

# 直接基礎構造物の支持力照査・確認試験方法について

土木研究所 寒地土木研究所 寒地地盤チーム ○福島 宏文  
西本 聡  
北海道大学大学院 工学研究科 三浦 清一

最近の性能規定型設計の動向から、現場条件を適正に評価した設計施工が求められている。直接基礎構造物の設計においても、寸法効果の導入や地盤定数の設定等において、適正な現場条件の把握が求められており、寒地土木研究所では、各種地盤条件において原位置試験を実施してきた。本報ではこれをふまえて、「地盤調査」「支持力照査」「確認試験」の各段階における留意事項について整理し、実務者向けの資料として提案するものである。

キーワード：直接基礎、性能規定、地盤定数

## 1. はじめに

従来の設計基準・要領では、材料・計算手法・構造などのいわゆる仕様が細かく規定された、仕様規定型の基準であった。そのため、新技術・新工法の採用や技術開発に対しては厳しい傾向にあり、条件によっては不経済な設計になる場合もあった。

これに対し、道路橋示方書をはじめとする設計基準・要領で適用がすすんでいる性能規定型基準は、構造物に要求される性能を規定する基準である。要求される性能を満足することが説明できれば、新技術や新工法が採用可能であるため、コストや工期の縮減が期待でき、これに関する技術開発の促進が見込まれる。

性能規定型設計の導入は、より適正な設計条件設定を要求する傾向にあり、とりわけ、構造物設計の与条件を得るための地質調査については、設計手法に即した調査が求められることになる。直接基礎構造物の設計においては、信頼性の高い原位置における各種試験の重要度が高くなっているものと考えられる。

本報では、橋梁の直接基礎構造物の調査、設計、施工の各段階における留意点について整理し、実務者のための提案するものである。

## 2. 直接基礎設計に関する道路橋示方書の改訂

### (1) 極限支持力式の寸法効果補正

道路橋示方書（以下、道示）では平成14年3月の改訂で、直接基礎の極限支持力式に寸法効果の補正係数が導入された<sup>1)</sup>。この補正係数により、従来（H8道示）の式<sup>2)</sup>と比較して大幅な支持力減少となり、一般的な設計例において直接基礎の支持力が4～6割程度減少する事

例が確認されている。この減少の程度は、実務上無視できない範囲であるため、寸法効果の厳密評価に対応した、より適正な地盤定数（ $c$  および  $\phi$ ）を調査・推定し支持力評価を行うことが求められる。

図-1に、想定的设计計算例を示す。この設計条件でH8道示による照査を行った場合、許容支持力 $Q_a$ および最大地盤反力度の両方で余裕があり、想定条件より小さい底版寸法となると考えられる。一方で、H14道示による照査では、寸法効果の補正により許容支持力 $Q_a$ がH8道示の6割程度となるため、極限支持力式から構造が決定することになった（図-2）。

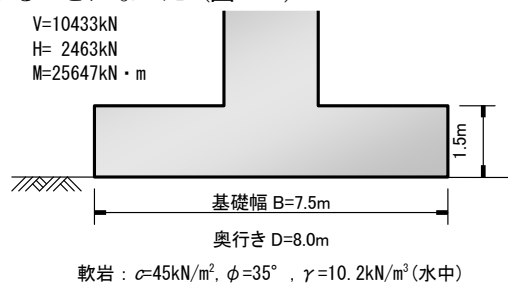


図-1 想定条件

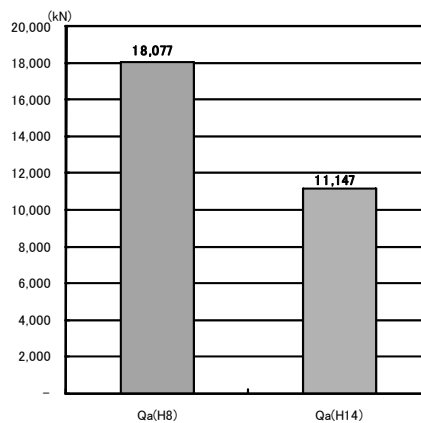


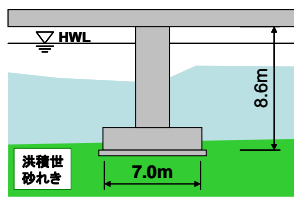
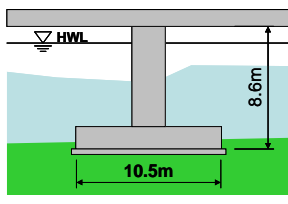
図-2 許容支持力  $Q_a$

