

超軟弱地盤における橋台基礎工の施工 ～回転杭（斜杭・直杭）～

栗倉 佑子

但馬県民局 豊岡土木事務所 河川砂防課 (〒668-0025 兵庫県豊岡市幸町7番11号)

兵庫県では県道豊岡竹野線（仮称）城崎大橋架け替え事業を行っている。本事業の目的は、老朽化対策をはじめ道路としての機能向上などであり、架橋位置は日本海に面した一級河川円山川下流である。右岸側のA2橋台付近は、軟弱地盤であり、N値5以下の粘性土層が約40m堆積している。本論文では、本事業で最初に着手した構造物であるA2橋台の鋼管杭基礎の特徴、支持層への根入れ長確保において発生した問題とその原因について述べる。

キーワード 軟弱地盤，回転杭，施工管理

1. はじめに

2005年から県道豊岡竹野線（仮称）城崎大橋架け替え事業に着手しており2023年度完了を目指している。新橋はPC6径間連続箱桁橋（L=561.5m）で、河川のみを跨ぐ県管理橋では県内最長となる。

この橋は、兵庫県北部の但馬地方を流れる一級河川円山川に架かっており、近年インバウンド需要で多くの外国人が訪れる城崎温泉の玄関口の一つである。1956年に架設されてから62年が経過して老朽化が進み、大型車の通行が制限され観光バスが通行出来ないなど、様々な課題を抱えている。これらの課題を踏まえた事業目的を表1に示す。

表1 架け替えの目的

<p>①機能性の向上 狭小幅員(4.5m)・大型車通行制限(10t)を解消し、交通の安全を確保、橋脚の間隔が狭く(基準50m、現況10m)、低い橋桁が洪水の流下を阻害している為、現城崎大橋を撤去し、治安全度を向上させる</p>
<p>②地域の安心・安全の確保 円山川出水時の道路冠水により通行止めとなる(主)豊岡瀬戸線の代替路を確保する、第3次医療機関である公立豊岡病院へのアクセスを強化する</p>
<p>③地域活性化 城崎温泉の玄関口にある本橋の整備により、大型バスによる観光ルートを改善する(例:コウノトリの郷公園→玄武洞公園→城崎温泉)</p>

また、架橋位置は、山陰海岸国立公園、ラムサール条約登録湿地（円山川下流域・周辺水田），世界ジオパーク（山陰海岸）に指定されており（図1），絶滅危惧種であるコウノトリの生息域でもある。そのため、2015年2月に景観・環境の専門家で構成する設計検討委員会を設置し、その意見を盛り込んだ詳細設計を2017年3月に完了した。委員会で決定した完成イメージを図2に示す。



図1 山陰海岸国立公園，ラムサール条約登録湿地，世界ジオパーク指定状況



図2 完成イメージ

事業において最初の構造物となるA2橋台の杭基礎の施工は2017年8月に着手し、11月に終了した。基礎の特徴としては、鋼管杭基礎35本中21本の斜杭を採用したことが挙げられる。

この工事は、約40mの軟弱地盤上での施工であったが、基礎杭の支持層への根入れを確保し、無事に完了することが出来た。

本論文では、超軟弱地盤とも呼べる厚い軟弱地盤において施工を行った、①A2橋台基礎の特徴と②支持層確認において発生した問題と、その対応の結果について述べる。

2. A2橋台基礎の特徴

(1) 地質概要

架橋位置は豊岡盆地に属し、完新世(約1万年前～現在)の礫・砂・粘土及びシルトが40m程度堆積しており、主に粘性土質から構成されている。

円山川の右岸側に位置するA2橋台の地質は、2016年に行った詳細設計時のボーリング調査(BA2)(図3)の柱状図(図4)のとおり、N値5以下の粘性土層が約40mも堆積しており、ここではこれを超軟弱地盤と呼ぶ。

