

斜杭基礎の新基準による設計施工法 —現場計測管理による杭支持機構の検証—

稚内開発建設部 稚内道路事務所 工務課 ○山崎 周
稚内開発建設部 稚内道路事務所 工務課 千葉 隆広
(国) 土木研究所寒地土木研究所 寒地地盤チーム 富澤 幸一

国土交通省北海道開発局稚内開発建設部管内に架橋する幌延IC橋（仮称）において、新設計基準に基づく斜杭基礎を採用した。斜杭の新設計基準は平成24年度道路橋示方書・改訂に伴い制定されたが、本橋が国道及び市町村道を含め北海道の道路橋における初めての適用現場となる。そのため本論では、新設計基準による斜杭基礎の合理性を示すと同時に、本橋を基本に斜杭設計の留意事項である耐震照査及び曲げ応力設計法の要点を概説する。また、斜杭は施工管理技術が重要となる事から、本現場で実施した杭試験及び計測工を紹介し、その成果より支持機構を精査した。さらに、今後新技術とし活用が望まれる斜杭基礎の有るべき方向を展望した。

キーワード：新技術、斜杭設計、施工管理、計測工、建設コスト

1. はじめに

従来より、杭基礎の水平抵抗が直杭では曲げ剛性のみであるのに対し、斜杭を用いた際には軸心の斜角により軸剛性抵抗も加わるため、基礎変形量低減の利点は周知である。ただし、適正な耐震照査をせずにコスト削減のみで採用した一部の現場で施工不備も含め側方流動等が問題化した事から、斜杭基礎は概ね平成初期から現在に至るまで採用が避けられてきた経緯がある。しかしながら、最大耐力向上が可能である斜杭の再活用を念頭に、各機関で斜杭の変形特性や動的メカニズムの研究が実施され、道路橋においても新設計基準が設定された^{1),2)}。

そのため、北海道開発局稚内開発建設部管内の幌延 IC 橋（仮称）において、当該の軟弱地盤に対する基礎構造の安定性を関係機関と協議し、現行で最も合理的技術と判断された新設計基準による斜杭基礎を採用した^{3),4)}。また、施工課題も抽出し、現場管理法を確定させた。

本論では、本橋での現場条件を勘案した斜杭基礎の選定事由を基本に、斜杭設計法の要点を概説する。さらに、当該橋梁の斜杭基礎が基準改訂後、北海道内で初めての適用現場となる事から、特に計測工等を併用した施工管理技術の重要性を記載する事とする。それらを踏まえ、斜杭基礎の新技術として活用性の展望を列記する。

2. 現場概要

幌延 IC 橋（仮称）は、宗谷管内幌延地区において、一般国道 40 号天塩防災事業の一環として整備するものである。

天塩防災事業は、天塩町から幌延町を結ぶ路線にある

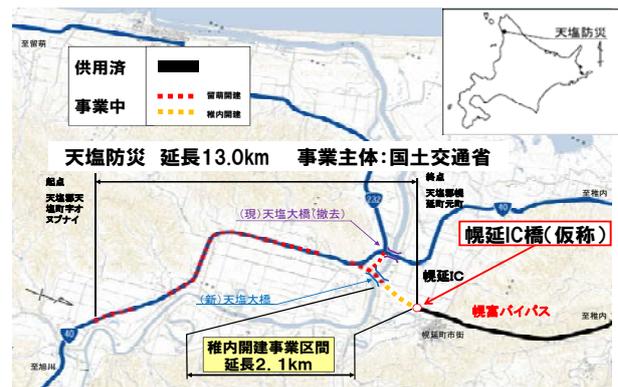


図-1 天塩防災事業概要

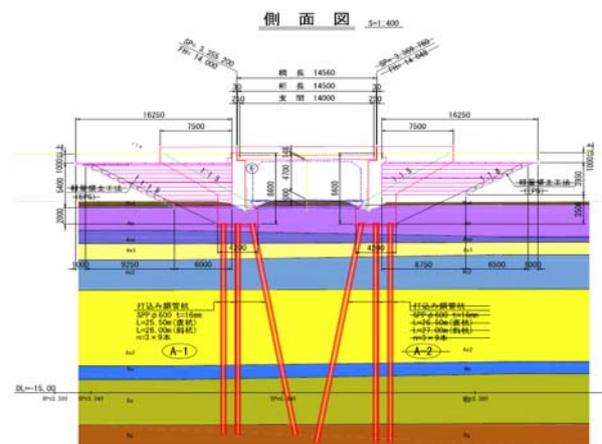


図-2 IC 橋側面図 (A1・A2 橋台基礎 直杭及び斜杭併用)

