

14. 構造物の基礎

おか はら みちお
岡 原 美知夫

建設省土木研究所

1. 基礎の種類と分類

我が国の地形は急峻で多数の河川を擁し、また多くの島から成る国土の自然条件から、道路を始めとする交通インフラ整備における橋梁の占める割合は大きい。これらの橋梁は、例えば、海峡部においては潮流と水深を克服する基礎工法を必要とし、都市部においては軟弱地盤に対応した深い基礎工法で騒音・振動や近接施工対策を必要とし、また山地部においては斜面対策を必要とするなど、建設地点の条件に応じた種々の工法が要求される。加えて我が国は地震、洪水など世界有数の自然災害の脅威にさらされた国である。これらの厳しい設計・施工の要求に応じて構造物の基礎を建設してきたため、我が国の基礎工法に関する技術は独自の工夫が加えられて開発発展してきたものが多い。

従来からの基礎形式といえば、浅い基礎の直接基礎、深い基礎の杭基礎とケーソン基礎である。近年次々と新しい基礎工法が開発されてきて、従来の基礎形式の定義に当てはまらない形状・構造の特徴を持つ基礎形式が出現してきた。比較的新しい主な基礎工法としては、鋼管矢板基礎工法、多柱式基礎工法、連続地中壁基礎工法、フーチング設置式杭基礎工法、大口径深礎基礎工法などがある。

基礎の分類には、設計上の区分と施工上の区分がある。まず施工法の開発が行われて、ある程度の施工実績を踏まえて、技術基準を定めるのが通常であるので、技術基準は施工法により分類された基礎形式に対応して設計法を規定しているのが一般的である。新しい基礎工法が次々と開発されると設計基準の整備が追いつかず、設計上の取扱い方について個々の技術者の判断によらなければならなくなり、新しい基礎工法の普及が遅れることにもなる。図-1は基礎形式を、支持機構、設計上の特性(形状と構造)、基礎工法の面から分類を試みたものである。ここで柱状体基礎とは複数本で用いられる群杭基礎とは異なり、単柱の基礎躯体で荷重に抵抗する比較的剛性の高い柱状の基礎の総称であり、設計法の統合化を計るために導入された設計区分の概念である。設計上の特性に基づいて、すなわち、直接基礎、柱状体基礎、群杭基礎、複合基礎として、設計区分の集約化を図ることが可能である。平成8年に改訂された道路橋示方書ではこの考え方が一部取り入れられている。このような汎用性のある設計法に基づく体系は、各基礎設計間の整合性を高めることおよび新規基礎の現場への導入を容易にす

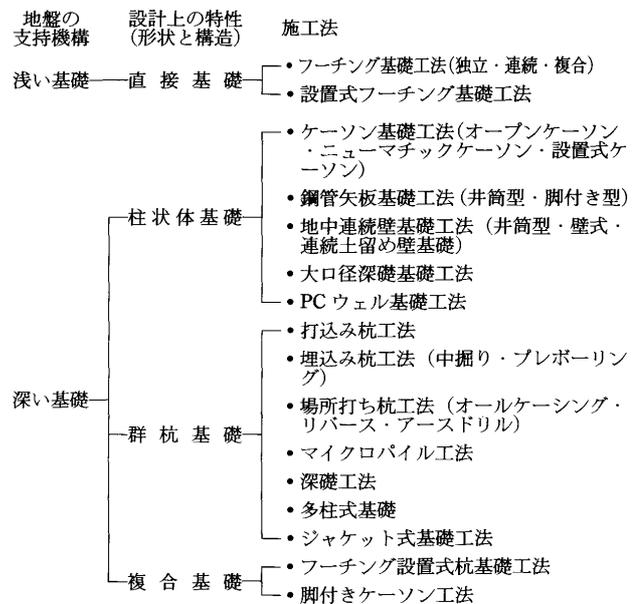


図-1 地盤の支持機構・設計上の特性・施工法による基礎の分類

ること等の利点がある。

2. 主な基礎

2.1 直接基礎

直接基礎は一般に、地盤を比較的浅く広く掘削し、フーチングを構築する基礎形式で、荷重を直接良質な支持層に伝える浅い剛体基礎であると定義される。地下水位が高いところや、支持層が比較的深い場合には土留めや止水を行った後、掘削施工される。直接基礎は一般に深い基礎に比べて施工が確実で経済的であるので古くから構造物の基礎として用いられてきた。

