

土木研究所資料

既設橋等に対する各種地盤調査法の  
適用に関する報告

平成28年2月

国立研究開発法人土木研究所  
構造物メンテナンス研究センター



## 既設橋等に対する各種地盤調査法の適用に関する報告

構造物メンテナンス研究センター

橋梁構造研究グループ	上席研究員	七澤 利明
	主任研究員	河野 哲也
	研究員	谷本 俊輔
	交流研究員	稲積 一訓

### 要 旨

既設橋が有する耐震性能等を合理的に評価するためには、地盤条件に応じた地盤調査法を適用し、照査に必要な地盤定数を適切に設定することが有効となる。本報告では、東北地方太平洋沖地震の影響を受けた既設橋に対して実施した地盤調査結果を対象として、各種地盤調査法の適用性について検証するとともに、今後の課題について整理した。

キーワード：既設橋，地盤条件，地盤調査法



# 目次

第1章 はじめに	1
1.1 既設橋等に対する地盤調査法の適用の現状と課題	1
1.2 本報告の目的	3
第2章 地盤調査の目的	6
2.1 東北地方太平洋沖地震の影響を受けた橋に対する地盤調査	6
2.2 動的解析のための地盤調査	6
第3章 地盤調査の方法	7
3.1 調査対象	7
3.2 調査計画	10
3.3 調査方法	11
3.3.1 ボーリング	11
3.3.2 サンプルング	11
3.3.3 サウンディング（標準貫入試験，電気式静的コーン貫入試験）	12
3.3.4 土質試験（三軸圧縮試験，繰返し三軸試験）	12
3.3.5 孔内水平載荷試験	14
3.3.6 物理探査及び物理検層（速度検層，常時微動測定）	14
第4章 地盤調査の結果	16
4.1 個々の調査結果による地盤上の特徴に関する考察	16
4.2 各種地盤調査法の適用性に関する考察	19
4.2.1 調査結果を評価する際の留意点	19
4.2.2 調査法の適用範囲及び適用する際の留意点	25
第5章 まとめ	32
5.1 本報告で得られた知見	32
5.2 今後の課題	34
参考資料 A	35

# 第1章 はじめに

## 1.1 既設橋等に対する地盤調査法の適用の現状と課題

既設橋が有する耐震性能等を合理的に評価するためには、地盤条件に応じた地盤調査法を適用し、照査に必要な地盤定数を適切に設定することが必要となる。しかしながら、地盤条件に応じた地盤調査法の適用に関して知見が十分でないのが実状である。

新設橋を設計する際の地盤調査法として、一般的には標準貫入試験のみが行われることが多い。同様に、既設橋の耐震性能を評価しようとする際にも通常は簡便な手法が用いられている。しかし、こうした一般的な地盤調査法については、以下のような課題を有している。

- ・ 軟弱粘性土の地盤定数の推定精度が悪い
- ・ 砂礫層の地盤定数の推定精度が悪い、サンプリングが困難
- ・ 動的解析に必要な地盤物性値が入手できない

特に既設橋の場合には、一旦補強が必要と判断された場合、補強に多大なコストを要するとともに、補強工事の際の通行機能の制限など社会的にも影響を及ぼすこととなる。このため、出来るだけ性能を適正に評価し補強の必要性を厳密に判断することが求められる。また、適用する地盤調査法についても、より精度の高い手法を用いるのが望ましい。さらに、信頼性に基づく設計技術が整備されることにより、こうした精度の高さをより合理的に性能評価につなげることが可能となる。なお、こうした精度の高い、あるいは一般的な地盤調査法では問題を有する地盤条件に対する新たな調査法として次のようなものがある。

### (1) SBP

孔内水平載荷試験については、コアチューブにより先に試験孔を掘削してから試験装置を挿入するプレボーリング方式のプレッシャーメータ試験<sup>1)</sup>（以下、PBP）と試験孔を掘削しながら試験装置を挿入するセルフボーリング方式のプレッシャーメータ試験<sup>1)</sup>（以下、SBP）などがある。図-1.1.1に試験装置の分類を示す。軟弱地盤では、試験孔掘削時の応力解放などにより、試験結果が孔壁の乱れの影響を受けやすく、PBPでは変形係数を過小評価する傾向がみられる。一方、SBPはPBPに比べて孔壁の乱れが少なく軟弱地盤において良質の試験結果が得られると期待されている。これまでも、軟弱地盤におけるSBPの適用性については、SBPから得られる変形係数とPBPや室内試験から得られる変形係数を比較するなど様々な検討が行

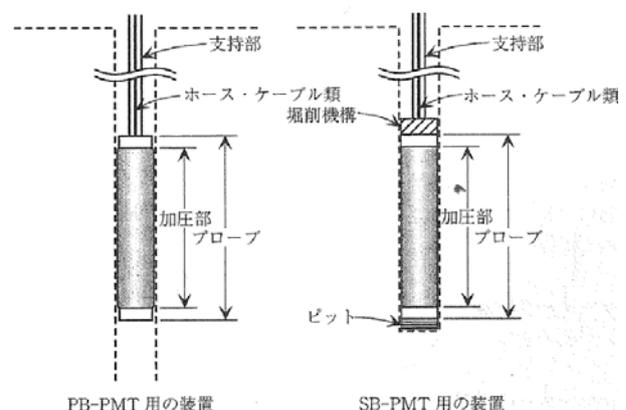
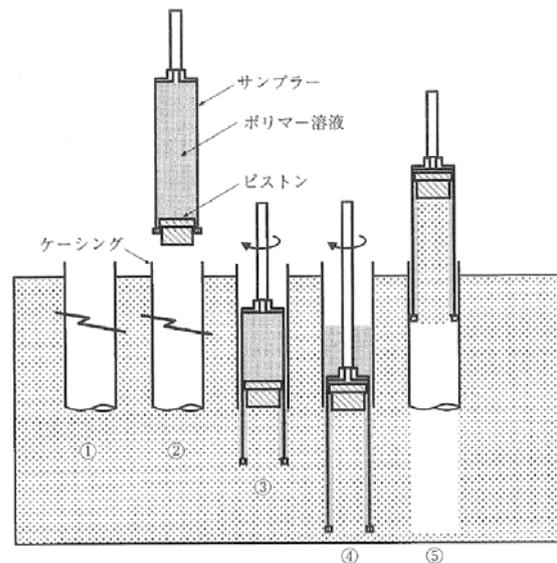


図-1.1.1 試験装置の分類<sup>1)</sup>

われている<sup>2)~20)</sup>。これによれば、 $N$  値 0 や  $N$  値 2 の軟弱粘性土地盤において PBP よりも大きな変形係数が得られるなどの試験結果が示されているが、SBP が PBP などの他の試験法よりも高い精度で変形係数を評価できる軟弱地盤の範囲を示すまでには至っていないのが現状である。

### (2) GP サンプリング

近年 GP サンプリングによって、以前では困難とされてきた砂礫層や崖錐層の不攪乱試料についても、高品質の試料採取が可能となっている。図-1.1.2 に GP サンプラーによる試料採取手順を示す。GP サンプリングは、ゲル状の高濃度ポリマー水溶液により、サンプリング時のコアチューブと試料の摩擦をなくし、コアの側面にゲル化した潤滑剤の保護被膜を形成して見掛けの粘着力が付与される効果でサンプリング時の土粒子の流出や転がり等を防ぎ、試料の乱れとコア詰まりの原因を回避しつつ、高速回転でれきを切削しながら高品質な試料を採取できる調査法である。ただし、高濃度のポリマー溶液が試料に浸透することによる各種室内試験結果への影響が明らかでない。また、サンプリングが適切に行える地盤の条件が必ずしも明らかとなっていない。



- 【概略手順】
- ① ケーシングパイプをサンプリング開始深度まで挿入する。
  - ② サンプラーにポリマー溶液を充填しピストンで蓋をする。
  - ③ サンプラーを孔底に降し回転と給圧を与えサンプリングを開始する。この際、試料がサンプラー中に採取された体積と同量のポリマー溶液がビット先端より排出されビットの冷却及びスライム排除を行う。
  - ④ サンプリング終了。
  - ⑤ サンプラーを回収する。

図-1.1.2 GP サンプラーによる試料採取手順<sup>1)</sup>

### (3) CPT

電気式静的コーン貫入試験 (Cone Penetration Test. 以下、CPT) は、先端のコーンプローブで先端抵抗、周面摩擦、間隙水圧を測定しながら静的に貫入を行うサウンディング法であり、これらの測定値に基づいて、地盤の硬軟に加えて土質分類を把握することができること、深さ方向に約 2cm 間隔でデータ測定を行うことで微細な層相変化を捉えることができることが特徴である。図-1.1.3 に CPT 試験機の例を示す。その他、測定値から相対密度、せん断強度、液化強度などの推定が行われる場合もある。貫入装置の自重やスクリーアンカーからの反力を得てコ

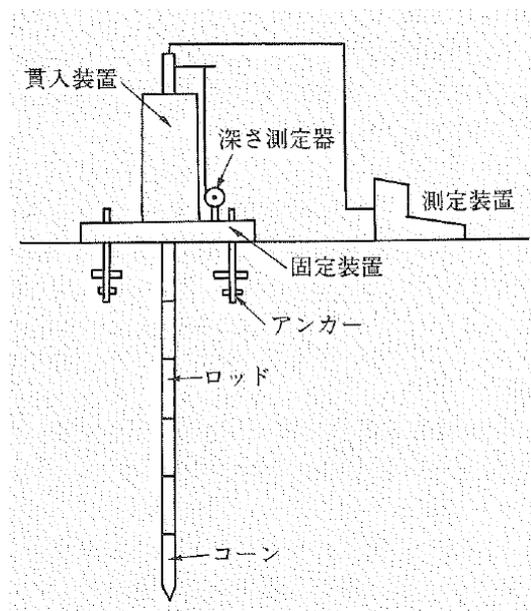


図-1.1.3 CPT 試験機の例<sup>1)</sup>

ーンを静的に圧入するため、軟弱粘性土層～砂質土層への適用は可能であるが、大きな玉石や砂礫地盤に対しては適用が困難となる。また、貫入深度が深くなるとコーン先端の傾斜が顕著となるため、適用深度は20～30m程度とされている。こうした特徴から、ヨーロッパの軟弱地盤が多い地域などでは、CPTから得られる試験結果と設計に用いる地盤定数との関連性が整理されており、地盤調査や設計に広く用いられているが、地層の硬軟分布

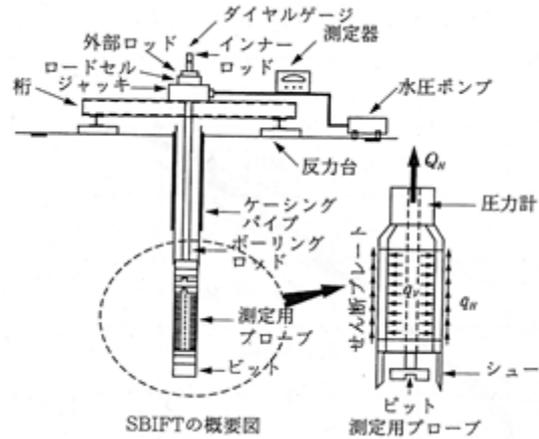


図-1.1.4 SBIFT 試験の概略図<sup>21)</sup>

の変化が著しい我が国では、適用範囲の広い標準貫入試験が主流となっている。しかし、測定値に基づく地盤の各種力学特性の推定手法としての発展性や分解能の高さ、コストなどを考慮すると、適用可能な条件を見極めた上で活用することで、有用な調査手法の一つとなりうるものと考えられる。

#### (4) SBIFT

孔内水平載荷試験と類似するものとして、孔内せん断摩擦試験法（SBIFT: Self Boring typed In-situ Friction Test）がある。図-1.1.4にSBIFT試験の概略図を示す。この試験装置はセルフボーリング方式であり、孔内水平載荷試験装置の機能を有するほか、孔壁に一定の水平応力を作用させながら一定速度でプローブを引上げることで、せん断強度を測定できるのが特徴である。ここで、せん断プレートは固い地盤に対応するため剛性の高い金属スリットが用いられており、対象とする地盤が軟弱な場合、せん断プレートの剛性自体が支配的となり十分な精度が得られない可能性がある。また、粒径が比較的大きい砂礫地盤や固結した岩盤などの場合、孔壁とせん断プレートの間ですべりが生じ、適切なせん断強度を得られない可能性がある。このように、本試験の適用を検討する際には、適用可能な地盤条件について留意する必要がある。また、本試験から得られた変形係数から地盤反力係数などの設計地盤定数を推定する方法について、NEXCO 設計要領<sup>21)</sup>では $\alpha=2$ が示されているが、プレボーリング方式の孔内水平載荷試験を用いた場合と比べて必ずしも設計上有利な扱いとならないという課題がある。

## 1.2 本報告の目的

本報告では、東北地方太平洋沖地震による影響を受けた既設道路橋の被災メカニズムの分析のために実施した各種の地盤調査法による調査結果を分析し、相互の比較検討を行うことにより対象とした地点の地盤上の特徴について考察するとともに、主として新たな地盤調査法の適用性や地盤条件に応じた適切な地盤調査法の組合せの考え方、今後の課題などについて整理した。

