

地形・地質を考慮した橋梁基礎形式の選定

The selection of type of bridge foundations to fit for topographic and geological conditions

おおしま かずや
大志万 和也*

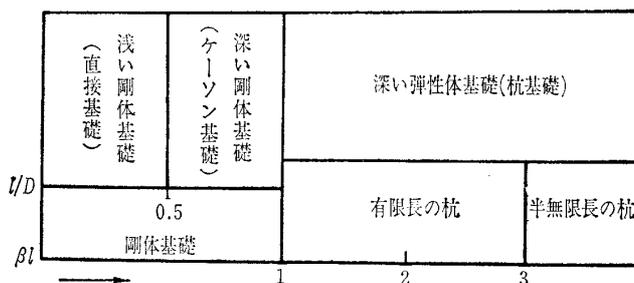
概説

基礎構造物の調査・設計段階において、まず重要なことは基礎形式の選定である。基礎形式の選定は、地形および地質条件、構造物の特性、施工条件、環境条件、経済性等の種々の条件を的確に把握して行うことが必要である。本稿では、このうち、主として、地形および地質条件から基礎形式決定へのアプローチについて述べる。

表一に基礎工法上の分類を示す。基礎形式は大別して、直接基礎、ケーソン基礎、杭基礎とそれ以外の特殊基礎に分類され、更に各基礎は施工法により、いくつかに分類される。すなわち、ケーソン基礎はオープンケーソンとニューマチックケーソンに分けられ、杭基礎は既成杭工法と場所打ち杭工法に分けられる。また、特殊基礎のうち、多柱式基礎、バルタイプ基礎は広義には杭基礎として分類してもよく、鋼管矢板式基礎、地中連続壁基礎はケーソン基礎として分類することもできるし、形状によっては杭基礎とも分類できる。

設計上の分類としては、浅い基礎および深い基礎、あるいは剛体基礎、弾性体基礎に区分される。直接基礎は浅い剛体基礎、ケーソン基礎は深い剛体基礎、杭基礎は深い弾性体基礎に対応する。表一で述べたその他基礎は深い剛体基礎と深い弾性体基礎の中間に位置する。これらの区分は道路橋においては『道路橋示方書・IV 下部構造編』(以

表一-2 基礎工の設計上の分類



l: 基礎の有効根入れ長(cm) k: 横方向地盤反力係数(kgf/cm³)
D: 基礎の幅または直径(cm) EI: 基礎の曲げ剛性(kgf·cm²)
β: 基礎の特性値(cm⁻¹)

$$\beta = 4 \sqrt{\frac{kD}{4EI}}$$

下、道示と呼ぶ¹⁾において表一2のように区分されている。鉄道橋では『国鉄建造物設計標準解説・基礎構造』(以下、設計標準と呼ぶ²⁾)において、ほぼ同様の思想で区別を行っている。設計標準では、道示のように表では明示されていないが、剛体基礎と弾性体基礎の境界はβl=2とし、有限長杭と半無限長杭の境界はβl=2.5としている。

施工上の区分と設計上の区分とは必ずしも一致せず、異なることもある。例えば、大口徑の短い杭はケーソンとして設計上取り扱った方が挙動と設計が一致し、また、口径が小さくて長さが長いケーソンは杭とみなすことが合理的である場合がある。

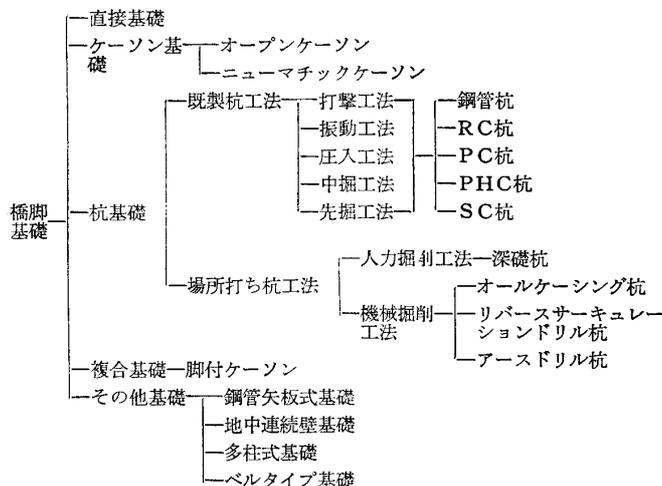
現在の橋梁基礎工の設計体系は道路橋であれ、鉄道橋であれ、残念ながら、基礎の種類により設計法が独立しており、これら設計法が異なると、同じ基礎でも答が異なってくる。したがって、設計にあたっては施工法にとらわれず、設計上の分類を明確にすることが必要である。

