

## 地盤材料物性の高精度計測・試験法の研究

研究予算：運営交付金（一般勘定）

研究期間：平 18～平 22

担当チーム：技術推進本部 特命事項担当

研究担当者：稲崎富士，中西利典

### 【要旨】

構造物の基礎として地盤を取り扱う際、あるいは掘削対象や土構造物材料としてそれを取り扱う際の最も重要な課題の一つに地盤物性の高精度計測がある。しかし設計体系に組み込まれた既往試験法のなかには、精度や信頼性に問題のある方法が存在している。現場計測技術の革新と計測機器の高性能化に伴って、これまでも原位置試験・室内試験の高精度化とその規格化に関して新しい地盤調査・試験法が数多く提案されてきたが、残念ながら標準化・普及に至ったものは少ない。これは、既往調査・試験法の問題を的確に指摘する点での不十分さと、高精度計測法の開発と技術普及における中核研究機関の積極的関与が不十分であったことによると考えられた。そこで本研究では、いくつかの既往調査試験法についてその問題点を明らかにし、精度および信頼性向上の方策を提案するとともに、新しい試験計測法とその適用条件について現地実験および室内実験を通じて検証することを目的とした。

キーワード：標準貫入試験，コア試料採取法，粒度分析，動的解析，ベンダーエレメント試験

### 1. はじめに

保全や開発の対象となる地盤の構造とその物性を的確に評価することは、合理的設計施工を進める上での最重要課題の一つである。地盤構造の調査にはいわゆる土質調査ボーリングが採用されているが、それによって提供される柱状図の信頼性、あるいは標準貫入試験データの信頼性とその特性についての整理という根本的課題についてさえも、これまで十分に検討されてきたとは言い難い現状がある。土質調査ボーリングに伴う各種原位置試験法、採取試料を用いる室内試験法についても同様であり、試験基準あるいは技術基準として体系化されており、既往の設計体系のなかに組み込まれているからというだけでは、それらの試験計測手法の妥当性を保証したことにはなりえない。現場計測に関わる技術革新と試験計測機器の高性能化を反映するように、試験基準類は適宜改訂されるべきであるし、耐震設計基準に代表されるように、地盤に関わる技術基準類についても改廃を含めて随時見直しが図られるべきである。地盤材料物性の調査試験法のなかには、たとえば標準貫入試験（JIS A 1219）のように1961年に制定された後、数次にわたって改訂が加えられたものの、根幹的な改訂は未着手でその測定データに対する材料物性的な位置づけがいまだに明確にされていない

手法もある。あるいは最近基準化された室内試験法の一つであるベンダーエレメント試験法<sup>1)</sup>（JGS0544）も、後述するように最近の試験計測技術の進歩を十分に反映しているとは言い難い。

既制定の試験法や基準類は、各種設計施工基準類にも反映されていることから、その改訂作業には長期間を要することが想定される。これには個別の試験法や技術基準に対して継続的、系統的に関わることが可能な中核研究機関の貢献が期待されてきた。土木研究所はそのような中核研究機関の一つであり、これまでも土研式簡易貫入試験器<sup>2)</sup>などの現場試験機器の開発や土木試験基準(案)<sup>3)</sup>の策定に貢献してきた。

本研究では、土質調査ボーリングで標準的に実施されている標準貫入試験法について、測定データとしての $N$ 値に対して統計的な解析を加えた。また実際に標準貫入試験を基本とした土質調査ボーリングを実施し、取得データの信頼性の検証、試料の分析を通じた標準貫入試験採取試料の活用法について検討を加えた。

本研究期間中の2007年3月25日に能登半島西岸を震源とする能登半島地震が発生した。この地震によって石川県穴水町で最大速度100kine，最大加速度800galに達する強震動が観測され、市街地では特定

の地域に建物被害が集中したことから、表層地盤構造の不整形性の影響が疑われた。地震後多くの研究機関によって表層地盤構造調査、建築物被害実態調査等が実施された<sup>4) 5)</sup>が、土木研究所においても関係研究機関と連携して浅部地盤構造物性調査を実施した<sup>6)</sup>。そのなかで、構成地盤の初期せん断剛性を原位置計測手法であるサスペンションS波検層と、室内試験である繰り返し三軸試験およびベンダーエレメント試験で算出した。その結果、前二者の算出値はよく一致したがベンダーエレメント試験結果は他と大きく異なっていた。そこでベンダーエレメント試験の計測技法について、レーザードップラー振動計と同時計測することで検討を加えた。比較検討の結果はベンダーエレメント試験法には計測技法に加え本質的な仮定に重大な問題があることを明らかにした<sup>7)</sup>。

## 2. 調査研究成果

本研究期間中に実施した主な調査研究成果の概要を以下に示す。

### 2.1 標準貫入試験N値データの検討

標準貫入試験で得られるN値データは土質調査ボーリング実施地点の支持層の確認や構成地盤材料の硬軟・締め具合を判定する指標として用いられるほか、ボーリング地点間の層相の対比、断面図の作成の基本情報としても用いられている。しかしN値データは試験法に起因する重大な問題を有しており、その取扱いには注意を要する。その主要な問題点として以下の4点があげられる<sup>8)</sup>。

