【012】

全自動ボーリングマシンの開発

－　ワイヤーラインを用いた軟弱地盤の削孔について　その２　－

㈱ワイビーエム　○奈須　徹夫　矢羽田　祥貴
㈱クリステンセン・マイカイ　宮本　哲臣　松熊　晋也
川崎地質㈱　近藤　勉　濱田　泰治

1. はじめに

地質調査業界では、熟練オペレータの退職と担い手の入職減少が進んでおり、マシン・オペレータ不足や技術伝承の問題が懸念されている[1)]。これらの対策として、機械メーカーの立場から、作業負担の低減や作業工数の省略化などに着目し、ワイヤーラインによる全自動ボーリングマシンの開発を進めている。これまでも既存ボーリングマシンによる削孔試験を行い、適正な削孔仕様について検討を行ってきた[2)]。今回は新たに開発した電子制御可能な試作実験機により、前回の最適仕様での削孔への適用性などについて実証試験を行ったので報告する。

2. 試作実験機について

ワイヤーライン方式で削孔する場合の作業手順や必要な出力、時間など、制御プログラムを作成するための情報を得ることを目的として試作実験機を開発した。

図-1に試作実験機の概要図を、表-1にボーリングマシンの性能および仕様を示す。

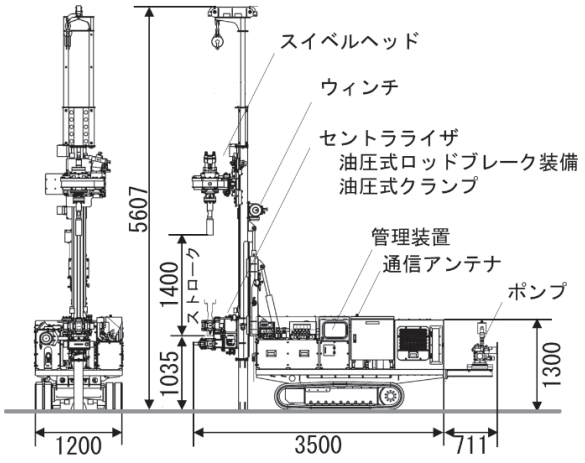

図-1　試作実験機の概要図

表-1　ボーリングマシンの性能および仕様

項　　目	単位	既存機　YWL-200	試作実験機　YWL-30C
掘削深度	m	200	30
回転数（高速・低速）	min-1	800・250	200・45
最大トルク（低速時）	N･m	690	400
最大給圧力	kN	20.7	20.1
寸法（L×W×H）	mm	3400×1800×8260	3500×1200×5620
質量	kg	3720	3100
走行		無し	自走式（クローラ）
掘削ポンプ形式		三連プランジャー　SG-30SV-e	単筒複動ピストン　GP-5
吐出圧力	MPa	4.9	2
吐出流量	L/min	235	40
エンジン出力	kW	28,8kW／2,400min-1	17.7 kW／2,700 min-1
操作方式		手動操作	無線電磁操作
管理装置		無し	タブレットPC

今回開発した試作実験機（YWL-30C）は、電子制御システムにより全ての動作をプログラムで制御することを可能とし､削孔作業中の履歴データは管理装置に表示され、データとして保存される。インターネットを介することで、遠隔地での監視が可能で「見える化」に対応しており、将来の無人化を想定して無線コントローラによる操作とした。

作業負荷低減のため、ロッド接続、オーバーショット投入等の補助作業は立ち姿勢で行えるよう、セントラライザの高さを地上から1m 程度とした。

また、実際の調査現場は狭隘で、搬入車両が調査地点まで近づけない場合が少なくないため、ボーリングマシンは既存機よりも小型化を図り、自走式を標準とした。

ポンプについては、前回の実験では脈動が少ない３連プランジャーポンプを使用したが、試作実験機では単筒覆道ピストンポンプを搭載することとした。

このようなマシンの小型化やポンプ仕様の変更等により、表-1に示すように回転トルクあるいは吐出圧力や吐出流量は、既存機のそれを下回る仕様となった。したがって、既存機と性能や仕様が異なる試作実験機への前回削孔試験で得た最適仕様の適用の可否等について実証試験による確認が必須となった。

3. 削孔試験

試作実験機による実証試験は、佐賀県唐津市原の造成地にあるワイビーエム社有地で実施した。当該地盤は一級河川松浦川の氾濫原にあるため均質な砂地盤が厚く分布し、GL-15m で風化花崗岩層に至る。図-2に事前のボーリング結果、図-3に調査位置図を示す。

本試験においては、新たに開発した試作実験機の削孔特性を確認するため、表-2に示す前回削孔試験での適正順位が1位の最適値と第5位の仕様で削孔し、品質工学による SN 比[3)]で評価することにした。表-3に試験ケースを示す。対象層は、前回と同様に GL-2～5m 区間とし、計測データ（削孔深度・回転数・回転トルク・削孔速度・給圧力・送水量・送水圧・時間）のうち、回転トルクに着目して解析を行った。削孔に際しては、図-4に示す前回と同様のコアバーレルを使用し、先端にはメタルビットを装着した。削孔水にはポリマー系泥材を0.1%添加した。

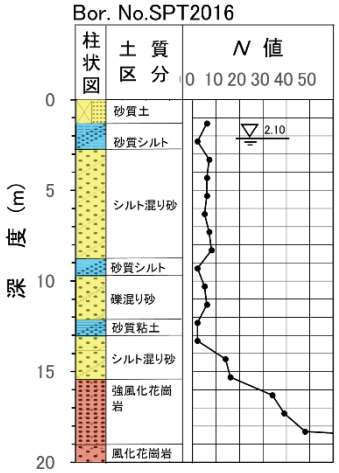

図-2 事前のボーリング結果

図-3 削孔位置図

表-2 前回削孔試験の結果

適正順位	9	3	4	7	2	6	5	8	最適
前回削孔位置No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
削孔速度(m/m)	5	5	5	10	10	10	15	15	15
回転数(rpm)	15	30	45	45	15	30	15	30	45
流量(L/min)	10	20	30	10	20	30	30	10	20
前回試験SN比	7.9	13.4	13.2	9.1	13.6	12.6	12.9	8.9	17.5

表-3 試験ケース

削孔位置No.	削孔速度 (m/m)	回転数 (rpm)	流量 (L/min)	コアバーレル	使用ビット
15	15	15	30	試作型	メタル
16	15	45	20	試作型	メタル

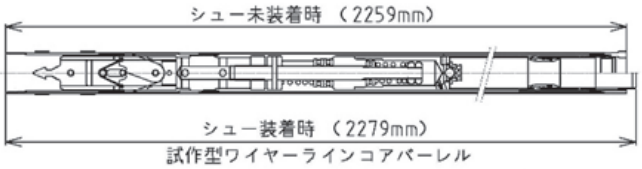

図-4 コアバーレル

図-5に深度とトルクの関係を示す。GL-2～5m 間でのトルクの分布を比較すると、No.16は、No.15に比べ、全体的にトルクのばらつきが少ない。SN 比は、No.15で15.9db、No.16で25.1db であり、前回の最適値仕様である No.16の方が良好なボーリングと評価でき、前回と同様な傾向を確認することができた。

