展望・解説

橋脚まわりの流れと洗掘*

加 島 聡**

Tidal Current and Scouring Around the Pier

Satoshi KASHIMA

1. はじめに

近年、長大橋の建設が増大し、大鳴門橋や瀬戸大橋のように海峡に架かる橋においては海中にも橋脚が建設されている。

海峡に構造物を構築することによって構造物周辺の流れが変化する。特に強潮流で底質が堆積層の場合には構造物周辺に洗掘が発生し、それが構造物の安定に影響を与える可能性もある。

本四架橋の中でも最大規模の明石海峡大橋は写真1に示すように大阪湾と播磨灘をつなぐ幅約4kmの明石海峡に架けられる吊橋であり、1日1400隻の船舶が航行する国際的な航路(幅1500m)をまたいで中央径間1990m、橋長3910mの吊橋となっている。

その基礎は4基あり、両端でケーブルを固定す

写真1 明石海峡大橋完成予想写真(手前が淡路島)

るアンカレイジ基礎は埋立作業基地上の陸上で施工されるが、主塔を支える橋脚は海中部に構築される。橋脚建設地点の最大潮流速は3.5~4.0m/secと速く、海底面が砂礫層のところに構造物が構築されるために局所洗掘が発生する。橋脚周辺の局所的な洗掘を防止することが橋脚の安定上重要であり、そのために長年にわたって調査を行った。本稿ではその概要を紹介する。

2. 橋脚の設計

明石海峡大橋架橋地点の地質断面図を図1に示す。神戸側橋脚(2P)地点の平均水深は45mで、未固結の砂礫層の明石層に支持される。淡路側橋脚(3P)地点の平均水深は40mで軟岩の神戸層に支持される。2Pの支持地盤は洗掘が予想される地質であり、ここでは2Pを中心に紹介する。

2Pの地質は上位から沖積層、上部洪積層、明石層、そしてT. P. -90m付近から出現する神戸層と続き、花南岩はT. P. -260m付近に分布する。沖積層および上部洪積層の層厚は薄い、明石層は約45mの層厚を有する青灰色の砂礫層で、上層に比べて著しく密実であるが、時に砂層を挟在する。神戸層は軟岩で、砂岩と泥岩の互層となっている。支持地盤となる明石層は最大礫径200mm以下、9.5mm以上の礫を60%以上含み、軟質なクサリ礫を含むが全体に非常によくしまった砂礫層であり、深度方向の変化が少ない。この地点での設計潮流速は3.5m/secである。

主塔からの約12万tの力を支える橋脚の平面寸法は、橋軸直角方向については2本の塔柱基部を収納する寸法とし、橋軸方向については安定上必

* 原稿受付 1989年11月15日

** 本州四国連絡橋公団第一建設局垂水工事事務所

図1 架橋地点の地質断面

要な寸法として安定計算を行った結果、橋軸方向および橋軸直角方向の必要寸法がほぼ同じであった。さらに強潮流、潮流方向の変化、施工上の方向性や耐洗掘性を考慮すると円形が有利となり、直径80mでT.P. -60mを支持地盤とする基礎が設計された。図2に橋脚一般図を示す。

3. 橋脚まわりの局所洗掘とその対策

河川や海峡の流れのあるところに構造物が存在することによって周辺の流れが変化する。流れの中におかれた構造物の周りには図3に示すような複雑な渦流や加速流が発生しており、これらが構造物周辺の海底面に強い剪断力や揚力を作動させ、洗掘を発生させる要因となっている。洗掘は洗掘孔内の流速低下に伴って徐々に鈍化し、やがて平衡状態に達して停止する。

河川における橋脚の洗掘については国内外において種々検討されているが、海峡部における橋脚は洗掘条件にすぎのような差異があり、現地に即した調査が必要である。

①河川の流れの方向は一方向であるが、海峡部では1日に4回変化する。

図2 神戸側橋脚一般図(2P)

②河川は上流から常に土砂の供給があるが、海峡部ではほとんどない。

明石海峡大橋の場合、潮流が速く、海底面が砂礫層である地点に基礎を建設するため、洗掘状況の把握およびその対策が基礎の安定上重要であり、昭和48、49年の現地調査以降、各種実験を重ねた。局所洗掘の予測には砂移動のメカニズムの複雑さから解析的なアプローチが難しく実験的手法が用いられることが多い。

明石海峡で橋脚周辺の洗掘量を定量的に把握するために直径9m、高さ13.5mの鋼製ウェルを水深約36mの海底に設置して洗掘調査を行った。最大潮流速は3.5m/secで、102日後の洗掘の結果を図4に示している。底質は砂礫で最大粒径は15cm程度であった。鋼製ウェルは往復流を受け、流向も変化しているが、最大洗掘深は側面に生じている。

この現地のデータをもとに底質の粒径分布をできるだけ相似させて橋脚の洗掘模型実験を行い、現地での洗掘深を予測した。その結果、現地の橋脚周辺に約20mの洗掘深の発生が予測された。

そのような洗掘に対して橋脚の安定を保つため

図3 橋脚まわりの流れ

図4 $\phi 9\text{m} \times 13.5\text{m}$ ウェル周辺の洗掘状況図(設置後102日)

には橋脚の根入れを深くすることが必要となり不経済となる。それ故、洗掘防止対策が必要となる。

海洋構造物の洗掘防止としては多くの工法が提案されているが、明石海峡のような強潮流、大水深のところでは機能性、経済性、維持補修の面から捨石が最も優れている。

捨石の重さは1t以上あれば4m/secの潮流にも掃流されないことが判明した。捨石の敷き均し厚さは、薄いと在来の地質砂礫が捨石の間から抜け出て洗掘を促進する懸念があり、厚すぎると在来地盤との境界付近からの洗掘の進行を早めること等を考慮して3～4層必要となった。

