

[論文 No. 6] 地盤の特徴にあわせた地盤調査の必要性

(地盤リスクは人為的なもの?)

○基礎地盤コンサルタンツ(株) 九州支社 田上 裕
九州大学 理事 副学長 落合英俊
東京電機大学 理工学部 教授 安田 進
西日本高速道路(株) 技術部上席専門役 前田良刀
九州大学 大学院工学研究科 教授 安福規之
福岡県飯塚県土整備部 道路維持課 右田隆雄
基礎地盤コンサルタンツ(株) 九州支社 白井康夫

1. はじめに

リスクをコントロールする方法として、保有・削減・回避・転嫁する、などがあげられる。地盤リスクの削減にあたって良く推薦されるのが、調査量を増やす方法である。ただし筆者らは、調査量を増やしても必ずしもリスクが削減されるとは考えていない。それは地盤リスク要因として地盤の特徴に合わせた調査を実施していないことが予想され、実際にそのような事例が多く見受けられるためである。地盤の特徴に合っていない地盤調査では、如何に数量を増やしてもリスクは回避できず、不経済な設計となる場合もあり得る。逆に、地盤の特徴に合わせた調査を実施すれば、合理的な設計ができる可能性が多い。ただし地盤の特徴を判断し、精度良く地盤定数を得るには地盤技術者の力量に左右されることが多い。当報文では2件の事例を基に、地盤の特徴に合わせた調査を実施したことで地盤リスクを低減し、どの程度のコストが実際に縮減されたかを定量的に示す。

2. 鋭敏比の高い超軟弱粘土地盤での高架橋基礎杭の設計例

N値がゼロ、含水比 $W_n=100\sim 150\%$ 、液性指数 $I_L=1.0$ 以上、鋭敏比 S_t が 30 程度というように、極めて軟質で層厚も厚い粘土地盤での高架橋基礎杭の設計例を以下に示す。

(1) 地盤の特徴を無視した地盤定数の設定

上記のような軟弱地盤が表層から厚く分布する場合、一般には杭の水平抵抗で杭本数が決定される場合が多い。設計箇所の数地点で実施された孔内水平載荷試験で得られた変形係数 E_b と、一軸圧縮試験 E_{50} を深度で整理したものを図 1^{1) 2)} に示した。この図の横軸は E_b や E_{50} に道路橋示方書³⁾ でいう「 $\alpha=4$ 」を乗じた値 ($E=\alpha E_b$, αE_{50}) としている。この図より、 E_b の平均値 ($500\text{kN}/\text{m}^2$) は E_{50} の最低値 ($1500\text{kN}/\text{m}^2$) の $1/3$ 程度である。このように得られた調査結果および地盤データをもとに、設計者は、①孔内(原

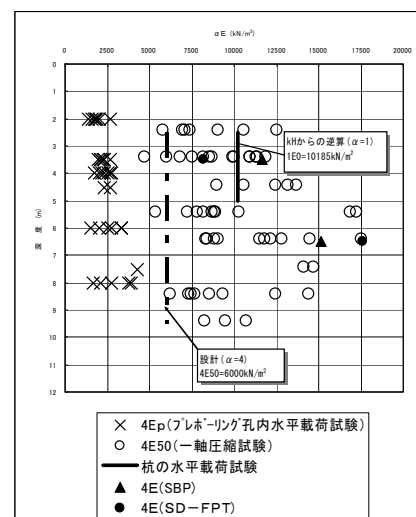


図1 E_0 の深度分布および実杭の水平載荷試験で得られた実測値¹⁾

位置) で得られた値であるので E_b は信憑性が高い, ②小さい方の地盤定数を用いた方が設計上は安全側となる, ③ E_{50} と E_b の両者があれば従来は必ず E_b を用いている, などの理由で $E_b = 500\text{kN/m}^2$ を設計値として採用していた。