- 1) 不連続不定長区間測定法であり、通常土質調査ボーリングでは掘削全長に対する試験区間割合が30%程度以下で他区間の情報は基本的に「欠測」となること、
  - 2) 測定データに線形性はなく、単純な算術平均や空間補間が適用できないこと、
  - 3) 測定レンジが狭小で、層相、物性の変動幅に対応した感度を有していないこと、
  - 4) データ記録が自動化されておらず、人為的なデータ編集が加えられている場合があること、
- である。

このうち、特に問題となるのは1)、2)に指摘した事項である。ただし1)に関しては試験実施区間を密に設定することで対処可能である。そこで後述するように、本研究において掘削全区間に対して標

準貫入試験を行なう試験掘削を実施し、その効果を検証した。

2)に指摘した事項は最も深刻な問題であり、線形性の保証がないままでは、「平均N値」の算出も、従来の単純な空間補間による模式柱状図の作成とそれに基づくゾーニングの過程も成立し得なくなる。そもそもN値は示強変数であり、地震のマグニチュードや温度、速度と同様に単純な加算や算術平均は適用できない。平均処理や空間補間処理を施すことができるようにするためには、まずN値データ自体を線形補間ができるように変換する必要がある。標準貫入試験は動的破壊試験の一種であり、理論的にその値を説明することが困難であるので経験的な方法により線形補間の手順を検討した。一打撃あたりのエネルギーはほぼ同等と仮定することができるので、地層の破壊強度指標としては正規化された打撃エネルギーあたりの破壊範囲(区間)を示標とすることが望ましい。すなわちN値の逆数を取ることにより線形性を近似できる可能性が高い。一方で他の物性値との相関性から線形補間法を推定することも可能である。また統計的には正規分布するように区間を再配列する、という手法がある。本研究では高精度の原位置物性計測手法の一つであるサスペンションS波検層によって得られたS波速度と対比した結果に加え、正規分布を仮定した区間等分割手法について検討した。その結果、対数値を取ることによって算術的処理が可能になることがわかった<sup>8) 9)</sup>。

下図-1は、濃尾平野臨海部で実施された土質調査ボーリングのN値約2000深度データの頻度分布を示したものである<sup>9)</sup>。通常の線形尺度での頻度分布は歪んでおり、低N値側にピークが出現している(左上)のに対し、対数尺度での頻度分布(左下)では

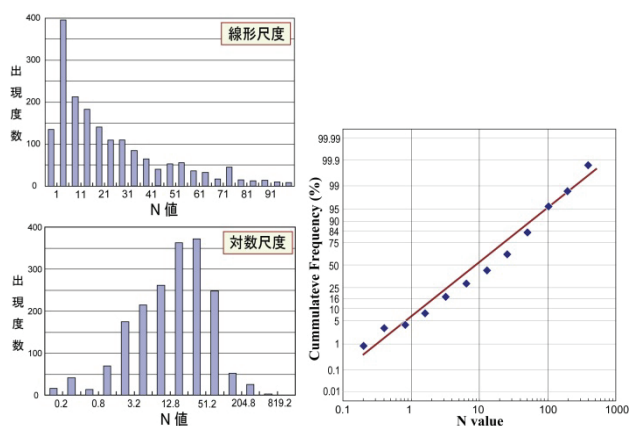


図-1 N値データの出現頻度分布(左)および対数正規確率分布表示<sup>7)</sup>。

中央部に最頻部があり、ほぼ左右対称となっている。このことは、 $N$  値データが対数正規分布をしていることを意味している。また同図右に示した対数正規確率グラフでも、データの累積頻度はほぼ一直線上にのり、対数尺度区分の妥当性を示している。すなわち対数尺度で取り扱うことにより、 $N$  値を算術的に処理することが可能となる。なお  $N$  値を対数表示する場合、自沈すなわち  $N$  値 0 のデータをどのように取り扱うかが問題となる。これに対しては、打撃による動的な破壊と自沈時の静的な破壊との間に線形関係を仮定し、経験的に求めた係数を乗することで  $N$  値 0 データの接合をはかった。

## 2.2 連続標準貫入試験ボーリング試験

前述のように土質調査ボーリングでは、不連続不定長の標準貫入試験が基本的に 1m 間隔で実施されるが、他の区間のコアの取り扱いについては統一的な仕様がない。関東地方では他の区間は掘り飛ばす、いわゆる「ノンコア半ペネ」が一般的であるが、この場合発注者に提供されるのは図-2（上）に示すように長さ 10cm 程度に切り分け、試料ビンに収納した部分ペネ試料だけである場合が多い。掘削長に対する比率は 10%以下であり、この試料から柱状図にまとめられた地層区分、層相解釈の妥当性を検証することは極めて困難である。他の地方では同図(中)に例示したように、50cm 長さのコア試料と、試料ビンに収納したペネ試料およびビニール袋に回収した残りのペネ試料が納品される。この場合コア比率は 80%程度にまで達し、コア試料と柱状図情報を容易に対比することができる。ただし試料ビンに収納される部分以外のコア試料は乱され、袋詰めされて提出されるので、詳細な層相対比はできない。これに対し同図（下）に示すような、コア回収用のインナーチューブを組み合わせた改良サンブラを用いれば、標準貫入試験においても乱れた試料を連続採取することが可能となる。そこでこの改良サンブラを用いてどの程度の試料回収が可能であるか、またコア試料の乱れの程度はどの程度かを評価するために連続標準貫入試験ボーリングを実施した。