## (2) 地盤定数の評価

地盤定数の評価に関しても、記載内容の変更があった。特に砂れき地盤の地盤定数の評価については、従前はH8道示の記載<sup>3)</sup>を根拠に、固結した洪積世の砂れきは $c = 50 \text{ kN/m}^2$ 程度の粘着力を有しているとして設計を行っていた。H14道示では、理論的な妥当性や実験等による検証に基づいた設計が求められており、必要に応じ平板載荷試験等による推定を求める記述<sup>4)</sup>となった。しかしながら、同試験は確認試験の位置づけで実施されることがほとんどであり、砂れきの粘着力 $c$ の推定は一般に困難であるため、粘着力を考慮しない設計例が見受けられる。

表-1に、砂れきの粘着力 $c$ の評価別の、直接基礎構造物の設計計算例を示す。この事例では、粘着力を0とした場合、底版幅が1.5倍にもなる結果となった。安易に粘着力を考慮しないことは、現場条件を反映しているとは言い難く、性能規定で求めている妥当性のある一定の検証に基づいた設計とはなっていない。コスト削減の観点からも、地盤条件を適性に評価する試験調査の実施が重要である。

表-1 砂れき地盤における設計計算例

	
$c = 50 \text{ kN/m}^2$ (H8 道示相当)	$c = 0 \text{ kN/m}^2$ (H14 道示相当)
$\phi = 33^\circ$	$\phi = 33^\circ$
底版幅 $B = 7.0 \text{ m}$	底版幅 $B = 10.5 \text{ m}$

## 3. 基礎構造物における留意点の整理

図-3に、橋梁における一般的な調査、設計、施工のフローを示す。

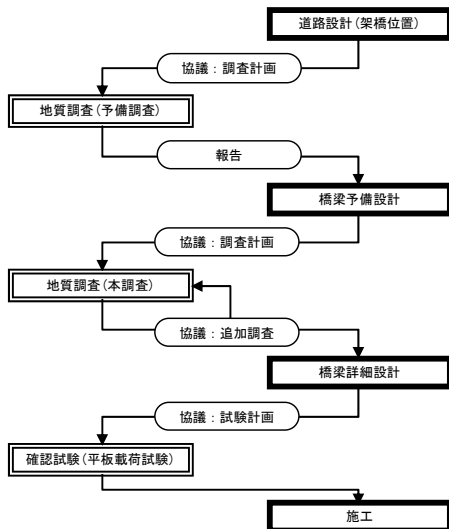


図-3 橋梁における地盤調査、設計、施工フロー

ここでは、直接基礎構造物の調査から設計、施工に至る段階を以下の5つに区分した。

- 地盤調査 (予備調査)
- 橋梁予備設計
- 地盤調査 (本調査)
- 橋梁詳細設計
- 施工前の確認試験 (平板載荷試験)

以下では、それぞれの段階における留意点を整理する。

### (1) 地盤調査 (予備調査)

地盤の予備調査は、以下の事項を検討するのに必要な情報を収集することを目的として実施される。

- 構造物の立地可能性 (一般的な安定性、選択可能な位置など)
- 基礎の形式や配置
- 構造物の挙動に重要な影響を与える地盤の構造や特徴、およびその特性
- 詳細設計・施工のために行う本調査の計画
- 構造物の建設による周辺環境への影響