我が国では山岳部の斜面上に構造物を建設する機会も多い。構造物としては橋梁、送電用鉄塔などがある。斜面に通常の水平な底面を持つ直接基礎を設置すると、非常に掘削量が多くなり問題が生じる可能性が高い。一方根入れが浅いと斜面地盤の崩壊など安全性に問題が生じる。このような問題を解決するため段切り基礎が開発された。フーチングの底面を斜面に沿って段切り形状とすることにより掘削土量の低減を計るとともに、基礎底面の内水平となる部分をできるだけ多く確保して支持力の減少を抑えるという特徴を持つ。

直接基礎は橋梁以外の構造物の基礎にも多く用いられている。原子力発電所、ダム、LNG地下タンク、高層建築物等岩盤上に建設される大型構造物の基礎のほとんどは直接基礎である。

2.2 杭基礎

地盤が軟らかい場合基礎に木杭を用いた例は太古からあり杭の歴史は古い。杭が本格的に構造物基礎に用いられるようになってきたのは大型構造物が地盤の悪いところに建設され始めてからであり、特に戦後に著しい発展をみた。明治末期から昭和の初期にかけて、外国から鋼杭、既製鉄筋コンクリート杭や場所打ちコンクリート杭工法が導入されたが、相変わらず松杭の使用が多い状態

であった。場所打ちコンクリート杭は当初無筋であったが、関東大震災以降は鉄筋を入れるようになったようである。

杭の設計において、鉛直支持力と水平抵抗は杭本数（コスト）に大きく影響する。以前は杭の支持力性状に関する研究は理論的なアプローチが中心であり、解析的に導かれた数多くの支持力式が提案されている。しかしながら、これらの式は現場載荷試験で十分に検証されていないことや杭の大型化や長尺化さらには多様な施工法の開発などに対して信頼性の高い支持力値を与えることができず、実際の設計においては非常に高価な現場載荷試験に依らなければならないことが大きな負担であった。このため杭の支持力推定式の精度向上に対して努力が続けられ、道路橋示方書（昭和55年）に実物載荷試験をベースにした経験式が提案され、さらに平成2年の改訂で改良式が提案された。

また、地盤工学会における「杭の急速載荷試験法委員会」（委員長：岡原美知夫、平成8年度～11年度）および「杭の鉛直載荷試験法基準化委員会」（委員長：岡原美知夫、平成10年度～12年度）において、低コストの杭の急速載荷試験法の開発および静的・動的・急速の各載荷試験法の基準化に対する努力が計られている。前者の委員会により作成された報告書「杭の急速載荷試験の載荷メカニズムと適用性」（1999.3.31）において、相対的な載荷時間に基ついて静的載荷試験、急速載荷試験、動的載荷試験に対する分類の定義が提案された。今後各載荷試験により直接確認された信頼性の高い支持力値を設計に反映させることにより、設計の合理化が図られることが期待される。

2.3 ケーソン基礎

ケーソンを施工法によって分類すると、オープンケーソン、ニューマチックケーソン、および設置ケーソンの3種類に分類される。

オープンケーソンは昔から井戸を掘るのに使われていたので古い歴史を持つといわれている。一般に機械により筒状構造物の底面地盤を水中掘削・排土しながら、主としてその自重を利用して所定の深さまで沈設して基礎とするものである。オープンケーソンの施工実績は、揚水井戸などに利用する小規模なものから、橋梁・建物基礎、炭坑用立坑、地下タンク、建物地下室などがある。

ニューマチックケーソン工法は、圧縮空気を用いる工法であるので圧気ケーソン工法とも呼ばれた。筒状構造物の底部にスラブを設け、スラブ下を作業室として水圧に見合う圧縮空気を送り、この作業室を完全にドライにして掘削作業を行い所定の深さまで沈下させる工法である。ニューマチックケーソン工法は、1830年トーマス・コ克蘭により考案され、1872年、ニューヨーク市にあるブルックリン橋の基礎はニューマチックケーソン工法により施工された。また、20世紀初頭、ニューヨーク市マンハッタン島に超高層ビルが多数建設されたが、それらの多くは、ニューマチックケーソン工法による基礎が用いられた。その後も大型構造物の基礎にはニュー

マチックケーソン工法が用いられてきた。ニューマチックケーソンの施工実績から、橋梁基礎を始めあらゆる構造物基礎のほかには地下タンク、トンネル、立坑等の地下構造物や岸壁、ドライドックなどの土留め構造物として用いられているが、杭基礎、鋼管矢板基礎等との競争で不利になる場合が多く、全体的に施工実績が減ってきている。