## 参考文献

- 1) 公益社団法人 地盤工学会：地盤調査の方法と解説，2013.3.
- 2) 森博，室伏信明：セルフボーリングプレシオメーターによるちゅう積粘性土の性質の原位置測定，第16回土質工学研究発表会，pp.109-112，1981.
- 3) 森博，曾根学，豊岡義則：セルフボーリング装置による砂質土の孔内載荷試験，第17回土質工学研究発表会，pp.1417-1420，1982.
- 4) 森博，丹下良樹：SBPプローブの長さが軟らかい粘性土の試験結果に与える影響，第18回土質工学研究発表会，pp.107-110，1983.6.
- 5) 大河内保彦，土谷尚，林三男：セルフボーリングプレッシャーメーター試験結果と室内試験との対応とその解釈，第28回土質工学シンポジウム，pp.41-44，1983.
- 6) 山本芳裕，大河内保彦：セルフボーリングプレッシャメータ試験と室内試験の比較，第21回土質工学研究発表会，pp.55-56，1986.6.
- 7) 大河内保彦，林三男：セルフボーリングプレッシャーメータ試験の解釈，第21回土質工学研究発表会，pp.57-58，1986.6.
- 8) 菅原紀明，米森博喜，小池豊：プレッシャーメータによる過圧密地盤の変形係数の評価，応用地質年報，No.13，pp.97-116，1991.
- 9) 深川良一，重松尚久，秦樹一郎，室達朗，田中洋行：セルフボーリングプレッシャーメータ試験による正規圧密粘土地盤の初期地圧および弾性定数の推定，第1回土木学会四国支部技術研究発表会，pp.292-293，1995.5.
- 10) 秦樹一郎，深川良一，室達朗，田中洋行：正規圧密粘性土地盤に対するセルフボーリングプレッシャーメータ試験結果の解釈，土木学会論文集 No.589/III-42，pp.219-229，1998.3.
- 11) 小林一三，曾我健一，飯塚敦，太田秀樹，Clive DALTON：セルフボーリングプレッシャーメータから得られる強度に間隙水の移動が及ぼす影響，応用力学論文集 Vol4,pp.285-294，2001.8.
- 12) 酒井幸雄，秦樹一郎：間隙水圧計を内蔵するセルフボーリングプレッシャーメータ試験機の適用例，全地連「技術 e-フォーラム 2003」さいたま，2003.
- 13) 酒井幸雄，丹下良樹，秦樹一郎，柳浦良行：新空気圧制御式孔内水平載荷試験装置（新 SBP）とその適用例，第38回地盤工学研究発表会，pp.613-614，2003.7.
- 14) 秦樹一郎，深川良一，田中洋行，室達朗，森田悠紀雄：正規圧密粘土地盤におけるセルフボーリングプレッシャーメータ試験(1)－初期放置時間の影響－，第30回土質工学研究発表会，pp.267-268，1995.5..
- 15) 深川良一，秦樹一郎，田中洋行，室達朗，重松尚久：正規圧密粘土地盤におけるセルフボーリングプレッシャーメータ試験(2)－載荷初期における水平方向地圧および変形特性－，第30回土質工学研究発表会，pp.269-270，1995.5.
- 16) 重松尚久，深川良一，室達朗，秦樹一郎，田中洋行：SBPによる正規圧密粘土地盤の変形特性の

- 推定，土木学会第 50 回年次学術講演会，Ⅲ，pp.58-59，1995.9.
- 17) 秦樹一郎，深川良一，室達朗，田中洋行，重松尚久：SBP による粘土地盤の  $K_0$ ， $P_y$  の評価，第 31 回地盤工学研究発表会，pp.429-430，1996.5.
- 18) 重松尚久，深川良一，室達朗，秦樹一郎，田中洋行：SBP による粘土地盤の変形・強度特性の評価，第 31 回地盤工学研究発表会，pp.431-432，1996.5
- 19) 秦樹一郎，深川良一，室達朗，田中洋行：SBP による正規圧密粘土地盤の歪みレベルに基づく変形特性の評価，第 32 回地盤工学研究発表会，pp.209-210，1997.5.
- 20) 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 vol,38,No.6，pp.33-36，2010.6.
- 21) 東日本高速道路（株），中日本高速道路（株），西日本高速道路（株）：設計要領第二集橋梁建設編，2014.

## 第2章 地盤調査の目的

### 2.1 東北地方太平洋沖地震の影響を受けた橋に対する地盤調査

既設橋の合理的な耐震性評価手法などを検討するうえで、実際に被災した橋、被災しなかった橋を対象として、被災した要因、被災しなかった要因を分析することは重要である。解析や室内実験に基づく知見には限界があることから、このような外力や構造物の規模がいずれも大きい実橋を対象とした検討は重要度が高いといえる。また、被災メカニズムの分析にあたっては、地盤の動的な応答特性や抵抗特性を適切に評価する必要があるため、詳細な地盤調査を実施し必要な地盤物性値を入手することが必要である。

そこで、2011年に発生した東北地方太平洋沖地震の影響を受けた橋に対して、変状のあった橋、変状のなかった橋の地盤の特徴を把握することを目的として地盤調査を実施した。

### 2.2 動的解析のための地盤調査

既設橋が有する耐震性能等を合理的に評価するためには、動的解析を含めた慎重な評価が求められる。そこで、動的解析により基礎の評価を実施する場合に必要な地盤物性値を入手することを目的として、地盤調査を実施した。

### 第3章 地盤調査の方法

#### 3.1 調査対象

調査対象は、2011年に発生した東北地方太平洋沖地震の影響を受けた以下の3橋である。K橋およびN橋は地震による変状のあった橋で、O橋はN橋の直近に位置していたにもかかわらず変状がなかった橋である。調査対象とした橋の概略を以下に示す。

##### (1) K橋

###### 1) 橋梁形式

橋長 370.6m、基礎形式は橋脚がケーソン基礎で橋台が直接基礎であり、昭和47年に架設された7径間単純鋼鈹桁橋である。

###### 2) 変状の状況

P1橋脚が図-3.1.1に示すように上流側に約 $1^\circ$ 傾斜した。橋脚には損傷が確認されておらず、ケーソン基礎の傾斜によるものと推測される。なお、P1橋脚は耐震補強済であった。

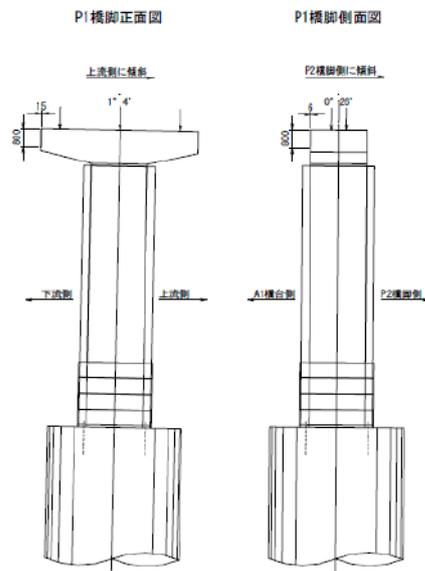


図-3.1.1 変状の状況 (K橋)

###### 3) 地盤条件

中間層は砂・砂礫地盤で、支持層は砂礫地盤であった。

(2) N橋

1) 橋梁形式

橋長 105m, 基礎形式は杭基礎 (RC 杭 φ400) で, 昭和 43 年に架設された 3 径間単純鋼桁橋である。

2) 変状の状況

橋台が前方へ移動し A1 橋台では 150mm 程度, A2 橋台では 30mm 程度の残留変位が生じ (図-3.1.2), 写真-3.1.1 に示すように橋台基礎杭頭部の破壊が確認された。

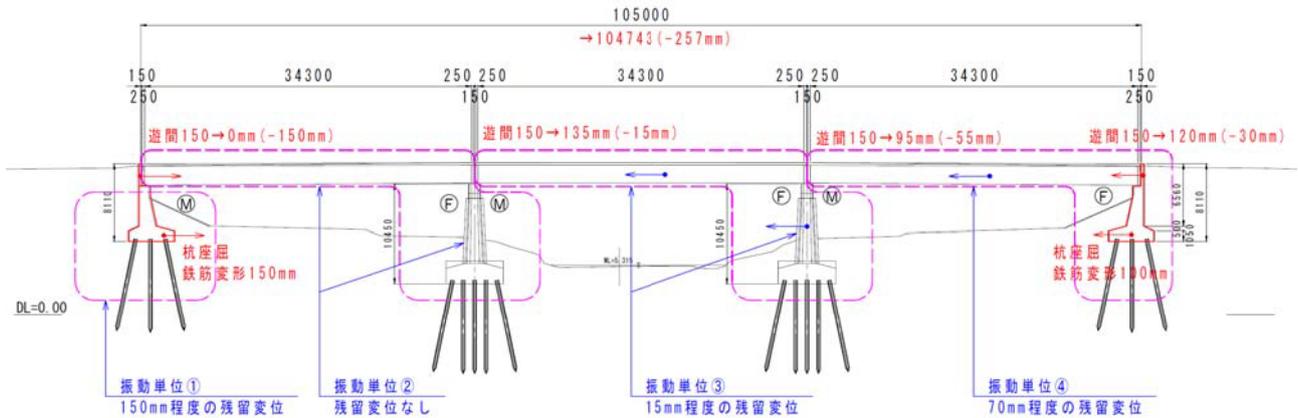


図-3.1.2 移動量 (N橋)

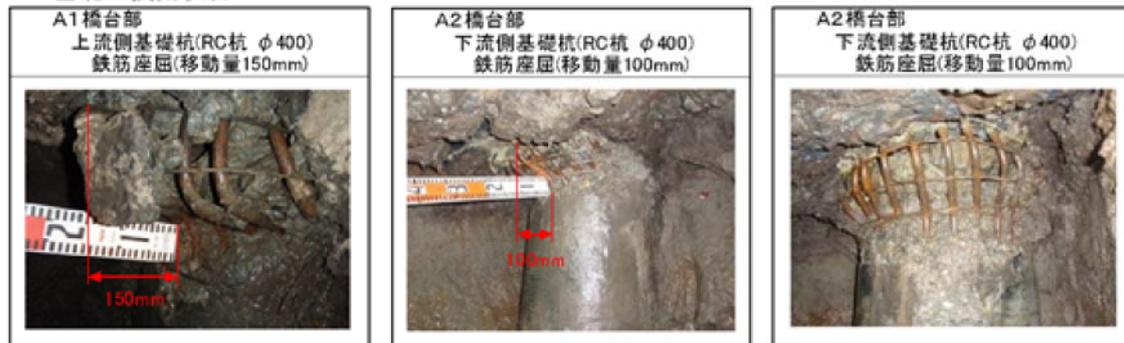


写真-3.1.1 変状の状況 (N橋)

3) 地盤条件

中間層は軟弱粘性土地盤で, 支持層は砂礫地盤であった。

### (3) 0 橋

#### 1) 橋梁形式

橋長 176.5m, 基礎形式は杭基礎（鋼管杭 φ600）で昭和 49 年に架設された 5 径間単純鋼鈹桁橋である。

#### 2) 変状の状況

支承部に軽微な変状（遊間異常など）があったが、それ以外はなし。

#### 3) 地盤条件

中間層は軟弱粘性土地盤で、支持層は強風化砂岩であった。

### 3.2 調査計画

調査を計画するにあたっては、調査目的を明確にし、目的に応じた調査メニューを選定することが重要である。また、地盤の状況を系統的かつ効率的に調査するためには、調査位置や試験深度等を適切に設定することが重要なポイントとなる。

#### (1) 調査メニューの選定

本調査では、調査対象とした橋の被害状況（軟弱粘性土地盤における橋台杭基礎の損傷，砂礫地盤における橋脚ケーソン基礎の傾斜）を考慮し，基礎の挙動に大きな影響を与える橋台背面土圧や地盤の抵抗特性，増幅特性，液状化特性などを精度よく評価することを目的として，詳細な調査メニューを構成した。軟弱粘性土地盤では SBP，砂礫地盤では GP サンプリング<sup>1)</sup>を実施した。また，橋の被災メカニズムを分析する際に実施する動的解析に用いる地盤の動的な物性値を得るために繰返し三軸試験，速度検層，常時微動測定を実施した。表-3.2.1 に基礎の動的解析に必要な主な情報と調査事項と調査方法の関係を示す。

なお，非排水繰返し三軸試験（液状化特性）については，明らかに液状化が生じるとは考えにくい粘性土層などについても行った。これは，大ひずみ域における非排水繰返しせん断に対する材料劣化挙動（繰返し軟化挙動）に関する基礎データを得ることを目的としたものであり，必ずしも液状化の発生有無の判定を目的としたものではない。

表-3.2.1 基礎の動的解析に必要な主な情報と調査事項と調査方法の関係

基礎の動的解析に必要な主な情報	調査事項	調査方法
地層構成	地層区分 N値	ボーリング，CPT 標準貫入試験
橋台背面土圧（主働～受働繰返し）	強度定数 $c, \phi$ 変形係数 $E$	三軸圧縮試験
地盤の抵抗特性	変形係数 $E$ 強度定数 $c, \phi$	PBP SBP（軟弱粘性土地盤） 三軸圧縮試験
地盤の応答特性	等価せん断剛性率 $G/G_0 \sim \gamma$ 履歴減衰率 $h \sim \gamma$	繰返し三軸試験（変形特性）
	弾性波速度 $V_p, V_s$	速度検層
液状化（繰返し軟化）特性	繰返し三軸強度比 $R_L$ など	非排水繰返し三軸試験（液状化特性）