今回の支持層は、N値30以上が連続して確認出来るという道路橋示方書の基準を満たす、標高-48.5m付近の礫混じり砂層とした。

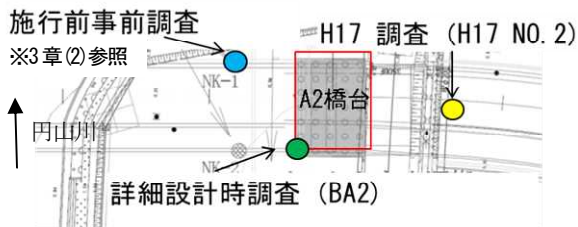


図3 ボーリング調査位置図

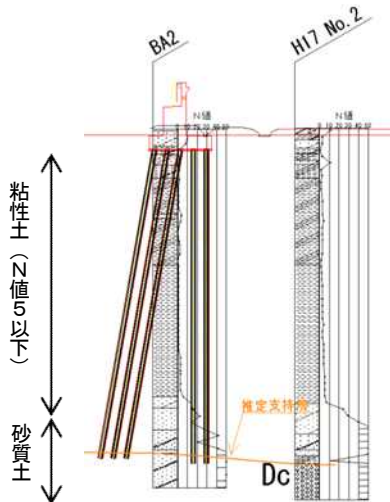


図4 柱状図

(2) 斜杭の採用

予備設計時は場所打杭としていたが、右岸取付道路の計画が進むにつれ、橋台背面の土工の形状が明らかになった。その結果を基に再検討を行うと、L1地震時の杭の水平変位が許容値を超過した。

その原因は、橋台前面方向に作用する地震時水平力が大きく、それに対して地盤の水平抵抗が小さい為、杭が変形に耐えられないことである(図5)。

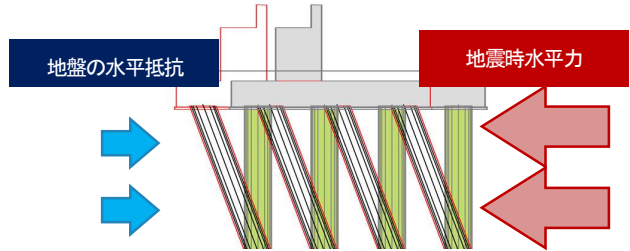


図5 直杭のみの場合のL1地震時の水平変位

そのため、水平力に対し高い抵抗値が得られる斜杭を採用した。一般的に、直杭では杭頭に作用する水平力に対して杭体の曲げ剛性で抵抗するが、図6に示すとおり斜杭では杭の軸心が斜角を有することから、水平力に対して杭体の軸剛性も抵抗要素として加わることとなり¹⁾水平変位を抑制することが出来る。斜杭の割合については、直杭を全本数の1/3以上とすること、角度についてはフーチングとの接合部の応力状態に不明な点が多いことから10度程度までとするのが良いとされている。²⁾

このため、全数35本中21本を斜杭とし、橋軸方向の橋台背面側へ10度傾けている。

なお、鋼管杭の直杭のみの設計も試みたが、杭の本数が増加し、それに伴いフーチングが大きくなり収束が付かない状況となり構造不成立であった。この様な場合、斜杭の採用により杭本数の低減が可能となりコストの削減も期待出来る。

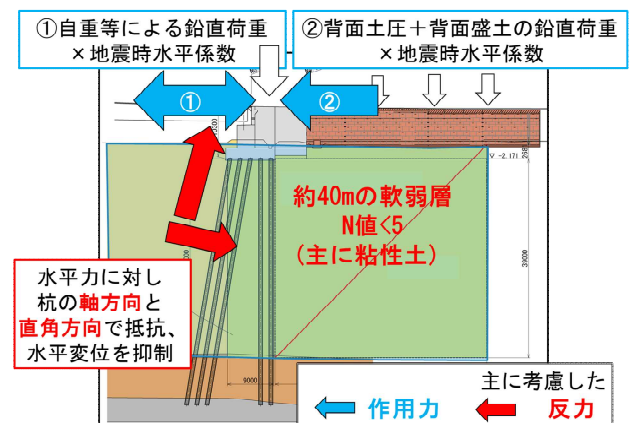


図6 斜杭の抵抗力概念図

(3)基礎杭の施工(回転杭工法)

基礎杭の施工に用いた回転杭工法は、鋼管杭の先端に羽と呼ばれる螺旋状の鋼板(図7)を取り付け、鋼管杭に回転力を付与してネジを押し込む様に、杭を地盤に貫入させる工法である。

現場付近はコウノトリの生息環境に配慮する必要があり、施工中の騒音を低減出来ること、また、斜杭が比較的精度良く施工出来ることからこの回転杭工法を採用した。その他の利点として、残土排出が無いこと、杭径に比べて羽根の拡底効果により大きな先端押し込み支持力が得られること、先端羽根のアンカー効果により大きな引抜抵抗力が得られることが挙げられる。

施工は、杭径が概ね600mm以下の場合には3点支持式杭打機等に装備したオーガモーターにより杭頭部に回転力を付与する杭頭回転方式を用い、杭径が概ね600mmを超える場合は、全周回転型オールケーシング掘削機で杭胴体部に回転力を付与する胴体回転方式を採用することが一般的である。³⁾今回は、杭径が800mmなので全周回転機で杭胴体部に回転力を付加した(図8)。