中規模程度の地震発生時に致命的な被害が予想される天塩大橋を架替整備することにより耐震性能を保有するとともに、地吹雪による視程障害の低減を図り、道路の安

全な通行の確保を目的とした延長 13.0km の防災対策事業である。(図-1)

本事業は留萌開発建設部と合同で実施しており、当部では(新)天塩大橋境界～幌延 IC (延長 2.1km) を担当している。幌延 IC 橋(仮称)は、町道と立体交差化する跨道橋であり、その橋台下部に斜杭基礎を採用した。

(表-1、図-2)

表-1 橋梁諸元

| 橋梁諸元 | | | | |
|------|--------------|------------------|--------|----------|
| 名称 | 幌延 IC 橋 (仮称) | | | |
| 道路規格 | 第 1 種第 3 級 | 設計速度 | 80km/h | |
| 橋梁形式 | 橋長 | 14.56m | | |
| | 上部工 | PC 単純プレテンションホロー桁 | | |
| | 下部工 | 逆 T 字式橋台 | 基礎工 | 鋼管杭 φ600 |

3. 斜杭基礎の選定事由

当該の天塩郡幌延地区は北部にサロベツ湿原を有する豊富地区が隣接しており、軟弱地盤が深く分布している事が 図-2 から概ね分かる。IC 橋架橋地点の詳細の地盤に注目すれば、上層約 4~5m に非常に脆弱な泥炭層その下に $N \approx 10$ 以下のシルト及び砂質土層が約 15m、さらにその下層 6~7m 間は平均 $N \approx 30$ のシルト・砂層・礫層が混在する煩雑な柱状であるため、支持基礎は約 27m 以上深の $N \approx 40 \sim 50$ の礫混じり砂層に求める事になる。

そのため、IC 橋の A1 及び A2 橋台基礎には深い基礎の代表である支持杭を選定せざるを得ないが、軟弱地盤中の杭設計であるために、諸元は杭支持機構の 3 要素である支持力・応力・変位の内、水平変位(道路橋では杭許容水平変位量は常時及びレベル 1 地震時において一般に $y=15\text{mm}$ 以下)に支配される。その結果より従来通りの直杭設計をした場合、試算では A1 橋台においては 60 本(6 列×10 本)もの多数の杭本数が必要となる。直杭のみでは A2 橋台もほぼ同様の結果である。これは橋長が短い 1 スパン橋梁基礎としては著しく不合理な形式であり、6 列以上の杭配列ではフーチング剛性が確保できず厚くなり、同時に躯体が過大となる事で杭基礎そのものの支持力設計法が成立しない懸念もある。この様な地盤性状においては、杭周辺脆弱地盤を地盤改良で改善し杭反力を向上させる手法⁹⁾も有効な場合もあるが、橋台前面側の地盤改良施工時に IC 橋が跨ぐ町道の交通供用を遮断するため、当該現場ではその適用は不可と判断した。

そこで、IC 橋両橋台前 1 列に新たに斜杭を配置する事で常時及び地震時の基礎安定が確実に確保される事を設計で照査した。その結果を踏まえ、発注者・設計者・土木研究所寒地土木研究所等(北海道開発局 道路建設課(現場試験フィールド承認)及び留萌開発建設部(当初の原設計担当)を含む)の関係機関が協議し、本 IC 橋に道路橋新設計基準の斜杭基礎を採用する事を決定した。

それにより全杭本数は A1 橋台では(直杭のみで 60 本

が) 27 本(3 列(斜杭 1 列×9 本))に減じる事ができ、A2 橋台や上部工等を含む全体工事費ベースで約 35% の建設コスト縮減が可能となった。なお、斜杭長が A1 橋台 26m で A2 橋台 27m とやや異なるのは地盤柱状の違いと A1 支承固定・A2 支承可動による反力機構の相違が要因である。ただし橋台躯体が 8m 以上と非常に高いため、側方流動回避及び圧密沈下軽減等の軟弱地盤対策として、両橋台背面に軽量盛土を併設する対応も講じた(図-2)。