ボーリング調査試験を実施したのは埼玉県三郷市采女新田地区である。同地区では産業技術総合研究所において圧入式シンウォールサンブラを用いたオールコアボーリングが実施されていた。その極近傍において本ボーリングを掘削した。それぞれの調査孔を PW\_MUS 孔, GS\_MUS 孔と略称する。PW\_MUS



図-2 土質調査ボーリングにおけるコア試料採取・取扱い例。(上):部分ペネ試料のみ;(中):半コア+ペネ試料;(下):改良サンブラによるペネ試料採取例

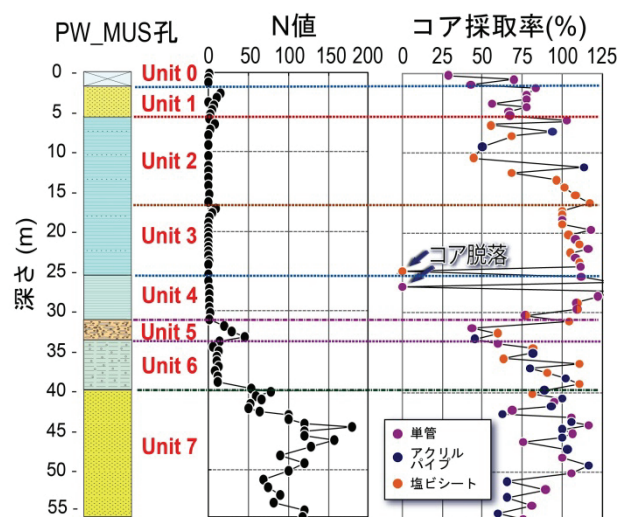


図-3 連続標準貫入試験ボーリング PW\_MUS 孔の層相(左),  $N$  値(中)およびインナーパイプ種類分けしたコア採取率(右)

孔の掘削長は55mであり、全区間を基本的に標準貫入試験用改良サンプラを打撃貫入させて掘削した。試験回数は81、一試験件あたりの貫入深度は25~155cmであった(予備打ち区間15cmを含む)。インナーサンプラには真ちゅう製単管、アクリルパイプ(図2(下))、ポリ塩化ビニルシートを用いた。標準貫入試験後、サンプラを回収しコア試料の長さを測定し、貫入長と比較してコア採取率を計算した。PW\_MUS孔の柱状図、N値およびコア採取率を図-3に示す<sup>10)</sup>。

コア採取率はUnit 5の埋没段丘砂礫層で低下するが、他の区間ではおおむね75%程度以上であった。なお採取率が100%を超過しているのはスライム分の排除が充分でないこと、採取に伴う拘束圧開放によるコア試料の伸長によるものと解される。インナーサンプラの種類による採取率の違いは顕著ではない。安価で入手しやすい真ちゅう製単管パイプを用いることが推奨されるが、コアの拔出し回収時に圧縮あるいは圧壊を生じさせる場合があるので作業に注意を要する。アクリルパイプやポリ塩化ビニルシートは高価ではあるが試料回収が容易であるという利点がある。

図-4に対数尺度で表示した換算N値、サスペンションPS検層で求めた50cm毎のS波速度、10cmに切り分けたコア試料の湿潤密度、コア試料に直径20mm、長さ20mmのプラスチックシリンダを圧入して採取した微小試料の湿潤密度と含水率を並べて示す。全部で81試験区間のうち、18区間でN値0が測定された。このデータに対しては前述のようにロッド長(試験深度)とハンマー载荷の有無を考慮した補正を加えて換算N値を求めた。得られた換算N値のプロファイルはS波速度のそれとよく対応していることがわかる。なおUnit 7の一部の区間では高いS波速度が観測されたがN値では対応する変動は認められなかった。この部分では標準貫入試験を測定しなかった区間が存在する。その区間の影響が想定される。

湿潤密度の値はいずれのデータ

でもばらつきが大きい。試料採取時の乱れの影響を受けているためと考えられる。なお分割コア試料に比べてそれから採取したシリンダ試料の値のばらつきのほうが小さい。分割コア試料に比べてシリンダ試料は小さく、圧入時の体積管理が容易なことがばらつきの低下に寄与していると考えられる。シリンダ試料の含水率の値も比較的ばらつきは小さい。乱した試料を用いて含水比を測定している従来の手法とも調和的である。

図-4に示した地盤物性プロファイルには共通する特徴的な変動が認められる。すなわち、Unit 2では含水率が大きく、湿潤密度が小さくなる層準でN値も低下する。Unit 2/3の境界部での含水率の低下、湿潤密度の上昇は、換算N値の上昇およびS波速度の増大としても現れており、N値やS波速度値が堆積物性を反映していることがわかる。同様の変動はUnit 4/5の境界、Unit 6/7の境界でも見いだされ、これらの物性間の相関性の強さを示しているものといえよう。