#### (2) 調査位置，試験深度の設定

調査位置は，既存資料を有効活用し地層の成層状況を効率的に把握できる地点に設定することとした。また，必要な地盤定数を効率的に得るためにパイロットボーリングを実施し，試料採取深度，試験深度，試験内容を決定することとした。なお，パイロットボーリングでは得られない軟弱地盤における微細な層相変化を把握するために CPT を実施した。

### 3.3 調査方法

本項では、各種地盤調査法について、本調査における調査の条件や留意点について示す。個別の調査方法については、本報告書の巻末資料（CD-ROM 収録）や地盤工学会基準<sup>2)3)</sup>等を参考にされたい。

#### 3.3.1 ボーリング

- ・工学的基盤の P 波，S 波速度をサスペンション方式の速度検層によって測定する可能性を想定し，工学的基盤面から 5m を掘進した時点で掘り止めとした。
- ・パイロットボーリングを実施し，試料採取深度，試験深度，試験内容を決定した。
- ・パイロットボーリングでは，各 1m のうち上 50cm 区間で標準貫入試験を行い，地層の硬軟の把握や土質の判別，物理試験のための試料採取を行った。また，下 50cm 区間でロータリー式スリーブ内蔵二重管サンプラーによる試料採取を行い，試料採取深度や採取方法，孔内水平載荷試験の実施深度を設定するためのコア観察を行った。

#### 3.3.2 サンプリング

- ・サンプリング方法として，粘性土にはシンウォールサンプラー(写真-3.3.1 a)，砂質土にはトリプルサンプラー(写真-3.3.1 b)，礫質土には GP サンプラー(写真-3.3.1 c) を選定した。
- ・試料の軟らかさ，室内での整形の容易さ，凍結時の膨張の影響等を考慮した上で適切な保存方法を選択した（自然状態 or 現場凍結）。
- ・自然状態のチューブは，パラフィン等で止水し静かに運搬した（クッション材を嚴重に敷くなど乱れを生じさせないように配慮した）。



a. シンウォールサンプラー



b. トリプルサンプラー



c. GP サンプラー

写真-3.3.1 サンプリング

- ・現場凍結させる場合の扱いは以下のとおりとした。

- サンプラーを立てた状態である程度の水抜きを行い、サンプラーごとにドライアイスで凍結させて冷凍庫で保管した。
- ドライアイスで急激に凍結させると、水の膨張により骨格構造を乱す懸念があるので、一端から他端に向かって順次凍結させた（3区間に分割して1区間あたり1時間程度以上ずつ）。

### 3.3.3 サウンディング

#### (1) 標準貫入試験

- ・半自動落下方式とした。
- ・各 30cm のペネ試料の中に土質の変わり目がある場合は、分けて袋詰めした。

#### (2) CPT (写真-3.3.2)

- ・貫入不能な箇所はオールサンプリングで微細な層相変化を把握することとした。



写真-3.3.2 CPT

### 3.3.4 土質試験

#### (1) 三軸圧縮試験

- ・粘性土は CU 試験を行った。砂質土は地下水以浅の試料については CD 試験を行い、地下水以深については CUB 試験を行った。
- ・橋台背面土については、サクシヨンの影響を含めたせん断強度を評価するため、供試体を飽和させることなく自然含水状態で試験を行った。ただし、サクシヨン自体の測定やせん断中の体積ひずみの測定は行っていない。
- ・供試体に原位置より小さな拘束圧を与えた状態で試験を行うと、過圧密の影響によりせん断強度が大きめに評価される可能性が考えられるため、3 供試体の圧密応力は原位置の拘束圧の 1.0 倍、1.5 倍、2.0 倍に設定することとした。



写真-3.3.3 繰返し三軸試験(液状化試験)

#### (2) 繰返し三軸試験 (変形特性試験)

- ・細粒土はクリープにより強度が小さめに出る可能性があるため、粒度によらず载荷速度は 0.1Hz で統一した。
- ・1 サイクルあたりのデータ計測点数は 100 点以上とした。
- ・試験結果の解釈を深めることができるように、間隙水圧を測定することとした。

### (3) 繰返し三軸試験（液状化試験）（写真-3.3.3）

- ・液状化試験では、採取した試料の乱れが試験結果に著しい影響を及ぼすことが知られているため、供試体に微小パルスを与えることで  $V_p$ ,  $V_s$  を測定した。これを原位置で別途実施した速度検層の結果と比較することで、乱れの影響を評価することを意図したものである。
- ・载荷速度は土質によらず 0.1Hz 程度で一定とした。
- ・1 サイクルあたりのデータ検測点数は 100 点以上とした。
- ・ $\varepsilon_{DA}=10\%$ 、あるいは繰返し回数 500 回に達した時点で試験を終了した。
- ・繰返しせん断後、軸差応力をゼロに戻した状態で排水量を測定し、体積ひずみを測定した。
- ・ネッキングなどの異常な破壊が見られた場合は記録を残すこととした。

### (4) 物理試験

- ・標準貫入試験により採取した試料については、各深度における土の基本性状を得るための物理試験（土粒子の密度、含水比、粒度、液性・塑性限界）をおおよそ 1m 間隔で実施した。
- ・力学試験の供試体については、地盤材料の空間的ばらつきを考慮し、試験結果が当該地層の力学特性を代表したものであるかどうかを確認できるように、試験後の全ての供試体について物理試験（土粒子の密度、湿潤密度、粒度、液性・塑性限界）を行った。

### 3.3.5 孔内水平載荷試験

- 基本的には、PBP(写真-3.3.4)を適用した。ただし、一部の軟弱地盤においてSBP(写真-3.3.5)を適用した。
- $N$  値 2 の軟弱粘性土地盤において PBP と SBP を同一深度で実施し、試験結果を比較した。



a.ゾンデ

b.測定状況

写真-3.3.4 孔内水平載荷試験(PBP)

### 3.3.6 物理探査及び物理検層

#### (1) 速度検層 (写真-3.3.6)

- 孔内起受信方式 (サスペンション方式) では孔壁の乱れの影響を受けやすいため、板叩きによる波動が測定深度に伝播する限り、ダウンホール方式を基本とした。
- 乱れの少ない試料の品質評価を想定し、P波、S波速度を1m間隔で計測し、地層ごとの平均速度と1m間隔での区間速度を求めた。
- サンプリング時間  $\Delta t$  の調整、スタック回数の設定、正負反転の確認、重合処理等を適切に行った。
- ケーシング区間は、あらかじめ抜管するか、保孔が困難な場合は段階的に抜管しながら下から順に部分的な検層を繰り返した。



a.プローブ挿入状況

b.測定状況

写真-3.3.5 孔内水平載荷(SBP)

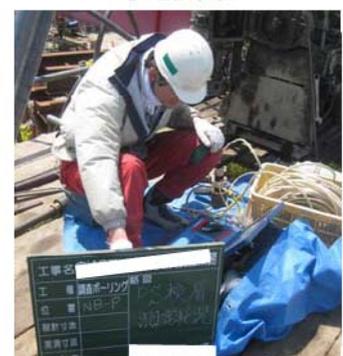


孔内受振器

P波起振状況

#### (2) 常時微動測定 (写真-3.3.7)

- 速度検層を孔内起振受振方式 (サスペンション方式) で実施せざるを得ない場合、地表からの走時曲線が得られないため、波動伝播速度の大局的な読み取り誤差に気付かない場合がある。そこで、速度検層の結果の検証を目的と



S波起振状況

測定状況

写真-3.3.6 速度検層

して、常時微動測定を実施した。その他、工学的基盤面が不明瞭な場合の地盤の基本固有周期の把握や、サイト増幅特性の評価方法としての活用が考えられる。

- ・パイロット孔近傍で実施した。
- ・長周期域の特性を抽出できるようにデータ区間長を設定した ( $\Delta t=0.01$  秒程度、区間長=163.84 秒程度)。
- ・交通振動等の影響を避けるため、1 晩の連続計測を行い、ノイズの少ない時間帯の測定データを切り出して解析に使用した。
- ・解析手順は以下のとおりとした。
  - 交通振動等のノイズが少ない 10 区間程度を選定した。
  - 各区間について  $H/V$  スペクトル比= (水平 2 成分のフーリエスペクトルの 2 乗和平方根) / (鉛直成分のフーリエスペクトル) として算出し、ウィンドウ処理 (バンド幅は 1 次固有振動数の 0.2~0.4 倍程度) により平滑化した。
  - 10 区間程度について上記の  $H/V$  スペクトル比を求めて平均値をとることとした。
  - $H/V$  スペクトル比のピークから地盤の固有周期を求めることとした。



写真-3.3.7 常時微動測定

#### 参考文献

- 1) 酒井運雄, 金子進, 湯川浩則: 高品質砂礫資料の採取 (GP サンプリング) - Tribology をベースとした濃厚液水溶性ポリマー (Gel) による非循環式 (Push) サンプラー, 総合土木研究所 基礎工, Vol.34, No.9, pp.44-47, 2006.9.
- 2) 公益社団法人 地盤工学会: 地盤調査の方法と解説, 2013.3.
- 3) 社団法人 地盤工学会: 地盤材料試験の方法と解説, 2009.11.

## 第4章 地盤調査の結果

個々の調査結果の詳細については、巻末資料に記すこととし、本章では、調査結果による地盤上の特徴に関する考察と各種地盤調査法の適用性に関する考察について述べる。

### 4.1 個々の調査結果による地盤上の特徴に関する考察

調査対象とした3橋の架橋地点における地盤上の特徴に関する考察を以下に示す。

#### (1) K橋

##### 1) 調査対象の概要

3.1 調査対象参照。本地点では、着目する P1 橋脚が河道内に位置するため、河道の両端で調査を行い、その結果を基に P1 橋脚の地層構成、地盤定数を推定した。なお、本来は水上ボーリングにより P1 橋脚位置で調査を行うのが望ましい。

##### 2) 想定断面

想定断面を図-4.1.1 に示す。

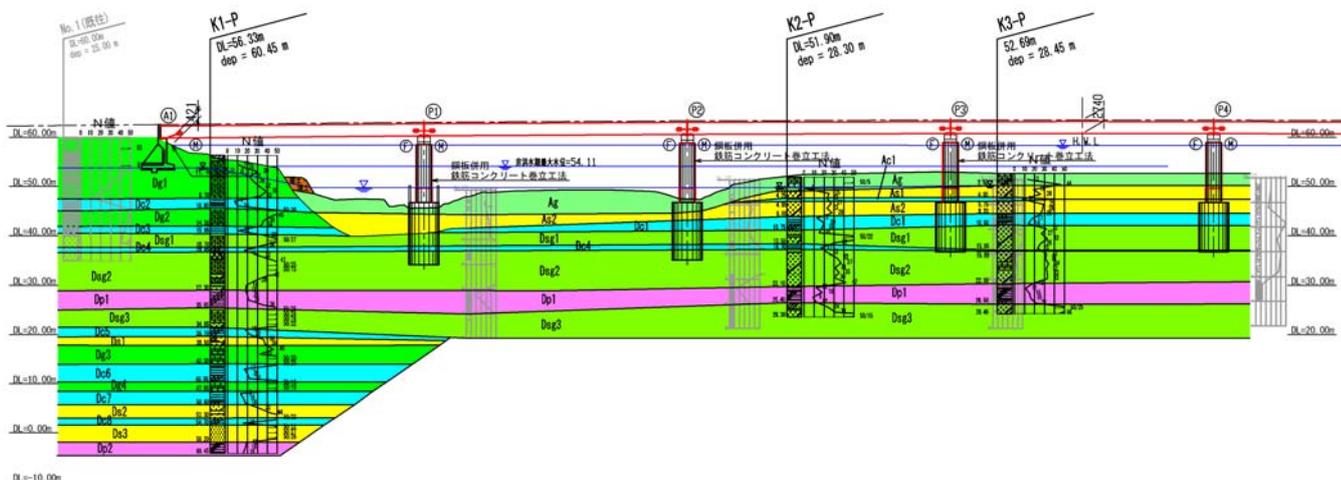


図-4.1.1 想定断面図 (K橋)

##### 3) 地盤上の特徴

- ・ K 橋付近は左岸では低位段丘層の洪積層で、扇状地性の砂礫が主体である。河川の流水により浸食された扇状地の末端部が A1 橋台と P1 橋脚の間に位置し、それより右岸側に河川堆積物や氾濫原堆積物による沖積層が堆積している。本地点は大河川の上流部に位置し、沖積層も砂礫が卓越している。
- ・ 図-4.1.2 に P1 橋脚および P2 橋脚付近の河床の洗掘状況を示す。赤線は施工時、黒線は耐震補強