IC 橋施工は平成 28 年度に開始し、A1 橋台の斜杭(杭径 600mm、杭長 26m)及び躯体構築を初段に先行実施した。

4. 斜杭設計法概説(耐震照査・曲げ応力設計)

斜杭基礎の群杭安定設計法は、直杭基礎と大きく変わるものではない。つまり現行の上部工慣性力を作用させる構造物基礎設計に従えば、常時においては変位法、地震時(レベル 1 地震動相当)及び暴風時では震度法、レベル 2 大規模地震時(タイプ I プレート境界型、タイプ II 内陸直下型)では地震時保有水平耐力照査または必要に応じた応答変位法設計等により、斜杭の斜角 θ の存在を考慮し、各々の設計体系に準じる事になる。

その設計詳細は道路橋等の新設計基準マニュアル^{1),2)}に譲るが、直杭基礎と対峙した設計上の留意事項は特に以下の 2 点である。

- (1) 地震時における斜杭基礎の耐震照査
- (2) 斜杭の曲げ応力設計法(特に軟弱地盤)

これらは、斜杭新設計基準の策定時において概ね検証・精査が成されているものと認識される。ただし、今後斜杭基礎が広く活用されるための実務者への参考及び本 IC 橋の安定性評価の妥当性説明を主旨として、上記(1)及び(2)の留意すべき要点を以下に概説する。

(1) 斜杭基礎の主たる耐震照査

斜杭基礎は杭軸心の斜角 θ の増加に伴い、静的常時荷重のみならず地震時の繰返し荷重に対する応答変形を抑制する事が可能となる。それは基礎が動的挙動した際に、斜杭の軸剛性が機能するからに他ならない^{1),2)}。ただし、斜角 θ が大きくなるに従い杭体に発生する軸力も卓越するため、設計実務上の斜角設定にはおのずと限界値が必要と考えられる。そのため例えば、港湾ではジャケット基礎の大口径斜杭を施工可能な斜角 15° 以上とする際には、杭断面剛性 EI を大きくする対応をしている。鉄道では、斜杭の斜角 θ を 5° 低度となるべく小さく設定し主にラーメン橋基礎の橋軸直角方向に斜杭を配置させ、列車の車両走行時の基礎応答抑制手法として活用している⁹⁾。

道路橋においても同様の認識から加震実験・解析成果及び特にレベル 2 地震時の受働土圧面の傾きを懸念し、現時点では斜杭基礎における斜角 θ は 10° 程度を標準としている⁷⁾。したがって、本 IC 橋ではその新設計基準に準じ

て、A1及びA2橋台の前列1列に配置する斜杭は斜角 $\theta=10^\circ$ に設計で設定した。

斜杭基礎の耐震照査において、斜角 θ 設定以外の留意すべき重要事項は、現行の地震時慣性力設計法すなわち大規模地震動に対する地震時保有水平耐力照査に則った設計時の斜杭許容応答塑性率である。前述したように、斜杭は杭軸心の斜角を有するため直杭に対して水平抵抗が大きくなる事は周知であり、例えば6本組杭（3列×2）の斜杭基礎プッシュオーバー実験では直杭基礎に対して約3割増の最大耐力を示すとされる。ただし、直杭組杭は最大荷重は下回るもののその後に変位増加しても非線形ながら耐力を保持し続けるのに対し、斜杭組杭では最大耐力後の抵抗低下が比較的早い事が明らかとなった⁷⁾。

その結果を踏まえ、道路橋の斜杭新設計基準は許容応答塑性率を橋脚基礎で3（直杭基礎は4）、橋台基礎で2（直杭基礎は3）と低減する事を新たに定めている^{1),2)}。なお本IC橋はその新設計基準に基づくが、更に安全側設計としA1及びA2基礎背面に軽量盛土を併設するため橋脚（許容塑性率3）及び橋台（許容塑性率2）両方で、Ⅲ種地盤（軟弱地盤）として地震時保有水平耐力照査を実施し、大規模地震時の安定に問題ない事を精査した。

また、斜杭基礎の耐震照査とは直接関係しないが、道路橋の斜杭新設計基準では1基礎の全杭本数のうち1/3以上を直杭とする事とされているため、図-2に示したように本IC橋のA1及びA2橋台の杭配列はそれに従った。ただし、本ルールはこの杭配列実験・解析で斜杭基礎の常時及び地震時の安定を確認した事が主たる事由であり、当面の措置と判断される^{1),7)}。なお当然の事ながら、A1及びA2橋台は斜杭を含む本杭配列で、常時及びレベル1地震時において杭許容水平変位量 $y=15\text{mm}$ 以下を満足（設計実変位量は最大約10mm）している事を付記する。

