

岩盤を支持層とする大型橋梁基礎設計法の現状と将来像

Current and Future Trends in the Foundation Design for Large Bridge Construction Using Rock Mass as a Bearing Stratum

佐藤 禎 哉 (さとう ていや)

(株)オリエンタルコンサルタンツ東京事業本部業務管理部 部長

山田 勝 彦 (やまだ かつひこ)

(株)長大 長大橋事業部 副技師長

1. 岩盤を支持層とする橋梁基礎の特徴とコンセプト

1.1 橋梁のコンセプト

橋は土木技術の中で最も古い技術の一つである。人間の生活圏が拡大するにつれて、川や谷を渡る手段を考えるようになった。木を切り倒し、川や谷に渡したのが丸木橋であり、木橋の起源である。その後、材料、調査、設計、施工技術の進歩や時代の変化と共にさまざまな橋が建設され、人々に親しまれてきた。橋の機能は次のように分類することが出来る。

(1) 交通施設としての機能

安全に渡すことができる強度と大きさ

(2) 景観創造の機能

周辺や自然や人工と調和する造形と色彩

(3) 空間創造の機能

広場的空間、遊びのための空間（橋上、橋詰）（桁下と水面、地表面に挟まれた空間）

(4) 社会資産としての機能

歴史的遺産、住民に親しまれる資産

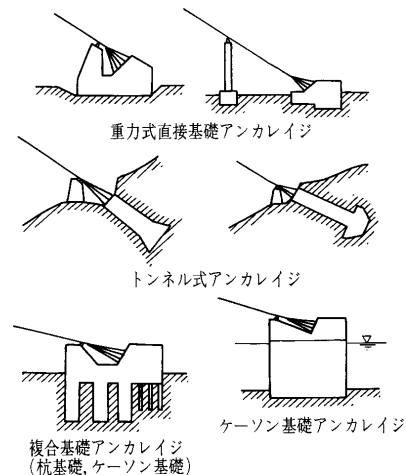
最近では、建設工事によって生み出される環境への影響（産業廃棄物、水質汚濁等の環境保全）、自然景観の保全を配慮しながら、より厳しい自然、環境条件の中の新たな技術開発が求められている。

1.2 岩盤の利用形態と基礎形式

次に岩盤構造物という観点より、橋梁の基礎工についてこれまで岩盤をどのように利用してきたか、岩盤の利用形態の面から基礎工の形式について考察する。

基礎工は橋梁上部工の荷重を安全に地盤に伝達する役目を持つため、良好な地盤である岩盤は、基礎工の支持層として選定されてきた。

水平力に卓越する基礎工として、吊橋のアンカレイジを例にとると、図—1に示すとおり、水平抵抗の仕方は、①地形の特色を利用、②周囲の景観や環境保全を重視す



図—1 アンカレイジ基礎形式

表—1 支持岩盤と地盤反力度

橋 梁 名	支 持 岩 盤	形 式	底面反力度 (tf/m ²)	竣功年度
G. Washington Bridge	砂岩・頁岩	直接基礎（締切り工法）	273	1931
San Francisco Oakland Bay Bridge	泥岩	ケーソン基礎（ドームドケーソン工法）	400	1936
Golden Gate Bridge	蛇紋岩	直接基礎（締切り工法）	105	1937
Mackinac Straits Bridge	角礫岩	ケーソン基礎（二重壁オープンケーソン）	146	1957
若戸大橋	3P 第三紀砂岩・頁岩	ケーソン基礎（ニューマチックケーソン）	75 (95)	1962
大島大橋	4P 花崗閃緑岩	多柱基礎	(425)	1977
名港西大橋	3P AunS層	ケーソン基礎（ニューマチックケーソン）	53 (83)	1984
大鳴門橋	4P 和泉砂岩	多柱基礎	500(612)	1985
南備讃瀬戸大橋	6P 花崗岩	直接基礎（設置ケーソン）	120	1988
横浜港横断橋	3P 土丹	多柱基礎	340	1989
東京港連絡橋	3P 土丹	ケーソン基礎（ニューマチックケーソン）	60(157)	1993
明石海峡大橋	3P 砂岩・泥岩の互層 2P 砂礫（明石層）	直接基礎（設置ケーソン）	132(340) 135(265)	1998

()内は地震時の値

る等考慮しながら、力学的合理性を追求する等の工夫が見られる。代表的な基礎構造物と支持層である地盤の種類、地盤反力度を表一1に示す。

2. 設計法の現状

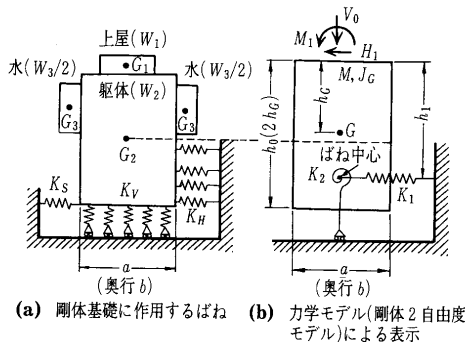
来島大橋剛体基礎耐震設計においては、吊橋の上部工や主塔と剛体基礎の固有周期の差が大きいため、連成振動をしないことを前提に並進と回転の2自由度の振動系で表される力学モデル(図一2)によるスペクトル応答解析に基づいて耐震設計が行われる。風化花崗岩を支持層とする剛体基礎の安定計算は、図一3に示す手順で行われる。