1. 基礎形式の選定方法

基礎形式の選定にあたっては、選定の要因となる種々の条件を検討することが必要であり、まず判定のための十分な調査を行うことが重要である。選定条件としては、①地形および地質、②上部構造の形式、規模、③施工条件、④環境条件、⑤工期、⑥経済性などが主なものであろう。

対象となる上部構造の規模が決定されると荷重条件が与えられ、まず、この荷重規模にあった基礎の形式規模が概略決まる。また、この際、上部形式によっては基礎の沈下などの変形の影響を受けやすいものもあり、この上部工形

表一-1 基礎工の施工上の分類



*阪神高速道路公団大阪第三建設部設計課

総 説

式によって、基礎の形式・規模の選定が左右される。

地形および地質条件の調査においては、現場付近の大略の地形や地表面の傾斜、水の状態などや、土質調査、地下水調査を行う。これらにより、支持地盤の選定や地表面付近地盤の水平支持力の算定などを行う。大規模な橋梁基礎では地盤応力の影響範囲が大きいので、支持層以下の土層についても調査を行う必要がある。

施工条件調査は地形調査などにより調査したもの、例えば河川内、傾斜地などを含めて、主として工事地域の地表面付近の地質や、作業上の諸制約条件、進入路の制約・作業空間の制約などをいう。施工場所が河川、海洋等の水上である場合は、河川・海の状態とその変化を把握するための河相調査、船舶の航行状況、農業用水、漁業の利用状況等の利用状況調査を行うことが必要である。

環境条件もやはり施工に関する条件である。環境条件がよく反映されていない計画で変更をよぎなくされた例は多い。環境条件は、作業による騒音、振動などの影響度の把握、地下埋設物、周辺建造物の調査などにより、基礎の選定に大きく影響を与える。

工事を短期間に完成できるということは工費にも関係する。工期、経済性に関しては、それぞれの使用仮設備、使用機械、施工速度などを調査する必要がある。

以上、各々の条件に対する調査、および検討資料に基づき基礎形式の選定を行う。図-1に選定手順のフローを一案として示す。予備調査は、基礎施工付近の地盤の構成を知る目的で行われ、支持層を想定し、対象となり得る基礎形式を選択し、建造物の概略寸法を定め、その後、更に本調査を行って、設計資料を得るという段階を踏む。しかしながら、昨年度行った建設省技術研究発表会の指定課題である『基礎工選定手法調査』での各地方建設局、県への調査では予備調査、本調査と区別している例は少なく、一般的な橋梁では、地質調査は一段階であるようである。

各種橋梁基礎構造物に対して形式選定図表が道示、設計

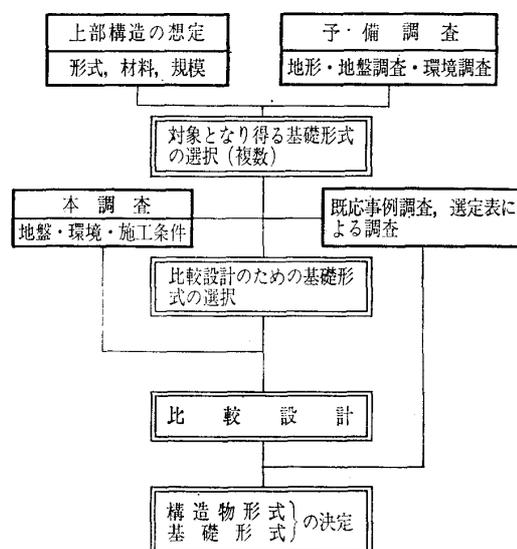


図-1 基礎形式の選定手順

標準, 更には, 杭基礎設計便覧 (日本道路協会) の基準類に示されているので参考にされたい。

2. 地形および地質条件に関する検討

2.1 地形

地形は地質を推定する上で重要な情報となるのはもちろんであるが、建造物の選定にも大きな影響を与える。

まず、地形によっては橋梁そのものの建設, あるいは基礎の築造が適さないものがある。この代表的なものとして地すべり地帯がある。橋梁予定地点が地すべり地帯である場合は, 路線を変更するか, あるいは縦断線形を変更し, トンネル構造とし, すべり線の下を通過させるなどの変更をするのがよい。地すべりが少規模な場合は, 橋梁支間長を長くし, 基礎を設けないようにすべきであるが, やむを得ず構築する場合は, 地すべり対策工を施す必要がある。

