

NSWS 試験装置を用いた原位置地盤内空洞調査

稲積真哉¹, 大北耕三²

1 京都大学大学院・工学研究科

2 大北耕商事

概 要

本論文は、荷重載荷と回転貫入抵抗値を取得できるスウェーデン式サウンディング（SWS）試験に準拠し、SWS 試験装置が不可能としていた 0 から 2500N の載荷領域、測定間隔の細分化および貫入速度の制御等により、地盤内の空洞・ゆるみを含む超軟弱領域を詳細に検出する原位置地盤調査機として開発した NSWS（Nippon Screw Weight System）試験装置の開発概要を説明している。さらに、原位置において NSWS 試験装置を用いた地盤内空洞調査を実施することで得られた知見を報告するものである。原位置地盤内空洞調査より得られた知見には、NSWS 試験装置を用いることで原位置における地盤内空洞領域を特定することができた。また、NSWS 試験装置によって取得される換算 N 値はその測定間隔が 2.5cm（もしくは 3.8cm）まで細分化され、貫入速度の事前設定により空洞・ゆるみ領域の範囲の特定や 0 から 1000N の載荷重による換算 N 値が 1 以下の超軟弱領域の検出が可能であった。

キーワード：NSWS 試験装置、換算 N 値、地盤調査、空洞領域、ゆるみ領域

1. はじめに

戦後、大量に整備されることで我が国の発展や国民生活の安全を支えてきた社会資本は 21 世紀を迎え、その多くが建設後 50 年を過ぎようとしている。一方、関連する技術も建設から維持管理へと移っており、限られた資源を有効に活用しつつ、社会資本の本来有する機能を継続させるための“再生”および“評価”が重要となっている。

例えば、海岸護岸擁壁の崩壊は波浪や洪水等の異常外力の作用が直接的要因になっているものの、連続する護岸の中で特定区間のみが崩壊する原因には、護岸背面地盤の空洞・ゆるみが誘引の一つとして考えられる。一般的に、背面地盤の空洞・ゆるみは、海岸や河川における継続的な波浪や流水の作用の中で、時には高潮、異常出水あるいは背面の地下水による土砂流出により、隠れた状態で徐々に進行する。背面地盤の空洞・ゆるみの進行を堤防、護岸ならびに道路等、地盤構造物の劣化過程として考慮すれば、その過程を調査し、評価する地盤試験装置は、地盤構造物の“再生”を図るための技術として必要不可欠であると考えられる。なお、地盤構造物の“再生”を図るための調査技術には、結果の迅速性やデータの連続性等、効率性や経済性、さらに原地盤の状況をより高精度で評価できる原位置試験方法が強く求められている¹⁾。

スウェーデン式サウンディング（SWS）試験は貫入に必要な最低荷重（ W_{sw} ）と、1000N の静荷重条件下での回転による貫入抵抗値（ N_{sw} ）を求める原位置地盤調査の一つ

である²⁾。元来、路盤支持力の調査を目的として開発されたものであるが、静的サウンディングの中では対象地盤の制約が少なく、且つ 15m 程度までの測定が可能であること、試験装置が人力運搬可能な規模に分解・独立していること等から、斜面調査においても実施される例が多い。ただし、SWS 試験の測定間隔は 25cm である。

ここで、例えば河川決壊の原因の一つである堤防漏水について考えると、漏水箇所、規模ならびに位置の特定、さらに、背面地盤の劣化状態を把握する必要がある。そのため、気相・液相・固相の三相状態で粒状状態が異なる地層条件に対して境界を明確にすると同時に、空洞・ゆるみを含む超軟弱領域を特定することが必要であり、少なくとも 5cm 以下の頻度で測定し、且つその状態を把握するための指標が必要と考えられる。そこで、SWS 試験に準拠し、荷重載荷の空油圧制御化と測定間隔の細分化により地盤内の空洞・ゆるみを含む超軟弱領域を詳細に検出する原位置地盤調査機の一つである NSWS（Nippon Screw Weight System）試験装置の開発^{3),4)}に至った（写真 1 参照）。

本論文は荷重載荷と回転貫入抵抗値を取得できる SWS 試験に準拠し、従来の SWS 試験装置が不可能としていた 0 から 2500N の載荷領域と測定間隔の細分化による貫入速度の制御等により、地盤内の空洞・ゆるみを含む超軟弱領域を詳細に検出する原位置地盤調査機として開発した NSWS 試験装置（写真 1 参照）について、その概要を説明する。さらに、原位置において NSWS 試験装置を用いた地盤内空洞調査を実施し、原位置地盤調査より得られた知



写真1 NSWS 試験装置の外観

見を報告するものである。

2. NSWS 試験装置の概要

2.1 NSWS 試験装置の開発と特徴

SWS 試験装置は移動が容易、試験時間が短く、試験方法も簡単、さらに、機械式ボーリングに比べて試験費が安価である一方、密な砂質地層、礫ならびに玉石層には適用できない試験方法である⁵⁾。また、従来の標準貫入試験や SWS 試験の測定間隔では、世代の異なる土質構成、地層境界、水みち位置の特定、空洞の有無、およびその周辺地盤のゆるみ等の状態を把握するのに不十分である。少なくとも 5cm 以下の頻度で測定が必要と考えられる。