設計時、青線は本調査時の測量により得られたものである。図中に示すとおり、河床が徐々に低下し洗掘が進行している様子が確認できる。特にP1橋脚付近の洗掘が著しい。

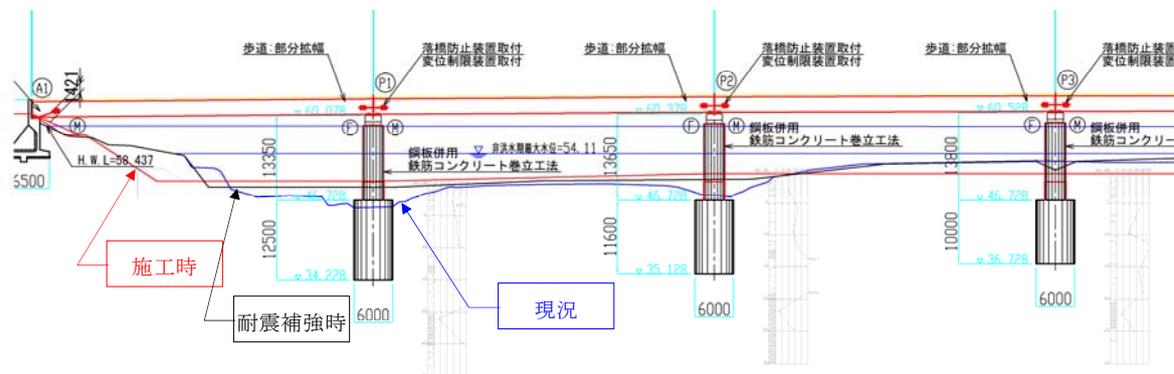


図-4.1.2 洗掘状況

## (2) N橋

### 1) 調査対象の概要

#### 3.1 調査対象参照。

### 2) 想定断面

想定断面図を図-4.1.3に示す。本橋は斜角を有しているが、想定断面図は橋軸方向のものである。

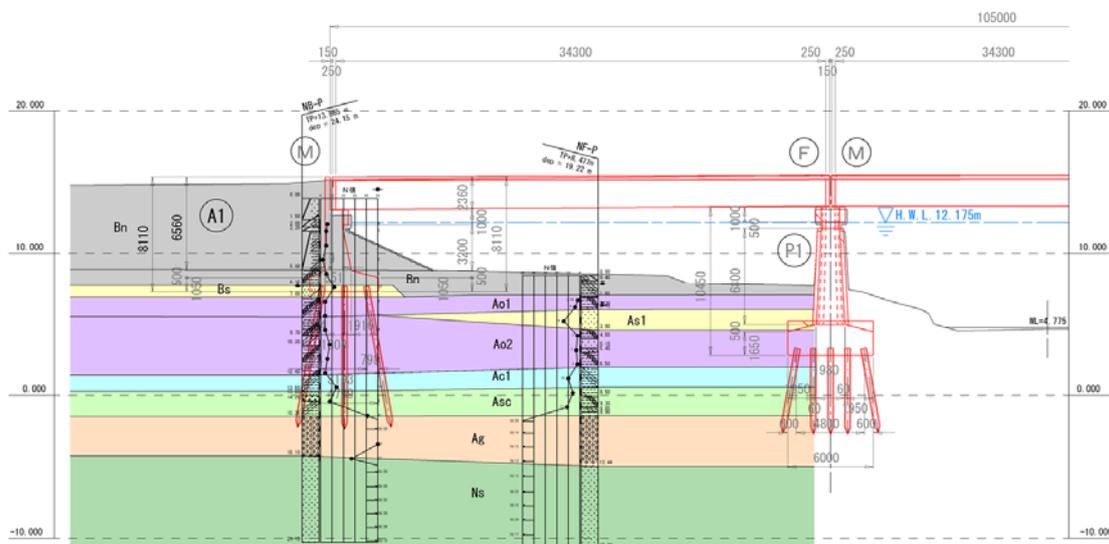


図-4.1.3 想定断面図 (N橋)

### 3) 地盤上の特徴

- ・低湿地に分類される。
- ・橋台背面は築堤に用いられた盛土層，杭頭部は砂質土を主体とした盛土層，杭中間部は河川運搬作用により堆積した陸性粘性土層で有機質粘性土が主体，支持層付近は砂礫を主体とした沖積礫質土層，それ以深は凝灰質細粒砂岩が強風化した砂層である。

- ・図-4.1.3 の右端に記されている河道は人工的に造成されたものであり，人工河道およびその築堤と同時に N 橋が建設されている。

### (3) O 橋

#### 1) 調査対象の概要

3.1 調査対象参照。

#### 2) 想定断面

想定断面図を図-4.1.4 に示す。本橋は斜角を有しているが，想定断面図は橋軸方向のものである。

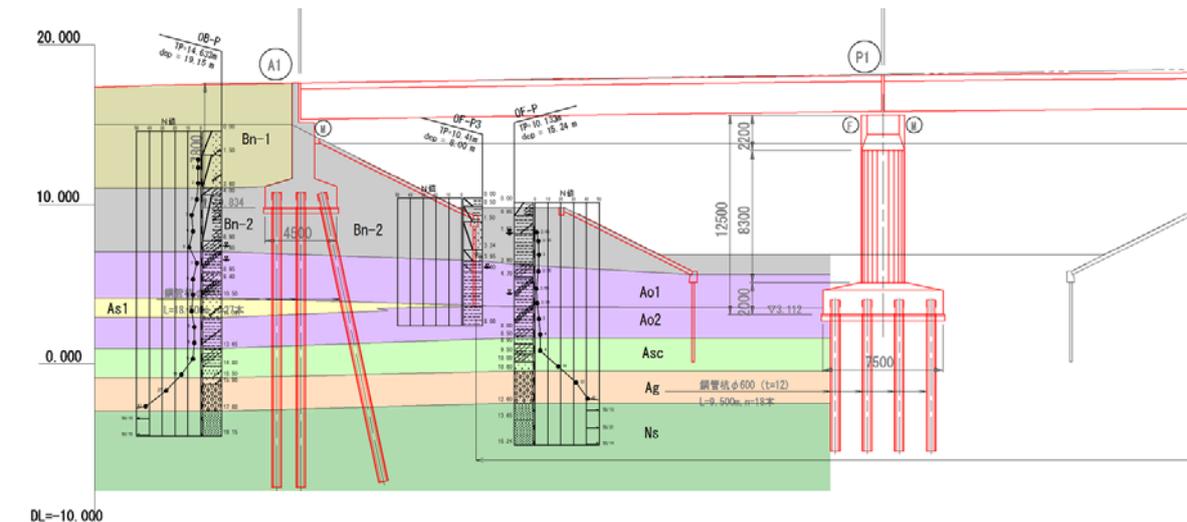


図-4.1.4 想定断面図 (O 橋)

#### 3) 地盤上の特徴

- ・低湿地に分類されるが，やや段丘化が進行し，複雑に入り組んだ地形を成している。
- ・橋台背面は築堤に用いられた盛土層，杭頭部は礫混じり砂質粘土を主体とした盛土層，杭中間部は河川運搬作用により堆積した陸性粘性土層で有機質粘性土が主体，支持層付近は砂礫を主体とした沖積礫質土層，それ以深は凝灰質細粒砂岩が強風化した砂層である。

## 4.2 各種地盤調査法の適用性に関する考察

### 4.2.1 調査結果を評価する際の留意点

各調査法（試験法）から得られる地盤定数を比較し、その違いや傾向から調査結果を評価する際の留意点を考察した。

#### (1) 変形係数 $E$

本調査で実施した調査・試験により得られた地盤の変形係数（標準貫入試験により求めた変形係数  $E_N$ 、孔内水平載荷試験による  $E_b$ 、三軸圧縮試験から求めた変形係数  $E_{50}$ ）についてそれぞれ比較を行った。これらの変形係数については、これまでも土木研究所などによる比較研究が行われており、本調査から得られた変形係数の比較結果を示すだけでなく、既往の研究との比較を行った。

まず、孔内水平載荷試験から得られた変形係数  $E_b$  と標準貫入試験  $N$  値から求めた変形係数  $E_N$  との関係について、土研資料第 299 号に示されている相関図に本調査で得られた値をプロットしたものを図-4.2.1 に示す。土研資料第 299 号では、両者の間にはバラツキがある中で土質にかかわらず  $E_b=678N^{0.998}$  という関係が近似的に成立することが示されている。本調査から得られた値についても、概ねバラツキの範囲内にあるといえる。

同様に、孔内水平載荷試験による変形係数  $E_b$  と三軸圧縮試験から求めた変形係数  $E_{50}$  との関係について、土研資料第 299 号に示されている相関図に本調査で得られた値をプロットしたものを図-4.2.2 に示す。土研資料第 299 号では、両者の関係は土質にかかわらずほぼ一致していることが示されている。本調査から得られた値についても概ね相関図に示されているバラツキの範囲内にあるといえる。

ただし、 $N$  橋の粘性土（ $N$  値 2 の有機質粘性土）については、孔内水平載荷試験から得られた値が室内試験から求めた値より大きく下回っている。この値は、PBP によるものである。このように、軟弱な粘性土地盤では、PBP によると変形係数を過小評価するおそれがあるため、地盤調査を計画する際には、PBP のみ実施するのではなく室内試験の実施や PBP ではなく SBP の適用を検討するなどがよいと考えられる。

次に、速度検層で得られた弾性波速度  $V_s$  から逆算した動的変形係数  $E_D$  と三軸圧縮試験から求めた  $E_S(=E_{50})$  との関係を図-4.2.3 に示す。既往の研究<sup>1)</sup>では、両者の間には  $E_D=187E_S^{0.794}$  という関係が成立することが示されている。これについて杭基礎設計便覧では、 $E_S$  は  $E_D$  の 1/20～1/40 となっているが、これらの違いの原因に関しては、試験方法、載荷速度、ひずみレベルの違いなどが考えられているものの、十分な根拠に乏しくあいまいなものであると記載されている。なお、道路橋の設計においては、動的変形係数  $E_D$  は地震の影響を考慮する場合の固有周期の算定に必要な水平方向地盤反力係数を求めるために用いられている。一方、鉄道標準<sup>2)</sup>などでは、速度検層から得られた変形係数を基礎の地盤反力係数の算定に用いる変形係数（室内試験より求めた変形係数相当）に換算する式が示されており、これによると  $E_S$  は  $E_D$  の 1/10～1/11 となる。本調査で求められた  $E_S$  は  $E_D$  の 1/5～1/40 となっており、 $E_D$  がやや小さめの値となっている。また、この結果からも  $E_S$  と  $E_D$  の関係はバラツキが大きく、