特に基礎構造物の設計においては、支持層の選定を行うことが主目的であり、文献・資料調査、現地踏査、ボーリング調査、地下水調査、乱された資料の採取、室内試験など、基本的な調査項目に限定される。そのため精緻な設計定数を得るための特別な試験調査を実施することは現実的ではない。これまで多くの設計定数は、 $N$ 値等との相関性から推定する方法が取られている。

橋梁構造物の直接基礎の支持地盤は、砂れきもしくは岩がほとんどであり、それぞれの地盤について留意点を述べる。

#### a) 砂れき地盤

道路橋示方書では、砂れき地盤のせん断抵抗角 $\phi$ を $N$ 値から推定する方法が提案されている<sup>5)</sup>。しかしながら標準貫入試験において、れきをたたいて $N$ 値が過大に出る傾向があるため、打撃回数と貫入量の関係を詳細に検討する必要がある。

粘着力 $c$ については洪積世のよく締って固結している砂れきの場合には、ある程度の粘着力を有する可能性がある<sup>6)</sup>。しかしながら、一般に砂れきの粘着力 $c$ を推定するには、載荷試験等の実施が必要であり、予備調査においては、砂れきの洪積世・沖積世の区別の把握と、本調査における調査方法の提案がなされることが重要である。

#### b) 岩盤

一般に硬質の岩の場合、支持力が問題になることは少ないが、亀裂、割れ目等がある場合や風化の程度によっては設計計算上支持力不足になる場合も有り得る。岩盤は、一般には土砂地盤と比べて不均質であり、力学・変形特性が岩相の状態や破碎・風化等の状況に影響されるため、試験結果の評価は土砂地盤と比べて容易ではなく、地盤定数( $c$ ,  $\phi$ )の推定は困難であるとされている。し

かしながら、直接基礎の設計計算においては、地盤定数 ( $c, \phi$ ) が設計条件として必須であるため、地盤定数の評価に当たっては、既往資料を十分に検討して実施せねばならない。

設計計算で用いられる岩盤の地盤定数推定法として、「一軸強度・RQDによる推定方法(北海道開発局 道路設計要領)<sup>7)</sup>および「換算  $N$  値による推定方法(NEXCO 設計要領)<sup>8)</sup>が良く用いられている。

以上の事項を、フロー図として整理した(図-4)。

## (2) 橋梁予備設計

直接基礎設計の照査項目は、「滑動」「転倒」「支持力」の3つが基本である。また、支持力の照査については、「極限支持力(静力学公式)」および「最大地盤反力度の上限値」の2つの項目に区分される。

前述の通り、平成14年改訂の道路橋示方書<sup>2)</sup>からは、

地盤定数 ( $c, \phi$ ) がパラメータとなる極限支持力の算定式に、寸法効果の補正係数が導入され、設計計算上軽視できない程度的大幅な支持力減少となる設計例が確認されている。

従前は、特に岩盤を支持層とする設計計算において、「最大地盤反力度の上限値」に関する照査を実施すれば、極限支持力は実荷重に対して十分余裕のある算定結果となっていた。しかしながら寸法効果補正の影響から、地盤条件によっては「最大地盤反力度の上限値」を満足しても「極限支持力」の照査が満足しない場合があるため、「極限支持力」の照査を確実にすることが求められる。

また、極限支持力による照査は、構造物の諸元や建設コストに直結するため、適正な地盤定数 ( $c, \phi$ ) を調査・算定し支持力評価を行うことが必要となった。