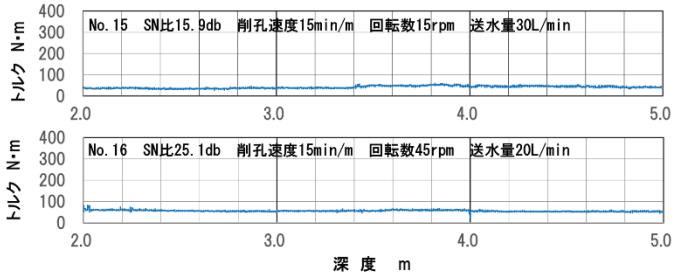

図-5 深度とトルクの関係

今回は、No.16については、GL-5m 以深についても削孔し、実地盤での適用性を確認した。No.16の深度と回転トルクおよび採取率の関係を図-6に示した。メタルビットを用いた現状の仕様で、15.4m まで削孔することができ、本仕様で、緩い砂質土地盤以外の地盤でも対応可能なことが解った。

ただし、10m 付近の砂層には砂礫が介在しており、11m まで掘削後、インナーチューブを引上げ、落下装着を試みたが、インナーチューブがロッド下端まで降下せず、装着できなかった。そのため、ロッドを2m 引上げ、ロッド内を送水洗浄後、インナーチューブを装着せずにアウターチューブのみで GL-11m まで削孔した。当該深度からは、細粒分が極度に少ない2～5mm の亜円礫が採取され、ボイリングが発生したものと考えられた。今後、インナーチューブの引上げ速度の調整とロッド内への注水による水頭確保などのボイリング対策をプログラム化する必要がある。その他、砂礫層を掘進中に削孔水が逸水したため、削孔水を大量に供給した。併せて逸水防止策のシステム化も必要である。

GL-15.4m では、φ30mm 以上の亜円礫からなる礫層のため、掘進が困難となり、削孔を中断した。今後、メタルビットからダイヤモンドビットへの変更などを行い、礫層などにも対応していく必要がある。

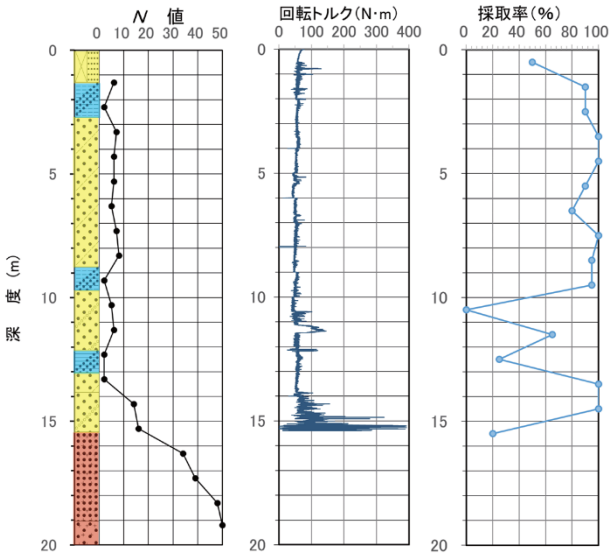

図-6 深度と回転トルクおよび採取率の関係

4. まとめ

試作実験機で削孔試験を実施した結果、2018年度に得た最適仕様が適用できることが確認できた。また、N 値<10の緩い砂質土以外の地盤についても概ね良好なボーリングができた。ただ、礫層などでのメタルビットからダイヤモンドビットへの変更、逸水防止対策技術などについて、従来のボーリング技術を自動化プログラムに取り入れる必要があり、地質調査専門家の知見収集と応用が必要である。また、作業時の地上高が1.3m と高いため、図-4に示したコアバーレルの短尺化が必要である。

《引用・参考文献》

1) 岩崎公俊:技術伝承に関わる全地連の取り組み, 地盤工学会誌,65-3,2017.5

2) 奈須徹夫・他:全自動ボーリングマシンの開発 ―ワイヤーラインを用いた軟弱地盤の削孔について ―, 全地連「技術フォーラム2020」Web, 2020.9

3) JISZ9061 新技術及び新製品開発プロセスのための統計的方法の応用―ロバストパラメータ設計(RPD),2016.12

【013】

全自動ボーリングマシンの開発

－　軟弱地盤削孔用ワイヤーラインツールスの開発について　－

㈱クリステンセン・マイカイ　○宮本　哲臣　　松熊　晋也
㈱ワイビーエム　　矢羽田 祥貴　　奈須　徹夫
川崎地質㈱　　近藤　　勉　　濱田　泰治

1. はじめに

地質調査業界では、熟練オペレータの退職の増加と新規入職者の減少が進んでおり、オペレータ不足と技術伝承の問題が懸念されている[1)]。その対策として全自動ボーリングマシンの開発を進めており、削孔方式として、孔壁崩壊事故のリスクが小さく、ロッド昇降回数が少ないワイヤーライン方式を採用した[2)]。開発に際して、従来のワイヤーラインツールスは掘進対象を岩盤としており、土砂削孔システムの開発が必要不可欠であった。本報告では、土砂削孔用に新たに開発したワイヤーラインツールスについて報告する。

2. 開発方針

ワイヤーラインツールスの開発に際しては、従来の調査品質に近づけるため、一般に普及しているスリーブ式二重管サンプラーの仕様と同等とし、コア径を65㎜、1回あたりの採取長を1m に設定し、標準貫入試験に用いるSPT サンプラー（外径51±1㎜）が挿入できるようメタルビットの内径は71㎜ とした。

従来の3重管式ワイヤーラインコアバーレル（HQ-3）の採取コア径は61.1㎜ であるが、インナーチューブ内径に余裕があったため、これをベースに開発を進めることとした。また、削孔深度は最大30m とした。図-1に、従来のワイヤーラインツールス（HQ-3）を示す。

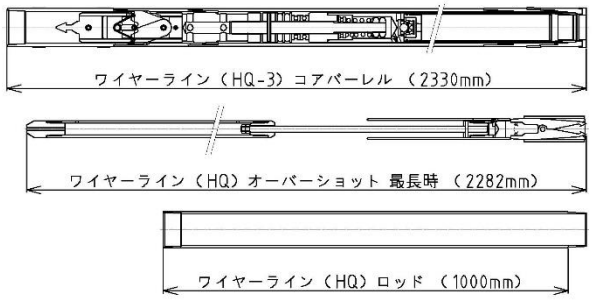

図-1 従来のワイヤーラインツールス（HQ-3）

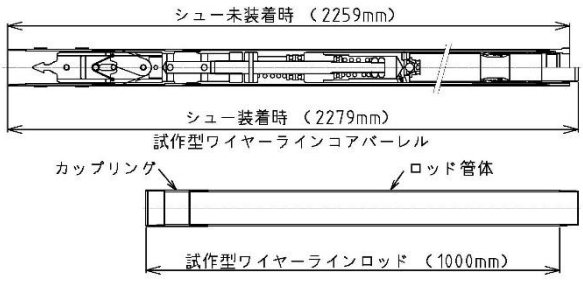

図-2 試作型ワイヤーラインコアバーレルとロッド

3. 試作型の開発

図-2に試作型ワイヤーラインコアバーレルとロッドを示す。試作型ワイヤーラインコアバーレルは、従来のワイヤーラインコアバーレル（HQ-3）の内管であるインナーチューブ（外径73.0㎜、内径66.9㎜）を使用することにした。一方、その外管であるアウターチューブおよびロッドについては、最大削孔深度が30m と浅く、従来のロッドに要望されていた強度は不要であることから薄肉化し、ロッドジョイントのネジ強度不足対策として、カップリング接続方式を採用した。

従来のワイヤーラインコアバーレル先端には、コアリフターケースおよびコアリフターを取り付けるが、当該コアバーレルでは、スプリングにより突出稼働するシューを取り付けることにより、常にビットから先行するシューにより土砂の流出を防ぎ、コア採取率の向上を図るようにした。