速度検層結果による  $E_s$  の推定精度は必ずしも高くないといえる。

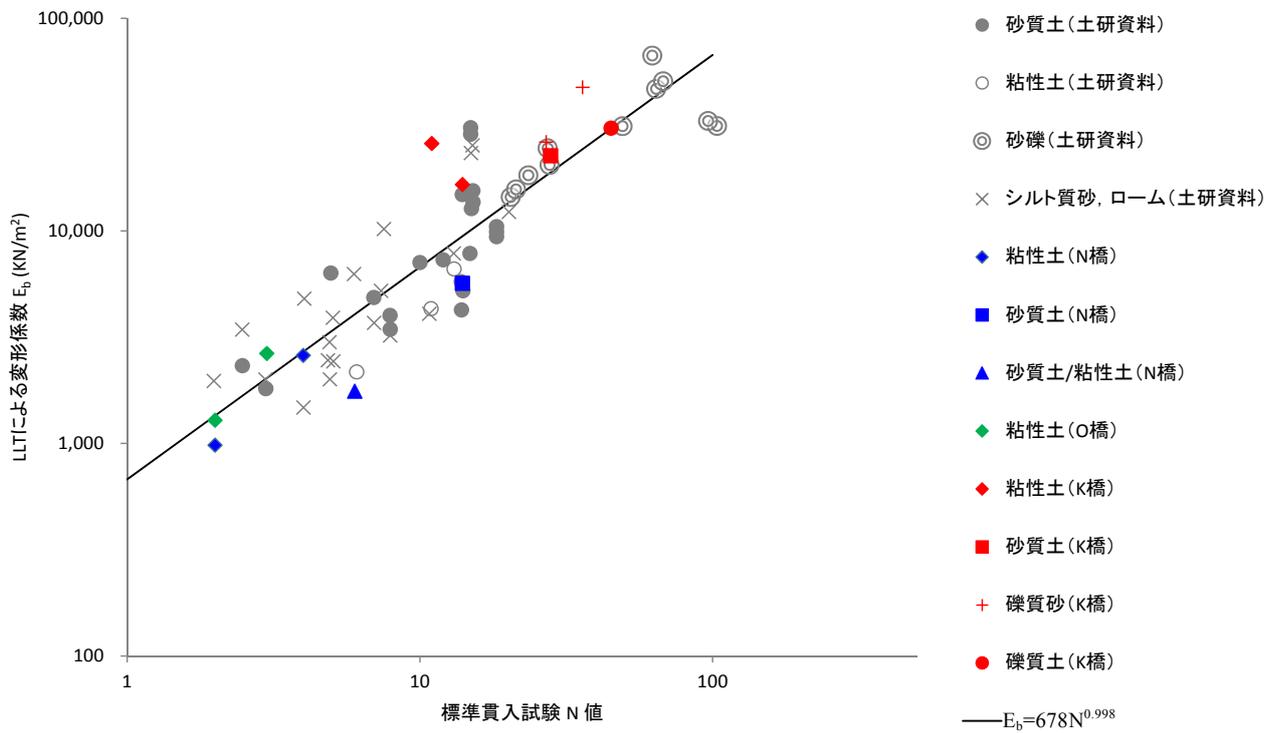


図-4.2.1 標準貫入試験により求めた変形係数  $E_N$  と孔内水平載荷試験による変形係数  $E_b$  との関係

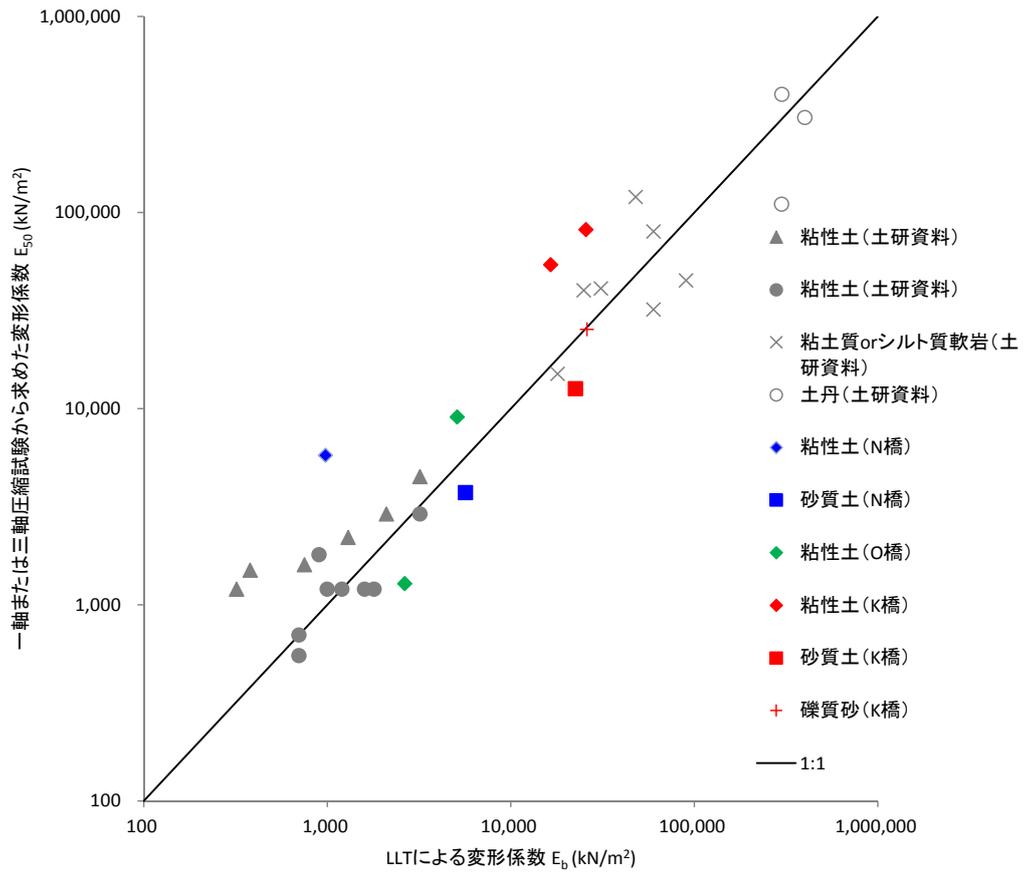


図-4.2.2 室内試験より求めた変形係数  $E_{50}$  と孔内水平載荷試験による変形係数  $E_b$  の関係

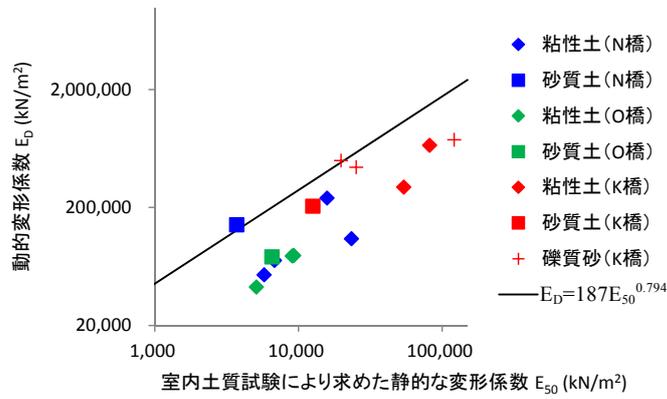


図-4.2.3 動的変形係数  $E_D$  と室内試験により求めた静的な変形係数  $E_{50}$  の関係

## (2) 強度定数 $c$ , $\phi$

まず、三軸圧縮試験結果から求めた砂質土のせん断抵抗角  $\phi$  について、道示の参考資料に示されている推定式<sup>3)</sup>により標準貫入試験の  $N$  値から算定した値との比較を行った。図-4.2.4 に三軸圧縮試験結果から求めたせん断抵抗角  $\phi$  と換算  $N$  値  $N_1$  の関係を示す。ここで、O 橋の砂質土については、 $N$  値が 5 以下のため推定式の適用外であるが参考のために示している。これによると、K 橋の砂質土を除いて概ね推定式に近い値を示している。ここで、K 橋の礫質砂については GP サンプリングにより乱れの少ない試料が採取できたものと推測される。一方、K 橋の砂質土については礫混じりが確認されており、サンプリング方法の選択が不適切で試料を乱した可能性がある。このように、試験結果をそのまま用いると地盤定数を過小評価、または過大評価する可能性があるため、地盤定数を評価する際には、既往の推定式との比較やサンプリング方法の妥当性について確認する必要がある。

次に、三軸圧縮試験から求めた粘性土の粘着力  $c$  について、標準貫入試験  $N$  値との相関を確認した。粘着力  $c$  と  $N$  値の関係については、H8 道示IVまでは「やむを得ない場合」に用いて良いとの注釈付きで推定式  $c=(6\sim 10)N$  (kN/m<sup>2</sup>) が解説中に示されていた。また、地盤工学会の「地盤調査の方法と解説」<sup>4)</sup>では、 $N$  値と一軸圧縮強さ  $qu$  の対応についてはバラツキが多く密接な関係に乏しく設計などへの適用は避けることが望ましいとしながらも、 $qu=12.5N$  (kN/m<sup>2</sup>) という関係が示されている。ここでは、 $c=qu/2$  (kN/m<sup>2</sup>) から  $c=12.5N/2=6.25N$  (kN/m<sup>2</sup>) とし、粘着力と  $N$  値の関係を確認した。図-4.2.5 に三軸圧縮試験から求めた粘性土の粘着力  $c$  と標準貫入試験  $N$  値の関係を示す。本調査の結果からも、粘着力と  $N$  値の相関関係はバラツキが大きく、 $N$  値から粘着力を推定しようとすると過小評価する場合が多いことが分かる。

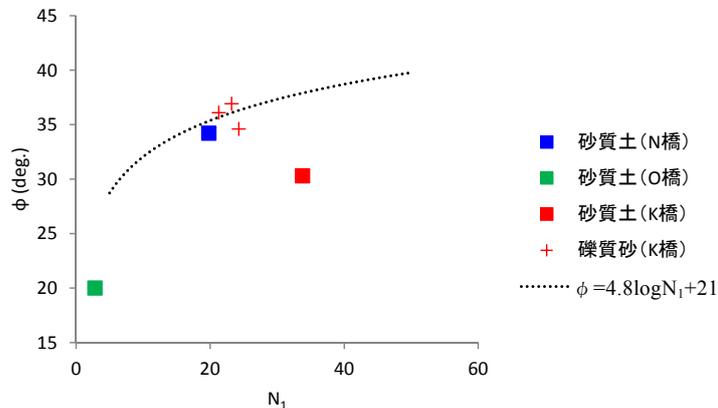


図-4.2.4 砂質土の三軸圧縮試験結果と  $N_1$  の関係

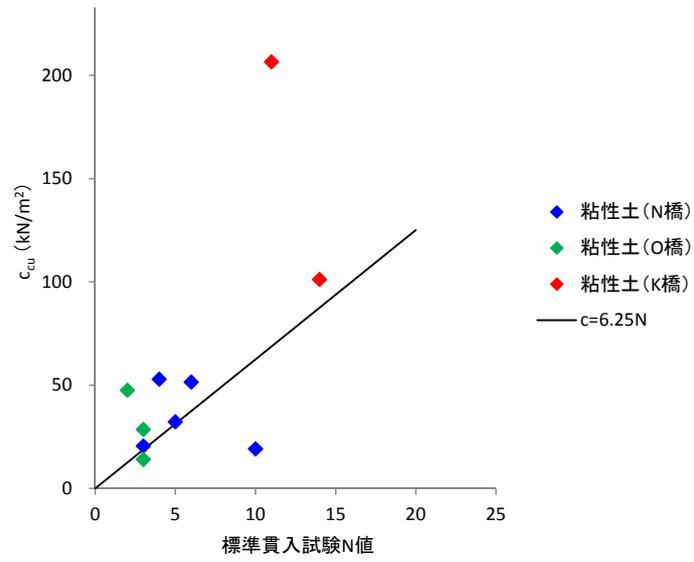


図-4.2.5 粘性土の三軸圧縮試験結果と標準貫入試験  $N$  値の関係

### (3) 繰返し三軸強度比 $R_L$

繰返し非排水三軸圧縮試験から求めた繰返し三軸強度比  $R_L$  について、道示の方法で算出される繰返し三軸強度比  $R_L$  との比較を行った。本調査において実施した繰返し非排水三軸圧縮試験から得られた繰返し三軸強度比と粒度の影響を考慮した補正  $N$  値  $N_a$  との関係を図-4.2.6 に示す。細粒分含有率  $F_c$  が 10%未満の砂質土については、文献<sup>5)</sup>や H14 道示 V の参考資料に繰返し三軸強度比  $R_L$  と換算  $N$  値との相関関係が示されており、この相関図に本調査から得られた値をプロットしたものを図-4.2.7 に示す。これより、本調査で得られた細粒分含有率  $F_c$  が 10%未満の砂質土の値については、概ね既往の研究による相関関係のバラツキの範囲内にあるといえる。一方、それ以外の  $F_c$  10%以上の砂質土、礫質土、粘性土については道示の方法で算定される値と比較してバラツキが大きいことが分かる。今回の調査結果では、特に  $N_a$  が 25 以上において、繰返し三軸圧縮試験結果から求めた繰返し三軸強度比  $R_L$  が道示の方法で算定される値を大きく下回っている。道示の  $R_L$  推定式は凍結サンプリング試料の試験データを基にしている一方で、本調査ではいわゆるチューブサンプリング試料の試験データから  $R_L$  を評価している。試料の乱れが小さくなるように配慮したもののその影響を受けてしまった可能性や、ネッキング等の液状化以外の要因による供試体の破壊によって  $R_L$  が過小評価された可能性、さらには礫打ちにより  $N$  値が過大評価された可能性等が考えられ、原位置液状化強度の評価が容易でないことが分かる。

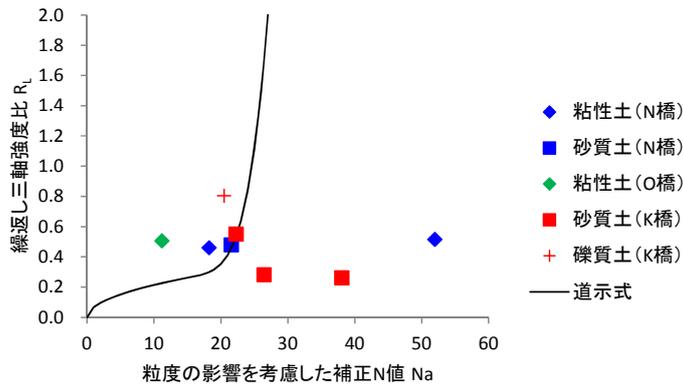


図-4.2.6 粒度の影響を考慮した補正  $N$  値  $N_a$  と繰返し三軸強度比  $R_L$  の関係

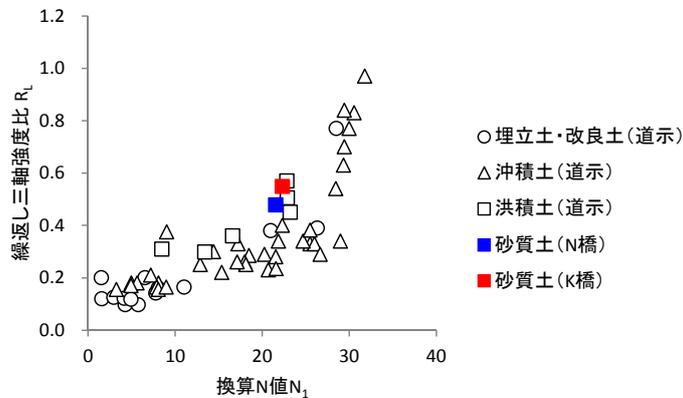


図-4.2.7 砂質土の換算  $N$  値と繰返し三軸強度比  $R_L$  の関係

#### 4.2.2 調査法の適用範囲及び適用する際の留意点

本調査で実施した SBP, CPT, GP サンプリング, 常時微動測定について, 得られた結果と従来の調査法の結果とを比較し, どのような条件で結果が整合し, どのような条件で結果が整合しないのかという観点から, 調査法の適用範囲や適用する際の留意点を考察した.

##### (1) SBP (セルフボーリング方式の孔内水平載荷試験)

$N$  値 2 の有機質粘性土地盤において, 同一深度で SBP と PBP を実施し, 得られた変形係数を比較した. 比較した結果を図-4.2.8 に示す. これによると, PBP から得られた変形係数は, SBP よりも小さく  $N$  値からの推定値よりも小さくなっている. 道示では, 「 $N$  値が 5 未満である場合には, 標準貫入試験から得られた  $N$  値と基礎の静的載荷試験から得られる地盤反力係数の関係は土質に関わらずばらつきが著しいため,  $N$  値から変形係数や地盤反力係数を推定することは適切ではない. したがって, このような場合には乱れの少ない試料による室内試験や原位置での孔内水平載荷試験, 平板載荷試験などの結果から変形係数を求めるのがよい」としているが, 孔内水平載荷試験については, 地盤の特徴にあった試験のタイプを選定することが必要といえる.