以上をふまえ、橋梁予備設計において留意する事項を整理する。

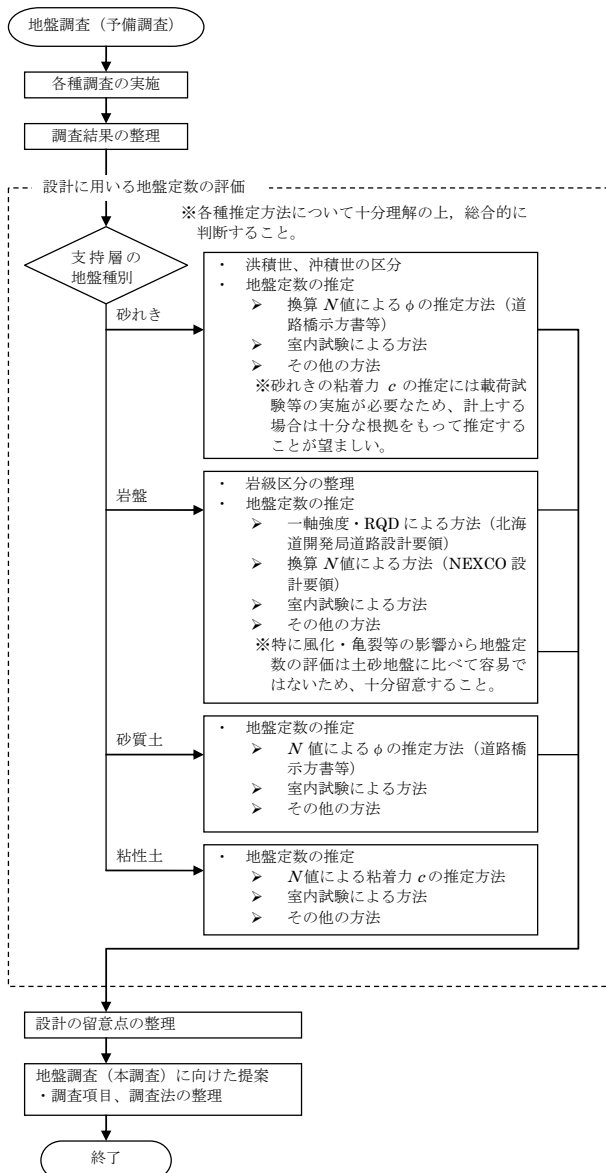


図-4 地盤調査(予備調査)における調査フロー

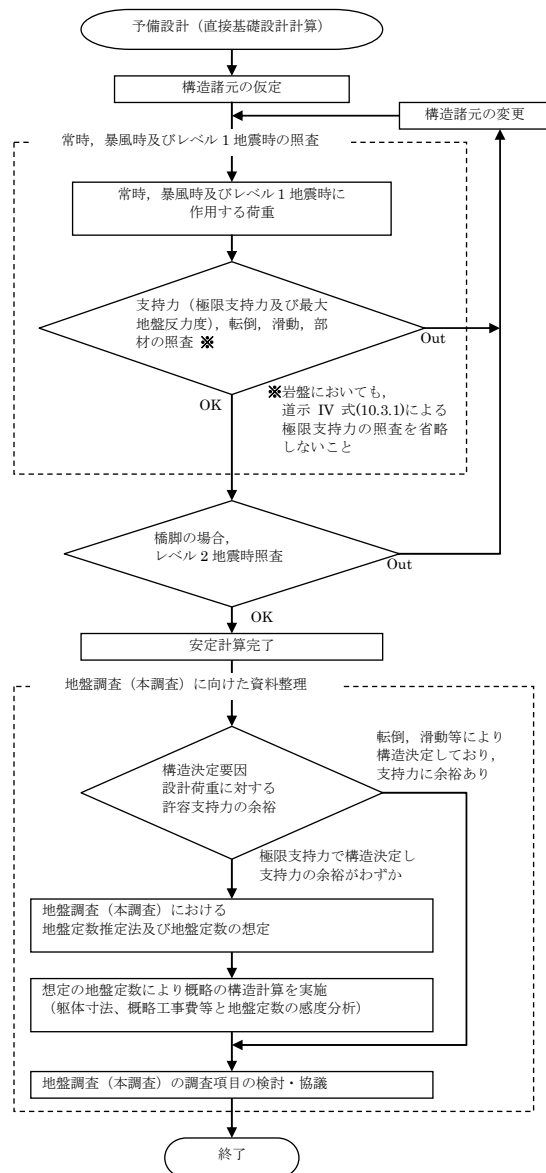


図-5 橋梁予備設計における設計フロー

a)設計計画

設計計画にあたっては、地盤の設計条件について、地盤調査者と十分協議を行う必要がある。地盤定数の設定にあたっては、十分信頼性のある方法により検討した結果を適用する必要がある。