そこで、SWS 試験装置の载荷と回転貫入抵抗による測定システムを利用し、载荷重の空油圧制御化と測定間隔の細分化の機能を備え、超軟弱領域の特定化が可能な原位置地盤調査機、すなわち、NSWS 試験装置を開発している^{3), 4), 6), 7)}。なお、開発した NSWS 試験装置は、いわゆる軟弱地盤を対象とした 1200 型（最大载荷重 1200N 且つ測定間隔 2.5cm）、また、礫や玉石層での貫入を可能とした 2500 型（最大载荷重 2500N 且つ測定間隔 3.8cm）の 2 機種がある。

NSWS 試験装置は、以下の特徴を有している。

- (1) 軽量且つ小型（総重量 70～75kg、全長×全幅×全高＝70～75×50×250cm）であり、手軽に移動据付が可能である。
- (2) 空油圧による载荷方式を採用し、0 から 1200N もしく

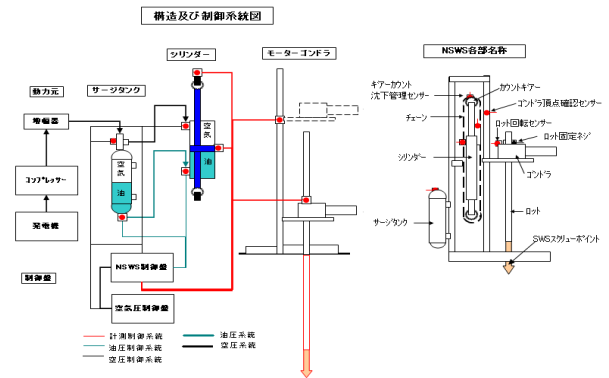


図1 NSWS 構造および载荷重作用状態

は 0 から 2500N まで、载荷重を連続的に制御することができる。

- (3) 0 からの载荷によって、軟弱層の分解能を大幅に増すことができる。
- (4) 载荷重、貫入量および回転数を 2.5cm もしくは 3.8cm 間隔で測定し、地盤の内部構造をおよそ連続的に詳細に捉えることができる。
- (5) 载荷時の貫入時間を測定し、貫入速度から自沈（空洞・ゆるみ）域を検出することができる。
- (6) 平坦面における傾斜方向ならびに盛土斜面等の傾斜地での測定が可能である。
- (7) 原位置において空洞やゆるみ領域を判定することができる。

2.2 NSWS 試験装置の各機能

2.2.1 载荷重

今日、SWS 試験の载荷装置については、作業の効率化を目的として自動試験装置が開発・普及しているものの、回転装置であるモーターと载荷ゴンドラの合計自重が 500N 近くになり、500N 未満の初期载荷重に対して測定不能領域が存在し、0 からの測定が不可能等の問題がある。

NSWS 試験装置は図 1 に示すように、空油圧作動の両シリンダーによりモーター+ゴンドラ自重に対し、反対方向荷重を作用させ 0 载荷状態を作り出し、0 から 2500N までの連続载荷による測定を可能にする。なお、载荷重は校正秤によるキャリブレーションを実施することで、その正確性を維持している。

2.2.2 測定間隔

NSWS 試験装置は、シリンダーに固定されたギアを介してゴンドラを動滑車状態でチェーン懸垂した構造であり、シリンダー移動距離に対して 2 倍のチェーン繰出し量（チェーンピッチ＝ギアピッチ、 $1.25 \times 2 = 2.5\text{cm}$ もしくは $1.9 \times 2 = 3.8\text{cm}$ ）をセンサーで感知し測定単位としており、25cm を測定単位とする従来型の SWS 試験に比べ詳細なデータの取得が可能となる。また、測定間隔の細分化に対して計測制御の時間を利用することにより貫入所要時間の事前定義が可能となり、自沈状態や空洞・ゆるみ領域



写真2 NSWS 試験装置による傾斜測定の様子

等の超軟弱領域の検出が可能となる。

2.2.3 傾斜測定

NSWS 試験装置の荷重制御は空油圧制御システムであるため、荷重作用方向に関係なく載荷が可能であるため傾斜面での測定が可能となる(写真2参照)。これより、図2に示すような空洞や極めて緩い土層(ゆるみ領域)の範囲を求めることが可能である。

2.2.4 地盤内空洞とゆるみ領域の特定

NSWS 試験装置は、測定間隔における貫入時間をパラメータとして回転・載荷を密に制御し、空洞・ゆるみ領域を特定している。すなわち、NSWS 試験装置による測定結果と解釈の一例を示した図3では、測定データ転送の時刻と単位間隔(2.5cm)の測定に要した貫入時間をコンピューター処理し、事前に設定した貫入時間(沈下時間)0.5秒以上(可変)を検知した時点で回転・載荷を一旦停止し、載荷重を0に戻し測定を再開するシステムによって、設定した貫入時間以下の場合の出現性やその時間の連続性とその載荷荷重状態を比較し、空洞・ゆるみ領域を特定している。なお、図3では深度0.75~1.5mで4箇所の異常領域が検出されており、当該区間で空洞・ゆるみが生じていると判定できる。

NSWS 試験装置は地盤内空洞・ゆるみ領域の特定に対して、中空のロッドの使用しているため、カメラ等の装着や水位計の挿入が可能となり、特定した地盤内空洞の可視化や、空洞内の水等の存在を把握することができる。さらに、NSWS 試験装置では付加的に排圧管理型高粘性ポンプを有しており、特定した地盤内空洞・ゆるみに対して、直後にセメントミルクや膨潤性止水材等の注入による簡易な補修を実施することができる⁸⁾。