コア切りの際には、従来のワイヤーラインコアバーレルと同様にスプリングによって接続されたインナーチューブ全体がビット方向にスライドし、ビット内面の所定位置にコアリフター先端部が係合してコア切りの荷重を受ける構造とした。

4. 改良型の開発

全自動ボーリングマシンの試作実験機の作業性から、試作型ワイヤーラインコアバーレルの短尺化が必要とされた。対策として、ヘッド部の短尺化を行い、改良型コアバーレルを開発した。図-3に試作型と改良型のヘッド部の機構を、図-4に改良型ワイヤーラインコアバーレル

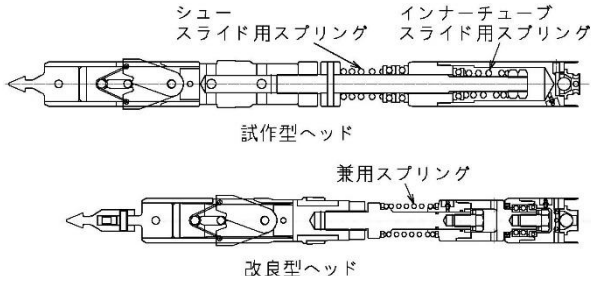

図-3 試作型と改良型のヘッド部機構

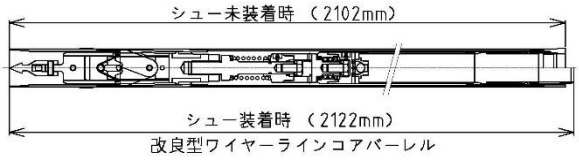

図-4 改良型ワイヤーラインコアバーレル

改良型では、試作型において採用したシュー稼働用とコア切り用の2つのスプリングが担う機能を1つのスプリングによって兼用する新機構を採用している。

改良型では、試作型とスプリング、給水孔等が異なるため、これまでの試作型を用いて求められた最適仕様での適用性等について確認することが必須であったため、改めて削孔試験を実施した。

5. 削孔試験

削孔試験は、佐賀県唐津市原の造成地にあるワイビーエムの社有地で実施した。当該地盤は、一級河川松浦川の氾濫原に位置し、均質なゆるい砂質土が厚く分布する。

図-5に事前のボーリング結果、図-6に削孔位置図を示した。

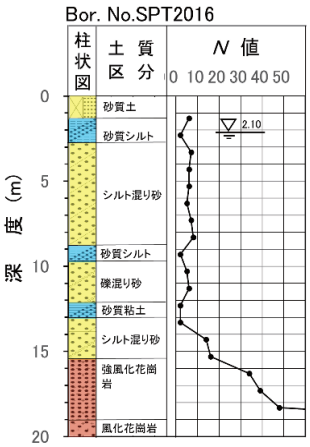

図-5 事前のボーリング結果

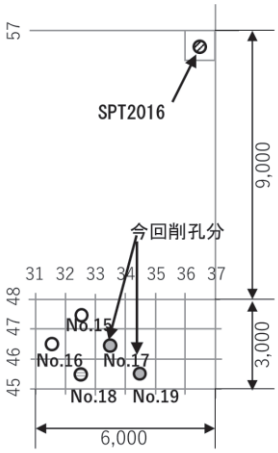

図-6 削孔位置図

表-1 試験ケース

削孔位置No.	削孔速度 (min/m)	回転数 (rpm)	送水量 (L/min)	コアバーレル	使用ビット
17	15	15	30	改良型	メタル
19	15	45	20	改良型	メタル

表-1に試験ケースを示す。当該試験では、改良型ワイヤーラインコアバーレルでの削孔特性を確認するため、2018年度に求めた削孔仕様の適正順位が1位の最適値と第5位の2つの仕様で削孔し、品質工学による SN 比で評価した[2]。ここに、No.17が第5位、No.19が最適値の仕様である。

削孔に使用するボーリングマシンは、今回開発の試作実験機[3] を用い、GL-2.0～GL-5.0m 間でのトルクの分布を比較する。また、No.19については、継続してその下層まで削孔した。コアバーレル先端にはメタルビットを装着し、削孔水にはポリマー系泥材を0.1%添加した。

図-7に深度とトルクの関係を示す。SN 比は、No.17の17.0db に対して、No.19では20.3db と大きく、最適値仕様である No.19の方がボーリングは良好であると判定でき、これまでの削孔試験結果と同様の傾向を確認した。

図-8に深度と回転トルクおよび採取率の関係を示す。従来の最適値（削孔速度15min/m、回転数45rpm、送水量20L/min）にて15.8m までの削孔を行った。

GL-1m～-10m 間および GL-12m～14m は採取率90%以上を確保し、良好なボーリングが行われている。

GL-11m の細粒分が極めて少なく、2～5mm の亜円礫からなる層では、コアバーレル引上げ時に試料が脱落した。また、15.8m では、φ30mm 以上の亜円礫からなる層にて削孔困難となり、削孔試験を中止した。

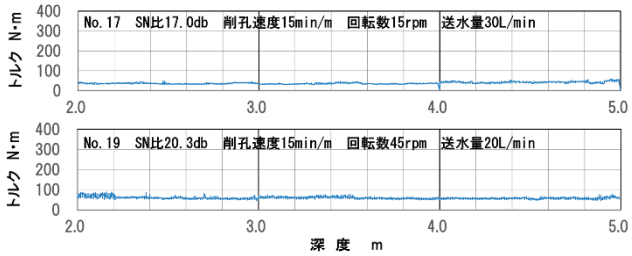

図-7 深度とトルクの関係

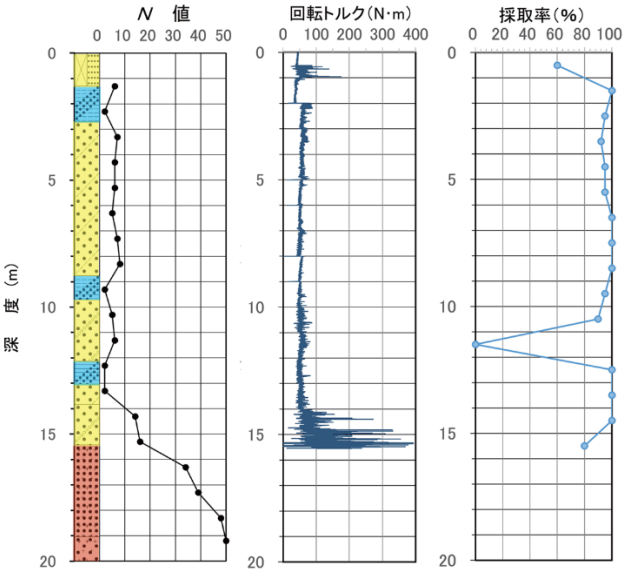

図-8 深度と回転トルクおよび採取率の関係

6. まとめ

今回、全自動ボーリングマシンの開発の一環として、土砂削孔に適した改良型ワイヤーラインコアバーレルを開発した。削孔試験の結果、2018年度に求めた最適な削孔仕様に適用し、緩い砂地盤以外でも削孔可能であることが確認できた。一方で、礫層での削孔については、試料の脱落や削孔が困難となり課題が残った。

今後も、全自動ボーリングマシンの開発と連携し、地質調査専門家の意見なども交えながら、ワイヤーラインツールスの普及に向けて改良を継続していく所存である。

《引用・参考文献》

1) 岩崎公俊:技術伝承に関わる全地連の取り組み, 地盤工学会誌,65-3,2017.5

2) 奈須徹夫・他:全自動ボーリングマシンの開発 ― ワイヤーラインを用いた軟弱地盤の削孔について ―, 全地連「技術フォーラム 2020」Web, 2020.9