b)照査実施

「極限支持力」の照査により、構造決定する場合があるため、確実に行うこと。

c)地盤調査（本調査）に向けた整理

寸法効果補正の影響から、地盤定数 ( $c, \phi$ ) の推定精度が構造物の諸元や建設コストに直結する場合がある。特に極限支持力により構造決定した場合、地盤定数の推定精度が構造諸元に大きく影響する。そのため、地盤調査（本調査）に向けて、地盤特性や地盤調査方法による推定値のばらつきを考慮し、地盤定数の条件を変えた場合の概略計算を行い、地盤定数と構造諸元の関係について把握できる参考資料を作成することが望ましい。

具体例として、地盤定数と構造諸元の関係について整理した例を表-2に示す。予備設計の設計結果とは別に、想定される地盤定数の推定範囲について地盤調査者と協議を行い、それに相当する躯体寸法を整理した。同時に簡易的にコストの算出も行っている。地盤定数と構造諸元の関係を把握しておくことで、地盤調査（本調査）の調査項目に関する判断材料となる。

以上についてフロー図にまとめる（図-5）。

(3) 地盤調査（本調査）

地盤調査（本調査）は、詳細設計および施工に必要な資料を得るために行うものであり、予備調査および予備設計の結果をふまえて、より具体的な個々の問題に対する地盤の情報を得る目的で実施する。

調査計画にあたっては、橋梁予備設計の担当者と十分な協議を行い、必要な設計条件を得るための調査手法を計画することが求められる。

特に、直接基礎の設計に当たっては、地盤定数 ( $c, \phi$ ) の推定が重要であり、原位置せん断摩擦試験<sup>9)</sup>等の比較的新しい調査手法の適用についても十分検討することが求められる。

