

関西一部地域で実施された盛土の N_d 値と N 値の関係に関する検討

A Study of Correlation of N_d value and N value about Embankments

Carried out in a part of Kansai Region

沖村 孝 岡野 靖 野並 賢 網野 功輔
Takashi Okimura Yasushi Okano Satoshi Nonami Kousuke Amino

前坂 巖 門田 浩一 片浦 正雄
Iwao Maesaka Hirokazu Kadota Masao Kataura

1. はじめに

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震では、仙台市を中心に東北・関東地方の宅地盛土で多数の変状を生じた。このことから、宅地盛土における地盤調査の重要性が注目されている。盛土地盤の評価をボーリングによって行う場合、精度の高い地盤情報が得られ、かつ工学的な評価が確立しているものの、比較的高価であることが実施上の制約となっている。木造建物等の低層住宅の支持力確認のために一般に行われるスウェーデンサウンディングは、調査が容易であるものの地質の把握ができないことや、貫入能力が低いため、盛土厚が概ね5mを超えるとこれより下部の調査が困難であり、盛土地盤調査としての適性は低い。そこでボーリングに比べて迅速、経済的に地盤の硬軟が判定可能であり、スウェーデンサウンディングよりも貫入能力の高い動的コーン貫入試験(ラムサウンディング)^{1),2)}による調査事例が最近増えている。

動的コーン貫入試験は従来、ボーリング調査の補完や、比較的表層の地盤の硬軟把握に利用されてきた。このような使用方法においては、測定値である N_d 値と工学的指標の関係について十分な配慮が行われなかった。しかし近年、動的コーン貫入試験単独で地盤性状を判断する機会が増えており、有益な工学的指標である N 値と N_d 値との相関関係を把握することが望まれている。関西地区では、宅地耐震化推進事業³⁾で対象とする大規模盛土造成地に対して動的コーン貫入試験が多く採用され、本試験により第一次スクリーニング⁴⁾で絞り込まれた大規模盛土の締固め状況および地下水位の深度が推定され、第二次スクリーニングに向けた絞り込みのための調査データが採取されているところである。しかし、盛土地盤は自然地盤と比べて不均質であることが多く、局所的な礫の混入が N_d 値に影響を与えている可能性がある。また、自然地盤と比べて続成作用は小さいが、これらが N_d 値と N 値の関係に与える影響は十分に検討されていないのが実状である。いくつかの自治体ではこのような不明な点を解消するために、動的コーン貫入試験の近傍で標準貫入試験を実施し、 N_d 値と N 値を比較検討した事例が集められている。

そこで一般財団法人建設工学研究所では、自治体のご協力を得てこのようなデータを提供して頂き、同一地点で実施された動的コーン貫入試験による N_d 値と標準貫入試験による N 値を比較し、両者の相関に与える影響について検討を行った。特に盛土地盤と自然地盤の違いに着目し、トルク補正の必要性や礫あたりの影響の考察を行った。本報告は、その成果の一部である。本検討を通じて得られる成果は、動的コーン貫入試験結果の利用に際して有益な情報を与えることが期待される。なお、大規模盛土造成地で実施され、得られた N_d 値と盛土諸元に関する検討結果は別報にて報告している⁵⁾。また、本文で取り扱うデータは宅地造成盛土を対象としたが、ここで得られる結論は同じ土構造物である道路盛土や鉄道盛土に対しても適用可能と考えられる。

2. 動的コーン貫入試験方法及び既往の研究

2. 1 試験方法の概要

動的コーン貫入試験は、先端にコーンを付けたロッドをハンマーの打撃によって地盤に打ち込み、貫入量と打撃回数との関係から地盤の硬軟を調べる試験である。動的コーン貫入試験の単位面積当たりの打撃エネルギーは次式で定義される。

$$R_d = \frac{MgH}{A} \times \frac{N}{D'} \tag{1}$$

ここに、 R_d : 貫入力 (kJ/m²)、 M : ハンマー重量 (kg)、 g : 重力の加速度 (mm/s²)、
 H : 落下高さ (mm)、 A : 先端コーンの断面積 (mm²)、 N : 所定の D' に達する打撃回数 (回)、
 D' : 所定の貫入深度間隔 (mm)、