3) 奈須徹夫・他:全自動ボーリングマシンの開発 ― ワイヤーラインを用いた軟弱地盤の削孔について その2 ―, 全地連「技術フォーラム 2021」(大阪), 2021.9

【014】

全自動ボーリングマシンの開発

－　電子制御ボーリングマシンによる改良地盤の掘削動作について　－

㈱ワイビーエム　○矢羽田　洋貴　奈須　徹夫
㈱クリステンセン・マイカイ　宮本　哲臣　松熊　晋也
川崎地質㈱　近藤　勉　濱田　泰治

1. はじめに

地盤調査業界における、熟練オペレーターの退職と担い手の入職減少によるオペレーター不足[1]が深刻化する中、その対策として、全自動ボーリングマシンの開発を進めている[2]。全自動運転に必要な自動化プログラムの作成に際して、試作実験機を使用した削孔試験により、作業フローの確認、プログラムの検証を行った。また、発生トラブルの対処動作についても同様に確認した。本報では、その削孔試験での検証結果について報告する。

2. 自動制御について

従来のボーリングマシンでは、レバー操作やコックの開閉など全ての操作をオペレーターの手動操作で行い、油圧や送水量の調整をしながら削孔作業を行ってきた。今回、これらの動作を自動化するために、試作実験機には、機械全ての動作を電子制御できるよう、電磁油圧機器とそれを制御するためのコンピュータ(PLC)を搭載し、また、将来の無人化を見据え、コントローラは無線方式とした。さらに、計測センサーの掲載およびモニター付きコンピューターにより、削孔速度や回転数などの削孔に伴う計測データの取得や監視を可能とした。ボーリングマシンの制御機構について従来マシンとの比較表を表-1に示す。

表-1 ボーリングマシンの制御機構の比較表

	従来のボーリングマシン	電子制御ボーリングマシン
運転	手動	自動・電子制御
操作	レバー・コック操作	無線コントローラ
足回り	接地	キャタピラ
運転状態監視	目視	管理装置
削孔記録	写真・日報	管理装置

マシンセットからの削孔フローを図-1に示す。今回は「③削孔」における通常作業および削孔中のトラブル回避のための動作対応の自動化について実証試験を行った。

全自動による通常削孔時の制御フローを図-2に示す。マシン搭載の管理装置に削孔仕様（削孔速度V、回転数R、送水量Q）を入力しておき、削孔開始状態にセット後、無線コントローラから削孔開始操作を指示すると自動制御が始まる。はじめに、送水により孔内土砂を排出し、回転動作を行った後、削孔仕様（V、R、Q）を満たす一定速度制御により削孔を行う。削孔長が1m（ロッド長）に達するとコア切りのためのロッド上昇、続いて孔内土砂を排出するための送水・回転を行う。これら一連の動作を一括して制御することが可能である。

土砂排出動作終了後、セントラライザとスイベルヘッドの動作により、ロッド切り・ロッド脱着まで自動で行う。図-1に示すその後の工程となる④オーバーショット落下～⑧ロッド追加装着の動作は手動で対応しており、⑧の作業終了後、自動運転による削孔を再開する。

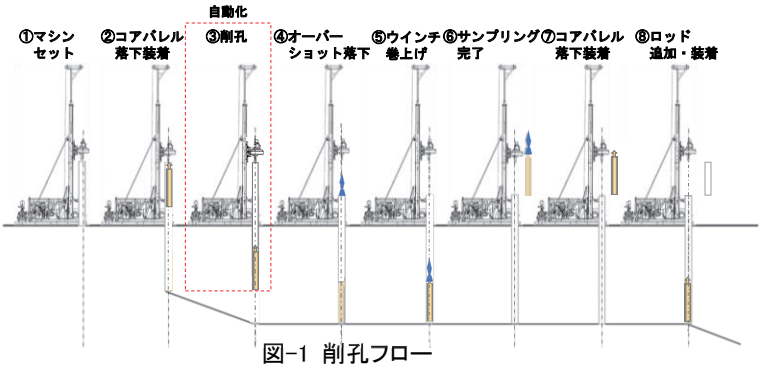

図-1 削孔フロー

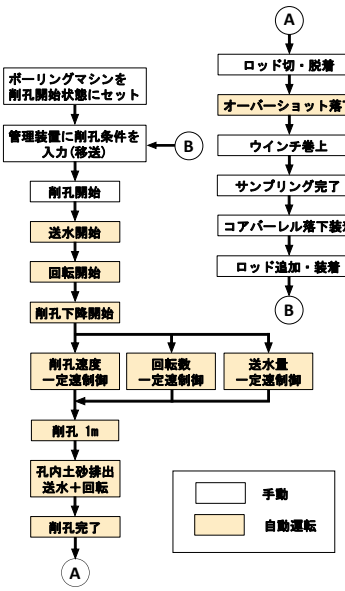

図-2 制御フロー（通常削孔）

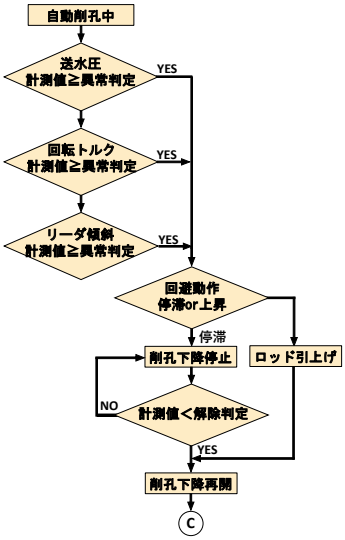

図-3 制御フロー（トラブル時）

削孔中には、回転拘束や掘進不可（機械浮き上がり）、送水圧上昇などのトラブルが想定されるが、これらを回避するための制御フローを図-3に示す。

「回転トルク」「リーダ傾斜角度」「送水圧」の上限値を各々設定し、自動削孔中に上限値を超過した時点で、自動削孔の停止またはロッド引上げによるトラブル回避を制御できるようにした。監視している計測値が上限値から回避動作解除値まで下がると削孔を再開する。

3. 削孔試験

試作実験機の削孔試験は佐賀県唐津市原の造成地にあるワイビーエム社有地で実施した。

計測システムを図-4に示す。ボーリングマシンの操作は無線コントローラで行い、ボーリングマシンに搭載された各種センサーをコンピューターに取込み、管理装置でデータ計測（回転数・回転トルク・削孔速度・給圧力・送水量・送水圧・時間）を行う。計測状況はSIM搭載の遠隔モニターで監視し、自動化プログラムの調整を専用のPCで行った。

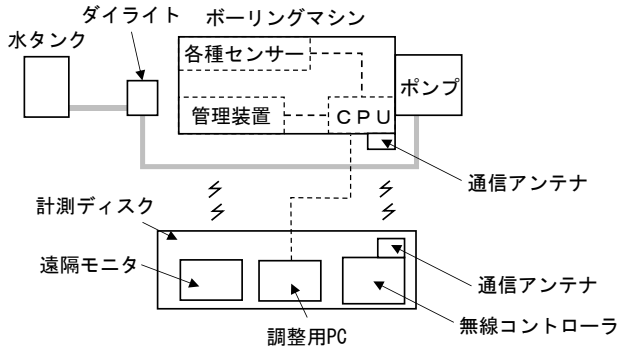

図-4 計測システム

削孔中のトラブルが起きやすい硬質地盤（深層混合処理工改良柱体）に対してメタルビットを使用して削孔試験を行った。ボーリングの3要素（回転・貫入・送水）のいずれかが上限値に達した場合のみをトラブルと判定し、逸水についてはトラブル対処から除外した。