以上の道路橋における斜杭基礎の主に耐震照査に関する新設計基準を、留意すべき3項目とし表-2にまとめた。

表-2 道路橋斜杭基礎の新設計基準（主に耐震照査）

| | |
|-----|-----------------------------------------------|
| (1) | 1基礎の全杭本数の1/3以上は直杭にする |
| (2) | 斜杭の斜角 θ は 10° 程度を標準とする |
| (3) | (レベル2地震時)地震時保有水平耐力照査 許容応答塑性率は橋脚3、橋台2が目安である |

(2) 曲げ応力設計法

斜杭基礎は水平変位抑止効果の利点より、本IC橋のように軟弱地盤中の基礎として採用される場合が多いと考えられる。ただし、斜杭周辺地盤が圧密沈下した際の杭曲げ応力の増加がもう1点の設計上の懸案でもある。そのモデル図を図-3に示したが、斜角を有する事で三角形分布の圧密荷重 P が作用する可能性が直杭とは異なる。

既述研究より、周辺地盤の圧密沈下に伴い斜杭に作用する圧密荷重 P は、式(1)で算定するとされている⁸⁾。

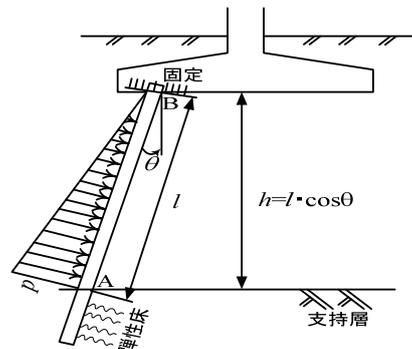


図-3 斜杭に作用する分布荷重モデル

$$P = \alpha_s \cdot D \cdot U \cdot \gamma_t \cdot h \sin \theta \quad (1)$$

ここに、 α_s : 荷重分布係数（設計最大値は3）、 D : 杭径、 U : 圧密度、 γ_t : 湿潤単位体積重量（地下水以下では水中単位体積重量 γ ）、 h : 深度、 θ : 斜角である。

本式の工学的妥当性等は検証されており、日本国内の多くの各機関（道路、建築、鉄道、港湾等）の斜杭設計法に適用されている。ただし、本式の運用において懸案となるのは、地盤性状を勘案した特に自重圧密の軟弱層深度 h と杭中心間隔比である荷重分布係数 α_s のパラメータ設定とその根拠である。これらを仮に過大に設定した場合には、安全側設計には成り得るが圧密沈下等の実現象を適正に反映していない可能性やその設計結果で曲げ応力が許容値を超過し斜杭採用を排除する危惧もある。

そのため、道路橋の斜杭基礎における新設計基準では、圧密地盤深度を正規に設定する手法として、影響評価係数の考え方を新たに取り入れている。この詳細は参考文献7)に詳しいが、端的には概ね0.8を地盤柱状から想定した軟弱層厚 h_d に乗じて設計圧密深度 h を設定するというものである（ $h \approx 0.8 h_d$ ）。本IC橋のA1及びA2橋台における斜杭曲げ応力設計法は、この新設計基準に準じ、上部工反力荷重で発生する杭応力に、斜角 $\theta=10^\circ$ での圧密曲げ応力を合成し、杭体が許容応力度以内であることを診断している。なお、この圧地盤層を対象にネガティブフリクションの支持力照査も斜杭及び直杭で実施している。

また、荷重分布係数 α_s は斜杭への荷重幅であるが、一律に $\alpha_s=3$ （杭径3倍幅の分布荷重）とするのは、軟弱地盤ではすり抜け効果現象から過大評価の場合がある事が実験・解析から確認されている^{3),4)}。この α_s を低減させる方法は本IC橋の斜杭曲げ応力設計法では取り入っていないが、後述する施工管理法の一環で斜杭本体に設置した杭ひずみ長期計測から、今後再検証していく考えである。