3. NSWS 試験装置を用いた地盤内空洞調査

3.1 調査現場概要

流域下水管渠の修復に先立ち、NSWS 試験装置(1200型;最大載荷重1200N且つ測定間隔2.5cm)を用い地表面

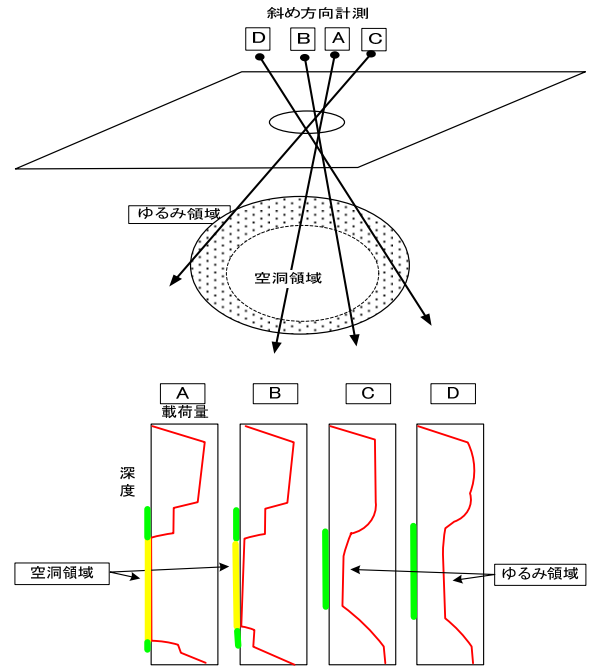


図2 地盤内空洞およびゆるみ領域検出の概念

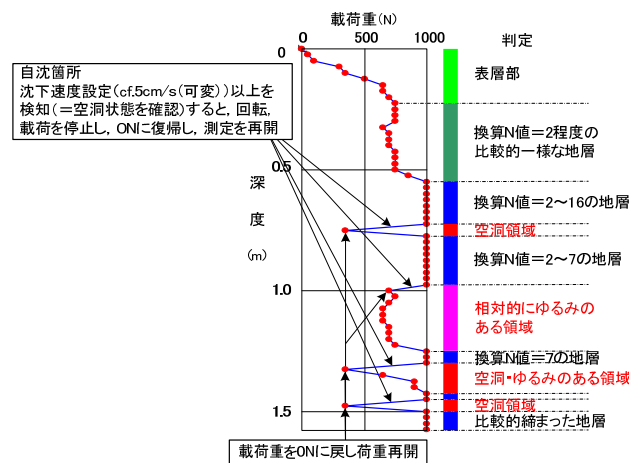


図3 NSWS 試験装置による測定結果と解釈の一例

から約6.5m深度にある当該流域下水管渠周辺の地盤内空洞の調査を実施した。

地表面下に発生が予想される空洞等の地盤状況の調査方法には、直接的な手法として試掘調査、調査ボーリング(標準貫入試験)ならびにSWS試験、間接的な手法として地中レーダー探査ならびに弾性波トモグラフィ探査等の物理探査がある。当該現場において予想される空洞は、流域下水管渠(φ1000mm)の直上、深度6m付近を中心に広がっている。なお、当該現場の地質構成は、既存ボーリング試験結果から、地下水位が高く、全体にN値=0~6の非常に軟らかい粘性土、緩い砂質土であることが判明している(図4参照)。すなわち、当該地盤状況では地中レーダー探査、高密度表面波探査、浅層反射法ならびに高密度電気探査等物理探査を適用しても地盤内空洞の判別は困難であると予想できる。また、試験ボーリングによっても、

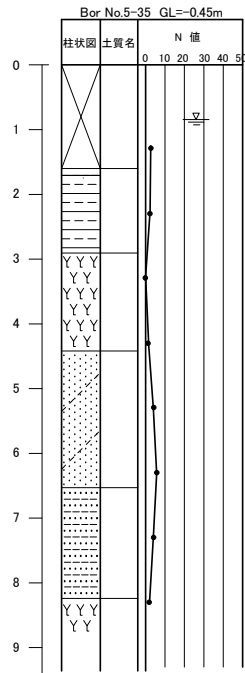


図4 調査地付近の既存ボーリング試験結果

表1 各試験孔の詳細

試験位置	地盤高(m)	傾斜角(°)	延長(m)	試験先端標高(m)	備考
①	-0.75	45	7.40	-5.98	
②	-0.75	45	8.20	-6.55	
③	-0.75	45	8.07	-6.46	
④	-0.48	90	4.98	-5.46	下水管直上
⑤	-0.42	90	5.98	-6.40	
⑥	-0.93	90	5.23	-6.16	下水管直上
計			39.86		