削孔諸元の深度方向の変化を図-5に示す。軟岩相当の強度を有する改良地盤に対して、土砂削孔で得た最適仕様（V=15min/m, R=45rpm, Q=20ℓ/min）で、メタルビットを装着し、自動制御による一定速度削孔を行った。コア観察の結果、平均採取率は97%、平均RQD値は84%であった。最適仕様は改良地盤に対しても有効であることが確認できた。

当初、コア切りのためのロッド引上げ動作を5cm、削孔前・削孔後の孔内土砂の排出のための送水動作を20ℓ/min×30秒と設定していたが、削孔開始時の回転トルクと送水圧に上昇が見られる場合があった。土砂の排出不足と見られ、深度・対象土等により、送水動作の時間設定を変えるようプログラム修正する必要がある。

次にトラブル対処への上限値として、回転拘束の判定は発生トルク T≧300N/m、貫入不可（機械浮き上がり）の判定をリーダ傾斜角度φ≧0.5°、送水圧上昇の判定を送水圧P≧0.5MPaとした。異常判定後の回避動作を図-6に示した。GL-15.2m～-15.4mにて、トルク上昇が2回、機械の浮き上がりが2回発生した。この間の異常判定から異常解除判定までに、合計8分程度の時間を費やした。今後、削孔時間を予測する場合、土質や地盤強度等により、作業効率を設定するなどの対応が必要である。

当該削孔試験で採取したコアの一軸圧縮試験結果から、当該仕様ではqu≦5,000kN/m²までは、削孔可能であることが判明した。地盤強度が高くなる場合、ダイヤモンドビットへの変更も必要と考える。

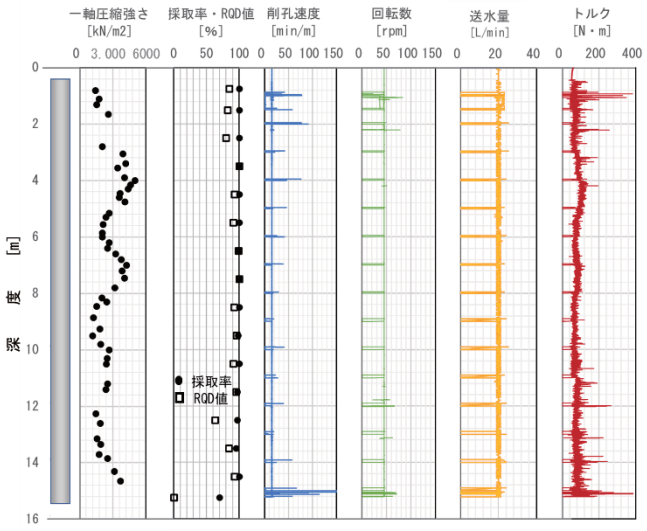

図-5 削孔諸元の深度方向の変化

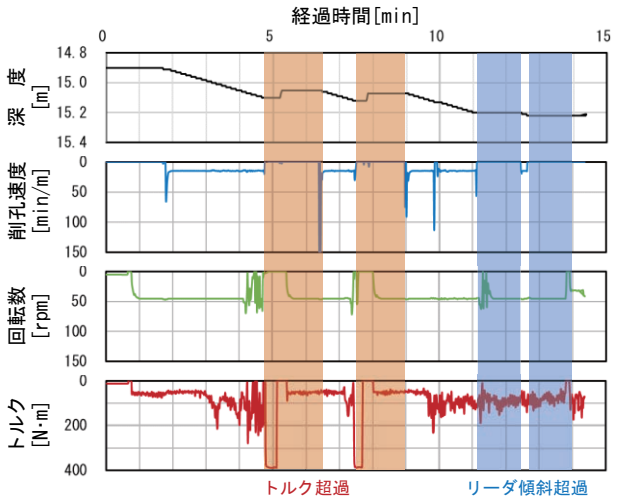

図-6 異常判定後の回避動作（15m～15.2m）

4. まとめ

試作実験機で削孔試験を実施した結果、土砂地盤の最適仕様（メタルビット、削孔速度 V=15min/m、回転数R=45rpm、送水量20ℓ/min）の場合、改良強度qu≦5,000kN/m²の範囲で削孔できた。削孔時の制御としてコア切り動作、土砂排出のための送水動作が必要であることが確認できた。また削孔負荷に対して、トルク、リーダ角度、送水圧を監視し、設定した上限値を超えた場合に停滞、ロッド上昇動作が有効であることが分かった。

オーバーショットの挿入やロッド追加等も含めた全自動化に向けて、今後も引き続き開発を進めていく所存であり、特に削孔負荷が高い時の適切な対処、泥水や逸水管理等の自動化については地質調査専門家の知見収集と応用が必要と考える。

《引用・参考文献》

1) 岩崎公俊：技術伝承に関わる全地連の取り組み，地盤工学会誌,65-3,2017.5

2) 奈須徹夫・他：全自動ボーリングマシンの開発　―ワイヤーラインを用いた軟弱地盤の削孔について　その２―，全地連「技術フォーラム2021」大阪，2021.9

【015】

サウンディング試験から得られる N 値の換算リスク

関東地質調査業協会 技術委員会　○水江　邦夫，橘　久生，調　修二
中川　渉，河野　寛

1. はじめに

各種サウンディング試験は，試験別，土質別による実証実験や研究成果などから N 値との相関式が提案されている。しかしながら，土質や試験機構などの条件によって，相関性にかなりのばらつきがあることが見受けられる。この相関式を利用して得られた換算 N 値から，設計用の地盤定数が設定されるケースも多くみられる。

本報は，各サウンディング試験から得られる換算 N 値の比較結果や，ばらつきの影響要因から，換算値の適用について提言するものである。

2. サウンディングと標準貫入試験との相関式

動的および静的なサウンディング試験から得られる N_d や q_t と標準貫入試験の N 値との相関式は，以下の表にまとめられる（表-1，表-2）。表に示すように土質の違いや，試験器によっては相関式が複数提案されており，その範囲も幅で示されるなど,相関性にばらつきがあるといえる。

表-1　動的サウンディング試験と N 値の相関式 [1)]

仕様	試験名	N 値相関式
動的サウンディング	鉄研式動的コーン貫入試験	大　型　$N=0.87N_d$ 中　型　$N=0.1N_{d35/30}$ $2N_{d35/30}=N_{d70/30}$
	オートマチックラムサウンディング	$N=N_d$
	大型貫入試験	$N=1.5\ N_d$　（砂） $N=2.0\ N_d$　（砂礫） $N=(N_d-2.7)/1.54$ もしくは $N=(N_d-2.8)/0.9$　（砂質土） $N=(N_d-0.7)/3.17$ もしくは $N=(N_d-3.1)/1.65$　（粘性土）
	中型貫入試験（ミニラムサウンディング）	$N=(N_d-3.5)/1.62$　（粘性土） $N=(N_d-3.1)/0.95$、 $N=(N_d-2.5)/0.97$ もしくは $N=(N_d-3.9)/0.89$　（砂質土）
	土研式動的コーン貫入試験	$N=0.8N_d$
	簡易動的コーン貫入試験	大久保ら　$N=(0.33\sim1)N_d$ 新　$N=0.67N_d$ 岡田ら $Nd\leqq4$：$N=0.50N_d$（礫質土） $N=0.66N_d$（砂質土） $N=0.75N_d$（粘性土） $Nd>4$：$N=0.7+0.34N_d$（礫質土） $N=1.1+0.30N_d$（砂質土） $N=1.7+0.34N_d$（粘性土） 甚野ら　$N=1.50\sqrt{N_d}+0.75$