ただし, 当地区の地盤の特徴は, 「鋭敏比が 30 と非常に高く, かつ N 値がゼロの超軟弱粘土地盤」である。このような地盤においては通常のプレボーリングタイプの孔内水平載荷試験では, 図 2²⁾のようにどうしても応力解放の影響を受けるので, E_b は過小評価されている場合が多い。言い換えれば, 当地盤の特徴には孔内水平載荷試験は適用性が低いといえ, いわゆる地盤の特徴に合っていない原位置試験ということができよう。

(2) 地盤の特徴を考慮した設計値と実杭での事後確認

ここで, E_{50} の最低値 (1500kN/m^2) と E_b の平均値 (500kN/m^2) を設計値とした場合には, 図 3²⁾のように基礎の大きさや杭本数が異なり, E_b を設計値にすると E_{50} を採用したときに比べて, 38%ほど工費が高くなる。当地区では最終的には発注者も交えて種々協議し, E_b では図 2 の影響が大きい, 道路橋示方書³⁾では E_b と E_{50} は同等に扱われている, 何でも安全側とする必要はない, などの理由で E_{50} の最低値が設計値として採用された。

後日, 設計値の信憑性を確認するために実杭の水平載荷試験が実施され, それで得られた変形係数 E (10185kN/m^2) を αE_b や αE_{50} と合わせて図 1 に示している。この図より, E_b の平均値では過小評価過ぎることがわかる。なお, 従来の設計はこのような超軟弱地盤でも孔内水平載荷試験の E_b で設計されており, 如何に地盤の特徴と調査方法のマッチングが疎かにされていたかが想像される。

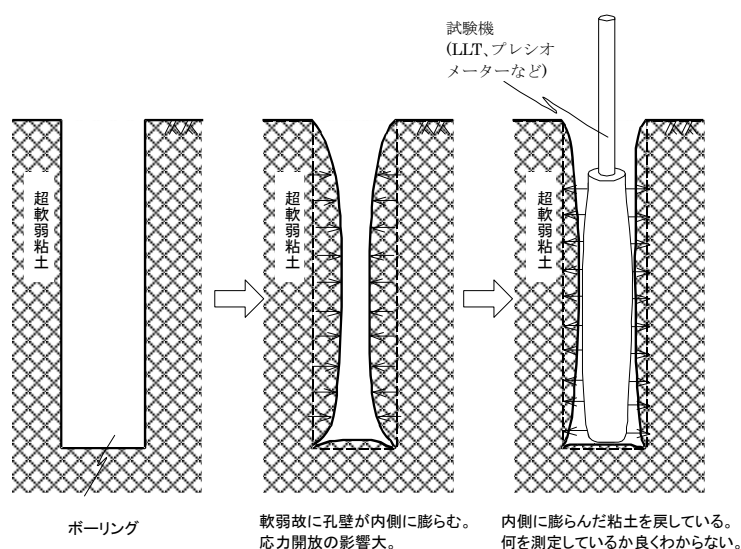


図 2 軟弱地盤での孔内水平載荷試験時の応力解放の影響²⁾

(a) 孔内水平載荷試験の $E_b=500\text{kN/m}^2$ を採用した場合 工費(1.38)	(b) 一軸圧縮試験で得られる $E_{50}=1500\text{kN/m}^2$ を採用した場合 工費(1.0)
杭長 $L=18.5\text{m}$, 杭本数 $N=8$ 本	杭長 $L=18.5\text{m}$, 杭本数 $N=5$ 本

図 3 E_b , E_{50} を採用した場合の設計試算²⁾

3. 互層地盤における海上連絡橋基礎杭の設計例

新北九州空港は 2006 年に開港された海上空港である。本事例は、この空港への連絡橋を対象に、合理的な設計を行なうために技術委員会（地盤基礎工部会）⁴⁾が組織され、その中で経験豊富な調査技術者と設計技術者が対等の立場で、地盤の特徴に合った調査・設計方法および地盤のモデル化を考えていったことにより、結果として N 値設計や岩盤への支持に比較して、大幅なコスト縮減を達成した事例である。なお、以下の (1) から (4) を作成する際には、委員会報告書⁴⁾をかなりの部分に渡り参考として作成した。