耐震設計は、応答スペクトル(線形応答)解析によるが、基礎底面の浮き上りの影響を考慮し、基礎底面での線形応答値を非線形応答値(実挙動)に変換する等価エネルギー法に基づいて行われる。

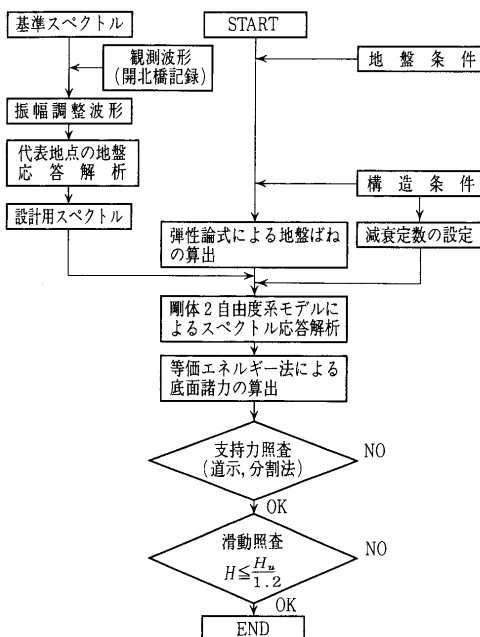
3. 課題および問題点

3.1 計測事例と地盤定数の評価

明石海峡大橋塔基礎2P, 3Pにおいて、地盤変形量の当初予測値と計算値を比較し、有害な変形が発生していないことを確認するために、地盤変位計測計(スライディングマイクロメーター)を基礎中心下の地盤内に設置し、



図一2 剛体基礎の1質点2自由度解析モデル



図一3 剛体基礎の安定計算フロー

施工中から工事完成後の動態観測²⁾を実施している。

動態観測結果から逆解析により地盤定数を評価した上で設計の妥当性の検証、および施工中、完成後の変形を予測し、安全性を確認することが可能で、手法としてはほぼ確立されている。ただ、支持力に関しては三次元的な不連続性、支持力と変形の相関等まだ十分解決されていない。

3.2 課題の整理

剛体基礎の耐震設計については、基礎と地盤の動的相互作用などを考慮した耐震設計要領に基づいて行っているが、要領は、実構造物の挙動や地盤内ひずみ等の観測記録が皆無に近いことや、地震時のデータが無いため、理論により組み立てられる面が大きい。

「動的地盤ばね」、「減衰定数」、「極度の偏心傾斜荷重下の地盤の挙動」、「残留変位」、「寸法効果」などは、仮定のもとに安全側になるよう配慮して定められており、工学的には、試験等による検証が必要である。①基礎地盤の動的相互作用、②極度の偏心傾斜荷重下の基礎の安定を検討する目的で著しく風化された花崗岩上で大規模載荷試験が実施されており、試験内容と成果が報告³⁾されている。これらの分析から設計への応用が待たれる。

剛体基礎は、剛性が極めて高く基礎構造自体の変形は問題にならないが、自重が大きく、慣性力が大きくなること、また海中において、水の付加質量が大きい等、地震入力が非常に大きくなることが不可避である。

4. 設計法の将来像

4.1 新しい海峡横断プロジェクト

現在、我が国で計画されている主要な海洋架橋プロジェクト構想の位置と、その計画⁴⁾概要を次に示す。

4.2 大水深下長大橋基礎の課題の整理

長大橋海中基礎の調査、設計、施工に関する要素は、表一3に示すとおりで、海峡横断プロジェクトで考えられる大水深下長大橋基礎においては、以下の課題がある。

- (1) 厳しい海上における地質調査・大水深ボーリング、連続サンプリング、面的地形調査
- (2) より高度な耐震設計法が求められる。
- ①支持地盤の一部破壊まで含めた応答解析(残留変位の評価含む)、②上部工サイドの受忍変位の研究(変位を許す設計)、③滑動、滑動+転倒、支持力に対する動的安定照査法の開発
- (3) より厳しい条件下における施工法の開発

表一2 明石海峡大橋と津軽海峡大橋の概要

	明石海峡大橋(内海)	津軽海峡大橋(国際海峡)
全長	4 km	19 km
最大水深	110 m	280 m
基礎の最大設置水深	60 m	230 m
最大波高	5.2 m	22.5 m
最大潮流	8 knot	7 knot
最大風速	65 m/s	80 m/s
地震地域分類	最も厳しい(第一地区)	最も厳しい(第一地区)

表—3 長大橋海中基礎の設計, 施工に関する要素(参考)