表-2　静的サウンディング試験と N 値の相関式 [1)]

仕様	試験名	N 値相関式
静的サウンディング	機械式コーン貫入試験	$N=0.25\ q_c$（MN/m^2）
		Kruizinga　$N=(2\sim5)\ q_c$（MN/m^2）　（粘性土）
		$N=(1\sim5)\ q_c$（MN/m^2）　（砂質土）
		$N=(0.56\sim5)\ q_c$（MN/m^2）　（礫質土）
		室町　$qc/N=5.48+1.36\log D_{50}$（kg/cm^2）
	スクリューウエイト貫入試験	福田　$N=0.002W_{sw}+0.067N_{sw}$（礫質土、砂質土）
		$N=0.003W_{sw}+0.050N_{sw}$（粘性土、礫混じり粘性土）
		上田　$N=0.318N_{sw}^{0.755}$
		三木　$N=1/12N_{sw}$　（砂）
		$N=1/9N_{sw}$　（赤土）$N_{sw}<90$
		立元　$N=0.27N_{sw}-2$　（鉱さい）$N_{sw}<90$
		新納　$N=0.300N_{sw}^{0.604}$　（粘性土）
		$N=0.755N_{sw}^{0.345}$　（砂質土）
	電気式コーン貫入試験	$N=0.341I_c^{1.94}(0.001q_t-0.2)^{(1.34-0.0927I_c)}$

3. 各種コーン貫入試験の整理

（標準貫入試験の N 値と動的貫入試験 N_d の比較）

N 値と各種コーン貫入試験結果の相関性について以下に述べる。

各動的貫入試験は,土質によって N 値との相関が大きくばらついている（図-1参照）。粘性土（青色系統）の N_d が大きく，礫質土（オレンジ系統）の N_d が小さい傾向で，砂は粘性土，礫質土との中間的な傾向になることが図から判断される。また，静的コーン貫入試験結果の q_t 値との相関にも大きなばらつきが認められる。試験種別では，N 値に対して機械式コーン（ダッチコーン）結果の q_t 値より電気式コーン（CPTU）の q_t 値が大きい傾向がある（図-2参照）。

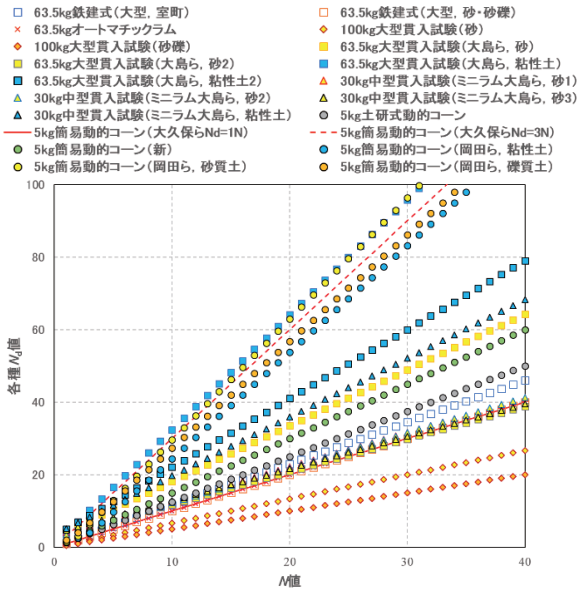

図-1　N 値と動的貫入試験 N_d との相関図

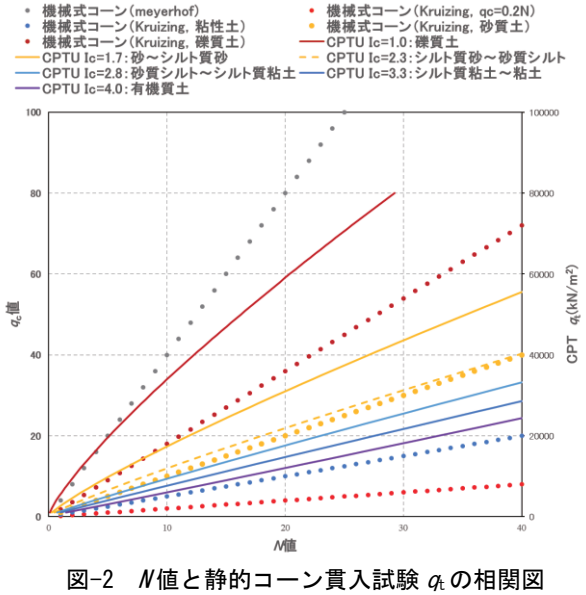

図-2　N 値と静的コーン貫入試験 q_t の相関図

また，土質的にみると，動的貫入試験の場合と同様に，粘性土→砂質土→礫質土の順に q_t が大きくなる傾向も認められる。

4. 動的貫入試験の打撃エネルギーでの比較

動的貫入試験では，試験方法によってハンマーの重量，落下高さ，コーン断面積などが一様ではないため，各種動的貫入試験結果を直接的に評価することには問題がある。そこでここでは，打撃エネルギーに着目してラムサウンディングの打撃エネルギーを標準とした正規化を試みた（図-3）。

$$\text{正規化打撃エネルギー} = \frac{\text{各種サウンディングの単位断面積あたり打撃エネルギー}}{\text{ラムサウンディングの単位断面積あたり打撃エネルギー}}$$

正規化エネルギーで比較しても，各種サウンディング結果はばらつきが大きい。このばらつき原因は N_d のばらつきによるものか，N 値によるものかは不明である。

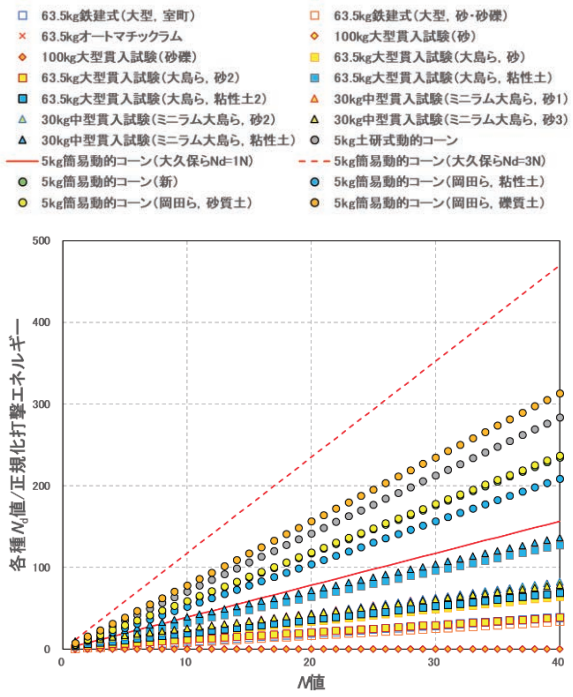

図-3　正規化打撃エネルギーと N 値の比較

5. 静的サウンディングと動的サウンディングの N 値換算に関する留意点

地盤のせん断強度は，土質，水分保持状態，密度，ひずみ速度などに支配されている。特に，地盤内でのせん断中の排水条件によって同じ地盤でもせん断強度の発現に大きな違いが生じる。そこで，ここでは，静的サウンディングと動的サウンディングにおける排水条件の違いに着目して N 値換算における留意点をまとめる。