捨石施工範囲は橋脚の形状によって異なるが、円形の場合、橋脚幅以上の幅で外周に施工することによってケーソン直近の洗掘を防止できること

がわかった。

橋脚の施工法については洗掘防止と平行しながら検討を進めてきたが、どのような工法を採用するにしても、あらかじめ構造物設置前に海底面を均す必要がある、均し掘削の深さを変化させて掘削面の安定性を実験した結果、掘削深度が大きいほど安定することが判明し、瀬戸大橋で実績のある設置ケーソン工法の可能性が大となった。設置ケーソン工法の手順を図5に示す。

設置ケーソン工法とはあらかじめ支持地盤まで掘削し、そこに工場で製作した鋼ケーソンを設置(写真2参照)し、その中にコンクリートを打設して橋脚を完成させる工法である。そして、現地の強潮流下で大型グラブ船(写真3参照)を用いて掘削実験を行った結果、土質に応じた法面ですりばち状の底面が基礎幅に対して余裕があれば埋

写真2 事前掘削した海底面に設置中のケーソン

図5 設置ケーソン工法

戻りに対処可能となり設置ケーソン工法を採用することになった。

写真4はφ80m、高さ65mのケーソンを水深46mの海底をすり鉢状に15m掘削した底面に設置した状態で行った洗掘模型実験(1/100)の結果を示している。ケーソン設置後長期間放置しておくと、ケーソン近傍にわずかに洗掘が発生しており、ケーソン設置直後の対策と長期の対策に分けて検討する必要が生じた。短期の対策として捨石施工中の吸い出しを防止するためにケーソンの外周沿いに重さ1t程度の袋詰め砕石を大ブロック(1ブロック:15×25×2m(厚さ))でケーソン設置直後に施工した(写真5参照)。

長期的な洗掘防止工としてはケーソンの外周に橋脚径以上の範囲3～4層の捨石を施工すると有効であるが捨石の外縁に4.5m程度の洗掘を生じる。そこで、ケーソン近傍の掘削部分の捨石高さを図2に示すように10mに下げた結果、捨石外縁での洗掘深が半減した。写真6は7年後の平衡状態に達した状況を示している。

写真3 大型グラブ船による海底掘削

写真4 設置ケーソンまわりの局所洗掘状況(無対策)

2Pの場合、全体の捨石量は24万 m^3 であり、大量の捨石を大水深でムラなく施工するためにバージによる捨石投下実験を行った(写真7参照)。その結果、大部分は底開バージによって施工可能であるが、ケーソン近傍は大型グラブ船によって施工することとした。

底開バージによる捨石の投下は水理模型実験の

写真5 橋脚直近の全周に大ブロックで施工する捨石(袋詰め砕石)

写真6 橋脚周辺に捨石を施工した洗掘防止工実験

写真7 底開バージによる捨石投下実験

写真8 標的台船（グラブ船）に接舷中の底開バージ

データをもとにしてバージの積載量、保留位置および潮流から捨石の拡がり状況を予測して標的台船の位置を決め、そこに底開バージを接舷して捨石を投下した（写真8参照）。捨石投下後、捨石堆積状況を音響測深機によって把握しながら同じ作業を繰り返し行った。約 24万m^3 の捨石の施工に3か月を要した。捨石完了後、鋼ケーソン周辺の海底面の調査を行った結果、周辺海底面には捨石施工前と有意な差は認められなかった。

4. おわりに

明石海峡大橋の現地工事は昭和63年5月から着手し、平成元年3月および6月に2基のケーソンを設置した。そして、洗掘防止工を施工した後、2Pでは10月からケーソン内にコンクリートを打設している。

橋脚を強潮流下で建設するためには橋脚のまわりの洗掘の把握とその対策が非常に重要であり、昭和48年以降、関係機関のご指導、ご協力を得て洗掘に関する調査を続けることができ、その積み重ねによって洗掘対策を確立することができた。今後は長期洗掘に対する観察を予定しているが、本文が類似工事の参考になれば幸いである。

最後に水理実験、施工に関係された方々に謝意を表します。

参考文献

- 1) 中川・鈴木：潮流による橋脚周辺部の洗掘特性に関する研究，第22回海岸工学講演会論文集，（昭50—11）
- 2) 岡田・山田：明石海峡の現地洗掘調査，橋梁と基礎，（昭51—1）
- 3) 加島・田中：明石海峡大橋主塔基礎洗掘防止工実験，本四技報 No.7，（昭54—1）
- 4) 加島・古屋：明石海峡大橋主塔基礎洗掘防止工実験（その2），本四技報 No. 14，（昭55—10）
- 5) 北川・森：明石海峡大橋洗掘防止工実験（その3），本四技報 No.34，（昭60—7）
- 6) 奈良平・加島：強潮流下の洗掘防止工模型実験，橋梁と基礎，（昭55—5）
- 7) 北川・今井・小池：強潮流下における構造物周辺の局所洗掘に関する実験的研究，第40回土木学会年次講演会論文集，（昭60—9）
- 8) 高沢：強潮流下における大型構造物の洗掘防止工法に関する研究，（平元—8）
- 9) 高沢・阿部・伊藤：海中橋梁基礎の洗掘防止対策，第41回建設省技術研究会，（昭62—10）
- 10) 高塚・佐々木・土谷：明石海峡大橋洗掘防止工実験（その4），本四技報 No. 52，（平元—10）