地表面が傾斜し, 大型施工機械の搬入が困難な地形では, 小型のケーソン工法, 直接基礎, 深礎杭が選定対象となるが, 傾斜が更に急になると, 直接基礎では掘削量が大きくなり, 地山が岩盤の場合は施工が困難となり, 土砂の場合は土圧が過大となるばかりでなく偏載荷重ともなり斜面の安定を保つことが困難であるため, 不適当となり, ケーソンは施工機械や刃口の据付けなどが困難となり, 深礎杭が採用される例が多い。また, これらの地帯では一般に玉石や転石が混在する層があることが多く, この層を貫いて基礎を設置するための対策を立てる必要がある。杭基礎は斜面上では打込みに困難が生じ, 打込み機も大型が多く, 転石層の打抜きも困難なため, 一般には採用されない。

2.2 表層の強度

表層が普通の強度の場合は, すべての基礎が選定の対象となる。軟弱な場合は重量物に対する地盤改良や, 架台の設置が必要となる。特に, ケーソン基礎の場合は刃口のセット, 初期掘削で不同沈下が起こり問題となることがあるので地盤改良を行う必要性が高い。

軟弱地盤で橋台などが基礎背面に盛土が行われる箇所では側方流動の可能性が高く^{3), 4), 5)}, この側方移動に対して, ケーソンや杭など基礎で抵抗する工法は工費も高く, 成功例も少ない。このため, 盛土高を低くしたりして, 背面盛土荷重を軽減する工法や, 地盤改良工法などの対策工法を取る必要がある。

2.3 中間層

中間層は一般に表層と支持層, または基礎先端の層の間の層を指し, この層は, 設計上では, 鉛直方向力に対しては摩擦力を, 水平方向力に対しては水平支持力を分担し, 非常に重要な位置を占める。基礎の選定上チェックすべき点は以下のとおりである。

- ① 中間層が硬い場合……摩擦力を期待できる基礎 (杭基礎, 鋼管矢板基礎, 地中連続壁基礎) の採用。施工上はこの層の打抜きが可能かどうかの検討, 特に鋼管

矢板基礎は高止まりの可能性が高い。

- ② 中間層に軟弱粘性土が含まれる場合……この場合は2.2で述べた側方流動，圧密沈下，それに伴うネガティブフリクションについて検討する必要がある。
- ③ 中間層に緩い砂層を含む場合……この場合は地震時の砂層の流動化が問題となる。ネガティブフリクションや，砂の流動化に対して直接的に有利な基礎形式は存在しないが，比較的剛な形式の方が有利といえる。
- ④ 礫，玉石，転石層が存在する場合……一般には杭基礎には施工上問題となることが多い。ケーソン基礎や深礎杭が適している。個々に論ずると，打込み杭では，礫程度ではRC杭を除いて問題はないが，玉石・転石層では打撃力により杭体破損の危険性があり，また，貫入不能となることが多い。中掘り杭でも排土の問題で10cmを越える礫を含む場合は施工は困難である。オールケーシング工法では杭径の1/3～1/2程度の転石で掘削不能となるが，この場合でも爆破やダイヤモンドビットなどの併用で掘削が可能となる。リバースサーキュレーション工法ではドリルパイプの径が20cm～25cmであるので，この径より大きな玉石は排土できない。実際にはパイプ径の70%程度以上の玉石が存在する場合はパイプが閉塞することが多い。アースドリル工法では10cm程度以上からパイプの閉塞が起こる危険性がある。オープンケーソンでは大きな転石等では潜水夫を必要とする。本号で記されている白鳥大橋は当初オープンケーソン案であったが，転石層の掘削が選定上一つの障害となり他の工法に変更された。深礎杭やニューマチックケーソン工法はこのような中間層に対して最も適しているといえる。鋼管矢板基礎は継手管が弱点となりやすいため鋼杭より不適といえる。地中連続壁基礎は掘削機により，オールケーシング工法，リバースサーキュレーション工法とほぼ同様である。

土質調査の際注意すべき点はこの礫，玉石等の大きさの判定である。ボーリング孔内で測定された径より約3倍程度の礫が存在するということはよく知られており⁶⁾，この点，土質調査の評価を誤らぬようにする必要はある。