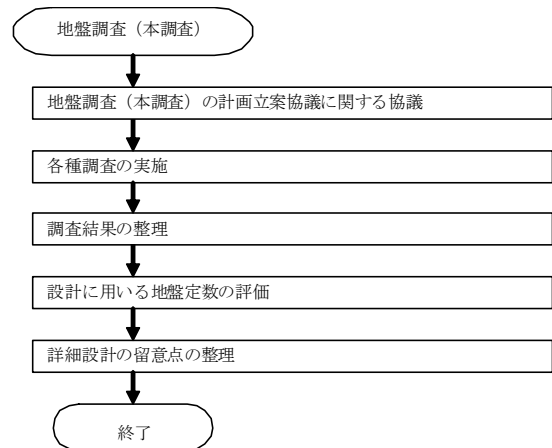


図-6 地盤調査（本調査）における調査フロー

表-2 地盤定数と構造諸元のとりまとめ事例

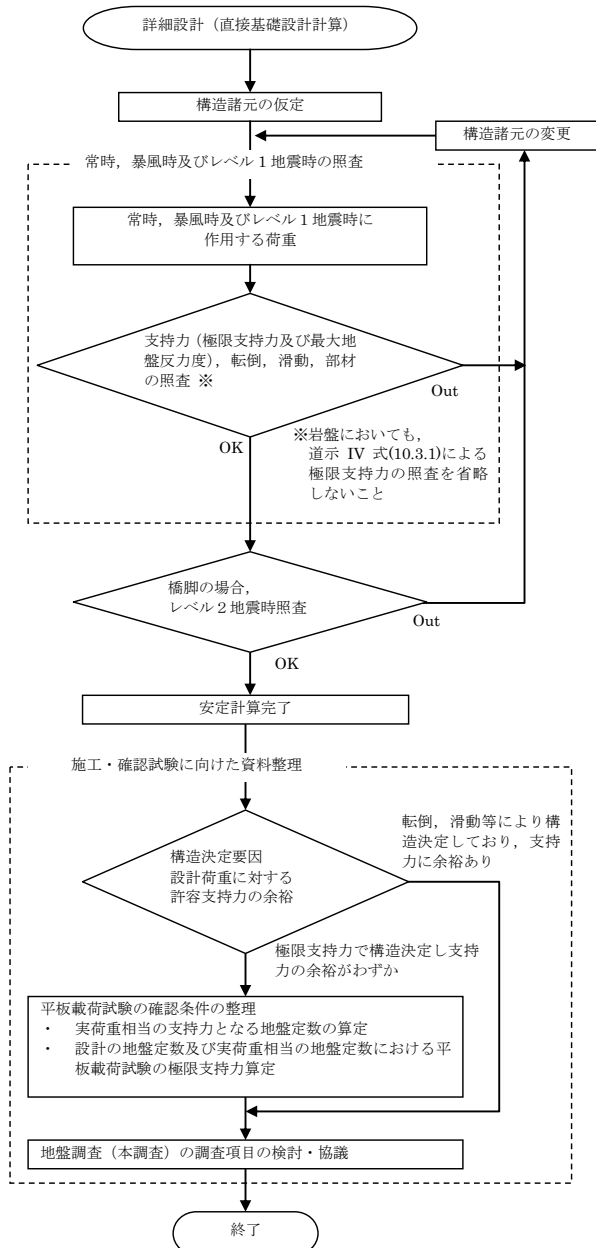
		予備設計結果		想定地盤定数 1		想定地盤定数 2		
A1	形状寸法							
		底板 1.5×10.0×12.4		底板 1.5×6.5×12.4		底板 1.5×8.5×12.4		
	安定計算	極限	○ 15400kN < 16600kN (0.93)	○ 11000kN < 11300kN (0.97)	○ 12700kN < 13000kN (0.98)			
	滑動	1.48 > 1.20 (0.81)	○ 1.23 > 1.20 (0.97)	1.33 > 1.20 (0.90)				
	転倒	1.00 < 3.33	1.10 < 2.17	1.00 < 2.83				
A2	形状寸法							
		底板 1.5×10.0×10.6		底板 1.5×5.0×10.6		底板 1.5×5.5×10.6		
	安定計算	極限	○ 15000kN < 15600kN (0.96)	9700kN < 11503kN (0.84)	10200kN < 11300kN (0.90)			
	滑動	1.56 > 1.20 (0.77)	○ 1.24 > 1.20 (0.97)	○ 1.27 > 1.20 (0.94)				
	転倒	0.62 < 3.33	1.40 < 1.67	1.45 < 1.83				
地盤定数	c	c=0		c=40		c=20		
	φ	φ=40		φ=35		φ=32		
コスト	底板	体積	345		200		246	
		工事費	20000		12000		14500	
		縮減額	-		8000		5500	

#### (4) 橋梁詳細設計

橋梁予備設計と同様に、「滑動」「転倒」「支持力」の照査を実施し、構造決定する上で影響が小さい「極限支持力」の照査を確実にすることが求められる。設計定数の選定の際には、地質調査（本調査）の調査結果を十分ふまえた検討が求められることから、調査担当者との十分な意思疎通が求められる。

また、施工に向けて、設計条件および構造決定要因を検討し、平板載荷試験等の確認試験実施の必要性についての検討が求められる。

特に、地盤定数（ $c, \phi$ ）により算定される極限支持力により構造決定がなされている場合、道路橋示方書 IV 式（解 10.3.6）<sup>10</sup>を用いて、地盤定数の確認を行うことが望ましいことから、設計条件および実荷重に相当する地盤定数を算定し、平板載荷試験の確認条件の整理を実施しておくのがよい。