静的サウンディングは，その試験方法からひずみ速度が比較的遅く，砂・礫質土については排水条件に近いと考えられ，粘性土については非排水条件に近いと考えられる。一方，動的サウンディングは，ランマーを自由落下させる試験方法であることからひずみ速度が速く，砂・礫質土においても非排水条件に近いと考えられる。

前掲の図-1 は各種動的コーン貫入試験結果の N_d 値と N 値の相関を土質別に示したものである。全般に，粘土→砂→砂礫の順に N_d 値に対して N 値が大きく得られる傾向を示している。砂・礫質土においては，標準貫入試験サンプラーが開放型のため，地盤内に貫入するには土粒子を破砕させる必要がある。それがエネルギー損失の要因と想定され，過大な過剰間隙水圧を発生させていることも考えられる。

次に，静的コーン貫入試験結果と N 値との関係については，鈴木ら [2] により平均粒径，細粒分含有率，ロバートソン [3] の土質性状指数 I_c との関係が整理されている。

図-4によれば，平均粒径が小さくなると先端抵抗 q_t に対して N 値が大きく得られる傾向にある。このことは，動的コーン貫入試験結果の N_d 値と N 値の関係を整理した図-1とも符合するものである。

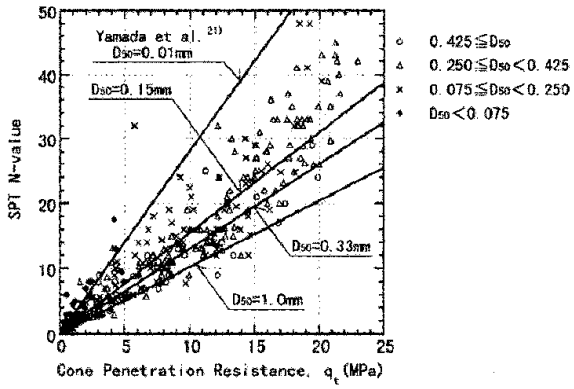

図-4　平均粒径で整理した N 値と先端抵抗の関係 [2]

6. まとめ

標準貫入試験の N 値と各サウンディングとの相関補間的な要素で用いられる場合などでは，N 値を基準とした柱状図と同等にその信頼性を確保することはできる。

ただし，サウンディングの方法によっては簡易的であるが故に試験荷重が限定される面があり，試験深度，対象地盤の土質および締まり具合によって適用に限界があると考えられる。このように，各種試験には一長一短があるため，試験結果を利用する上では，適用する試験方法の特徴を理解したうえで適切な手法を用いて地盤物性値との関係を検討することが強く求められる。

これらの内容を踏まえ，N 値と各種サウンディング結果との相関式は絶対的なものではなく，一つの指標として扱うのが望ましいと思われる。

《引用・参考文献》

1) 一社)関東地質調査業協会:我が国における標準貫入試験の利用実態と留意点,2021発行予定　3章 N 値の換算リスク,pp28～38
2) 鈴木康嗣・時松孝次・實松俊明：日本建築学会構造系論文集第566号，2003.4，pp73～80
3) Robertson，P.K.：Canadian Geotechnical Journal，Vol.27 No.1，1990，　pp. 151～158

【016】

羽根付きコーンを利用した新しいサウンディング試験の開発

(株)東京ソイルリサーチ　○関根　さやか
穴井　和孝
吉田　正
時松　孝次

1. はじめに

日本国内における重量構造物のための地盤調査では標準貫入試験併用のボーリング調査が広く用いられているが、連続データが得られない等の問題点が指摘されている。これに対し、サウンディング試験（例えば、電気式静的コーン貫入試験、オートマチックラムサウンディング試験、スクリューウエイト貫入試験）は、連続データを取得できることやコスト面、作業効率でボーリング調査に優るものの、適応土質や適応深度の点でボーリング調査に及ばないのが現状である。

本報文では、サウンディング試験の長所を維持しながら、適応深度・作業能率を高めた新しいサウンディング試験である羽根付きコーン貫入試験[1)]（以下、「HCPT」と称す）の開発について報告する。

2. HCPT の概要

HCPT は、載荷した軸力と回転トルクによって、写真-1に示すような羽根付きコーンを地盤に回転貫入させるサウンディング試験である。

羽根付きコーンを地盤に回転貫入させる際に羽根付きコーンに作用する軸力、トルクおよび1回転当たりの貫入量に基づいて、地盤の貫入抵抗を測定することができる（図-1）。

写真-1　羽根付きコーン

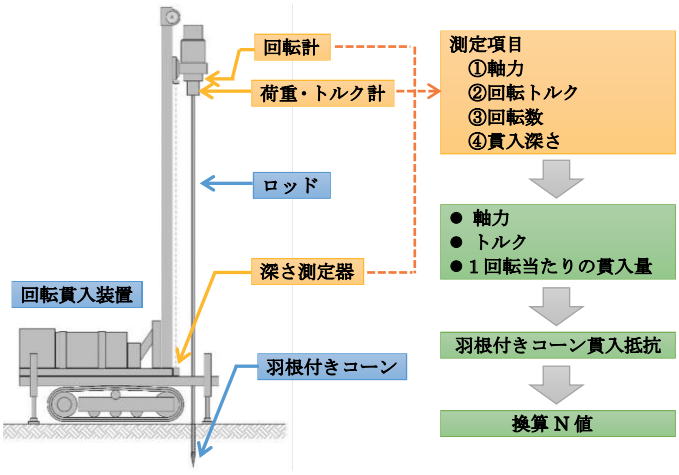

図-1　装置の基本構成、測定項目

3. 地盤の貫入抵抗の評価方法

図-2は、HCPT における載荷軸力、載荷トルクと、それによってロッドおよび羽根付きコーンに生じる力とトルクの模式図である。ロッド上部に載荷軸力と載荷トルクを与えたとき、羽根付きコーンには作用軸力 L_b、作用トルク T_bが働く。作用軸力 L_b と作用トルク T_bにより羽根付きコーンに生じる力とトルクは、貫入抵抗力 R_p、貫入摩擦抵抗トルク T_p、羽根推進力 P_w、羽根摩擦抵抗トルク T_wの4つである。

これらのうち、R_pは地盤の貫入抵抗力で、コーン貫入試験のコーン貫入力 Q_cとほぼ同じ性質を有し、地盤の強さを示す指標のひとつであると考えられる。そこで、力のつり合いおよびエネルギーのつり合いから、貫入抵抗力 R_pを HCPT の測定値（作用軸力 L_b、作用トルク T_b、