2.4 支持層

支持層は基礎からの荷重を安全に支持できる良質な地盤であるが，具体的に明確な定義は困難である。これは荷重が小さく，若干の沈下も許容できる上部工形式であれば， N 値15程度の砂層でも支持層となり得る場合もあるが，荷重が大きく，許容沈下量が小さい場合は N 値30以上の砂礫層でも支持層とは見なし得ないこともある。道示では一応の目安として， N 値30以上の砂質， N 値20以上（一軸圧縮強度 q_u が2～5 kgf/cm²以上）の粘性土層を支持層としている。

直接基礎は鉛直力，水平力等の外力に対する抵抗をすべて支持層により取るので，良質な支持層を必要とする。また，ケーソン基礎も，鉛直力のすべてと水平力，モーメントの一部を支持層により負担させるので，同様の良質な支持層が必要となる。柱基礎は外力に対し中間層で抵抗する割合が大きい。

また，支持層はその強度のみならず，その層厚や，支持層と見られる層の下の地層についても十分配慮して総合的に判断する必要がある。

支持層について基礎選定上チェックする項目は以下のとおりである。

- ① 支持層の深さ……支持層が浅い場合は直接基礎，深い場合は深い基礎（表—2）を採用するのが合理的である。

PC杭は打撃による衝撃に弱く，長い杭としては不適であり，25mを越える杭長はほとんど実績がない。PC杭は40m程度までの実績があり，更に支持層が深い場合は既製杭ではPHC杭（高強度PC杭）や鋼管杭，SC杭（鋼管コンクリート複合杭）が利用される。また，場所打ち杭では，深礎杭が掘削能力の関係で30m程度未満のものがほとんどであり，アースドリル杭は機械能力から38mまでの掘削長となる。オールケーシング杭は中間層の強度にもよるが通常は40m程度までであり，軟弱地盤帯では50mを越える施工実績もある。リバースサーキュレーション杭は原理的には深さの制限は実用上ないと言ってよく，最も深い支持層に適している。

ニューマチックケーソンでは圧気作業下での人力掘削の関係で支持層の深さは30m程度が一般には限度とされる。しかし，地下水位が低かったり，ディープウェル工法等で地下水位を下げたりして，更に深い層での施工も可能である。また，現在，無人化施工が研究されており，これが実用化されれば，支持層深さの制限はかなり緩和されよう。オープンケーソンは，50mを越えるものも施工実績があるが，深い場合は，ケーソンの施工精度，掘削能率で問題が生じる。

鋼管矢板基礎は同口径の鋼管杭より継手抵抗や打撃による地盤の締固め効果で，打込み能力が低下するが60mを越える施工実績もある。また，打込み能力が不足する場合は脚付鋼管矢板基礎とすることもある。

地中連続壁基礎は支持層の深さに実用上ほとんど制限を受けない。基礎としては実績が不足しているため深度の記録はそれほどないが，LNGタンクの外壁としての施工実績では100mを越えるものもある。

- ② 支持層の傾斜……直接基礎では基礎底面を平らにする必要があるが，掘削量が増す。ただし，傾斜角が大きい場合は底面を段状にしたり，また，複合基礎とする場合もある（図—2）。この場合，設計上，荷重の分担