図7 先端羽

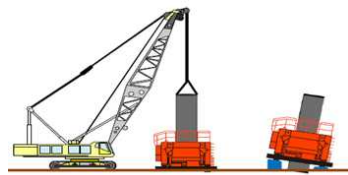


図8 回転杭施工方法

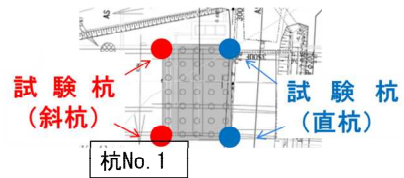


図9 試験杭の配置

詳細設計に用いたN値、回転杭施工に伴う掘削トルク値[kN・m]のグラフを比較すると、今回の施工現場においてもN値と掘削トルク値の相関性が高いことが分かる。貫入量[mm/回]、上載荷重[kN]については、極力一定に保つよう注意して施工を行った。

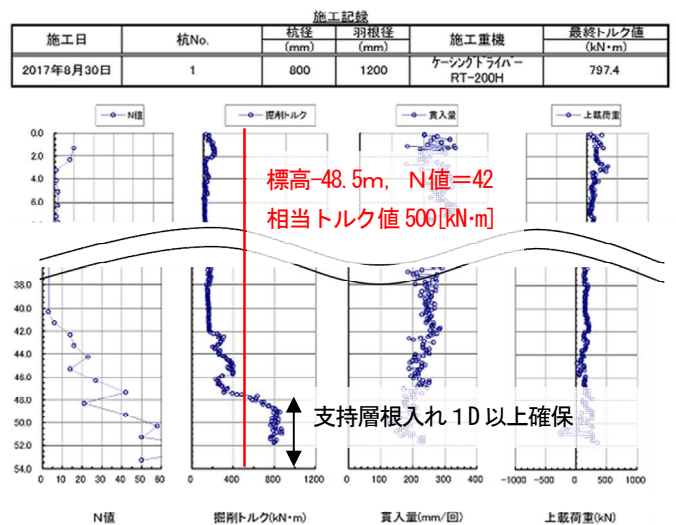


図10 試験杭(斜杭)施工データ例(杭No.1)

3 支持層への根入れ長確保

(1) 支持層への到達確認

回転杭工法では、回転速度がスパイラルオーガによる掘削の場合と比べて遅いことや、杭先端に羽根があるため先端地盤の硬軟が回転抵抗値に反映されることから、一般的には施工中の掘削トルク(回転抵抗値)がN値と相関性が高い。ただし、地盤条件や、施工機械の能力、杭体から決める回転抵抗値の上限、押し込み力等によって異なる。このため、支持層確認は杭の貫入量、施工機械の回転速度・押し込み力を極力一定に保ち、回転抵抗値とN値の変化を対比し、支持層上部よりも回転抵抗値が増加していることから判断するのが基本となる。

本工事では、橋台フーチング部の四隅の杭を試験杭とし(図9)、支持層到達の判断基準としてトルク値500[kN・m]以上を設定した。4本の試験杭の施工データの内、例として、杭No.1の記録を図10に示す。グラフは、左から、詳細設計に用いたN値、回転杭施工に伴う掘削トルク値[kN・m]、貫入量[mm/回]、上載荷重[kN]を示す。

(2) 問題と対応結果

斜杭の先端位置のボーリング調査を行っていなかった為、2017年5月に施工前事前調査ボーリングを斜杭の先端位置で行った(図3、青丸で示す)。その結果、設計支持層と調査データがおおよそ同じであった為、設計杭長L=48.5mで鋼管杭を製作した。

直杭については、先端付近の支持層中、一部N値が下がる地層が見られていたが、設計上根入れ長は確保出来ていたため、事前ボーリング調査は行わなかった。

施行結果として、斜杭については全数において支持層への必要根入れ長1D(800mm)を問題無く確保することが出来た。

直杭の施工では、掘削トルク値が判断基準トルク値500[kN・m]に達した後、一時的に減少する現象(図11)が見られ、14本中5本について、根入れ長の確保が難しいと思われる状況になった。施工初期段階には、この現象は回転杭の先端羽が地層に食い込まず、地層表面で空回りする機械的なすべり現象だと考えていた。