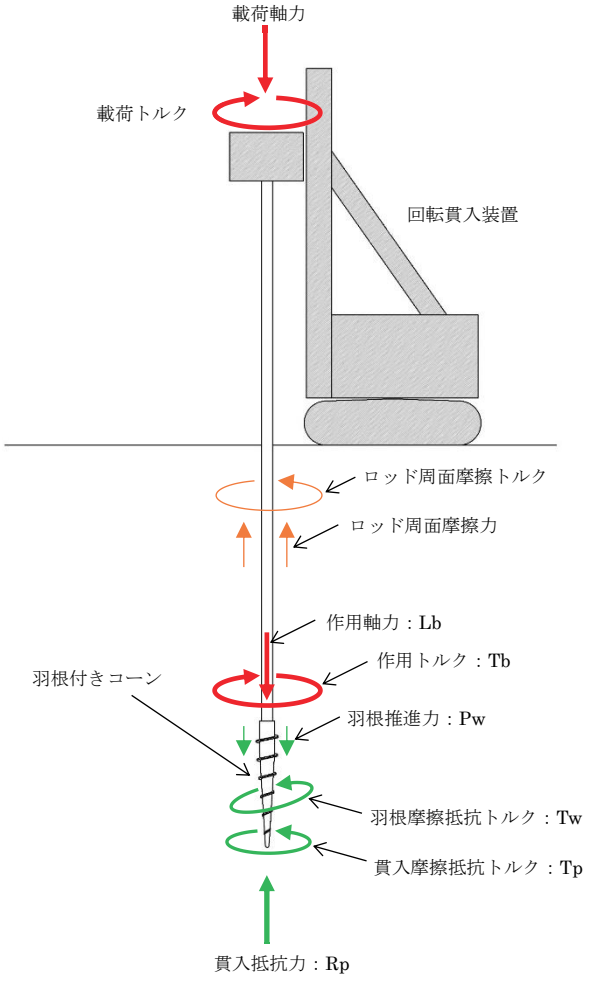

図-2　HCPT における力とトルクの模式図

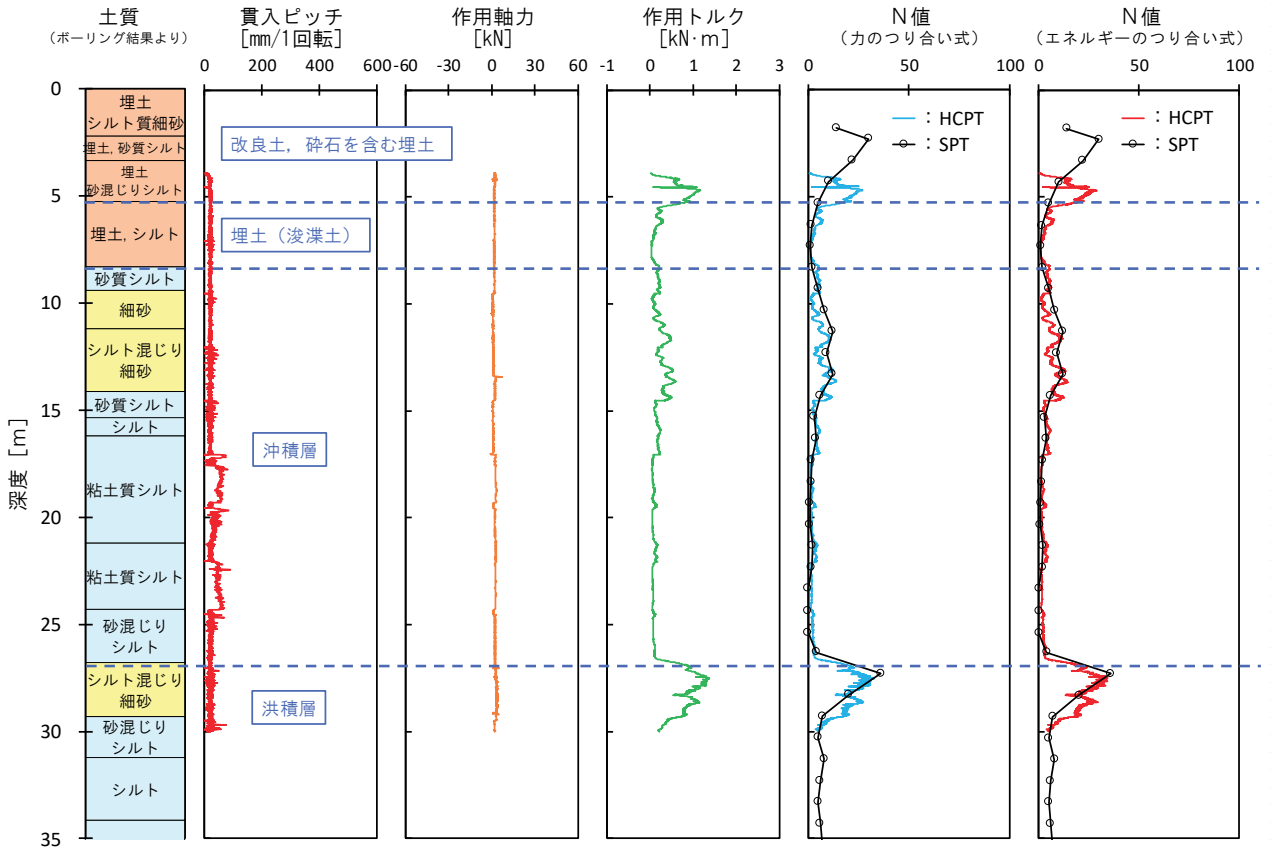

図-3 HCPT 結果とボーリング調査結果（土質、N 値）の深度分布の比較

1回転当たりの貫入量）で表す算定式[1]と、貫入抵抗力 R_p をコーン貫入試験のコーン貫入抵抗 q_c や標準貫入試験の N 値に換算する換算式[1]を開発した。

4. 現場実験結果

臨海部の埋立地における既存のボーリング調査（標準貫入試験併用）地点の近傍にて、HCPT（深度30m）を実施した。図-3は、HCPT 結果と既存ボーリング調査結果の深度分布図を比較したものである。

図中の土質はボーリング調査結果で、当該地の地層構成は、地表から埋土、沖積層、洪積層である。また、N 値欄における HCPT は HCPT 結果より求めた換算 N 値、SPT は標準貫入試験による実測 N 値である。同図より、HCPT による換算 N 値の深度分布は実測 N 値の深度分布と比較的良く一致していることが分かる。

図-4は、実証実験サイト（11地点）の粘性土・砂質土における、HCPT による換算 N 値と標準貫入試験による実測 N 値の関係を示したものである。両者はほぼ1対1の関係を示しており、換算 N 値と実測 N 値の間には良好な相関があると評価される。

5. まとめ

本報告では、羽根付きコーン貫入試験の概要と、HCPT による換算 N 値とボーリング調査の実測 N 値との比較結果について示した。HCPT による換算 N 値と実測 N 値との間には良好な関係が認められ、地盤の貫入抵抗を確認する目的において、HCPT は標準貫入試験を補足する地盤調査になり得ると考えられる。

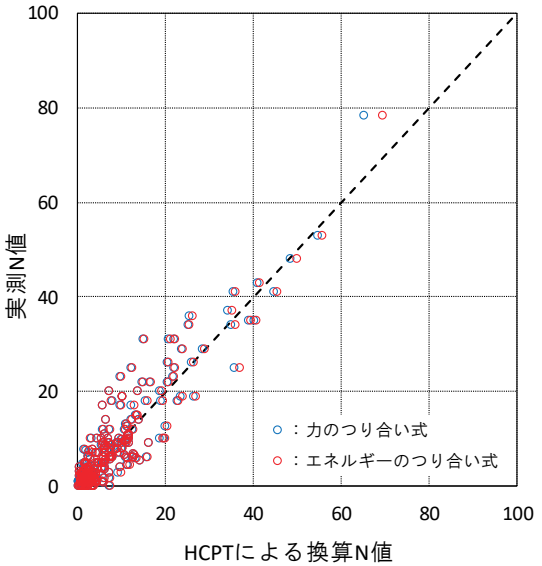

図-4 HCPT による換算 N 値と実測 N 値の比較

一方、HCPT では砂礫・玉石地盤を貫入することが難しい。また、直接・間接ともに土質の観察が行えないため、現状では土質の判別ができない。この点では標準貫入試験用のボーリング調査に及ばない。

今後は、砂礫・玉石地盤にも適用可能となること、土質判別ができることを目標として、本試験の開発・改良を進めていく予定である。

《引用・参考文献》

1) (株)東京ソイルリサーチ, 佐伯英一郎:「地盤調査方法と羽根付きコーン」, 特許第6532637号, 2019.6.19