流域下水管上端部標高: H=-6.0m

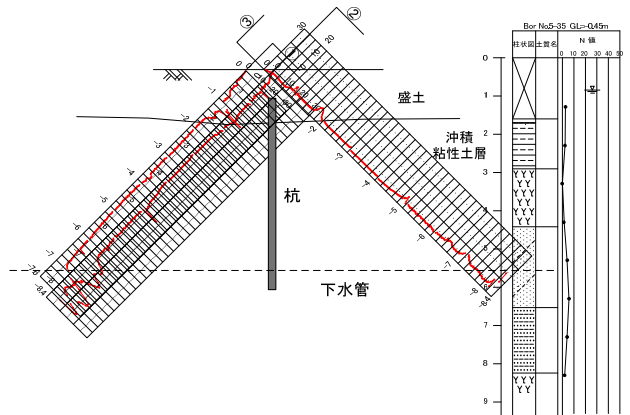


図6 試験孔①～③における結果の一例

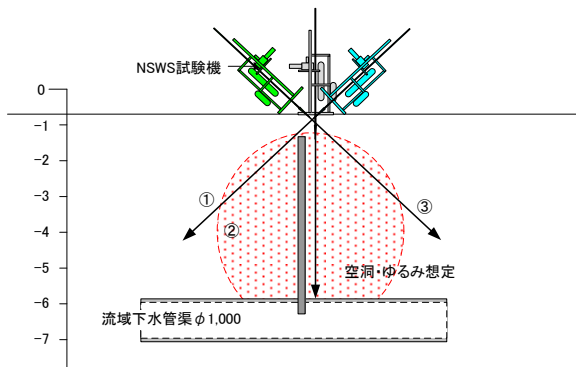
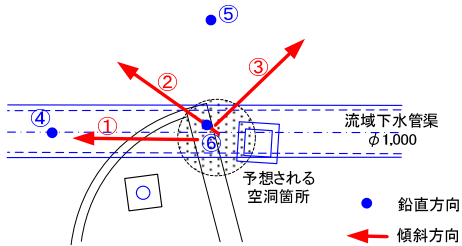


図5 原位置地盤内空洞調査の実施計画概念

軟弱な地質構成にあつて、細かな地盤状況を捉えることは困難である。

3.2 原位置地盤調査の手順

流域下水管渠上方の地盤状況把握を目的とし、以下の手順で原位置地盤調査を実施した(図5参照)。

- (1) 地盤内空洞調査は排水樋管(φ350mm)を撤去後に実施する。
- (2) 各試験孔①～③は、順次方向と角度を調整し、流域下水管渠の天端方向および横断方向で試験を実施し、流

域下水管渠の破損箇所上部を中心とした地盤状況を把握する(図5参照)。

- (3) 試験孔①～③の結果を踏まえ、追加試験として試験孔④～⑥を実施し、天端上方縦横断方向の地盤状況を把握する(図5参照)。

3.3 試験孔の詳細

当現場における流域下水管渠の上端標高は、およそ H=-6.0m であり、各試験孔の深度はこの標高値を下回る深度とした。表1は各試験孔の詳細を示している。

試験孔①として、杭位置に近接する位置から、流域下水管渠の法線方向(北方向)へ下方45°で試験を実施した。削孔長は7.4m、試験深度は5.2m(H=-6.0m)である。

試験孔②として、杭位置に近接する位置から、流域下水管渠方向から東に約45°方向、下方45°で試験を実施した。削孔長は8.2m、試験深度は5.8m(H=-6.6m)である。

試験孔③として、杭位置に近接する位置から、流域下水管渠方向から東に約135°方向、下方45°で試験を実施した。削孔長は8.07m、試験深度は5.7m(H=-6.5m)である。

試験孔①～③によって、流域下水管渠の法線方向から東側135°の範囲を扇形に試験した。さらに、試験孔①～③を終了した時点では、図6に示すように杭周辺の盛土および粘性土層との境界付近はいずれも軟らかい地盤状況を示しているが、既存の試験ボーリング結果(図4参照)とおよそ同等の地盤状況であり、顕著な空洞を示す結果は得られなかった。そこで、試験孔④～⑤として、杭位置から離れた箇所、試験孔①～③と同様に軟らかい地盤状況であるかを確認するため、鉛直方向の試験を実施した。

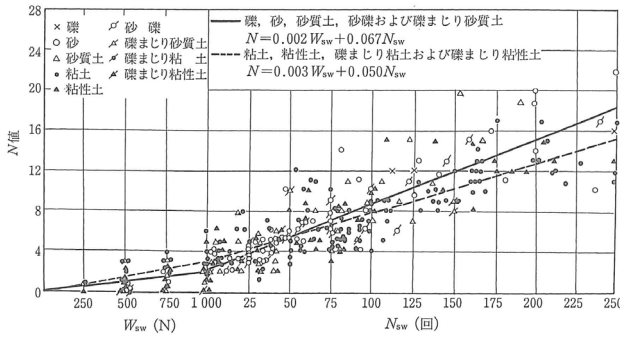


図7 稲田式に準じたN値と半回転数(Nsw)および
 載荷重(Wsw)の関係

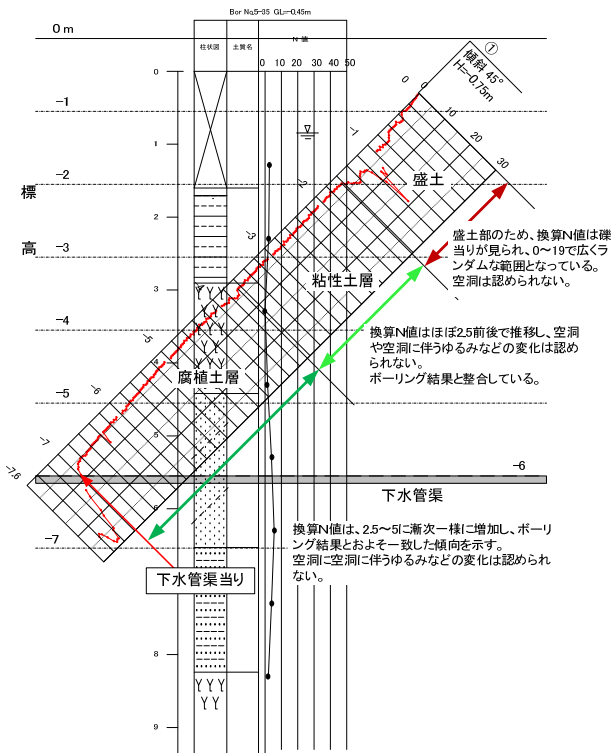


図8 試験孔①における深度方向への換算N値分布

試験孔①~⑤では、全体に軟らかい地盤状況ではあったが、顕著な空洞の結果が認められなかったことから、空洞があまり拡がりを持っていないと考え、試験孔⑥として、杭の直近で試験を実施した。