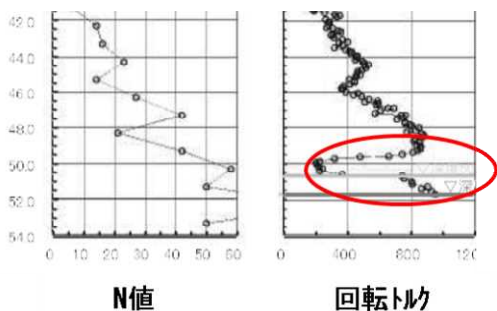


図11 掘削トルク値の一時的な減少

その後、施行の進捗と共にこの現象の原因が判明した。まず、直杭の全てで掘削トルク値が減少し、いずれも平成17年の土質調査箇所付近であること(図12)、次に図4に示す平成17年に実施した土質調査結果(H17 No.2)の支持層付近で粘土層によるN値の減少が見られること、以上2点から、橋台背面側の直杭の支持層付近に存在する粘土層が、掘削トルク値の一時的な減少の原因だと判断出来る。

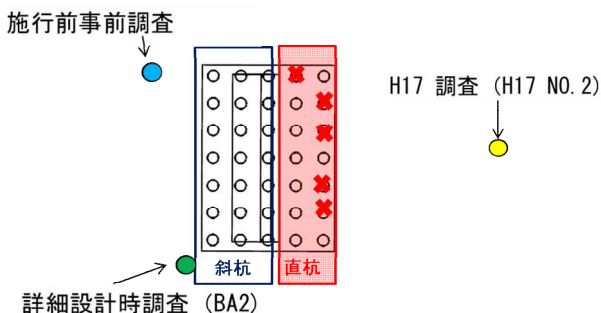


図12 掘削トルク値の減少がみられた杭(直杭全数)の位置

支持層の定義は、N値30程度以上の地盤が連続して確認出来ることであり、支持層到達後の一時的な掘削トルク値の減少があれば、それ以浅の地盤を支持層とみなせない為、根入れ長確保へ悪影響を及ぼす。

根入れ長確保について設計長で判断すると、掘削トルク値が減少した直杭14本中9本については掘削トルクの減少後、判断基準トルク値500[kN・m]以上で1D(800mm)以上の根入れ長を確保出来たが、図12「赤×」で示す残り5本については支持層への根入れ長が1Dを3cm~12cm不足した。

しかし、製作工場において鋼管杭を15~18cm程度長く製作していた為、表2に示すとおり、製作実長で判断すると必要根入れ長1Dを35本全ての杭で確保する事が出来た。

表2 鋼管杭(直杭)の根入れ長

杭No.	設計上の杭長の場合			製作実長の場合	
	根入れ長	根入れ長1Dの判定	不足長	根入れ長	根入れ長1Dの判定
1	No.22	0.943	○	1.103	○
2	No.23	0.864	○	1.025	○
3	No.24	0.914	○	1.077	○
4	No.25	0.876	○	1.047	○
5	No.26	0.801	○	0.953	○
6	No.27	0.837	○	1.014	○
7	No.28	0.688	×	0.855	○
8	No.29	1.171	○	1.338	○
9	No.30	0.754	×	0.901	○
10	No.31	0.770	×	0.954	○
11	No.32	0.902	○	1.059	○
12	No.33	0.760	×	0.921	○
13	No.34	0.675	×	0.834	○
14	No.35	0.835	○	0.983	○

4. まとめ

円山川下流右岸側に位置し、厚い軟弱地盤上に施行するA2橋台は、斜杭により構造が成り立っている。

この基礎の施工方法として選定した回転杭工法は、適切な施工管理によりスムーズで確実な施工を行える事が分かった。その結果、騒音を出さず、必要根入れ長を確保し、超軟弱地盤においてL=48.5mの鋼管杭を施工する事が出来た。

ただし、今回の反省点として、ボーリング調査が不十分であった点が挙げられる。

直杭については、直杭近傍の過年度の土質調査結果を踏まえると、支持層中に一部N値が低い地層が存在することも考えられた。直杭位置でのボーリング調査を追加していれば、より確実に杭長設定が行えた可能性がある。

一方、上手くいった点は、鋼管杭の施工データを毎日受発注者間で共有したこと、これによって、支持層への根入れ長1Dが確保困難になる可能性を予め把握し、対応を検討することが出来たことである。

謝辞：事業に関わっていただきました、地元の皆様、設計受注者様、施工受注者様、施工管理受注者様のご協力に感謝させていただきます。

参考文献

- 1) 日本道路協会：杭基礎設計便覧 (H27. 3)
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 (H24. 3)
I 共通編 IV 下部構造編
- 3) 日本道路協会：杭基礎施行便覧 (H27. 3)

※本論文は従前の所属である道路第1課時の所掌内容