(1) 地盤の特徴と地盤リスク

当計画ルート地層は図 4 のように示され、非常に起伏に富む中生代の三郡変成岩類(片岩)を基盤とし、その上位に堆積年代が 20 万年以前の砂と粘土が複雑な互層状を呈す洪積層が厚く分布し、層厚 10m 程度の軟弱な沖積粘土層がほぼ水平に堆積する。図 4 を得るには平成 3 年から 7 年の最終調査までのボーリング本数が 66 本（延べ 3,299m）となり、全橋長に対するボーリング密度は単純計算で 1 本/114m である。その中の海上橋部は 1 本/50m となり、高い調査密度となった。このように高い密度の調査となった背景には、

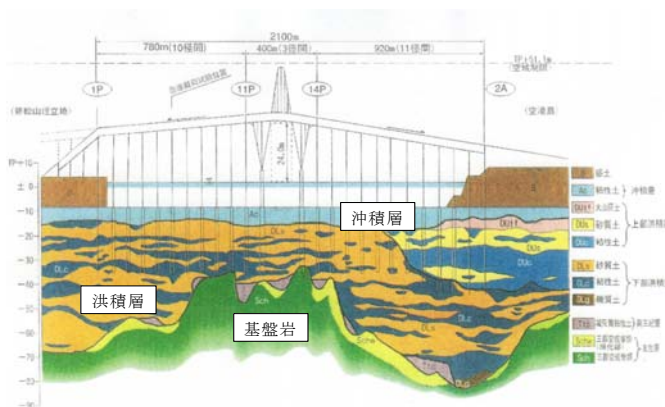


図 4 地質縦断面図⁴⁾

洪積地盤の地層連続性の複雑さ、基盤層の深度及び起伏の激しさ、などによる確固とした地盤情報の把握の難しさによるところと、地盤の力学的情報の精度を上げることによって、結果として地盤工学の視点を反映した、より経済的で合理的な設計・施工が可能となるとする二つの考えがあった。

このような地盤で構造物基礎（鋼管矢板井筒基礎）を設計する場合、重要と考えられるのは、支持層の選定と支持力の評価である。当地区の場合は基盤岩が深くかつ傾斜に富んでいたために、経済性を考慮してなるべく上層の洪積層に支持させたかったという経緯がある。この洪積層を粒度分布で砂と粘土に判別し、砂層を DLs 層、粘土層を DLc 層に分け、各々の N 値の深度分布を図 5 に示した。図-5 より N 値は深さ方向にも直線増加または減少の傾向が見られず、それは水平方向にも同様である。また、この洪積層は粘性土と砂質土の複雑な互層から成り、水平方向、鉛直方向の連続性にも乏しい。

ここで、道路橋示方書³⁾で言われている支持層（砂層、砂礫層は概略 N 値が 30 以上、粘性土層は概略 N 値が 20 以上）、という観点から眺めると N 値は大きくばらついているものの、砂層・粘土層ともに T.P.-30m 以深では N 値は安定しつつあることが伺える。ただし、この深度以深を支持層として杭の設計を実施するには、次に示す問題点（地盤リスク）が存在した。

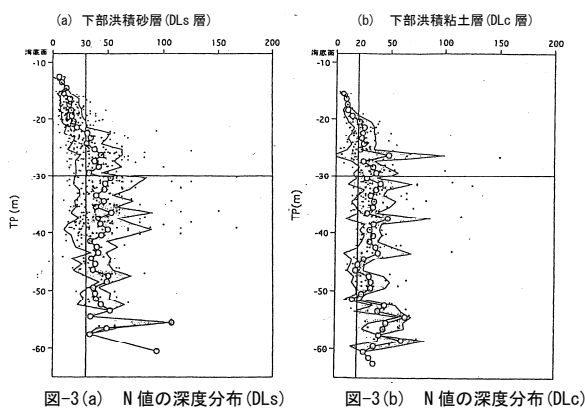


図 5 洪積層の N 値の深度分布図

- ① 完全な支持杭とみなすのは難しいことから、洪積層での杭の周面摩擦力を正確に評価する必要がある。
- ② この洪積層の特徴として、複雑な互層地盤であることがあげられ、1m 離れると、また1m 深度が変わると地層が変化するくらいの複雑さであった。
- ③ 通常摩擦力はN 値で求められるが、鋼管の打ち込み杭では砂質土と粘性土で5 倍の差があるために、こういう地盤の場合は土質判別（砂か粘土か）の誤差がかなり大きい。