3.4 試験結果 (換算N値)

試験結果は、半回転数(N_{sw})と載荷重(W_{sw})から図7に示す稲田式⁵⁾を用い、各深度における換算N値として整理し、各試験位置の結果を図8~13に示している。ここで、稲田式による換算N値に対するNSWS試験およびSWS試験の相関については、文献⁷⁾にて報告しており、両者間に高い相関性が認められることを明らかにしている。

試験孔①では、盛土層を除いて、換算N値の深度曲線は2.5から5.0まで緩やかに増加し、途中大きく減少する

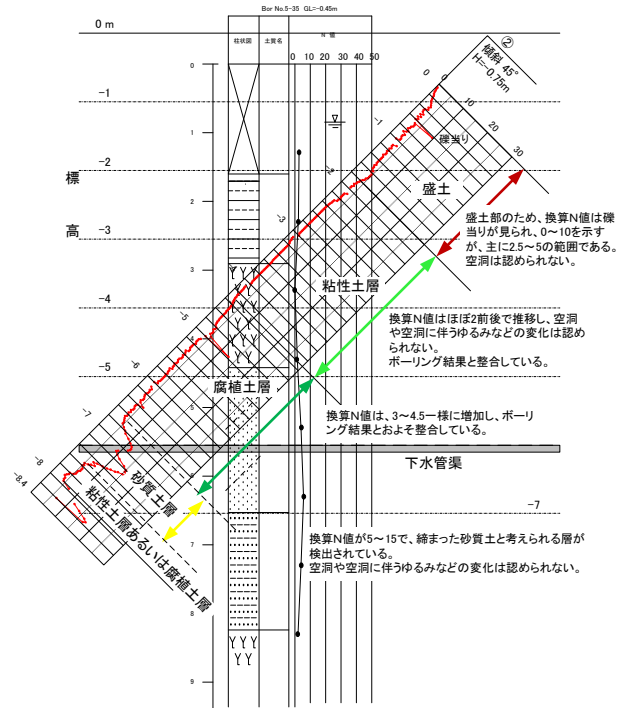


図9 試験孔②における深度方向への換算N値分布

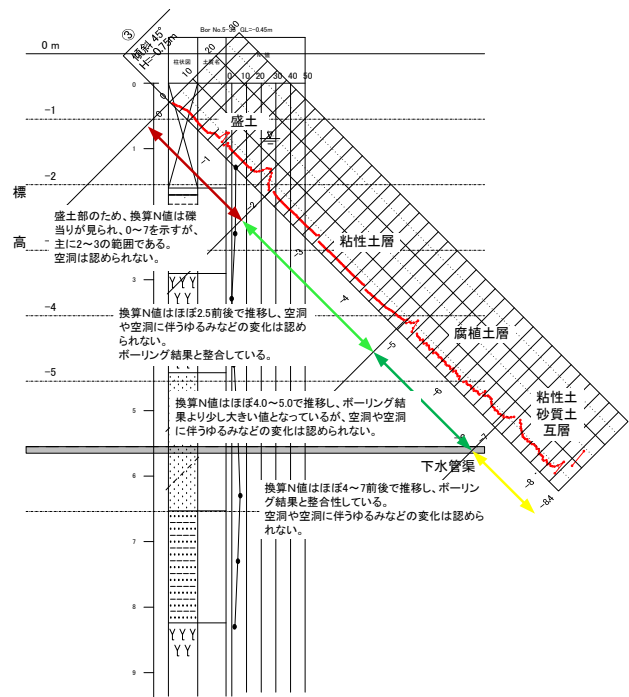


図10 試験孔③における深度方向への換算N値分布

箇所も観測されなかった。したがって、試験孔①では、空洞あるいはこれに起因したゆるみは確認されなかった(図8参照)。

試験孔②では、盛土層を除いて、換算N値の深度曲線は2.0から5.0まで緩やかに変化し、途中礫当たりによる異常値があるが、大きく減少変化する箇所は観測されなかった。したがって、試験孔②では、空洞あるいはこれに起因したゆるみは確認されなかった(図9参照)。