5. 斜杭施工管理法

斜杭は直杭と異なり明確な施工管理体系が無く、本IC橋が北海道内の新設計基準策定後初めての斜杭施工となるため、種々の検討・対応を実施した。本施工時に講じた、特筆すべき4事項を以下に示す。

(1) 出来形管理基準

現在、北海道開発局における鋼管杭の出来形管理基準には、直杭、斜杭の分けが存在せず鋼管杭としての管理基準が設定されているのみである。斜杭については、特に「偏心量 ($d \leq 100\text{mm}$)」管理が難しい。この規格値を準用して施工管理が可能であるかという問題が懸念された。

結果から論じると、開発局の出来形管理基準を準用した。この規格値は「鋼管杭・その設計と施工」³⁾より設定されている値である。

そこでは、直杭と斜杭についての施工実績を基に設定されていることが記載されており(図-4)、斜杭についても同規格で施工管理できることがわかった。

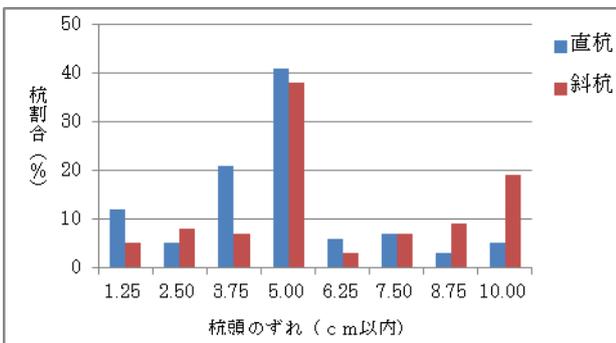


図-4 打込み精度「偏心量」(「鋼管杭その設計と施工」より出展)

(2) 施工精度

打ち込みに使用する機械は、直杭で使用するものと同じクローラ式杭打ち機に油圧パイルハンマを用いて施工する。施工時には杭打ち機のリーダーを傾斜させ打ち込んでいくことになる(写真-1)。ここで問題となるのが、杭が固定されず打ち込まれていく点である。直杭の場合であると、杭の自重により地盤に対し直角に打ち込まれていくが、斜杭の場合はその杭の自重により傾斜ずれが起きることが予想された。

そこで施工精度に関しては、序盤の打込みの位置調整を確実にする事に留意することとした。その結果、規格値を逸脱するような杭芯・傾斜ずれが起こることはなかった。特に今回は、施工業者と協議の基、打込みの位置調整の施工管理に新技術を用いた。本施工管理技術は、杭芯を三次元的にとらえ正位置からのずれ・傾斜を、スマートフォン端末よりリアルタイムで確認できるというものである。それらの工夫もあり正確な施工管理を行う事ができ、管理基準50%以内で施工することが出来た。

(3) 打込み管理試験(斜杭動的極限支持力)

打込み管理試験は、IC橋A1橋台の全ての鋼管杭(斜杭



写真-1 鋼管杭打ち込み

9本及び直杭18本)の打込み時の根入れ深さに応じた一打当たりのリバウンド量 K 、貫入量 S 、打撃回数 n 等を計測管理し、設計所定長における支持層への所要根入れに応じた杭の動的極限支持力を確認するものである。

打込み杭工法による鋼管杭の動的極限支持力 R_u' は、波動方程式から導かれた式(2)より算定される¹⁰⁾。

$$R_u' = A_p \cdot E_p \cdot K / e_0 \cdot L_1 + N \cdot U \cdot L_2 / e_f \quad (2)$$

ここに、 A_p : 杭断面積、 E_p : 杭ヤング係数、 N : 地盤平均 N 値、 U : 杭周長、 L_1 : 杭長、 L_2 : 杭: 地中長、 e_0 : 応力波補正係数、 e_f : 動摩擦低減係数である。

直杭の動的極限支持力 R_u' は、設計極限支持力 R_u を全て確保($R_u' \geq R_u$)する結果が得られている事から説明を割愛し、ここでは本論の主旨である打込み杭工法による斜杭の動的極限支持力 R_u' を中心に考察する。