本四プロジェクトにおいて設置ケーソンは多く用いられてきたように、設置ケーソンは水深が深くかつ支持層が浅い場合には有力な工法である。本四プロジェクトの場合よりもさらに水深が深くなる次期海峡横断道路プロジェクトでは、コスト縮減を計るため特に海底地盤の掘削量を減らすとともに、基礎の質量を押さえるような工夫が不可欠となる。

2.4 鋼管矢板基礎

鋼管矢板基礎は、昭和39年ごろより開発に着手され、昭和42年、溶鉱炉基礎に用いられたのが最初であることから知られるように、その開発はいくつかの製鉄メーカーの手によって行われてきた。溶鉱炉基礎のほか、製鉄所内の土木構造物の基礎にも適用され、橋梁基礎に用いるための基礎的な技術が培われた。

この基礎の最大の特徴は、水中で締切り工が不要な仮締切り兼用工法をとりうることであり、仮設コストが縮減できること、河川占有面積が小さいことなど大きな利点を持つ。鋼管矢板基礎は、各鋼管矢板が継手により相互に連結されていること、施工時の水圧により発生する応力が完成後鋼管矢板に残留すること等により力学的挙動が複雑であり、力学的挙動の解明と設計法の確立が大きな課題であった。基準化に向けて各機関で研究が続けられ、例えば、昭和56年には日本国有鉄道において、「鋼管矢板井筒の設計施工指針」、昭和59年には日本道路協会において、「鋼管矢板基礎設計指針」がそれぞれ刊行された。これら一連の基準化により鋼管矢板基礎の施工実績は着実に増加してきている。

2.5 地中連続壁基礎

地中連続壁工法は、ヨーロッパにおいて考案され、その後我が国に導入された。建設工事における騒音・振動に対する対策工法として積極的に用いられるようになり発展を遂げてきた。当初、地中連続壁は仮設目的の利用が多かったが、その後の技術進歩により地下構造壁などを対象に本体への利用が増加してきた。地中連続壁の機械掘削の進歩により、大規模な壁厚や深度に対する施工能力が高まるとともに、継手をはじめとする構造機能に関する研究開発の進展によって、工法の信頼性が高くなった。さらに地中連続壁を井筒状に構築し、橋梁などの大型構造物の基礎として利用する地中連続壁基礎が案出された。地中連続壁基礎は、隣接する地中連続壁エレメントを相互に継手を用いて連結して一体閉合断面を形成し、その頭部と頂版が一体となるように構築した構造形式のため耐力が大きく耐震性に優れている。

地中連続壁の施工実績としては、外郭放水路立坑、人工島、LNG地下タンク、変電所、橋梁など多くの大型

地盤工学50年の歩みと展望

構造物に使われている。なお、現在、国内で使用されている主な壁式連壁掘削機によれば、最大壁厚として3 m, 最大深度としては150 m を越える掘削および連壁の構築が可能である。

3. 地震と洪水による道路橋基礎の被害の特徴と技術基準における課題

3.1 地震に対して

日本道路協会の道路橋震災対策便覧（震前対策編）によれば、昭和39年新潟地震、昭和53年宮城県沖地震、昭和58年日本海中部地震による被災橋梁（通行規制が行われた31橋）について、橋梁の耐震性に影響を与える要因についてまとめられている。これによると、「橋梁の被害形態と適用示方書には強い相関がある。これは、過去の被害経験を通して徐々に耐震設計法が整備拡充されてきており、これに応じて被害形態も変化してきているためと考えられる」と述べられている。兵庫県南部地震による被害は過去の被害に基づく経験・教訓に対して根本的な見直しを迫ったものであるが、土木研究所等により行われた被害分析結果によれば、大被害は39年以前に建設された橋脚に集中して発生し、一方新しい基準による橋脚にも中程度の被害がかなり発生しているものの総じて被害程度は軽い、と指摘されている。兵庫県南部地震まで、過去の地震被害を経験して耐震設計法の見直しを行い耐震性向上に向けて努力が続けられている。

今後の耐震基準の方向において重要と考えられる事項としては、確率論に基づいて地震力を設定しかつ大規模地震（レベル2地震）を考慮することおよび2段階設計に合理性があること、精密な計算を追求するという理想と簡便な計算を求める実務とのギャップを解消するた