(2) 周面摩擦力推定式の提案

このような互層状の不均質な地盤を対象として鉛直支持力を求めるには、地盤の種別にあまり左右されない合理的な予測方法が求められる。この考え方を反映したモデル化の方法として、ここでは有効応力に基づく強度定数 (c' , ϕ') を基礎としたモデル地盤の作成を選択した。この背景には、実際に行った膨大な室内三軸試験や土質調査の結果を無駄にせず、直接的に活用することが、結果として経済的で合理的な設計につながるという考えがあった。

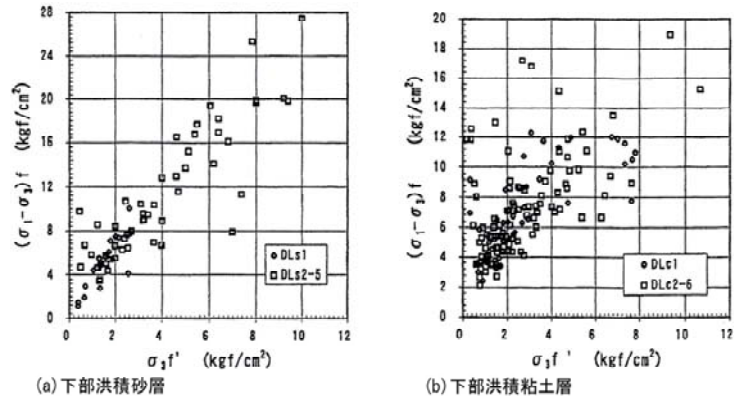


図6 下部洪積砂層と粘性土層の $(\sigma_1 - \sigma_3)f$ と $3f$ の関係

実際にDLsとDLc層とでは図6に示されるように、強度定数(c' , ϕ')に有意な差はなく、強度定数における土質の種類による違いは特に認められなかった。

打込み鋼管杭の開端先端支持力は、支持層付近での閉塞の程度に大きく依存し、破壊メカニズムも変化する。本橋の場合も、支持層付近での閉塞効果の程度を明確に把握し、底面積に対する先端支持力度として評価することは困難であると予想され、そこで図7に示すように支持層以深での杭内周面摩擦力を設計上の杭先端支持力と見なすことを考え、このとき本橋では、地盤の c' , ϕ' を用いて次式にて周面摩擦力度を評価することとした。

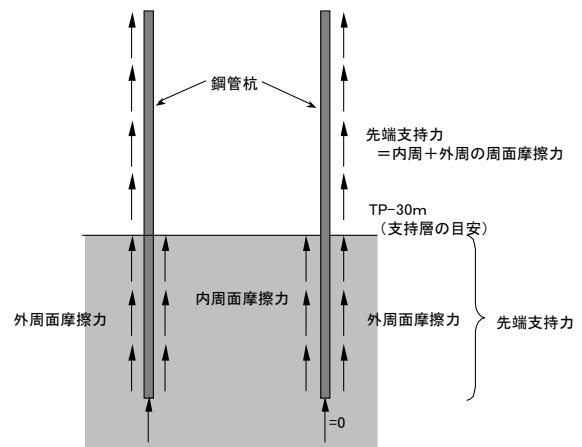


図7 先端支持力の仮定

$$f = c_\delta + K \sigma v' \tan \delta \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、