図-5には層相区分の指標となる物性値と含有物情報が表示されている。帯磁率のカーブには、含水率、

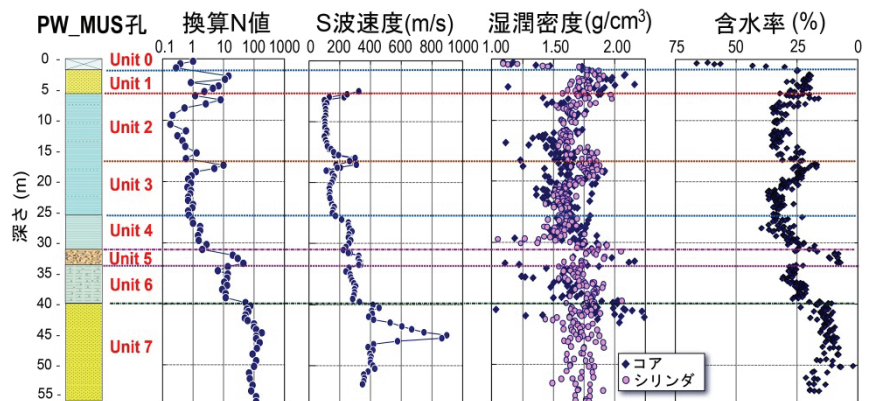


図-4 PW\_MUS 孔地盤物性プロファイル

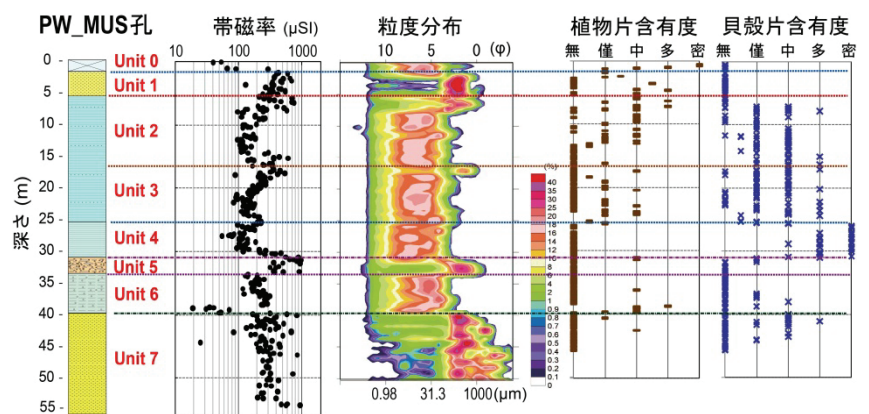


図-5 PW\_MUS 孔層相プロファイル

湿潤密度等と調和的な変動が認められる。この帯磁率は基本的に磁性鉱物の含有量に支配されるが、比重が大きいため掃流力が小さいときは流されず含有量も小さくなる。したがって基本的に粒度分布と相関性が高いことが知られている。

粒度試験には粗粒分は篩分け法を、細粒分に対してはレーザー回折散乱粒度分析装置を用いて分析した。従来の粒度試験では細粒分の分析に沈降法が利用されている。しかし同手法は測定に時間を要し、かつ $1\mu\text{m}$ 以下の細粒分の測定が困難であった。さらに分析間隔が粗く、均等係数や歪度などの粒度分布特性を算出することも困難であった。これに対しレーザー回折散乱粒度分析装置を用いることで、 $0.05\mu\text{m}$ までの細粒分を稠密な粒径間隔で測定することが可能となる。また通常の土質調査ボーリングでは粒度試験の間隔は $1\text{m}$ 程度であるのに対し、本孔コア試料に対しては $10\text{cm}$ 間隔で粒度試験を実施した。このように空間的にも分析間隔も密にとることで粒度組成を層相解釈の指標とすることが可能となる。図-5には対数尺度( $\phi$ スケール)上で各深度の粒度組成を頻度分布としてコンター表示してある。このような表示によって、粒度組成の深度分布をより視覚的に捉えることができる。

図-5にはコア試料中に含まれる植物片、貝殻片の多寡を5分類して示した。貝殻片の有無は堆積環境推定の指標となる。たとえばUnit 1とUnit 5/6には貝殻片は含まれていないか、僅かしか含まれておら

ず、これらのユニットが陸成相であることの証左となる。またUnit 4からUnit 2に向けて貝殻片の含有度は低下し、逆に植物片の含有度が上昇する傾向が認められる。エスチュアリー環境からプロデルタ、デルタへと浅海化するとともに陸域からの堆積物供給が増加していったことが推定でき、粒度組成や湿潤密度などの物性変化も、これにとって説明可能である。このように連続的に標準貫入試験を実施し、採取試料に対して稠密かつ高精度の試験・分析を加えることで、地盤物性を的確に把握できることが明らかになった。