図一七 橋梁詳細設計における設計フロー

#### (5) 確認試験（平板載荷試験）

直接基礎の施工実施に先立って、必要に応じて平板載荷試験等の確認試験を実施することが望ましい。

特に、地盤定数（ $c, \phi$ ）により算出される極限支持力で構造が決定している場合、地盤定数を確認する試験を実施することが求められる。

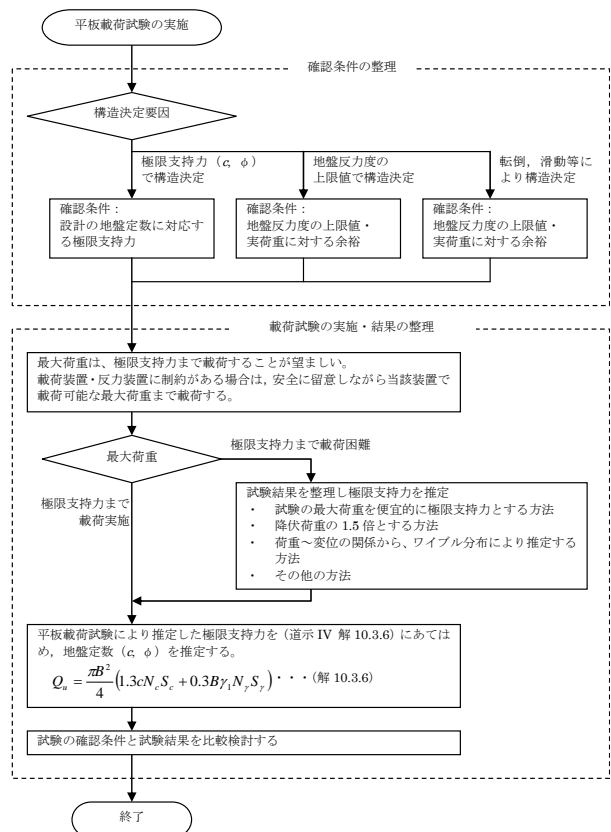
平板載荷試験による地盤定数（ $c, \phi$ ）の確認は、道路橋示方書 IV に記載のある式（解 10.3.6）<sup>10</sup>により確認する方法に従って実施する。載荷試験により、極限支持力を推定し、地盤定数の確認を行う。

反力装置及び載荷装置の制限から極限までの載荷が困難な場合、安全に留意しながら当該装置で載荷可能な最大荷重まで載荷し、極限支持力の推定を行う。

極限支持力は、「試験の最大荷重を便宜的に極限支持力とする方法」「降伏荷重の 1.5 倍をとる方法」「ワイブル分布による推定法」等の方法を検討し推定した上で、（解 10.3.6）により地盤定数の確認を行う。

$$Q_u = \frac{\pi B^2}{4} (1.3cN_c S_c + 0.3B\gamma_1 N_\gamma S_\gamma) \quad (\text{解 } 10.3.6)$$

- $Q_u$  : 平板載荷試験によって求めた極限支持力 (kN)
- $B$  : 載荷板直径 (m)
- $c$  : 土の粘着力 (kN/m<sup>2</sup>)
- $\gamma_1$  : 地盤の単位重量 (kN/m<sup>3</sup>)
- $N_c, N_\gamma$  : 鉛直加重に対する支持力係数 ( $\phi$  の関数)
- $S_c, S_\gamma$  : 支持力係数の寸法効果に関する補正係数



図一八 施工前の確認試験（平板載荷試験）フロー

#### 4. 原位置せん断摩擦試験の適用事例

##### (1) 原位置せん断摩擦試験(SBIFT)の概要

SBIFTはボーリング孔で実施する原位置試験で、粘着力 $c$ 、せん断抵抗角 $\phi$ 、変形係数 $E$ を評価できる試験である(図-9)。試験機構は従来からの孔内水平載荷試験と直接型せん断試験を組み合わせたもので、水平加圧応力、せん断応力、せん断変位等の計測記録から解析を行い、各地盤定数を推定する。適用可能な土質は、中硬岩、玉石を除く多くの地盤条件が対象である。特に、不攪乱試料の採取が困難な砂れき、強風化軟岩、破碎帯、崩積土などで試験可能な点が特徴として挙げられる。