- f: 周面摩擦力度(kN/m²), $c_\delta (=c')$: 付着力(kN/m²), c' : 有効応力表示の粘着力(kN/m²),
- K: 側圧係数, $\sigma v' (= \gamma' z)$: 有効上載圧(tf/m²), $\delta (=2/3 \cdot \phi')$: 壁面摩擦角(度),
- γ' : 水中単位体積重量(kN/m³), z : 各層の中心までの深さ(m),
- ϕ' : 有効応力表示の内部摩擦角(度)

なお、式中の各パラメータは、種々の試験で決定したがここでは省略する。

(3) 実杭を用いた載荷試験による確認

当該地盤は基盤岩が深いため、経済性、施工性の観点から下部洪積層を支持層と想定して、設計を進めてきた。ただし、予想した極限支持力が得られるかどうか確認しておく必要がある。そこで、原位置での杭の支持力特性を把握すること、提案した支持力式の適用性を検討すること、設計時の支持力安全率の低減を図ることを目的として、実杭での静的鉛直載荷試験を12Pと22Pの2ヶ所で実施した。図8は12Pと22Pで、載荷試験で得られた極限支持力（杭先端沈下量が杭径の10%以上の沈下量となる荷重）と提案した式(1)より求めた極限支持力を比較したものである。図8から読み取れるように、12P、22Pともに全体の極限支持力、先端支持力、周面摩擦力は実測値と計算値はよく一致しており、提案した予測式の適用性は良好と判断される。図9は、22Pでの全外周面摩擦力を試験値、提案式(1)および道路橋示方書³⁾によるN値での推定式による計算値の比較をしたものである。図9より提案式(1)は試験値にかなり近い(86%)が、N値による推定では過小評価される傾向が読み取れる。

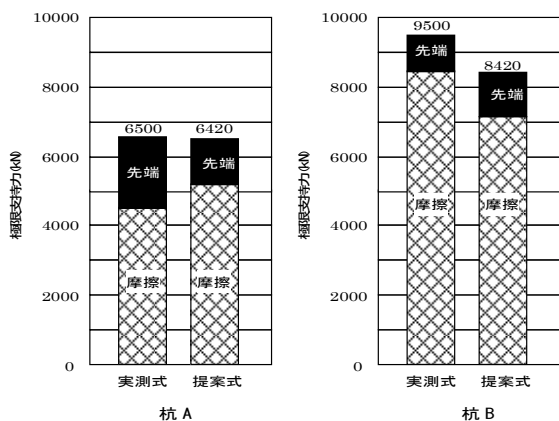


図8 載荷試験結果と提案式による支持力

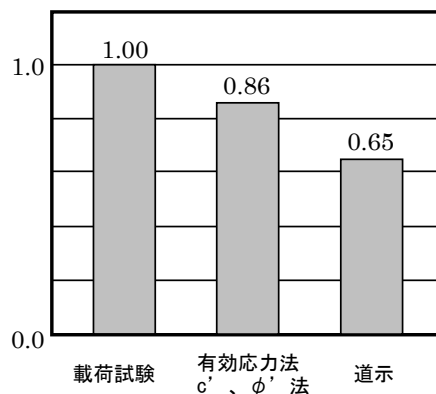


図9 周面摩擦力の比較

(4) コストの比較

橋梁基礎の設計を実施するまでには、かなりの量のボーリング、室内土質試験、現位置試験を行ったことになる。ここで、実際にこれだけの量の調査・室内力学試験が必要だったのか、また基盤岩に支持させればもっと少ない調査量で済んだのでは、という反論があるかも知れない。そこで、①岩盤に支持、②N値で設計して洪積層に支持、③今回の c', ϕ' 法で洪積層に支持、という種類で、調査費、施工費を簡単に比較したものが表1である。表の中の調査費は、予備調査はどの考え方を採用しても同様と考えられたので、詳細調査費で比較した。また詳細調査の中でもボーリング本数については、提案式の場合は基本的に1橋脚に対して1本のボーリングであるが、①、②の場合、本地区のように基盤岩の起伏が激しいと、1橋脚あたり2~4本のボーリングが必要になる場合が多い。そこで、平均的に1橋脚あたり2本のボーリングで計算した。