### 2.3 浅部地盤構造・動的物性の計測評価

本研究期間中の2007年3月25日に、能登半島西岸を震源とする能登半島地震( $M_w=6.9$ )が発生した。この地震によって能登半島各地で震度6以上を観測し、斜面崩落や道路盛土崩壊などの地震被害が生じた。特に石川県穴水町では最大速度 $100\text{kine}$ に達する強震動が観測され、市街地では特定の地域に建物被害が集中した。図-6に防災科研のK-NETで観測されたこの地震の速度波形を示すが、震央に近い富来(ISK006)と比較しても、穴水観測点(ISK005)では低周波の強震動が観測されていることがわかる。特に東西成分で特徴的なこの低周波強震動は、他の観測点では観測されていないことから観測点近傍の表層地盤構造の不整形性の影響が疑われた。穴水町域では地震被害がK-NET 穴水観測点周辺の特定の地域

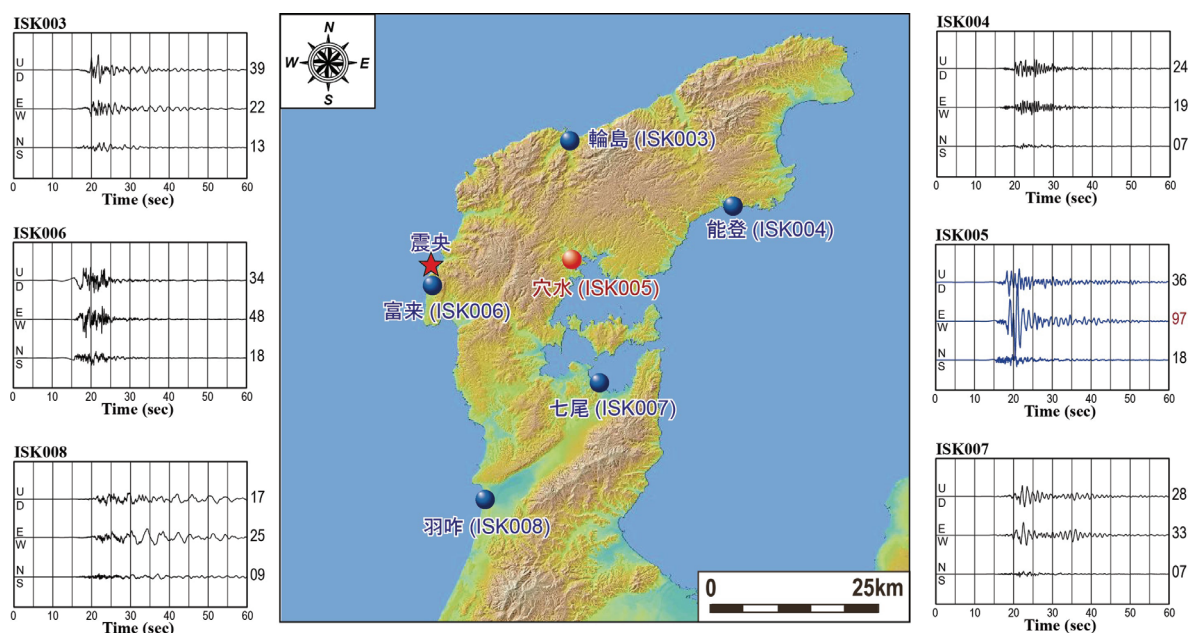


図-6 2007年能登半島地震における能登半島 K-NET 観測点の速度波形記録。

(防災科研運用 K-NET 地震計記録を使用)

に集中していたことが特徴的であった<sup>4)</sup>。さらに市街地およびK-NET観測点近傍での稠密な地盤調査によって、基盤構造が複雑に変化し、軟弱地盤の層厚が厚い地域で家屋被害の割合が高くなることが明らかにされた<sup>5)</sup>。しかしK-NET穴水観測点での強震動が、軟弱表層地盤での増幅の影響として説明できるかについては未解明のままであった。そこで同観測点近傍で詳細な地盤構造調査を実施<sup>6)</sup>するとともに新たにボーリング(PW\_NAO\_1孔)を実施し、孔内速度検層および不かく乱試料の動的試験によって浅部地盤の動的特性を調べた。

K-NET穴水観測点から約30m南東の児童公園敷地内で実施したオールコアボーリングの柱状図とS波速度プロファイル、コア試料の帯磁率、ガンマ線透過率およびシリンダ採取試料の含水率を並べて図-7に示す。特徴的であるのは、深さ約2mから11mにかけて、S波速度が60m/s程度の低速度層が厚く分布していることである。深さ14.5m-17mにかけて礫層が出現し、その下位には新第三系基盤が確認された。このうち、深さ5m、10m、12mの3層準で不かく乱試料を採取し、繰り返し非排水三軸試験によって動的特性を測定した。図-8にその結果を示す。片振幅ひずみレベルに対するせん断剛性率比の低下傾向は、一般的な粘性土、砂質土のそれと調和的であり、修正H-Dモデルで近似可能である。そこでこの試験結果を参考にして地盤構造をモデル化し、等価線形法による一次元地震応答解析を実施した。解析プログラムにはDYNEQ(Ver. 3.25)<sup>11)</sup>を用いた。なお最大せん断ひずみに0.65を乗じた値を有効せん断ひずみとして用いている。