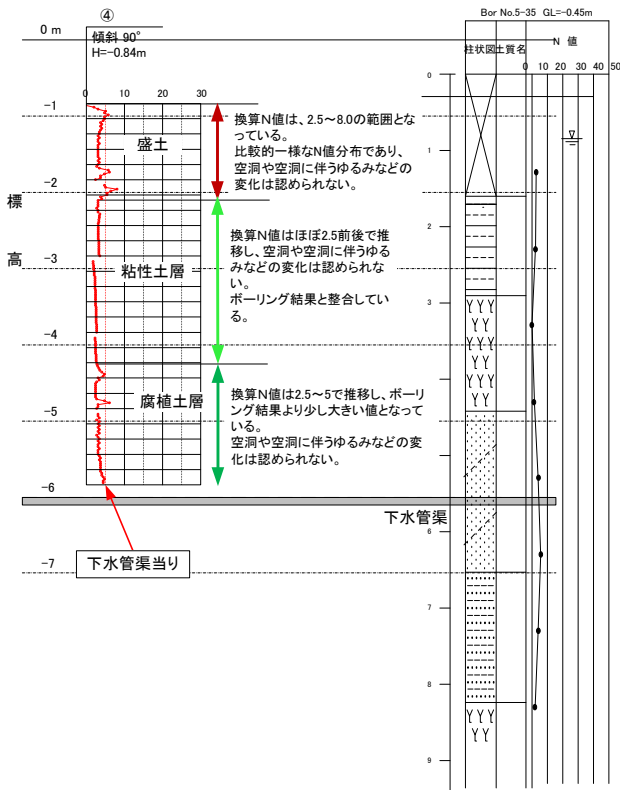


図 11 試験孔④における深度方向への換算 N 値分布

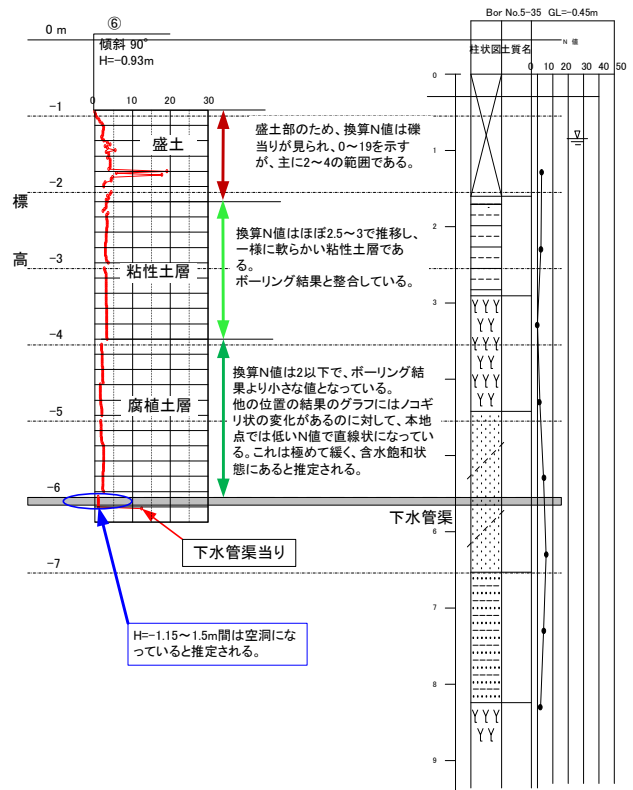


図 13 試験孔⑥における深度方向への換算 N 値分布

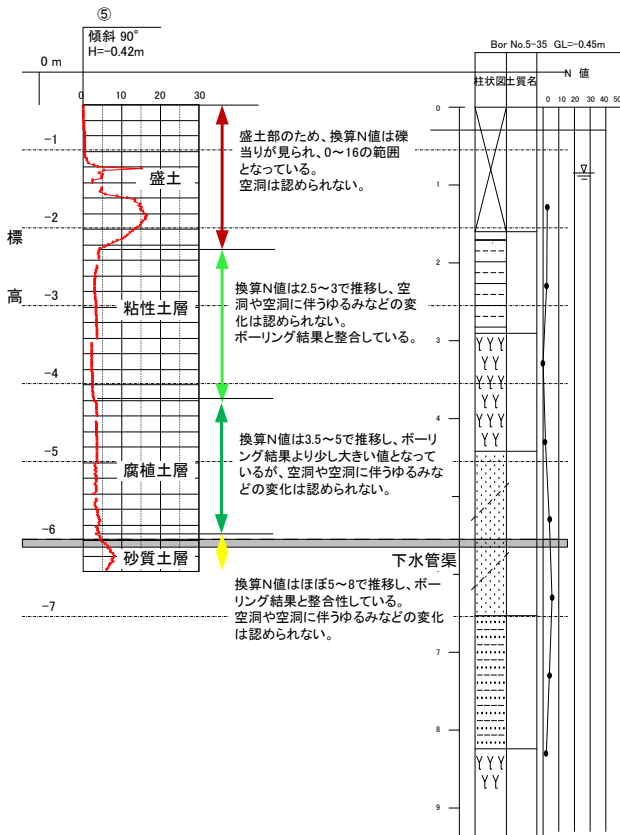


図 12 試験孔⑤における深度方向への換算 N 値分布

試験孔③では、盛土層を除いて、換算 N 値の深度曲線は 2.0 から 5.0 まで緩やかに変化し、途中礫当りによる異

常値があるが、大きく減少変化する箇所は観測されなかった。したがって、試験孔③では、空洞あるいはこれに起因したゆるみは確認されなかった (図 10 参照)。

試験孔④では、盛土層を除いて、換算 N 値の深度曲線は 2.5 から 5.0 まで緩やかに変化し、途中礫当りによる異常値があるが、大きく減少変化する箇所は観測されなかった。試験孔④では、盛土層を含め、空洞あるいはこれに起因したゆるみは確認されなかった (図 11 参照)。

試験孔⑤では、盛土層を除いて、換算 N 値の深度曲線は 2.5 から 5.0 まで緩やかに変化し、大きく減少もしくは変化する箇所は観測されなかった。試験孔⑤では、盛土層を含め、空洞あるいはこれに起因したゆるみは確認されなかった (図 12 参照)。