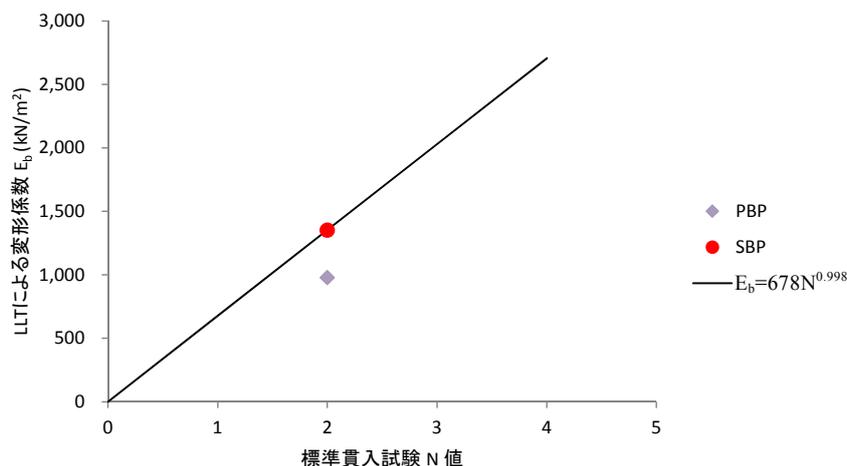


図-4.2.8 PBP から得た変形係数と SBP から得た変形係数の比較

##### (2) CPT (電気式静的コーン貫入試験)

CPT の試験結果 (先端抵抗  $q_t$ , 周面摩擦  $f_s$ , 間隙水圧  $u$ ) から土質分類, 換算  $N$  値  $N_c$ , 細粒分含有率  $F_c$  を示し, ボーリング結果および室内試験結果との比較を行った. 図-4.2.9~図 4.2.14 に比較結果を示す. ここで, CPT の試験結果から得られた  $F_c$  について, Robertson<sup>6),7)</sup>の算出方法によるものを  $F_c(\text{Rob})$ , 時松ら<sup>8)</sup>の算出方法によるものを  $F_c(\text{toki})$  と示す. また  $N$  値については, Jefferies ら<sup>9)</sup>によるものを  $N(\text{jeff})$ , 時松らによるものを  $N(\text{toki})$  と示す. CPT による土質分類結果については, 各地点においてボーリング結果と概ね整合性が確認できる. 換算  $N$  値  $N_c$  や細粒分含有率  $F_c$  については, ボーリング結果や室内試験結果と整合したりしなかったりと多少のバラツキはみられるものの, ボーリング間の地層構成を補間するという観点では CPT の適用性は高いと考えられる. また, 既設橋の耐震性能

評価などにおいて、地盤の地層構成を詳細に把握したい場合などには、その有効性は高いと考えられる。

各図に示すように、同一層内で地盤抵抗が大きく変化する場合、CPT ではその傾向を細かく把握することができる。また、例えば図-4.2.9 の Ac1 層のように標準貫入試験ではとらえられない薄い層が存在するような場合においても、CPT では把握が可能である。こうした薄層が設計や施工に影響する場合には、標準貫入試験に加えて CPT を行うのがよいと考えられる。なお、CPT の試験結果から液状化判定に用いられる  $F_c$  を推定することが可能であるが、前述のとおりさまざまな算出方法があるものの、各図に示す推定結果をみるとバラツキが大きいことが分かる。このように、どのような地盤条件でどの算出方法が適切であるかなどの知見は十分ではなく、 $F_c$  の推定方法に課題があるため CPT による  $F_c$  が液状化判定に使えるか否かは今後検討が必要と考えられる。

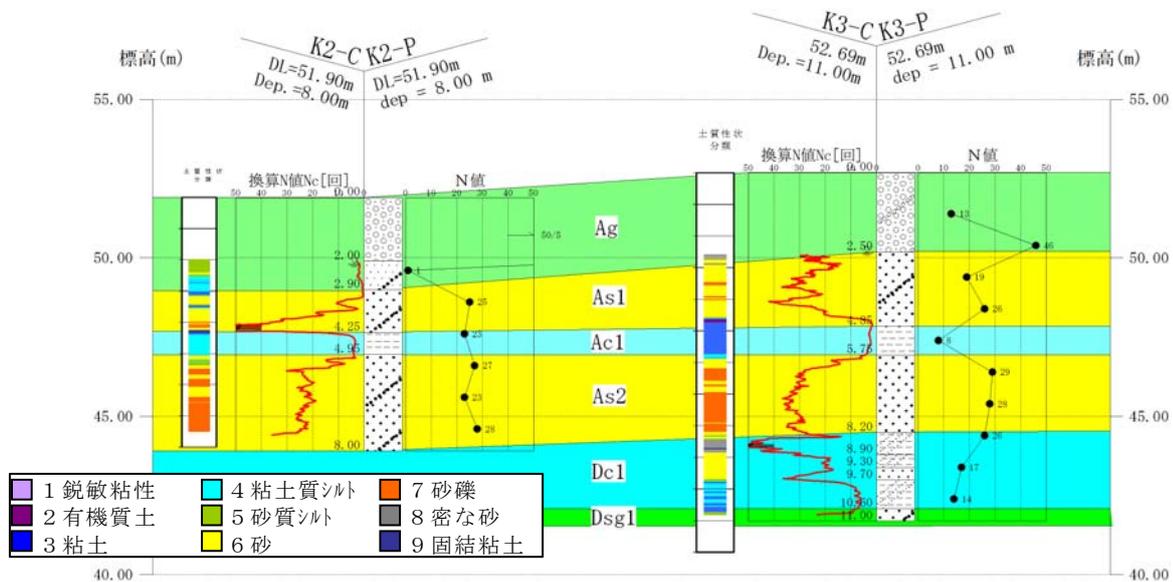


図-4.2.9 CPT による土質分類、換算  $N$  値  $N_c$  とボーリング結果との比較 (K 橋その 1)

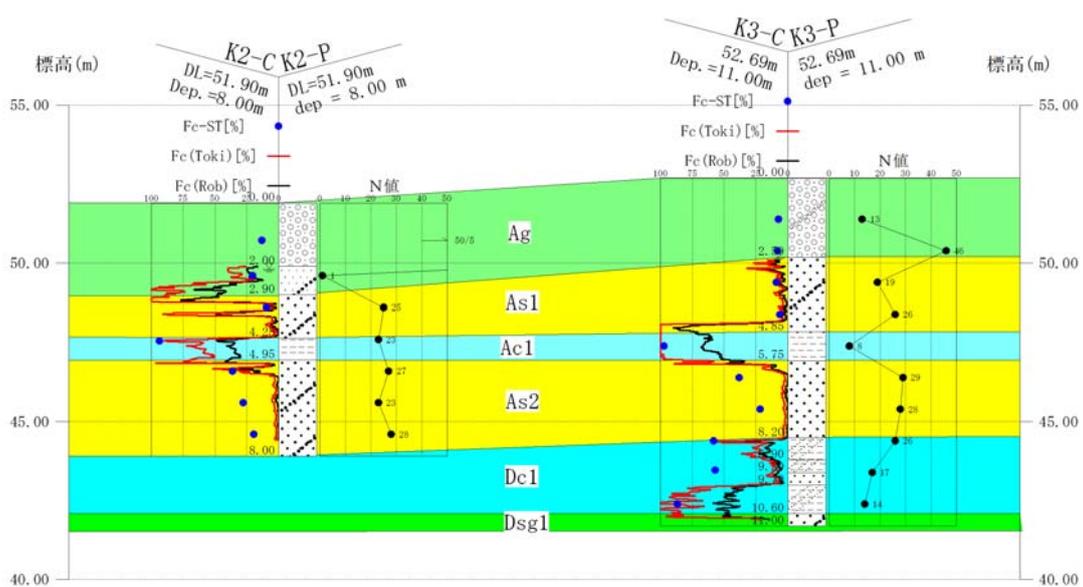


図-4.2.10 CPT による細粒分含有率と物理試験結果との比較 (K 橋その 2)