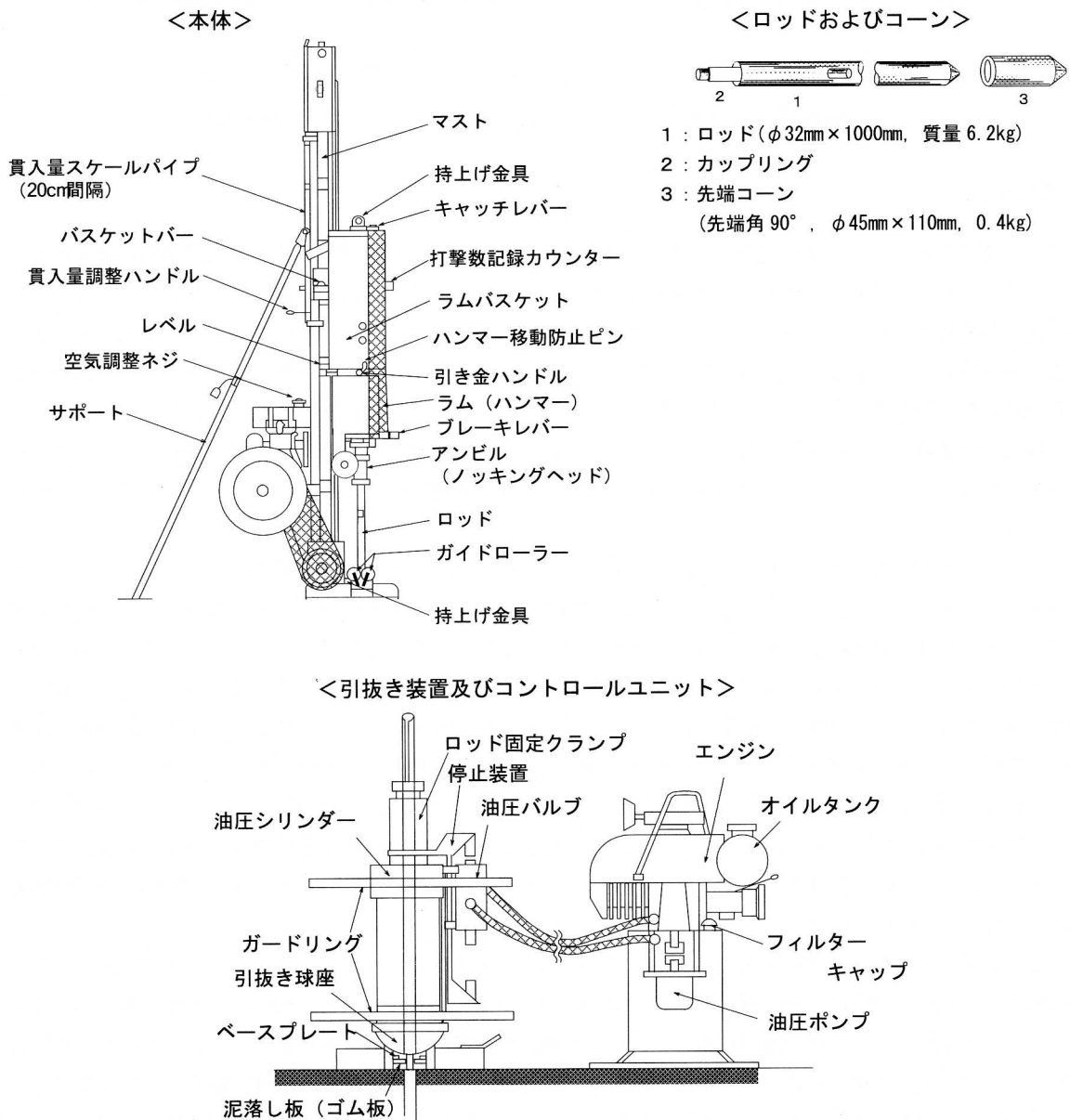


図-1 一般ラム試験装置¹⁾を一部修正

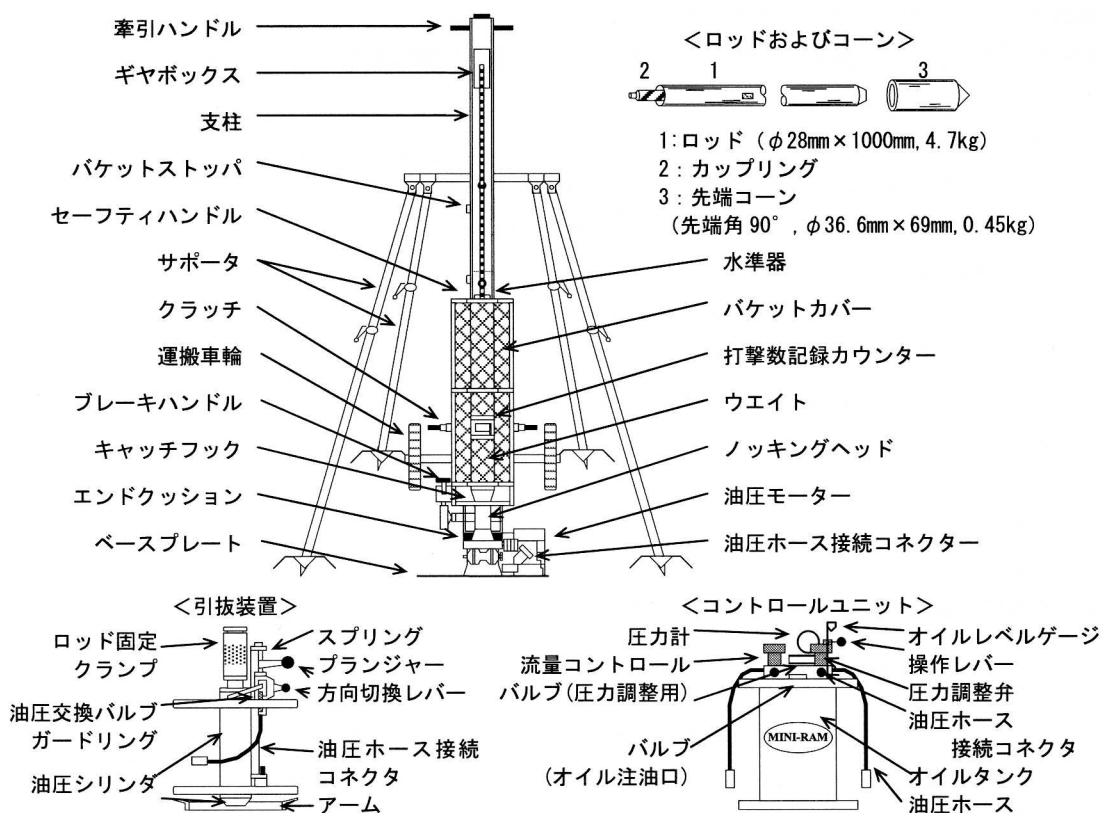
図-2 ミニラム試験装置²⁾を参考に記述

表-1 動的コーン貫入試験装置の仕様

	一般ラム	ミニラム
打撃エネルギー	196(kJ/m ²)	98(kJ/m ²)
試験時の機械高さ	2.8m	2.5m
試験機本体の全幅	0.9m	0.84m
試験機の全重量	210kg	135kg
ハンマーの重量	63.5kg	30kg
ハンマーの落下高さ	50cm	35cm
標準打撃回数	24回/分	24回/分

動的コーン貫入試験は打撃エネルギーの違いに基づき、2種類の試験装置がある。図-1には打撃エネルギーが196(kJ/m²)の試験装置概要図を、図-2には打撃エネルギーが98(kJ/m²)の試験装置概要図を示した。本報文では、前者を一般ラム、後者をミニラムと称することとする。一般ラムは打撃エネルギーを標準貫入試験に準じて設定しており、サウンディングとしては大きな貫入力を有することが特徴である。一方ミニラムは一般ラムと比べて小型であるため、2m四方程度の面積で実施可能であり、振動音もやや小さい等、宅地内の公園や余地で試験の実施に向いている。表-1に、両者の試験装置の仕様を示した。