斜杭施工はハンマ重量7tonの三点式油圧杭打ち機を用いたが、中心位置の代表斜杭の打込み管理記録値に注目し検証する。本斜杭の設計所定長(26m)施工時の最終総打撃回数 n は707回であったが、層別区分した各累計で整理すれば、上層約5mまでの泥炭性軟弱地盤層で $n_1=11$ 回、中間層約15mの $N=10$ 以下のシルト及び砂質土層で $n_2=284$ 回、下層約6mの平均 $N=30$ のシルト・砂層・礫層混層及び $N=40\sim 50$ の礫混じり砂層で $n_3=412$ 回($n=n_1+n_2+n_3=707=11+284+412=707$)である。これらの代表斜杭の施工管理記録を1打当たりの貫入量 S 等と併せて精査すれば、地盤柱状の強度(N 値)に則したほぼ線形的な打込み施工の結果と判断できる。この事は、前項で記した斜杭の直進性を確保した打込み施工法の妥当性及び施工精度の正確性を裏づけるものと考えられる。

A1橋台斜杭9本は設計所定長の打止め時で、平均リバウンド量 $K=9\text{mm}$ 、平均貫入量 $S=4\text{mm}$ であり、式(2)より算定される斜杭の動的極限支持力 R_u' は3495kNとなる。これは設計極限支持力 $R_u=2892\text{kN}$ (1.2倍=動的極限支持力3495kN/設計極限支持力2892kN)を過大で無い範囲で

確保するものである。あえて斜角 θ を考慮し垂直値に変換しても大きな差異はない ($3400\text{kN} \approx 3495\text{kN} \times \cos 10^\circ$)。

上記より、適正に施工管理された本 IC 橋の A1 橋台斜杭は、所要の鉛直支持力を有しているものと判断される。

(4) 斜杭応力計測工

新たな試みとして、A1橋台斜杭の杭体応力現場計測工を実施した。本計測工は概ね以下の3点を目的とする。

- (1) 打込み杭工法施工の妥当性及び施工管理法検証
- (2) 杭曲げ応力及び軸力発現確認（設計値との対比）
- (3) 地震時の杭健全性評価

本計測工は発注者である稚内開発建設部と土木研究所寒地土木研究所が協議し、北海道開発局道路建設課が現場試験フィールドとして承認のもと実施するものである。

A1橋台斜杭長は26mのため上杭・中杭・下杭3ロッド（各長約9m）を現場溶接するが、杭頭モーメントより上杭管厚は $t=16\text{mm}$ 、中杭と下杭管厚は $t=9\text{mm}$ としている。杭応力計測工は、斜杭9本中の中心位置斜杭1本に、深さ方向の等間隔5点の下面A及び上面Bに貼設したひずみゲージから算定する簡便で安価な手法とした（写真-2）。

つまり、ひずみ計測値 ϵ に杭弾性係数 E (205kN/mm^2) を乗じて各5点位置の杭体応力 σ を算定 ($\sigma = \epsilon \times E$) し、その下面A及び上面B値応力 σ の差分を斜杭曲げ応力 σ_M 並びに平均値を軸応力 σ_v とするもので、長期計測を念頭としている。曲げ応力 σ_M に杭断面係数 Z を乗じれば作用荷重に対する曲げモーメントを得ることが可能である。

平成28年度の杭ひずみ ϵ の計測は、1回目がひずみゲージ貼設時の作動確認・初期値、2回目が斜杭設計所定長の打止め時、3回目がA1橋台躯体施工後の計3回である。



写真-2 A1橋台斜杭ひずみゲージ貼設（下面Aと上面B各5点）

2回目の杭ひずみ ϵ の計測が可能であった事は、斜杭の打込み杭施工時にひずみゲージ及びその保護チャンネルプロテクターは損傷せず特異な変状が無かった事を意味する。つまり前節の施工精度・動的極限支持力での結論通り、2回目の杭ひずみ ϵ 計測より上記(1)の施工法及び施工管理法の妥当性を再度検証したとも考える事が出来る。