結果的には、①、②の場合、サンプリングや室内土質試験費は殆ど必要ないものの、ボーリング本数や深度が増えるために、杭の鉛直載荷試験を除いた地盤調査費は①、②、③で殆ど差がないものとなっている。また、岩盤に支持させる場合は施工費では杭長が長い分費用は高くなり、提案式の方がトータルでは37%ほどのコスト縮減となっている。またN値で設計した場合も提案式と同じ洪積層に支持させるとはいえ、杭長が長くなるので、その分費用は高くなり、提案式の方が約20%ほどコスト縮減となっている。

表 1 杭の設計施工に関する各種工費の比較

	項目	岩盤に支持		N 値法 (中間層に支持)		c', φ' 法 (中間層に支持)	
		内訳	費用 (千円)	内訳	費用 (千円)	内訳	費用 (千円)
調査・試験費	ボーリング調査	2,898m(各ピア 2 本)	188,350	2,898m(各ピア 2 本)	188,350	2,217m	140,235
	サンプリング		0		0		18,181
	室内土質試験		0		0		50,141
	孔内水平載荷	c', φ' 法と同等と仮定	11,543	c', φ' 法と同等と仮定	11,543		11,543
	実杭の載荷試験	必要なし	0	必要なし	0	12P,22P の 2ヶ所, 破壊まで実施	188,206
	小計		199,893		199,893		408,306
施工費	材料および施工費	平均深度 60m 1~24P	28,060,800		21,195,000	平均深度 30.5m 1~24P	17,400,000
合計			28,260,693		21,394,893		17,808,306

4. さいごに

地盤の特徴に合わせた調査試験の重要性を説明し、そうすることにより合理的な設計が可能となりコストが低減された 2 つの事例を示した。なお、実際の設計では設計技術者が地盤調査結果より自分の判断で設計用の地盤定数を設定（または結果に示されている妥当性を判断）して、設計されることが殆どである。ただし、調査技術者と設計技術者の欠点は表 2 に示されるように、調査技術者は調査精度が設計結果に与える影響に関してはあまり範疇がなく、その結果関係ない部分に関して精度を追求する、などが良く見受けられる。逆に設計技術者は調査結果に対しての精度や適用範囲が範疇がないので、地盤定数を最も安全側に設定し、結果として不経済な構造物を作ってしまう、などのことが現実によく見られる。故にこれらを防ぐには、地盤の特長に合わせた調査を実施することはもちろん重要であるが、まずは調査と設計（+発注者）が融合（よく協議し合う）していくことが一番必要であろう（その頭に「良質な」という言葉が必要であるが）。それが地盤リスク（設計リスク？）の削減に対して、最も手っ取り早くかつ効果的な方法と筆者らは考える。

表 2 調査と設計技術者の欠点

	弱点	その結果・・・
調査	<ul style="list-style-type: none"> 設計に必要な地盤定数に対する要求精度。 調査精度が設計結果に与える影響。 	<ul style="list-style-type: none"> 精度を上げる項目が不明で、関係ない精度を追求する。 調査結果がどこに役立っているか不明。
設計	<ul style="list-style-type: none"> 地盤定数を自分が必要とする精度で得る方法。 得られた調査結果に対する精度や適用範囲。 	<ul style="list-style-type: none"> すべてに渡り調査結果は適用できる。 N 値のみの柱状図さえあれば良い。 地盤定数は安全側の値を使えば良い。

【参考文献】

1) 白井康夫・田上裕：杭の水平抵抗を求めるための地盤調査（地盤の特徴に合わせた調査・試験の必要性），基礎工 38-6，pp33-36,2010.6. 2) 田上裕：基礎の計画と選定に必要な地盤調査（調査と設計が一体となって機能するには），基礎工 30-7，pp35-39,2002.7. 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編，2002.3. 4) 新北九州空港連絡橋設計施工委員会：新北九州空港連絡橋 委員会報告書，pp17-100,2007.7.