めの合理性を追求すること、上下部工に分かれて設計するなど部門別設計の寄せ集めでなく全体でコーディネートした設計に転換すること、耐震性向上とコスト縮減の両立を目指すこと、そのためには新技術が必要であること、地震リスクを明確にした耐震性能に対する国民的合意を得ること、そのためにはわかりやすい説明が必要であること等がある。

3.2 洪水に対して

平成2年の梅雨前線による記録的な豪雨が九州北部地方を襲った。そのため各地の河川が氾濫したほか、土石流、地すべり等も発生して大きな被害が発生し、37橋の道路橋が流失した。被災橋梁のうち下部工が変状して流失した例が非常に多い。また土石流や流木等が上部工や橋脚に引掛かった結果、桁下の閉塞が原因で溢流が発生して橋台取付け部盛土に被害が生じた例も多い。

また平成10年の8月末豪雨においても、栃木県、福島県の橋梁について大きな被害が生じた。栃木県の余笹川水系では、氾濫した洪水流により橋梁の取付け道路が流失した事例が多く、そのうち3橋では橋台が流失し、それが支持していた上部工も流失した。上部工が流失していない橋でも流木が橋脚や桁への掛かり、高欄に被害が生じた。一方、福島県の阿武隈川水系では、被災橋梁のほとんどで洗掘による橋脚や橋台の沈下が発生しており、高欄の被害も、下部構造の沈下に起因するものである。このように、同じ豪雨に対しても、河川の特性により橋梁の被害状況は大きく異なっていた。

以上の事例も含め洪水による橋梁の被災内容を分類し、河川管理施設等構造令・道路橋示方書による規定事項との対比を示したのが図-2である。洪水による被災の主要因としては、図中に示したように、水衝部における川

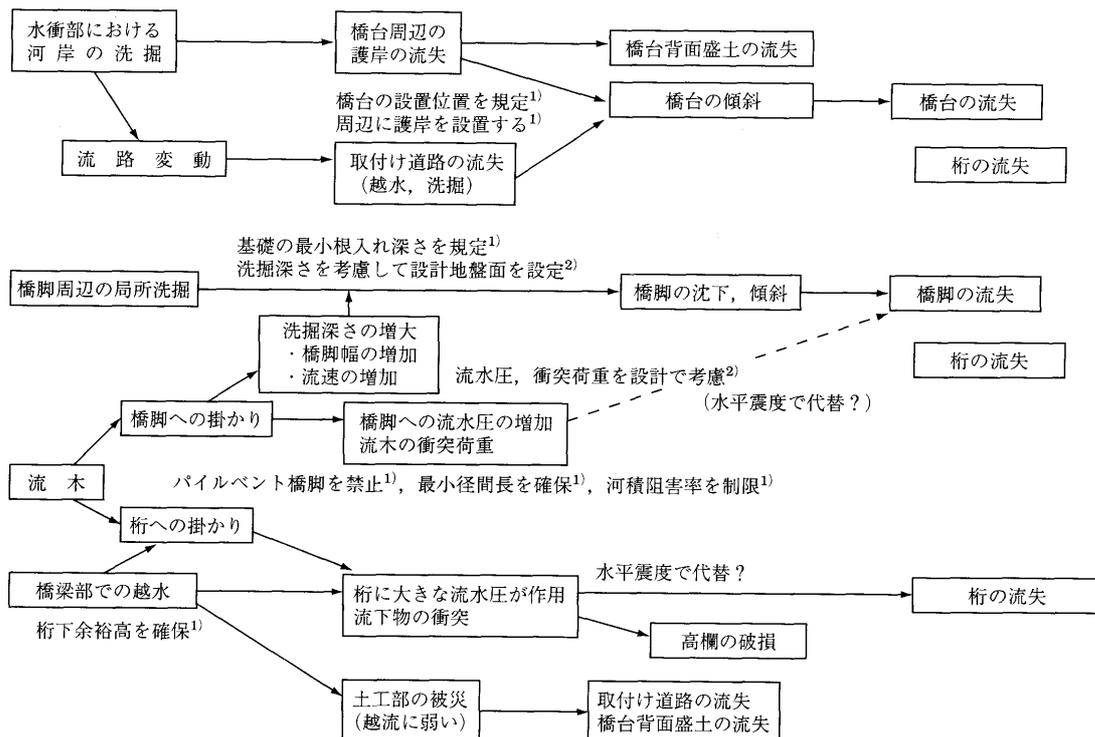


図-2 洪水による被害内容（箱の中）と1）河川管理施設等構造令・2）道路橋示方書による規定事項との対比

岸の洗掘、橋脚周辺での局所洗掘、流木そして橋梁部での越水があげられる。これらの規定事項において、橋梁を越流するような大洪水に対する取扱いが必ずしも明確になっていないことがある。特に中小橋梁に対しては地震力を上回る越流による流水圧が作用することがあり得ると考えられ、大洪水時の流水圧の取扱いを明確にすることが求められよう。