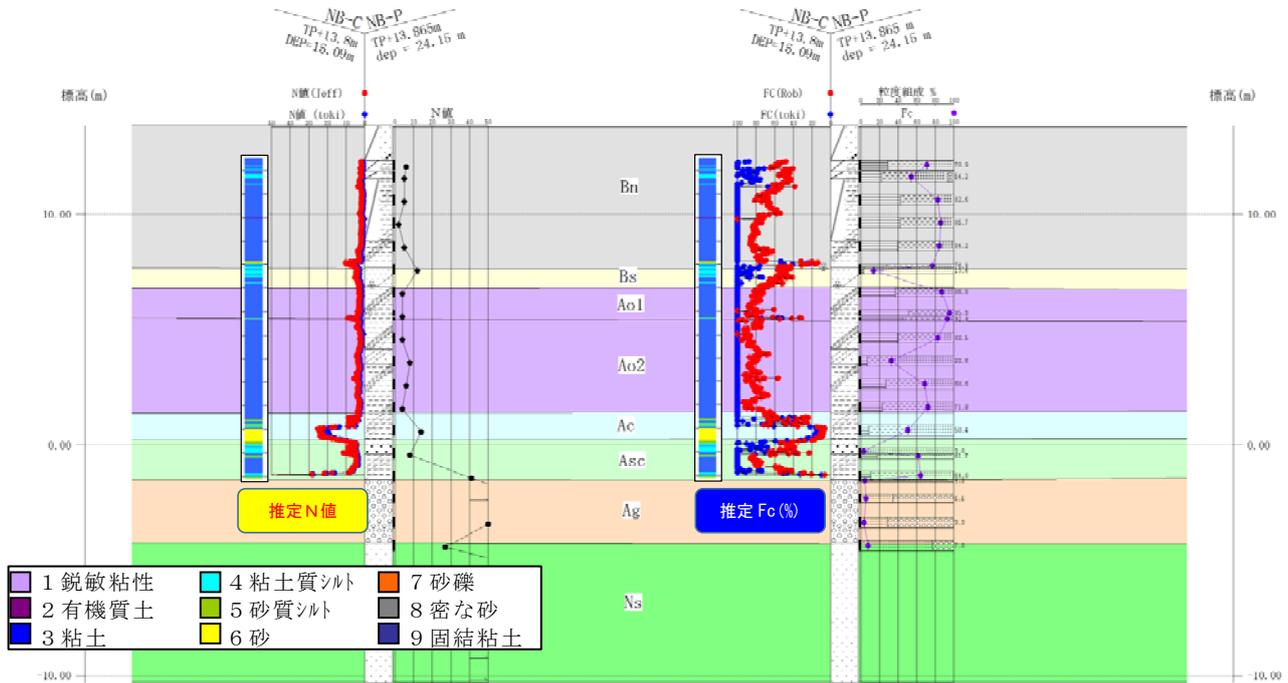


図-4.2.11 CPT による土質分類，換算  $N_c$ ， $F_c$  とボーリング結果，室内試験結果との比較（N 橋その 1）

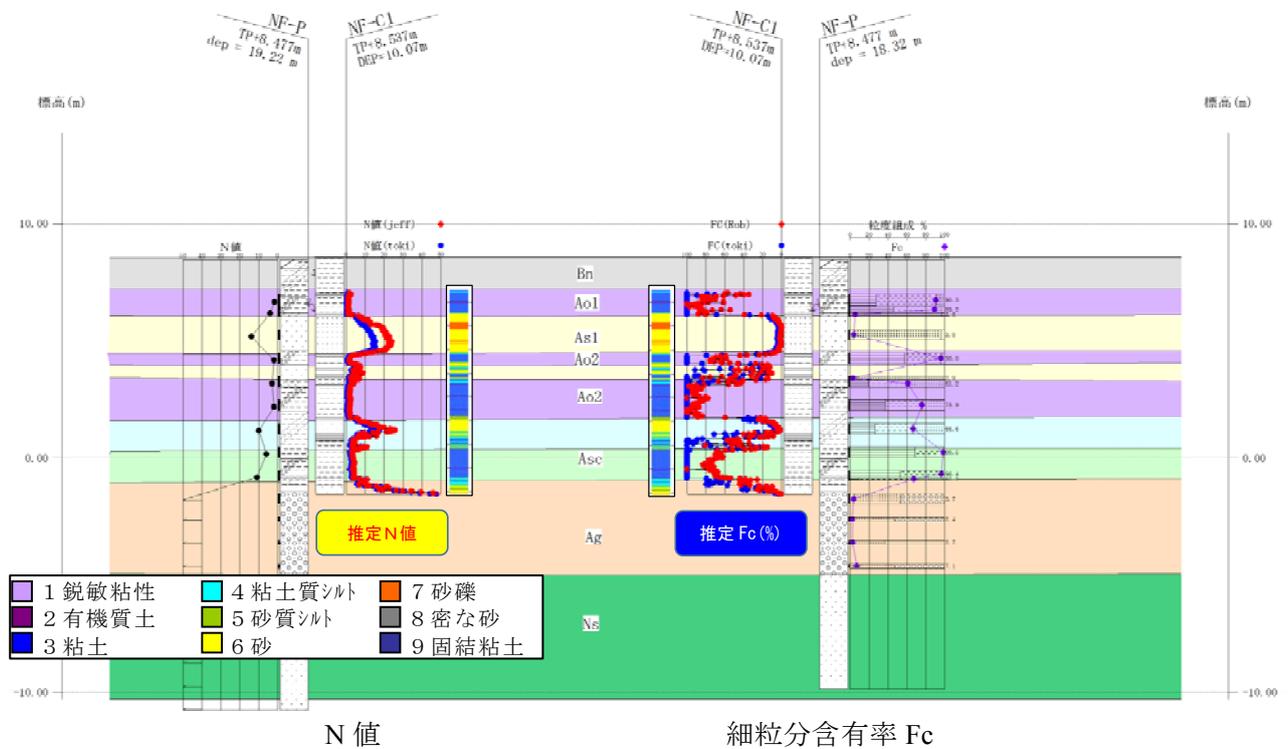
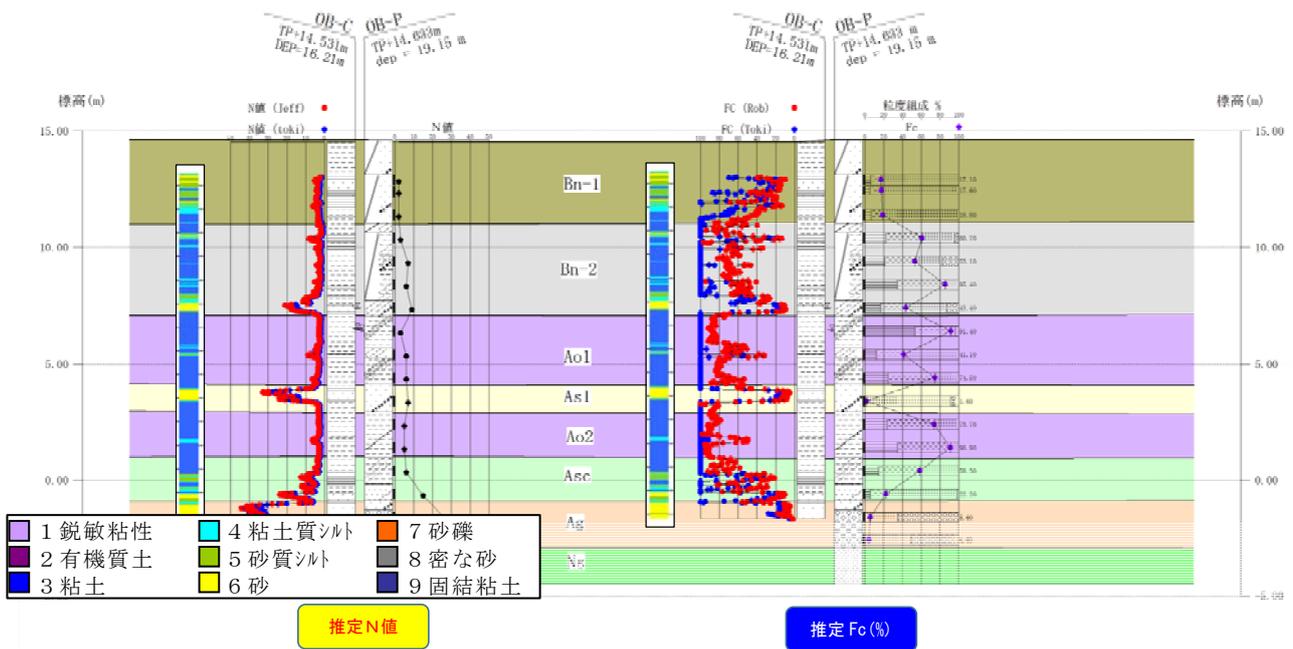


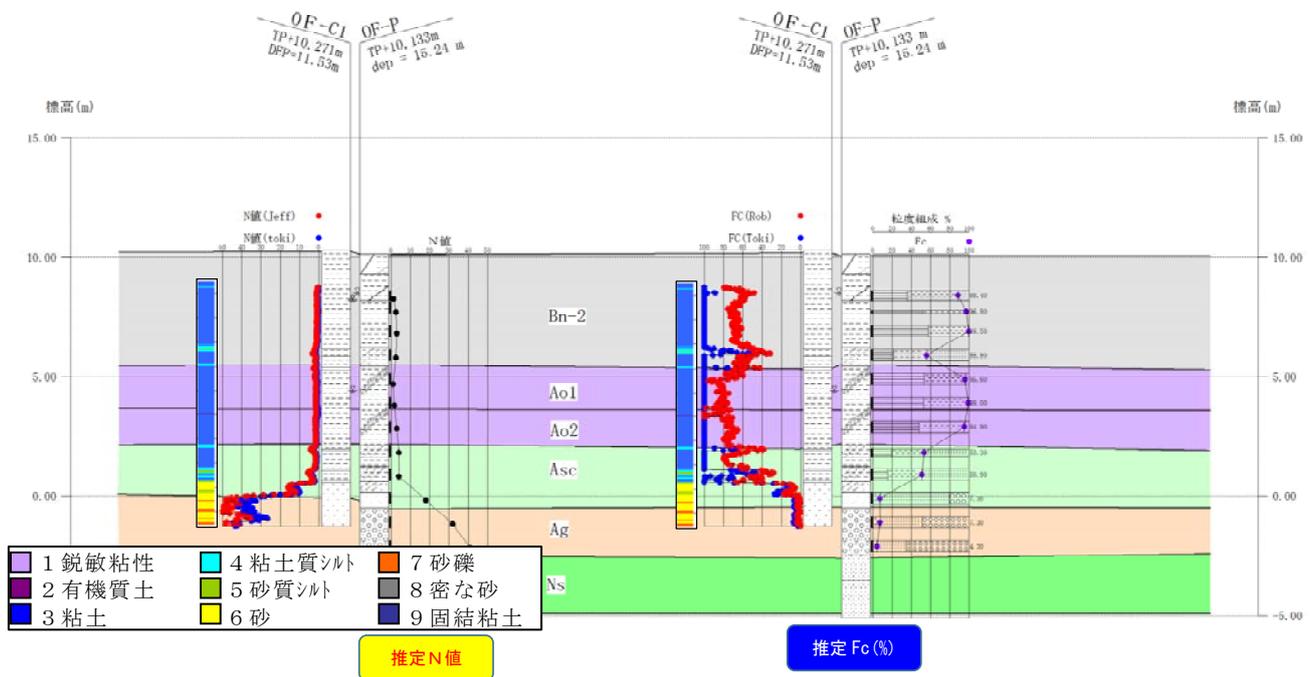
図-4.2.12 CPT による土質分類，換算  $N_c$ ， $F_c$  とボーリング結果，室内試験結果との比較（N 橋その 2）



N 値

細粒分含有率  $F_c$

図-4.2.13 CPT による土質分類，換算  $N$  値  $N_c$ ， $F_c$  とボーリング結果，室内試験結果との比較（O 橋その1）



N 値

細粒分含有率  $F_c$

図-4.2.14 CPT による土質分類，換算  $N$  値  $N_c$ ， $F_c$  とボーリング結果，室内試験結果との比較（O 橋その2）

### (3) GP サンプリング

本調査において実施した GP サンプリングによって採取した試料の試験結果を図-4.2.15 に示す。調査結果は何れも道示に示す推定式と近い結果となっていることから、乱れの少ない試料が採取できていると考えられる。ここで、高濃度のポリマー溶液が試料に浸透することによる各種室内試験結果への影響が懸念されたが、既往の研究<sup>10)</sup>において、ポリマーの浸透が試験結果に与える影響は小さい検討結果が報告されている。ただし、混入率が低い場合、ポリマー溶液（原液を 3%に薄めたもの）の混入率によって試験結果の値が低下する結果（混入率 1.8%で繰返し三軸強度比が 6%低下、混入率 5%で繰返し三軸強度比が 20%低下）が示されており、GP サンプリングを実施する際には、試験結果に影響を及ぼさないようポリマーの混入率等に留意する必要がある。

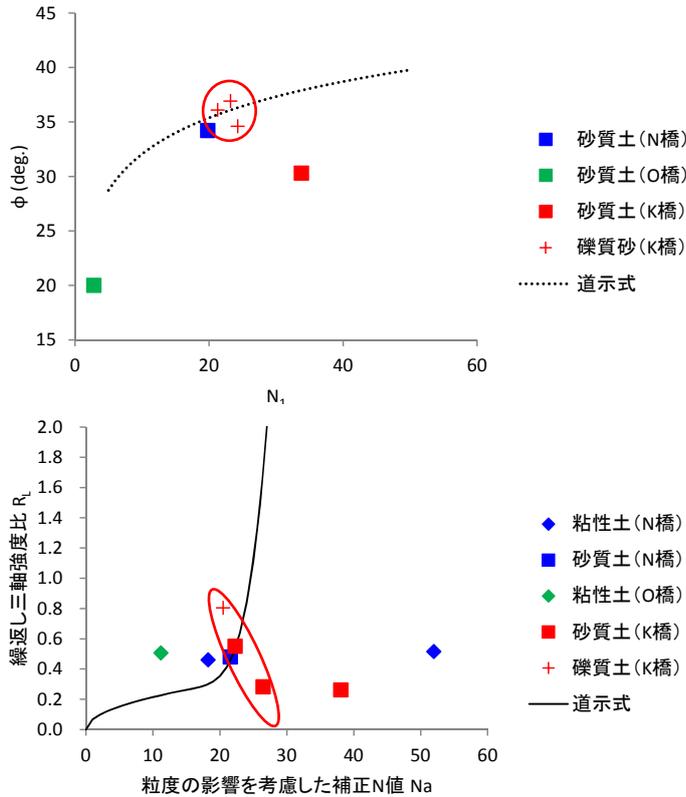


図-4.2.15 GP サンプリング試料の試験結果

#### (4) 常時微動測定

速度検層結果の評価には個人差が生じるため、速度検層の結果および結果の評価の妥当性を検証することを目的として、常時微動測定を実施した。常時微動測定による観測  $H/V$  スペクトル比と速度検層結果から算出した理論  $H/V$  スペクトル比の比較図を図-4.2.16～図-4.2.18 に示す。これらによると、ピークの周波数は概ね一致しており、速度検層の結果または結果の評価が概ね妥当であることが分かる。ただし、常時微動測定では、明瞭な速度コントラストを有する地層境界が存在しない場合等に明瞭な卓越周波数が認められない場合があるが、今回の調査結果においても、常時微動測定による  $H/V$  スペクトル比の卓越振動数は必ずしも明瞭でない。今回のように、速度検層結果の検証を目的とする場合は問題ないかもしれないが、例えば、耐震設計上の基盤面が不明確な場合の地盤の基本固有周期の評価に適用する場合、常に地盤の基本固有周期が得られるとは限らない点に注意を要する。

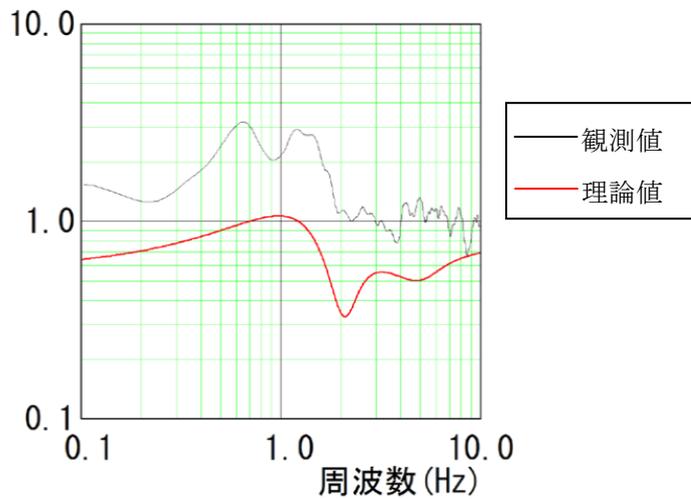


図-4.2.16 観測  $H/V$  スペクトル比と理論  $H/V$  スペクトル比の比較図 (K 橋)

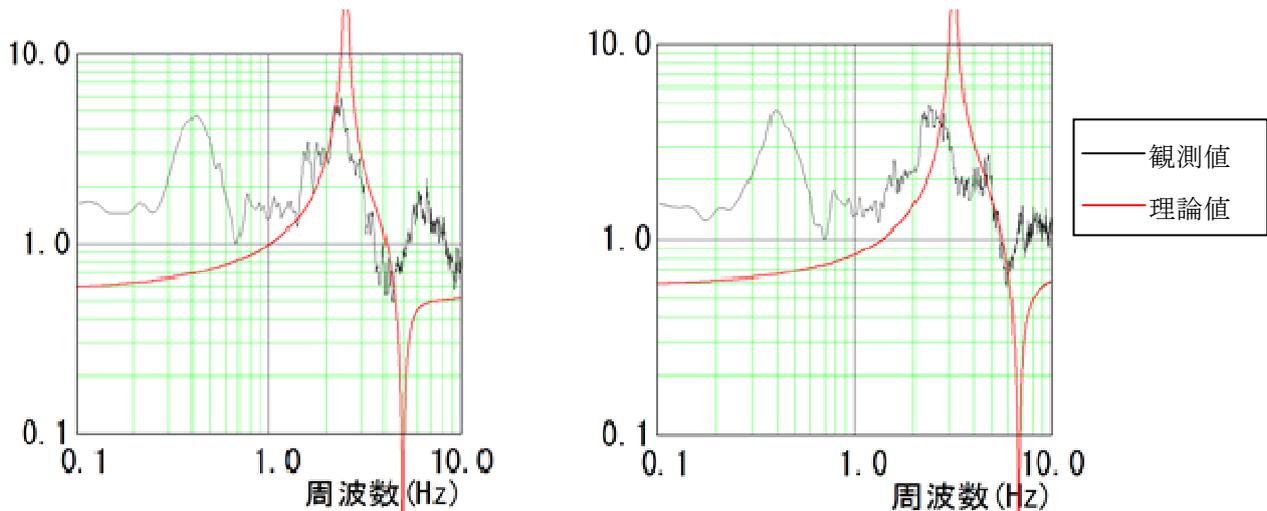


図-4.2.17 観測  $H/V$  スペクトル比と理論  $H/V$  スペクトル比の比較図 (N 橋)