調査	大水深ボーリング, 連続サンプリング, 面的地形調査	
設計	設計条件 (荷重ほか)	施工時 ・潮流, 波浪, 風, その他 完成 ・地震, 動水圧(海水の付加重量), 波浪, 船舶衝突
	設計手法	施工時 ・浮体安定, 着底時安定 完成 ・許容変異および安全率 ・耐震設計(応答解析) ・支持力安定解析, 部材設計
施工	施工条件	・施工ヤード, 洋上基地の施工水深 ・施工期間 ・安全性, 環境保全
	施工法と施工技術	・岩盤掘削, ならし工法 ・海上作業(波浪, 浮体の安定, 係留, 着底時の安定) ・コンクリート打設, プレハブ化, ブロック化 ・洗掘防止 ・情報化施工および動態観測(計測技術) ・施工管理技術
維持管理	耐用年数(耐久性)	



図—4 海洋架橋プロジェクト構想位置図

大水深, 強潮流における海底ボーリングはこれまでのSEP(自己昇降式足場)では, 適用性の問題があり, 豊子海峡トンネルで用いられた海底着底型ボーリング装置では, 1m未満のコアしか採取できず, 橋梁設計に必要な力学特性を得ることができない。今後の海峡プロジェクトにおける大水深ボーリングの方法としては, 海外で実績のある船舶型の足場⁵⁾(DPS=Dynamic Positioning System(自動船位保持装置システム)を搭載した地質調査船)や自航台船型の足場が有力な方法として検討されている。

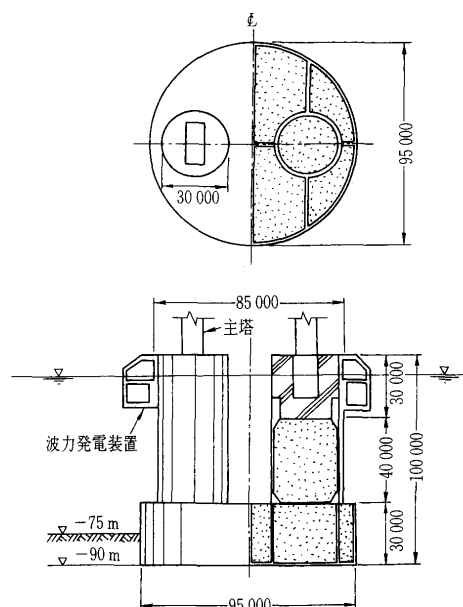
4.3 構造物のコンセプトと将来像

海中の岩盤の支持される基礎構造物に求められる将来像は, 以下のとおりである。

- (1) 波力, 地震時動水圧の影響の小さい構造形態
- (2) 浮力の利用, 海水のサーチャージとしての利用等
- (3) 人工地盤の開発による免震構造
 - i) 硬い岩盤の動的性状の改良, すべり層の形成, 着底時の衝撃の緩和(クッション材)

これらを実現するための構造物のコンセプトを以下に示す。

- ①海中, 海上作業を出来るだけ少なくする, ②現場の

図—5 波力発電機能を持ったツインタワー基礎⁶⁾(概念図)

気象条件下で施工性に優れている, ③耐久性(新材料構造の採用, メンテナンスフリー), ④工費・工期の低減(プレキャスト化, 高強度化, 柔構造), ⑤浮力・海水の有効利用, ⑥変位をゆるす構造, ⑦動水圧, 慣性力を低減する構造(免震構造)(中空化ほか), ⑧ハイブリッド構造

海峡プロジェクトで計画される長大橋梁は, いずれも大水深, 大深度に基礎を必要とし, また, スパンの拡大に伴う上部構造反力の増大という厳しい条件下にあるので, 単位長さ当たりの工事費が大幅に増加することは明らかである。したがって, 橋梁の機能のハイブリッド化, 建設技術のハイブリッド化による技術の集約とローコスト化というコンセプトが必要とされる。

例えば, ハイブリッド構造について言えば, 基礎構造物に波力発電⁷⁾や風力発電, 潮力発電等のクリーンエネルギー施設の機能を持たせたり, 橋梁を軸にして静穏海域を創造(海上都市, レクリエーション施設等から成る多機能空間の創造)することも考えられる。

参考文献

- 1) 地盤工学会: 岩盤構造物の設計法に関する研究報告書, pp. 99~119, 1997.
- 2) 山岸一彦・那須清吾・谷口貴成: 海底地盤に関するシンポジウム'94発表論文集, pp. 69~78, 1994.
- 3) 山田勝彦・山縣守・山本茂樹: 多々羅大橋大規模載荷試験, 本四技報, No. 68, 1993.
- 4) 駒田敬一・山下義之: 津軽海峡架橋の計画と設計施工条件, '96本州・北海道架橋シンポジウム論文集「津軽海峡からのメッセージ」, 本州・北海道架橋を考える会, 1996.
- 5) 宮島主司・越智啓登: 大水深下の海底地盤調査の現況, 海峡横断, Vol. 6, 1996. 7.
- 6) 山縣守・田中努: 超長大橋梁の基礎に求められる耐震構造, 土木学会論文集, No. 522/VII-28, pp. 165~175, 1995.
- 7) 日本海洋開発建設協会 海洋工事技術委員会: わが国の海洋土木技術, (社)日本海洋開発建設協会, 1997.

(原稿受理 1998.5.26)