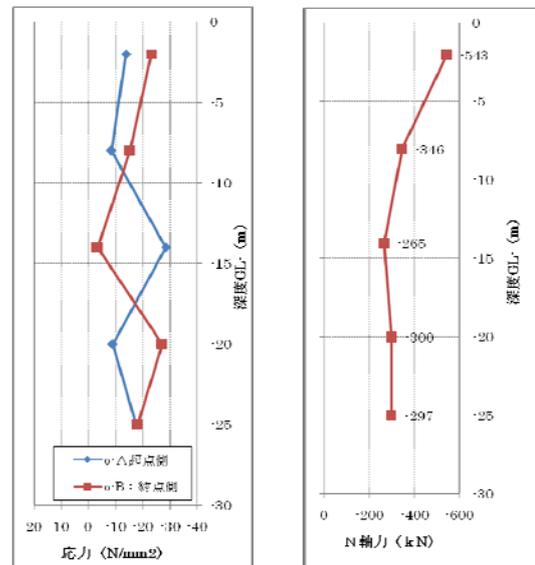


図-5 躯体自重作用時の斜杭応力 σ （A面・B面）及び軸力N

上記(2)の現時点の考察のため、図-5にA1橋台躯体施工後つまりに躯体自重が作用した際の斜杭杭体に発生したA・B面の曲げ応力 σ_M と杭軸力Nを示した。A・B面の応力 σ は、3回目と2回目の杭ひずみ ϵ 増加差分に杭弾性係数 E を乗じた算出した。同様に杭軸力Nは、3回目と2回目の杭ひずみ ϵ 増加差分に杭弾性係数 E と杭断面積 A_p を乗じて求めた。

図中の応力 σ は、深さ約13mの下面Aで引張、上面Bで圧縮の傾向を示した。これは杭頭固定条件で支持層が比較的強層の状況の斜杭に躯体自重が作用したために、下端が強層となる $N \approx 10$ 以下のシルト及び砂質土層位置の境界部に応力がやや集中したための事象と想定される。下面Aと上面Bの差分から曲げ応力 σ_M を算定する事も可能であるが、現時点で斜杭への圧密分布荷重が増加する要素もほぼ無く、いずれにしても問題ない過小値である。

杭軸力Nは杭頭部でやや大きい圧縮値(-543kN)が発現している。躯体自重6737kNが全杭27本に平均的に加わるとすれば杭1本当たり軸力は $N \approx 250\text{kN}$ となるが、躯体自重の重心位置が約20cm斜杭側にあるため、直杭18本に対して斜杭9本の受け持ち荷重が大きくなるため概ね妥当値と判断できる（例えばの試算： $575\text{kN} = \alpha$ （斜橋 87° の影響は不明のため1とする） $\times 250\text{kN} \times 1.15$ （重心ずれ） $\times 2$ （直杭ブロックと斜杭ブロックに区分） \approx 杭頭軸力543kN）。また杭軸力Nの深さ方向伝達の低下傾向は、地盤柱状の摩擦力抵抗に則していると判断される。

なお、杭曲げ応力 σ_M 及び軸力Nは、桁施工時等にはその自荷重により増加し発現分布の傾向も変化すると考えられる。施工状況に合わせた長期計測で、設計値との対比・照査よりそれらを随時明らかにしていく考えである。

上記(3)については、当該現場は地震の少ない地帯ではあるが、ひずみゲージは10年程度は計測が可能のためスイッチBOXにコード接続しておけば、大規模地震時の杭健全性の検証や損傷確認・対策等が十分に可能である。

6. 結論と展望

新設計基準に基づく斜杭基礎を道路橋に採用し、設計法の精査及び計測工等の施工管理の実施した成果として、概ね以下の知見を得た。

- (1) 的確な判断により斜杭基礎を現場条件に応じて活用する事で、建設コスト削減を含め合理的かつ安全な橋梁構築が可能となる。ただし、関係者との詳細な設計施工法の検討は必須である。
- (2) 新設計基準の斜杭は基礎形式として、現段階において以下の数点の適用範囲が設定されており、斜杭基礎の設計上の安定性よりそれを厳守すべきである。
 - ① 鋼管杭のみを適用
 - ② 1基礎内の全杭本数の1/3以上は直杭
 - ③ 斜角 θ は $\pm 10^\circ$ 程度が標準
- (3) 斜杭基礎の地震時設計法つまり耐震照査は、レベル1地震時では斜角 θ を反映し、ばね定数等を設定した震度法による。また、レベル2地震時(タイプIプレート境界型及びタイプII内陸直下型)は直杭基礎同様に地震時保有水平耐力照査を基本とするが、最大耐力後の抵抗低下現象を考慮し許容応答塑性率を橋脚基礎で3(直杭基礎は4)、橋台基礎で2(直杭基礎は3)に低減設定し判定する。
- (4) 斜杭は基礎全体の水平変位抑止効果として、軟弱地盤で採用される場合が多いと考えられる。ただし、斜杭周辺地盤が圧密沈下した際の杭曲げ応力の増加が懸案であるため、道路橋の新設計基準で設定された影響評価係数の考え方から圧密層厚を適正に定め、曲げ応力設計を実施する必要がある。また、斜杭曲げ応力設計時の分布荷重幅である荷重分布係数の一律 $\alpha_s=3$ 設定は過大評価であるとする研究成果もあるため、今後の杭体ひずみ計測値から精査する。
- (5) 斜杭施工では、現設計法に則した的確な現場管理技術が重要となる。そのため、斜杭施工精度の許容値・出来型は北海道開発局設計要領及び鋼管杭協会基準等のマニュアルに準じる管理措置を取る必要がある。また施工法は現場条件を勘案し、打込み杭工法または回転杭工法のいずれかを選定する。
- (6) 道路橋において斜杭は過去約20年間採用が避けられてきたある種の新技术でもある。したがって、斜杭基礎を安定性した構造物として構築するためには、通常現場管理の動的支持力以外に、杭応力計測工等を併用する適正な対応が必要と考えられる。