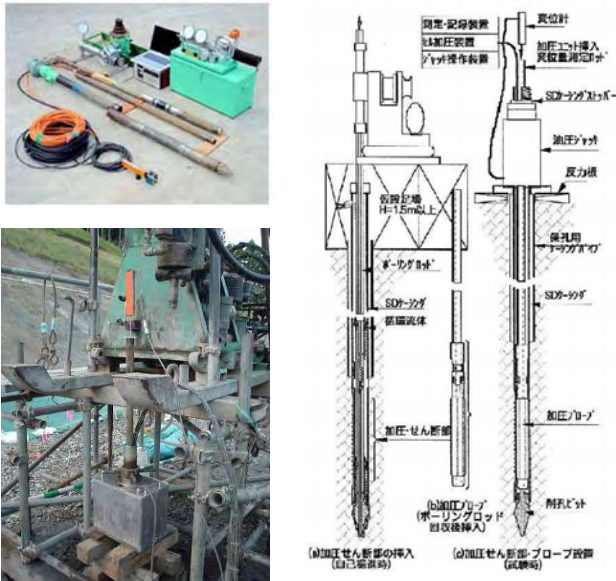


図-9 原位置せん断摩擦試験装置概要

##### (2) SBIFTの適用例

砂れき地盤の地盤定数推定法としてSBIFTを適用し、詳細設計を実施した場合の事例を示す(表-3)。

SBIFTの実施により、砂れきにある程度の粘着力を評価することが可能となり、橋脚底版幅の寸法が低減された。これに伴い、土工量及びコンクリート体積が約15%低減し、直接工事費で11%の縮減となる試算結果となった。このコスト縮減の程度は、SBIFTの調査費用を考慮しても十分なものである。

表-3 粘着力の評価の違いによる設計計算比較

予備設計	SBIFT結果による設計
$c = 0.0, \phi = 33.0$	$c = 20.2, \phi = 32.4$
底版幅: $B = 10.5$	底版幅: $B = 8.5$
工事費: 34,790 (1.00)	工事費: 30,980 (0.89)

#### 5. まとめ

本報では、性能規定型設計への移行に伴い、地盤定数の推定により信頼性の高い方法が求められていることをふまえ、調査、設計、施工の各段階における留意点を整理した。

- 1) 調査方法と設計手法、設計条件と調査結果は相互に依存することから、地盤調査者と設計者は、互いの専門性を尊重し、協調することが重要視されている。
- 2) 直接基礎の設計に際しては、地盤定数( $c, \phi$ )の推定精度が構造諸元、建設コストに大きく影響することから、設計条件の適正な推定が求められる。
- 3) 地盤調査および橋梁設計においては、地盤定数の調査手法および推定精度とその影響について資料整理を行い、相互に協議を行うことが求められる。
- 4) 以上の手順について、フロー図に示し提案した。
- 5) 地盤調査者と設計者との協調の事例として、原位置せん断摩擦試験の適用例を紹介した。

#### 6. おわりに

現在、道路橋示方書の改訂作業中であり、将来的には部分係数設計法の採用など、地盤定数の推定法の推定精度に関する適正評価が求められることが予想される。今回提案したフローについても、実務担当者と協議の上、実態に即したものに随時改善を行っていく。

#### 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書 (I 共通編・IV 下部構造編)・同解説, 2002.3.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書 (I 共通編・IV 下部構造編)・同解説, 1996.12.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書 (I 共通編・IV 下部構造編)・同解説, p.236, 1996.12.
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書 (I 共通編・IV 下部構造編)・同解説, p.131, 2002.3.
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書 (I 共通編・IV 下部構造編)・同解説, pp.564-565, 2002.3.
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書 (I 共通編・IV 下部構造編)・同解説, p.131, 2002.3.
- 7) 北海道開発局：道路設計要領 第3集 橋梁, pp.3-B-1-3-B-12, 2009.
- 8) NEXCO 東日本・中日本・西日本：設計要領 第二集 橋梁建設編, pp.4-6-4-12, 2006.5.
- 9) 前田良刀ほか：原位置せん断摩擦試験(SBIFT)の紹介, 基礎工 pp.76-78, 2006.9.
- 10) 日本道路協会：道路橋示方書 (I 共通編・IV 下部構造編)・同解説, p.278, 2002.3.