総 説

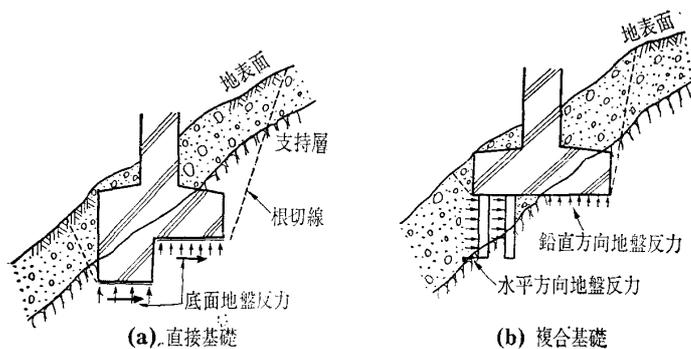


図-2 支持層の傾斜

について十分な検討が必要である。

杭基礎では傾斜が40度程度を越える場合は杭の支持層への貫入が困難となったり、杭が傾斜したりする場合がある。

ニューマチックケーソンは人力掘削であるので傾斜に対しては適合性が高い。オープンケーソンではケーソン全体が傾斜する可能性が高い。

鋼管矢板基礎では傾斜に対しては杭とほぼ同じであり、地中連続壁基礎でも同様である。

一つの基礎で支持層の傾斜に合せて基礎の根入れ長を変える場合は、荷重分担について十分検討する必要がある。

- ③ 支持層の凹凸……支持層に凹凸がある場合重要となるのは、この支持層が正確に確認できること、支持層の変化に応じて根入れ長の変更ができることの2点である。前者に対して有効なのは、まず人間が直接確認できる、直接基礎、ニューマチックケーソン、深礎杭であり、ついで掘削土を地上へ排出する場所打ち杭、オープンケーソン、地中連続壁と続き、打込み杭の順となる。
- ④ 支持層の下に軟らかい層がある場合……この場合、支持層が厚ければ問題はないが、薄い場合は、基礎の沈下やパンチングに対する検討が必要である。

ニューマチックケーソン基礎の場合は支持層の確認が容易であるので、層が薄い場合は所定の位置にとめやすく有利である。しかしながら、一般に鉛直力が大きい場合が多く、下層の粘性土の先行圧密荷重により、基礎の底面積が決定されることがある⁷⁾。

杭基礎の場合も、ケーソンと同様の検討が必要であるが、摩擦力により鉛直力の分散が図れるのでやや有利である。また、支持層を打抜き、更に下層を支持層とするか、または、不完全支持杭（設計標準参照）とするか、あるいは、摩擦杭（道示参照）などを考慮する必要がある。

2.5 地下水

地下水の有無、水位、水量などが問題となるのは、まずフーチングの施行時である。その意味で直接基礎の施工で

は、地下水位が高くかつ水量が豊富（透水係数が高い）な場合は締切り工法等に配慮が必要である。また、ニューマチックケーソンでは、地下水位により作業室内の作業気圧が左右されるので特に注意が必要である。

また、地下水が被圧されていたり流れていたりと選定される基礎は限定される。このような地下水があった場合、PC杭、鋼管杭などの既製杭および鋼管矢板が最も適した基礎であろう。場所打ち杭や地中連続壁は、掘削孔のボーリング、ヒービングや、コンクリートの流出など問題が多く不適である。直接基礎もやはり水処理が問題となり、オープンケーソンもボーリング、ヒービングの恐れがあり、また、底スラブの打設が困難であるため不適である。

2.6 その他

基礎の設計にとって問題となる事項は、①寒冷地における凍上、②有害ガス、温泉などによる基礎の腐食、③旧炭鉱における鉱害沈下などがある。

施工上問題となるのは、人力掘削を行う基礎での有害ガス（無酸素空気を含む）である。

おわりに

本稿では、基礎工の選定手法の概要を、特に地形地質とその適合する基礎工について述べた。基礎形式の選定は、過去の実績、種々の調査結果により有力な基礎形式、工法を数案選び、それらを対象に工期、工費を算定し、最後にすべての要因を総合判断して、一つの基礎形式を決定する。しかし、各々の要因に対し優劣が明確に表れないことも多く、また各々の優先順位も難しい問題であり、最後は責任ある技術者によって決められるべきものであろう。

また、近年、基礎工の進歩はめざましく、特に施工機械の開発、改良により、従来では不可能とされていた地盤へ橋梁基礎が築造されることも多い。したがって、基礎の選定に際しては、最新のこれら基礎工技術情報の収集が不可欠である。しかしながら、一般の技術者にとってこれらの情報を収集することは困難であり、それだけ選定の幅が狭まることになる。このようなことから、これら情報を収集し、必要な情報を一般の技術者が容易に利用できるデータベース作りの必要性が痛感される。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書、同解説、IV 下部構造編、pp. 168~169, 1980.
- 2) 土木学会：国鉄建造物設計標準解説、基礎構造編、p. 111, p. 153. p. 215, 1986.
- 3) 首都高速道路協会：極軟弱地盤における構造物設計法に関する調査研究（その3）、1983.
- 4) 高速道路調査会：軟弱地盤上の橋台基礎に関する調査研究報告（その3）、1981.
- 5) 橋台の側方移動に関する研究、土木技術資料 第1804号、建設省土木研究所、1981.
- 6) 京牟礼和夫：場所打ちぐいの選び方、山海堂、p. 25, 1976.
- 7) 阪神高速道路公団編：港大橋工事誌、土木学会、pp. 251~292, 1975.

（原稿受理 1986.6.13）