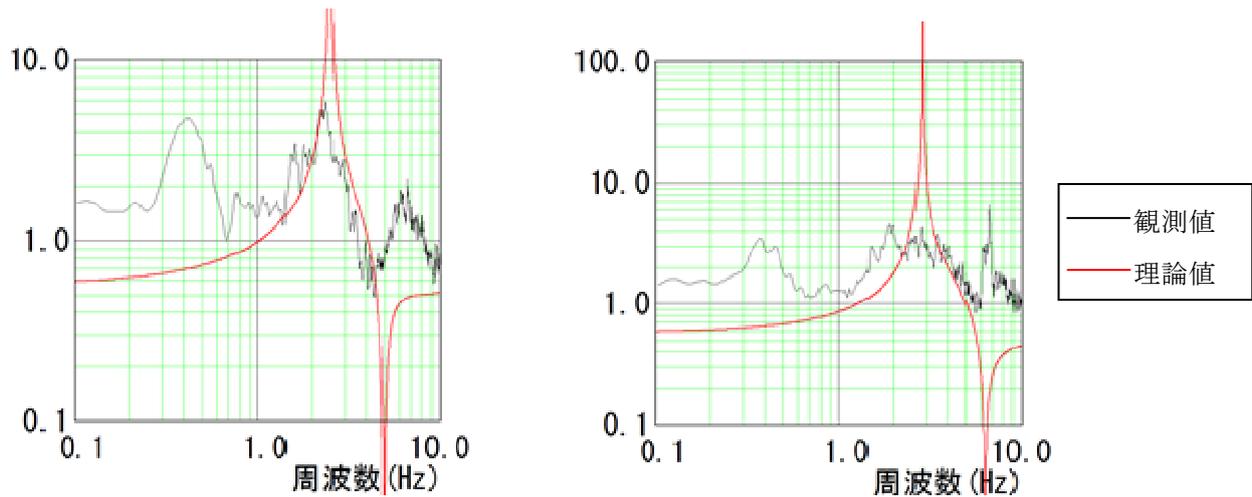


図-4.2.18 観測  $H/V$  スペクトル比と理論  $H/V$  スペクトル比の比較図 (O 橋)

#### 参考文献

- 1) T.Imai, M.Matsubara, K.Yokota and M.Nagura : The Relationship between LLT Test Results and Soil Engineering Parameters, Pressure Meter Symposium '82, 1982.
- 2) 公益財団法人鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計基準・同解説－基礎構造物，2012.1.
- 3) 独立行政法人土木研究所：三軸圧縮試験による砂の内部摩擦角と標準貫入試験 N 値との関係，土木研究所資料第 3849 号，2002.2.
- 4) 公益社団法人地盤工学会：地盤調査の方法と解説，2013.3.
- 5) 松尾修：道路橋示方書における地盤の液状化判定法の現状と今後の課題，土木学会論文集 No.757/III-66, I -20, 2004.3.
- 6) Robertson, P.K. : Soil Classification using the cone penetration test, Canadian Geotechnical Journal,27(1), 151-158, 1990.
- 7) Robertson, P.K. and Wride, C.E. : Evaluating Cyclic Liquefaction Potential using the Cone Penetration Test, Canadian Geo- technical Journal, Vol.35, No3, 1998.
- 8) 鈴木康嗣，時松孝次，實松俊明：コーン貫入試験結果と標準貫入試験から得られた地盤特性との関係，日本建築学会構造系論文集第 566 号，pp.73-80, 2003.4.
- 9) Jefferies,M.G. and Davies, M.P. : Use of CPTu to Estimate Equivalent SPT  $N_{60}$ , Geotechnical Testing Journal,Vol.16,No.4, 1993.12.
- 10) 山田眞一，柳浦良行，若杉護，谷和夫：水溶性ポリマー溶液を混入した試料の非排水繰返し三軸試験，第 49 回地盤工学研究発表会，2014.7.

## 第5章 まとめ

### 5.1 本報告で得られた知見

本報告では、東北地方太平洋沖地震の影響を受けた既設橋に対して実施した地盤調査結果を対象として、各種地盤調査法の適用性について検証するとともに、今後の課題について整理した。

1章では、既設橋等に対する地盤調査法の適用の現状と課題、本報告の目的を示した。2章では、本報告で検証の対象とした地盤調査について、調査目的を示した。3章では、調査対象、調査計画、調査方法について示した。4章では、個々の調査結果による地盤上の特徴に関する考察、各種地盤調査法の適用性に関する考察を示した。

- 1) 今回の調査のように、パイロットボーリングを実施し、試料採取深度、試験深度、試験内容を決定することで、必要な地盤定数を効率的に得られると考えられる。
- 2) 本調査で実施した孔内水平載荷試験から得られた変形係数  $E_b$  と標準貫入試験  $N$  値から求めた変形係数  $E_N$ 、三軸圧縮試験から求めた変形係数  $E_{50}$  をそれぞれ比較したところ、両者のあいだにはバラツキがあるものの、概ね既往の研究で示されている相関のバラツキの範囲内にあることを確認した。
- 3)  $N$  値 2 の粘性土地盤において、プレボーリング方式のプレッシャーメータ試験による孔内水平載荷試験 (PBP) から得られた変形係数は、室内試験から求めた値を大きく下回る結果となった。このような軟弱な粘性土地盤において、PBP によって地盤の変形係数を評価しようとする、変形係数を過小評価する可能性があることを確認した。
- 4) 本調査で実施した速度検層で得られた弾性波速度  $V_s$  から逆算した動変形係数  $E_D$  と三軸圧縮試験から求めた  $E_{50}$  を比較したところ、 $E_{50}$  は  $E_D$  の 1/5~1/40 となっており、既往の研究よりもバラツキが大きい結果となった。速度検層結果から  $E_{50}$  を推定することは精度が低いことを確認した。
- 5) 砂礫地盤において GP サンプリングにより試料を採取し三軸圧縮試験および繰返し三軸圧縮試験を実施したところ、何れの試験結果も道示に示す推定式と近い結果となっていることから、乱れの少ない試料が採取できていることを確認した。
- 6) 本調査において実施した繰返し非排水三軸圧縮試験から得られた繰返し三軸強度比と粒度の影響を考慮した補正  $N$  値  $N_a$  との関係性を比較したところ、 $F_c10\%$ 未満の砂質土については、道示の方法で算定される値とほぼ整合がとれているが、それ以外の  $F_c10\%$ 以上の砂および礫質土については道示の方法で算定される値と比較してバラツキが大きい結果となった。特に  $N_a$  が 25 以上では、繰返し三軸圧縮試験結果から求められた繰返し三軸強度比  $R_L$  は道示の方法で算定される値を大きく下回る結果となった。道示の  $R_L$  推定式は凍結サンプリング試料の試験データを基にしている一

方で、本調査ではいわゆるチューブサンプリング試料の試験データから  $R_L$  を評価している。試料の乱れが小さくなるように配慮したもののその影響を受けてしまった可能性や、ネッキング等の液状化以外の要因による供試体の破壊によって  $R_L$  が過小評価された可能性、さらには礫打ちにより  $N$  値が過大評価された可能性等が考えられ、原位置液状化強度の評価が容易でないことが分かった。

- 7) 孔内水平載荷試験については、コアチューブにより先に試験孔を掘削してから試験装置を挿入するプレボーリングタイプの孔内水平載荷試験 (PBP) と試験孔を掘削しながら試験装置を挿入するセルフボーリングタイプの孔内水平載荷試験 (SBP) などがある。軟弱地盤では、試験孔掘削時の応力解放などにより、試験結果が孔壁の乱れの影響を受けやすく、PBP では変形係数を過小評価する傾向がみられる。一方、SBP は PBP に比べて孔壁の乱れが少なく軟弱地盤において良質の試験結果が得られると期待されている。本調査においても、 $N$  値 2 の有機質粘性土地盤において、同一深度で SBP と PBP を実施し、得られた変形係数を比較したところ、PBP から得られた変形係数は、SBP よりも小さく  $N$  値からの推定値よりも小さい結果となることを確認した。
- 8) CPT の試験結果 (先端抵抗  $q_t$ , 周面摩擦  $f_s$ , 間隙水圧  $u$ ) から土質分類、換算  $N$  値  $N_c$ , 細粒分含有率  $F_c$  を示し、ボーリング結果および室内試験結果との比較を行ったところ、CPT による土質分類結果については、各地点においてボーリング結果と概ね整合性していることを確認した。また、同一層内で地盤抵抗が大きく変化する場合、CPT ではその傾向を細かく把握できることを確認した。ボーリング間の地層構成を補間するという観点では CPT の適用性は高いと考えられ、既設橋の耐震性能評価などにおいて、地盤の地層構成を詳細に把握したい場合などには、その有効性は高いと考えられる。なお、CPT の試験結果から液状化判定に用いられる  $F_c$  を推定することが可能であるが、さまざまな算出方法があるものの、今回の試験による推定結果をみるとバラツキが大きいことが分かった。このように、どのような地盤条件でどの算出方法が適切であるかなどの知見は十分ではなく、 $F_c$  の推定方法に課題があるため CPT による  $F_c$  が液状化判定に使えるか否かは今後検討が必要と考えられる。
- 9) 速度検層結果の評価には個人差が生じるため、速度検層の結果および結果の評価の妥当性を検証することを目的として、常時微動測定を実施し、常時微動測定による観測  $H/V$  スペクトルと速度検層結果から算出した理論  $H/V$  スペクトルを比較したところ、ピークの周波数は概ね一致しており、速度検層の結果または結果の評価が妥当であることを確認した。今回のように速度検層結果の検証のために用いる上では問題ないかもしれないが、常時微動測定の結果のみから卓越周波数、地盤の基本固有周期を読み取ることが必ずしも容易でない場合がある。

## 5.2 今後の課題

既設橋が有する耐震性能等を合理的に評価するためには、地盤条件に応じた地盤調査法を適用し、照査に必要な地盤定数を適切に設定することが必要となる。既設橋に対する各種地盤調査法の適用性についてより精度を高めて検討するためには、実際に被災した橋、被災しなかった橋を対象として、現地において実施した各種地盤調査法から得られた地盤物性値を用いて再現解析等を行い、どのような地盤条件のときにどのような地盤調査法を適用しどのように地盤定数を評価することで、より合理的に実際の挙動を再現できるかを検証していく必要がある。

## 参考資料 A 巻末 CD-ROM 収録データ

土木研究所資料第 4314 号の巻末 CD-ROM には、本文で示した地盤調査結果の詳細データが収録されています。収録されたデータは、下記の条件を満足する場合に限り、使用することができます。

1. 巻末 CD-ROM に収録されている情報を利用すること、もしくはその結果を利用することにより何らかの不利益が生じたとしても土木研究所および著作権者は一切の責任を負わないこと。
2. 巻末 CD-ROM に収録されている情報、利用方法の内容に関する質問に答える義務を、土木研究所及び著作権者は負わないこと。
3. 改変を行う場合には、利用者の責任において行うこと。
4. 巻末 CD-ROM に収録されている情報の再配布を行わないこと。
5. 巻末 CD-ROM に収録されている情報を利用し、その結果について言及したものを公表する場合には、利用したことを参考文献などに明示すること。

さらに、さらに、これらの情報の利用されている実績を蓄積することによって情報提供の必要性・有益性を把握するため、次の点についてご協力をお願い致します。

巻末 CD-ROM に収録されている情報を用いて作成された学术论文・報告書等で、印刷物等が出版・公開された場合は、コピーを下記に送って下さい。これには、大学等における卒業論文、学会講演の予稿集・商用利用時の報告書等も含まれます。お送りいただくのは、年度末にまとめてお送りいただいても、随時お送りいただいても構いません。

送付先

〒 305-8516 茨城県つくば市南原 1 番地 6

国立研究開発法人 土木研究所

構造物メンテナンス研究センター 主任研究員 河野哲也

### 巻末 CD-ROM の収録データ

資料 1	K 橋詳細地質調査業務報告書	1
資料 2	N 橋詳細地質調査業務報告書	425
資料 3	O 橋詳細地質調査業務報告書	1156



Copyright © (2015) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、国立研究開発法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、国立研究開発法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

---

土木研究所資料  
TECHNICAL NOTE of PWRI  
No.4314 June 2015

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

---

本資料の転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人土木研究所 企画部 業務課  
〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754