入力地震波形には、K-NET穴水観測点から約15km北東に位置するKiK-net柳田観測点の地中地震計記録(EW成分)を用い、最大加速度を調整して使用した。図-9に入力波形レベルをそれぞれ100、300、600galとして深さ20mの基盤に鉛直入射した場合の地中および地表での最大せん断ひずみと最大加速度分布を示す。同図からは、入力地震動レベルが300gal以上の場合、非線形効果によって地表加速度レベルのほ

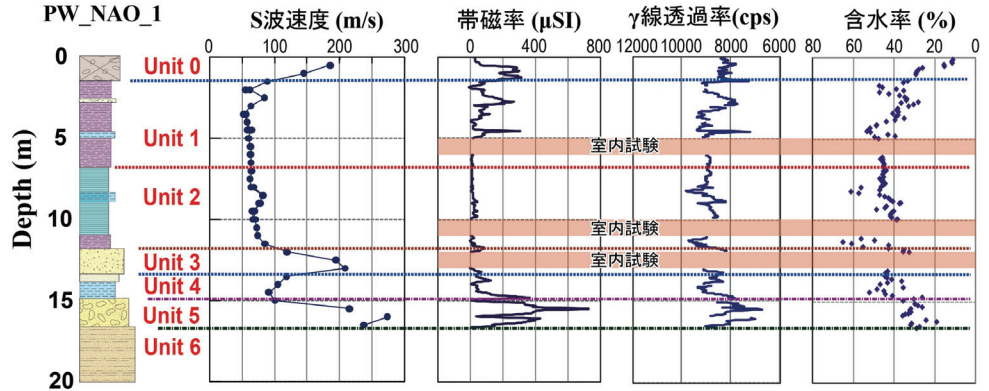


図-7 PW\_NAO\_1 孔地盤物性プロファイル

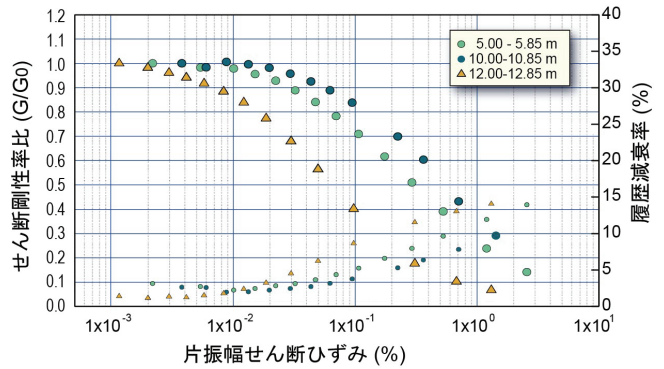


図-8 PW\_NAO\_1 コア試料の剛性率・減衰率のひずみ依存性

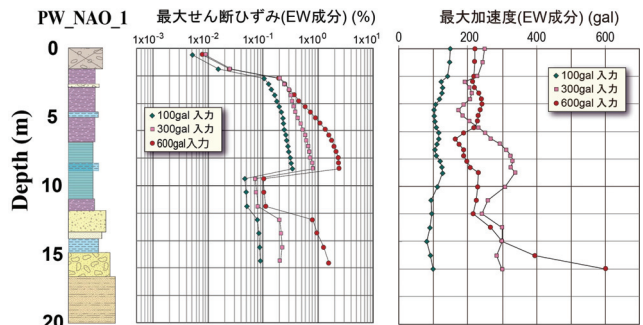


図-9 PW\_NAO\_1 孔一次元非線形応答計算結果

うが小さくなること、600gal以上の地震動入力では地中のせん断ひずみが1%を超過し、等価線形法の適用範囲を超えること、いずれの入力地震動レベルでも、K-NET穴水観測点で観測された800galに達する最大加速度を説明できないこと、がわかった。この一次元応答解析の結果は、同観測点で観測された強震動には、二次元の地盤不整形構造の影響が支配的であったことを強く示唆する。実際K-NET穴水観測点近傍では設置されている児童公園内で基盤構造が急激に変化することが明らかにされており<sup>5,6)</sup>、この不整形構造の影響によって強震動が観測されたと考えられる。

## 2.4 ベンダーエレメント試験法に対する比較試験

ベンダーエレメント(BE)試験は、計測が簡便なことから微小ひずみ領域のS波速度・剛性率計測手法として注目されてきた<sup>12)</sup>。最近試験基準が策定され<sup>1)</sup>、利用の拡大が期待されている。そこでこの試験をPW\_NAO\_1孔で採取した不かく乱試料に対しても適用し、原位置計測手法であるサスペンションS波検層と、室内試験である繰り返し三軸試験結果から導出されるS波速度値と比較した。右表-1に示すように、ベンダーエレメント試験結果は他の試験計測法で得られた値と大きく異なっていた。そこでベンダーエレメント試験の計測技法、波形データ処理法に対して検討を加えた。ある計測技法に内在する本質的な課題を鮮明化する最も簡便で有効な方法として、確立された他の計測技法と対照する方法がある。そのような既往計測技法の一つにレーザードップラー振動計(LDV)計測技法<sup>13)</sup>があげられる。LDVは非接触で供試体表面の振動を測定することができる。入力信号との同期を確保すれば、波動伝播の把握に不可欠な多点・多成分の振動測定も容易に実現できるという利点がある。そこでこのLDVを用い、BE試験と同時に試料内伝播振動を計測することによりBE試験法の計測、データ処理過程について検証を加えた<sup>7)</sup>。