試験方法は、一般ラムは63.5kgのハンマーを50cmの高さから自由落下させ（ミニラムはハンマーの質量30kg、落下高さは35cm）、20cm貫入するのに要する打撃回数 N_a を測定する。サウンディングロッドは、ハンマーによって機械的に打込むため、人為的誤差の小さいことが特徴である。 N_a 値>5の状態では、ロッドを時計回りに2回転させて次の貫入を行う。回転はトルクレンチを用いて行い、回転に要する最大トルクを測定する。これは、ロッド周辺摩擦による N 値を求め、測定 N_a 値から先端コーン貫入抵抗による N 値を分離計算するためである。ただし、打撃回数が20cm当たり5回

以下の場合、ロッド接続時 1m 毎に 2 回転させる。

打撃回数から測定値 N_d への換算式について、一般ラムの N_d' 値、 N_d 値は次式で求められる¹⁾。

$$N_d' = N_m \quad (2)$$

$$N_d = N_m - 0.04M_r \quad (3)$$

ここに、 N_d' ：一般ラムによって得られる換算 N 値（トルク補正なし）

N_d ：一般ラムによって得られる換算 N 値（トルク補正あり）

N_m ：打撃回数（単位：回）

M_r ：測定したトルク（単位：kg・cm）

次に、ミニラムの N_{da} 値、 N_{db} 値は次式で求められる。なお、ここで示している補正係数は経験的に得られたものである⁶⁾ことに留意されたい。

○砂質土地盤

$$N_{da} = \frac{1}{2} N_m \quad (4)$$

○粘性土地盤（貫入中のロッドの摩擦力を考慮して）

$$N_{db} = \frac{1}{2} N_m - 0.016M_r \quad (5)$$

ここに、 N_{da} ：ミニラムによって得られる換算 N 値（砂質土地盤、トルク補正なし）

N_{db} ：ミニラムによって得られる換算 N 値（粘性土地盤、トルク補正あり）

なお、ミニラムにおいては、対象地盤の土質によってトルク補正の有無が異なっており、試料採取を行わない場合の補正の判断が困難であることが課題として指摘される。

2. 2 既往の研究

N 値と N_d 値の関係に関する検討は、主に宅地の液状化調査の視点から、動的コーン貫入試験の高精度化を目的として実施されている。一般ラムにおいては、特に沖積粘性土層のような強度の小さい粘性土地盤では打撃装置自重の影響が現れ、地盤強度を過小評価する可能性が指摘されている⁷⁾。このことから自重低減した改良機が開発され、粘性土でも N 値と N_d 値の相関性が向上することが報告されている。ミニラムにおいては、周面摩擦による打撃回数の補正方法について、周面摩擦に関する理論式が示されている⁸⁾。一方、N 値と N_d 値の比較に際しては、N 値のばらつきの傾向を把握しておくことが望ましい。人為的誤差に関する検討事例として、30m×60m の敷地で実施した監督者がついた場合とつかない場合の試験結果を比較した場合、両者に無視できないばらつきを生じたことが報告されている⁹⁾。次に地盤の不均質性の影響に関する検討事例として、任意の 2 本のボーリング孔で同一標高ごとに求めた N 値の差を平均した ΔN と交換距離 L の関係から、両者に正の相関が見出されたという報告がなされており^{10), 11)}、N 値のばらつきが地盤の不均質性に影響されていることが指摘されている。これらの報告は、本検討で実施する N 値と N_d 値の比較に際して、ばらつきの影響を考慮した考察を行う必要があることを示唆するものと考えられる。

図-3 には、新潟市の臨港地区埋立地 200m×200m エリアで得られた標準貫入試験の深度方向分布図を示した¹²⁾。本図には、標準貫入試験をコーンブリー法で行ったものと全自動型モンケンで行ったものが混在している。(b) は (a) に示した全調査データのうち、同一試験者によって行われたものを抜粋している。これより、地盤性状に大きな差がない場所で同じ試験者が試験を実施しても N 値はばらついており、N 値は人為的誤差のみならず、機械的誤差も内包していることが指摘される。