以上が本論成果の骨子であるが、斜杭基礎の新技术活用に際しては、産・学・官の協議及び連携は必須と考える。

さらに、斜杭に限らず基礎の新技术の採用に当たってのあるべき方向を展望し、以下に幾つかを記載した。

- (1) 斜杭基礎等の地中構造物の力学挙動は周辺地盤との相対剛性で決定する。そのため地盤性状を的確に把握し、すなわち現場条件を十分に勘案し新技术採用の

可否を決定する必要がある。

- (2) 現行設計基準のみに捉われる事無く新技术の採用を検討する事が望ましい。ただし、各機関の設計基準はこれまでに培ってきた実験・解析等の研究成果の蓄積から成立しているマニュアルであるため、その原理原則は逸脱すべきではない。
- (3) コスト削減のみで新技术採用を決定する事は回避すべきである。逆に歩掛が無い等の事由だけで採用しない事も避けたい。つまり、新技术の有用性と逆にリスクを説明可能なよう丁寧に整理する必要がある。
- (4) 構造物単体のみで新技术を評価・採用するのでは無く、周辺地域の防災やインフラ整備等の長期的見地及びメンテナンスも念頭とした総合的判断が求められる。
- (5) 新技术にはおのずとメリット・デメリットや現場条件制約等が想定されるが、それらは有識者と意志共有し、採用の是非も含めて最終判断する必要がある。

以上の5点は留意点、制約条件の列記でもある。更にあるべき方向の結論的展望をすれば、現場に則した真に必要な技術・工法であるとすれば、実績のみに捉われる事なく、調査・試験工の実施等も含めた工学的論拠に基づき、新技术の積極的行使を念頭とする事が重要と考える。本論は、道路橋の新設計基準制定後に北海道で初となる斜杭基礎の設計法及び施工管理の取り組みを示したものであるが、今後の工学発展の一助となれば幸甚である。

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.337-453、2012
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編、pp.210-228、2012。
- 3) 冨澤幸一、西本 聡、三浦清一：泥炭地盤における斜杭基礎の静的および動的挙動評価に関する実験的検討、地盤工学ジャーナル、Vol.8、No.2、PP.209-220、2013。
- 4) Koichi Tomisawa、 Koichi Isobe : *Seismic Resistance of Batter Pile Foundations in Peaty Soft Ground*、4th Geo-China International Conference、CD-ROM、2016。
- 5) 土木研究所寒地土木研究所：北海道における複合地盤杭基礎の設計施工法に関するガイドライン、214p、2010。
- 6) (例えば) 清田三四郎、米澤豊司、青木一二三、神田政幸、西岡英俊、出羽利行：斜杭基礎の水平抵抗特性と鉄道構造物への適用性の検討、地盤工学ジャーナル、Vol.5、No.2、pp.293-307、2010。
- 7) 日本道路協会：杭基礎設計便覧、pp.333-344、2015。
- 8) (例えば) 佐藤 昭、赤井公昭、舟崎恒義：負の周面摩擦力と斜ぐいに発生する曲げの計算法に関する研究—その1 負の周面摩擦力と斜ぐいに発生する曲げの計算法—、日本道路公団試験所報告、pp.76-82、1969。
- 9) 鋼管杭協会：鋼管杭・その設計と施工、p.390、2016。
- 10) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編、pp.554-557、2012。