右図-10に、外径5cm、高さ10cmの人工供試体の上面にBEを埋め込み5kHzサイン波を発振したときの供試体表面を伝播する振動を、LDVを用いて5mm間隔で計測した結果を示す。上端面での発振波形と底面で測定された波形の2波形だけからは走時を読み取ることが困難であるのに対し、側面を伝播する多点の振動波形からは伝播する振動の位相速度を正確に読み取ることが可能である。

LDVを用いた比較計測の結果、従来のBE試験法では反対称モードの撓み波が励起されること、伝播振動には速度分散が認められること、供試体へのBE埋込みが不十分な場合発振周波数成分が測定されないこと、など同試験法に関わる本質的な問題が明らかになった。今後この試験結果を基にした試験基準類の見直しが求められる。

## 3. まとめ

既往の試験法や基準類のなかには、精度や信頼性に問題のある方法が少なからず存在する。あるいは現場計測技術の革新と計測機器の高性能化によって、

表-1 計測試験法によるS波速度測定値の比較

試験区間(m)	5.00-5.85	10.00-10.85
サスペンション S波検層	63 m/s	72 m/s
繰り返し三軸-1	63 m/s	68 m/s
繰り返し三軸-2	59 m/s	80 m/s
ベンダー エレメント	82 m/s	114 m/s

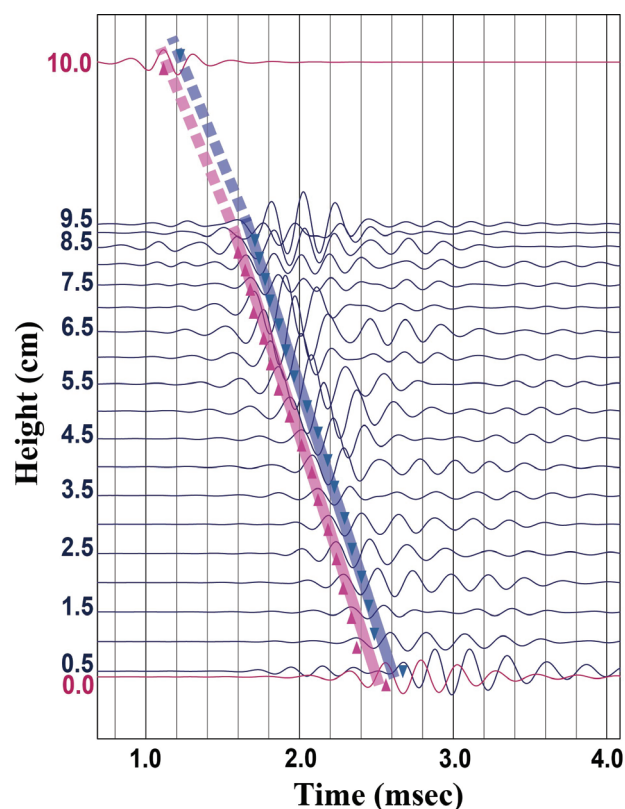


図-10 LDVによるBE励起供試体表面伝播振動波形記録(5kHzサイン波発振)

定められた試験計測手順が陳腐化している試験基準類も散見される。本研究では、それらのうち標準貫入試験、コア試料処理分析、ベンダーエレメント試験を対象にその問題点を明らかにし、改善策を明らかにすることを目的とした調査研究を実施した。

まず標準貫入試験については、試験によって得られるN値データが、通常の設定では非線形であり、平均化や空間補間などの処理が適用できないこと、之に対し対数尺度で取り扱うことで算術的处理が可能になることを地盤データベースに対する統計的な検討で明らかにした。さらに関東地方で特有の土質調査ボーリング仕様である「ノンコア半ペネ」ボー

リングの問題点を整理し、実際に改良サンブラを用いた連続標準貫入試験ボーリングを実施することで、柱状図および各種土質試験の信頼性を向上させることが可能であることを実証した。特に10cm間隔という密な試料採取・分析によって地盤の物性と堆積環境を詳細に把握可能であることを明らかにした。

つぎに2007年能登半島地震の被災地で軟弱地盤の不整形構造の影響と動的特性、特に非線形性の影響を明らかにすることを目的として、特徴的な地震動が観測されたK-NET穴水観測点の近傍でオールコアボーリングを実施し、高精度でS波速度を求めることが可能なサスペンションS波検層を用いて地盤の初期せん断剛性を求めた。これと動的室内試験の一種である繰返し三軸試験結果と比較したところ、両結果は概ね一致した。さらに採取試料に対してベンダーエレメント試験を適用したところ、算出結果はこれらとは合致しなかった。そこでベンダーエレメント試験の計測技法について、レーザードップラー振動計と同時計測することで検討を加えた。比較検討の結果はベンダーエレメント試験法には計測技法に加え本質的な仮定に重大な問題があることを明らかにした。今後は同試験法を含めて既往の試験基準類の改訂に本研究の成果を反映させることを予定している。

