 8. 26)