さらに洪水に対してより安全な橋梁構造を目指して、特に洗掘に対する効率的な調査手法、洗掘を受けにくい基礎構造、低コストの洗掘対策手法等について技術開発を行うことが必要であり、その成果を技術基準の中に新たな規定として反映させることが望まれる。また、既存の橋梁のなかには現在の規定を満足しないものも多くあり、これらについてその安全性を照査し、順次計画的に補強等の対策を講じる必要がある。

4. (橋梁) 基礎の今後の展望

今後の基礎においてキーワードとなるのは、自然災害に対する安全性の確保、維持管理を含めた技術基準の整備、技術の限界への挑戦であると考ええる。

橋梁の被災要因として、地震、洪水、地盤変位（地すべり、沈下など）および船舶の衝突等があげられる。過去の被災事例数では洪水による被害が圧倒的に多いが、平成7年の阪神・淡路大震災においては、多数の幹線道路の橋梁に大きな被害が発生した。3で述べたように地震と洪水に対する安全性の確保が重要な課題であり、このため特に大地震・大洪水に対する荷重および要求性能の設定に関する研究の必要性が高い。

現在、建設工事の国際化が急速に進展している。1995年に発足した世界貿易機関（WTO）における「政府調達に関する協定」や「貿易の技術的障害に関する協定」（TBT協定）により、各国の規格や基準は、ISO規格を尊重することが定められた。現在ISOや欧州コードにおいては性能規定型技術基準の整備が進められつつあり、我が国においても、性能規定型技術基準への移行を計っていく必要がある。それと同時に、国際的にも検討が進んでいる限界状態設計法、部分安全係数設計法への移行、および維持管理費・更新費を明確な形で取り入れたライフサイクルコストの概念の導入を計っていく

ことが、今後の技術基準整備の重要な点であると考ええる。

平成10年4月5日に明石海峡大橋が開通した。また、本年5月には新尾道大橋・多々羅大橋・来島海峡大橋が開通し、本州と四国は三つのルートで結ばれることになった。今後、さらなる道路ネットワークの強化およびリダンダンシーの確保という面から、また一極一軸に集中した国土構造の転換という面から、新たな海峡横断道路プロジェクトの実現に向けた技術開発が要請されている。海峡横断道路プロジェクトには明石海峡大橋を越えるような超長大橋梁の建設が想定されているが、それらの実現には大幅なコスト縮減が不可欠である。コスト縮減のための技術開発は、一般の公共事業にとっても大きなテーマであるが、海峡横断道路プロジェクトにとっては、最低限30～50%のコスト縮減が実現しなければ事業化はあり得ないと考えられている。この目標を達成するためには、従来の常識を越えたアイデア・コンセプトに基づく新しい上・下部構造形式、設計・施工法の開発が不可欠となる。

参考文献

- 1) 大型基礎の調査・設計から施工まで編集委員会：大型基礎の調査・設計から施工まで、地盤工学会、1996。
- 2) 駒田敬一編著：構造物基礎の計画と設計の要点、山海堂、1986。
- 3) 杭の急速載荷試験法研究委員会：杭の急速載荷試験の載荷メカニズムと適用性、受託研究委員会報告書、地盤工学会、1999。
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、1996。
- 5) 河川管理施設等構造令研究会編：解説・河川管理施設等構造令、日本河川協会、1978。
- 6) 日本道路協会：道路震災対策便覧（震前対策編）、1988。
- 7) 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会：兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する調査報告書、1995。
- 8) 土木学会コンクリート委員会：平成8年制定コンクリート標準示方書（耐震設計編）改訂資料、土木学会、1996。
- 9) 建設省土木研究所・福島県・栃木県豪雨災害現地調査団：平成10年8月末豪雨による福島県・栃木県河川・道路災害現地調査速報、土木技術資料11月号、1998。
- 10) 土木研究所資料：九州北部梅雨前線豪雨による橋梁の被害調査、1991.3。

(原稿受理 1999.6.15)