試験孔⑥は、杭位置の直近 0.5m 離れた箇所では鉛直方向に実施したものである。盛土層を除いて、換算 N 値の深度曲線は標高 -4m 付近まで 2.5 から 3.0 で一様であるが、-4m 以深では先の試験孔①~⑤と比較して 2.5 以下になっており、-4.5m 付近で減少する等、試験孔①~⑤とは異なる変化が認められる。また、流域下水道の直上 20cm では、換算 N 値が 2.5 から 1 に急変しており、この部分では空洞になっていると考えられる。したがって、杭から 0.5m 離れた試験孔⑥においては流域下水道の上位 2m からゆるみが生じ、流域下水道近傍には空洞になっていると考えられる (図 13 参照)。

3.5 地盤内空洞の判定

図 14 は、試験孔①~⑥の結果を流域下水道の中心法

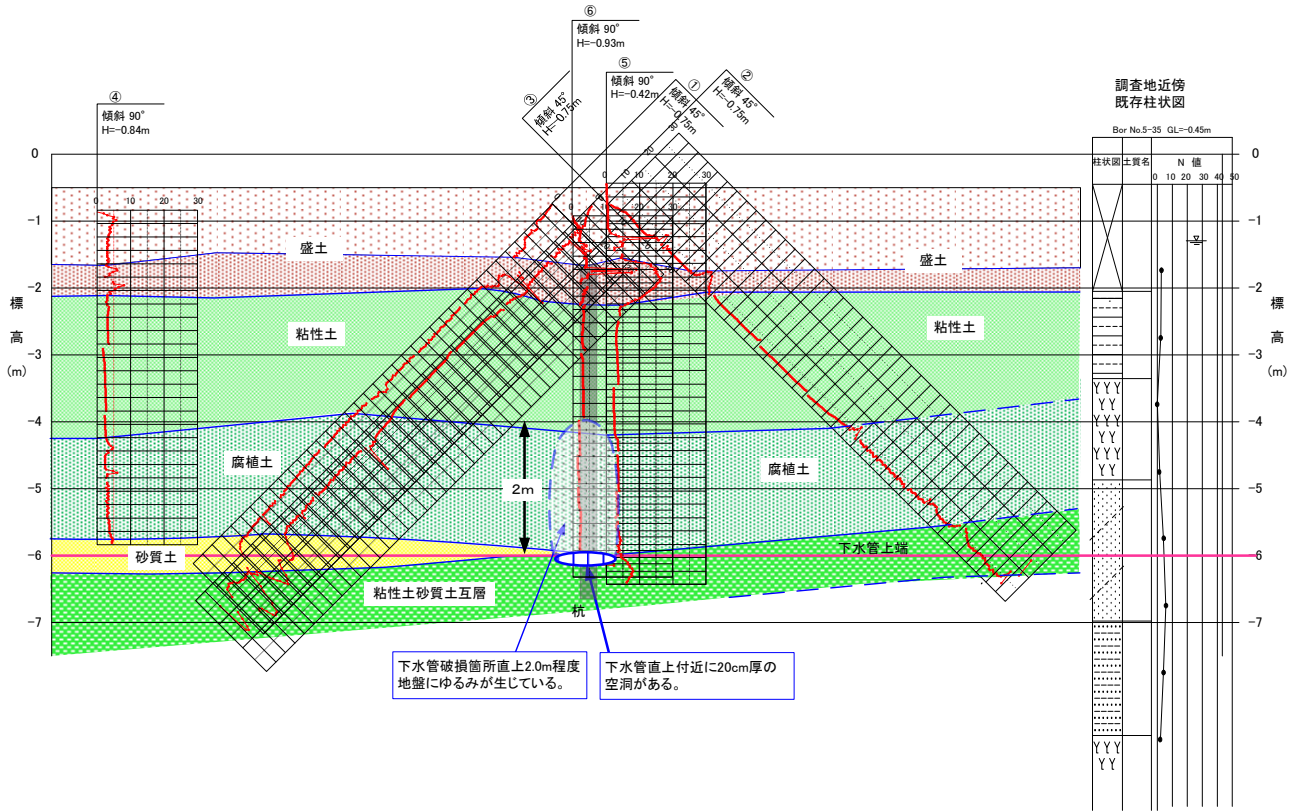


図 14 NSWS 試験結果と縦断地質断面（下水道管中心線に投影）

線に投影，作成した地質縦断図を示している。試験孔①において，盛土箇所で換算 N 値が 2 以下の非常に軟らかい地盤状況を捉えた。この軟らかい層が流域下水管渠破損の原因で生じたものか否かを検証するため，杭位置を中心に，広範囲に試験を実施した。当現場における流域下水管渠周辺は，近傍の既存試験ボーリングから，緩い砂質土が分布し，そのため，空洞も舗装面下まで拡がっている可能性があると思定されていた（図 4 参照）。しかしながら，破損箇所直上（試験孔①～③）地点および周辺試験孔④～⑤地点の試験結果では，空洞を示唆する極めて軟らかい部分は検出されず，盛土層を除いて，流域下水管渠深度-6m 付近まで，換算 N 値が 2.5 から 5 の軟らかい粘性土と腐植土を主体とした一様な地層構成であると判断された。一方，杭直近（試験孔⑥）では流域下水管渠の直上 20cm で空洞を検出した他，試験孔①～⑤とは異なり，管の上部 2m 付近まで，換算 N 値が 2 以下の非常に軟らかい土質状況となっていることが判明した。したがって，試験段階における空洞・ゆるみの範囲の拡がり，破損箇所上部 2m 程度の範囲に留まっており（図 15 参照），舗装面直下にまで至る拡がりはないと判断した。