#### 参考文献

- 1) 地盤工学会(2011): ベンダーエレメントによる土のせん断波速度測定法(JGS0544), 6p, 地盤工学会.
- 2) 大久保駿・上坂利幸(1971): 簡易貫入試験機による地盤調査、土木技術資料、Vol.13、No.2.
- 3) 建設省(1970):「建設省土木試験基準(案)」, 351p, 全日本建設技術協会.
- 4) 国土技術総合研究所・建築研究所,(2007):平成

19年(2007年)能登半島地震建築物被害調査報告, 170p, 国総研資料第415号.

- 5) 林 宏一・平出 務・飯場正紀・稲崎富士・高橋広人(2008): 表面波探査と微動アレイ探査による石川県穴水町中心部の地盤構造調査, 物理探査, Vol. 61, 483-498, 物理探査学会.
- 6) 稲崎富士・林 宏一・飯場正紀・吉見雅行・小原一成(2009): ランドストリーマー高分解能反射法およびS波VSPによるK-NET穴水観測点近傍の浅部地盤構造調査, 物理探査学会第120回学術講演会講演論文集, 101-104.
- 7) 稲崎富士・西澤 修・竹原直人・山本 洋・山口和郎(2011): LDV同時計測によるBE試験の計測技法の検討, 第46回地盤工学研究発表会講演集, CD-ROM, 2p, 地盤工学会.
- 8) 稲崎 富士(2008): 高精度S波速度検層データを指標とした沖積層の堆積環境と工学的特性の検討, 第四紀研究, vol. 47, 121-138.
- 9) Inazaki, T., (2006): Relationship between S-wave velocities and geotechnical properties of alluvial sediments, Proceedings of the 19th Annual Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP2006), CD-ROM, 1296-1303.
- 10) 中西利典・稲崎富士・田辺 晋(2007): 標準貫入試験試料とオールコア試料との堆積物物性の比較—埼玉県三郷市采女新田地区の沖積層—, 日本応用地質学会平成19年度研究発表会講演論文集, 233-234.
- 11) 吉田 望・末富岩雄(2004): DYNEQ, A computer program for dynamic response analysis of level ground by equivalent linear method, <http://boh0709.ld.infoseek.co.jp/>



## RESEARCH ON PRECISE MEASUREMENT AND TESTING METHOD FOR EVALUATING GEOTECHNICAL PROPERTIES

**Budget** : Grants for operating expenses  
General account

**Research Period** : FY2006-2010

**Research Team** : Advanced Technology Research  
Group (Special Unit on  
Geophysical Exploration)

**Authors** : INAZAKI Tomio, NAKANISHI Toshimichi

**Abstract** : Research on precise measurement and testing of geotechnical properties of unconsolidated sediments was conducted mainly through field and laboratory testing as well as statistical analysis of geotechnical data. First, nonlinearity of  $N$  values obtained by in situ Standard Penetration Test (SPT), was statistically clarified in correlation with S-wave velocities, bulk densities, solidities, and median grain sizes measured as the standard laboratory test, and a logarithmic conversion procedure was proposed to enable spatial interpolation including averaging. Next, continuous core sampling and core analysis technique was tested making use of modified SPT sampler, because conventional geotechnical drilling was characterized as non-coring and rough treatment of SPT samples, especially in Kanto Region. A field drilling test was conducted at Misato City, situated at the central part of Kanto Plain, in comparison with whole core drilling conducted by Geological Survey of Japan close to each other. As a result, it was cleared the dense core analysis was helpful to evaluate not only the geotechnical properties but also sedimentological properties.

During the research period, 2007 Noto Peninsula Earthquake ( $M_w=6.9$ ) took place and sporadic damage zone was observed in the central part of Anamizu Town, where a K-NET observation site had been placed. It was inferred the near surface heterogeneity and its nonlinear property affected housing damage in Anamizu Town. Then, shear moduli or S-wave velocities and their nonlinear properties were measured by means of in-situ and laboratory testing to calculate dynamic response of the near surface. An open-source program named DYNEQ was adopted to calculate the nonlinear response of the near surface using test results and field survey results. However, the calculation result could not explain anomalous strong motion observed at the K-NET station. This suggests that the heterogeneity in the near-surface structure caused the observed strong motion. Actually, high-resolution seismic reflection surveying delineated sudden deepening of bed rock surface depths from few meters to 15 m within 30 m in lateral direction.

The measurement technique of bender element (BE) testing, which has become a simplified technique to estimate shear wave velocities of soil specimen, was investigated by comparing waveform data simultaneously obtained using Laser Doppler Vibrometer (LDV). Comparative analysis of waveform data clarified that the inherent inappropriateness of BE testing method.

**Key words** : standard penetration test,  $N$  value, Suspension S logging, shear modulus, nonlinearity