4. おわりに

NSWS 試験装置は，従来の原位置地盤調査では得ることが困難であった詳細な地盤情報が提供可能な試験装置であり，今日問題となっている河川堤防，ため池，谷埋め盛

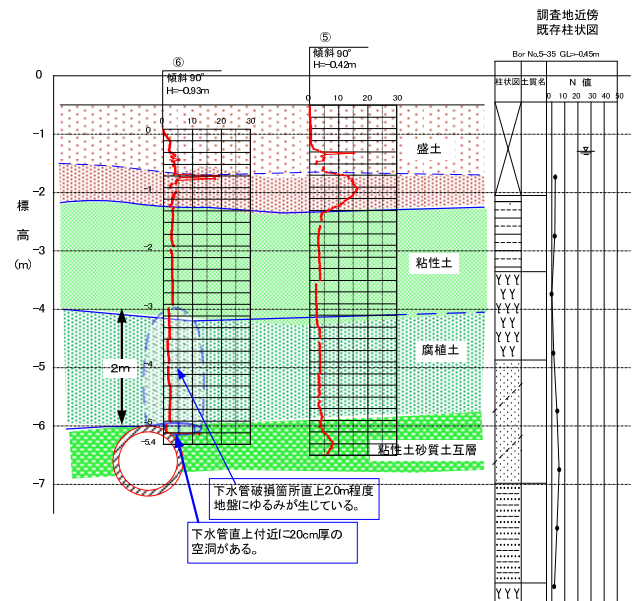


図 15 NSWS 試験結果と横断地質断面

土，急傾斜地腹付け盛土，海岸および河川構造物背面空洞調査，下水等道路埋設物による道路陥没箇所調査等に対して，地盤構造物の再生技術や防災技術を確認する上で有効な調査技術であると考えられる。また，本論文では，NSWS 試験装置を用いた下水道管周辺の地盤内空洞化の原位置地盤調査を実施した。その結果として，原位置における地盤内空洞とゆるみ領域を特定することができた。また，

NSWS 試験装置は JIS G 4051 に規定するスクリーポイントを使用しているため、従来の SWS 試験装置によって取得されるデータと同程度の信頼性を有することは無論、その測定間隔が 2.5cm と細分化され、貫入速度の事前設定により空洞領域の範囲の確定や 0 から 1000N の载荷重による N 値 1 以下の超軟弱領域の検出が可能であった。

今後は NSWS 試験装置の特色を生かし、陥没や崩落による地盤のゆるみと性状変化、境界位置の特定と拡がりの調査と軟弱層から玉石混じり礫層に至る様々な地盤への適用事例を重ねることによって、新たな地盤の測定技術として確立する予定である。

謝 辞

NSWS を用いた原位置地盤内空洞調査においては、関係する多くの各位にご協力をいただいた。ここに記して深甚の謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 佐々木靖人：土層強度検査棒による斜面の土層調査マニュアル(案)(土木研究所資料)，土木研究所，第 4176 号，2010.
- 2) 日本材料学会地盤改良部門委員会：実務者のための戸建住宅の地盤改良・補強工法－考え方から適用まで－，オーム社，2010.
- 3) 近藤巧，大北耕三：地盤内空洞自沈領域の詳細調査方法およびその調査機，地盤工学会誌，Vol.56, No.9, pp.30～31, 2008.
- 4) 近藤巧，大北耕三：地盤内の空洞自沈領域を詳細に検出する原位置地盤調査機の開発，建設機械，No.4, pp.52～57, 2008.
- 5) 地盤工学会地盤調査法改訂編集委員会：地盤調査の方法と解説，地盤工学会，2004.
- 6) 風嵐健志，近藤巧，大北耕三：NSWS による地盤陥没領域の調査，地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2009 発表論文集，pp.101～106, 2009.
- 7) 大北耕三，高清水祐之，篠塚潤，奥野日出：新しいスウェーデン式サウンディング試験(NSWS)による地盤評価に関する基礎的研究，地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2010 発表論文集，pp.145～152, 2010.
- 8) 稲積真哉，穴戸賢一，大北耕三：NSWS を用いた地盤内空洞調査と簡易グラウトによる地盤補修，第 9 回地盤改良シンポジウム論文集，pp.233～236, 2010.

(2011. 1. dd 受付)

In-situ ground investigation for hollow and loosening zones using NSWS testing machine

Shinya INAZUMI¹, Kozo OKITA²

1 Kyoto University, Graduate School of Engineering

2 Okita-Ko Co., Ltd.

Abstract

This paper outlines the development of the NSWS (Nippon Screw Weight System) testing machine, which complies with the SWS (Swedish Weight Sounding) test to determine loading and rotational penetration resistance, and developed as an in-situ ground investigation device to detect super soft zones in the ground including hollows and loosening in detail by allowing operation in the 0-2500N load range, very frequent measuring interval and penetration speed control, which cannot be achieved by the SWS testing machine. Additionally, findings from an in-ground hollow investigation of in-situ ground using the NSWS testing machine are reported in this thesis. As one of the findings from the in-ground hollow investigation of in-situ ground, in-ground hollow zones were identified by using the NSWS testing machine. Also, the machine achieved a conversion N-value measuring interval of 2.5cm (or 3.8cm), determination of ranges of hollow and loosening zones through pre-setting of penetration speed, and detection of super soft zones of conversion N-values 1 and below with a load range of 0-1000N.

Key words: conversion N-value, ground investigation, hollow zone, loosening zone, NSWS testing machine