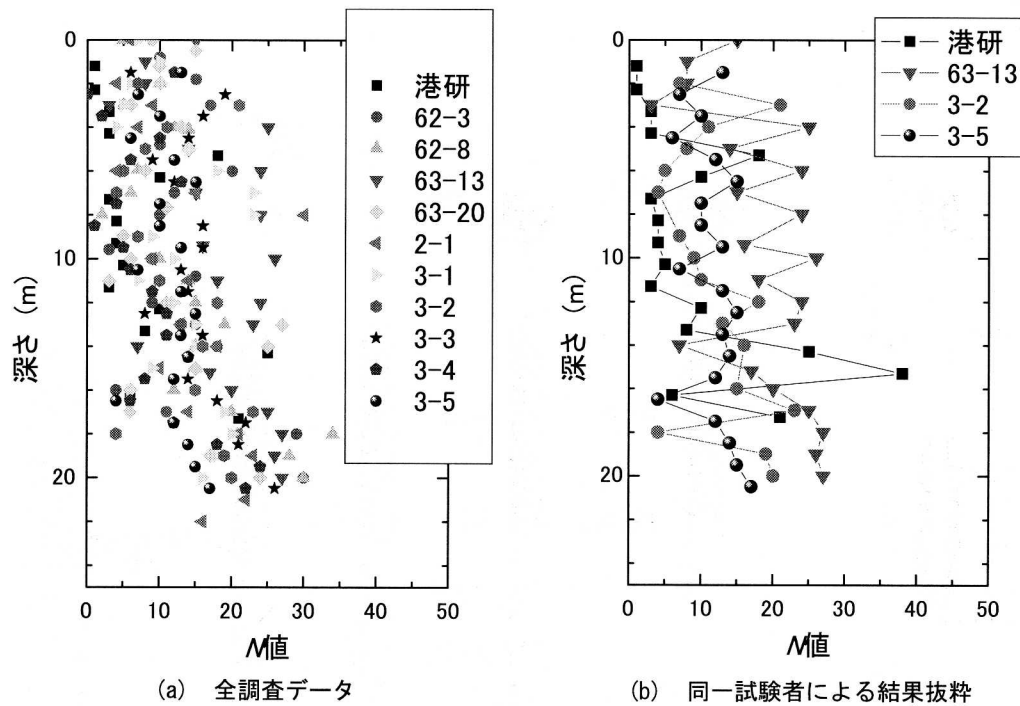


図-3 新潟の臨港地区埋立地 200m×200m エリアで得られた標準貫入試験の深度方向分布図¹²⁾

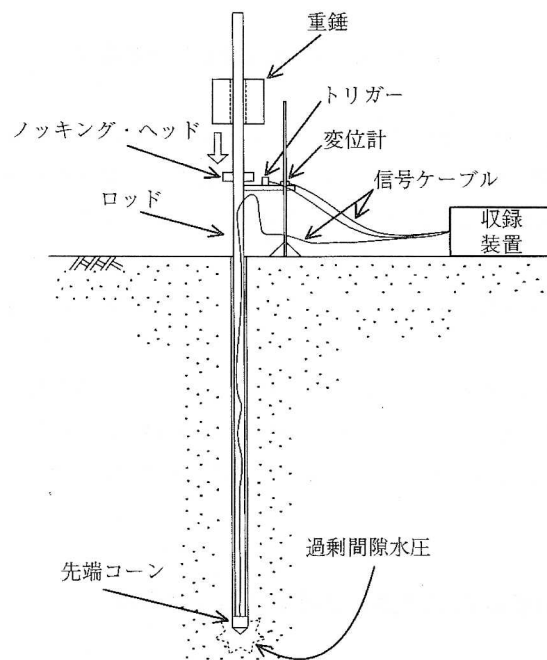


図-4 PDCの構成概要¹³⁾

このほか、動的コーン貫入試験装置を改良することによって、 N_d 値以外の地盤情報を得る試みも進められている。地震時の被害を予測する上で重要となる液状化強度を原位置で簡易に評価する方法として、ピエゾドライブコーン(液状化ポテンシャルサウンディング、以下 PDC と略す)がある¹³⁾⁻¹⁵⁾。本試験は、動的貫入試験装置の先端コーンに内蔵した間隙水圧計で打撃貫入時に地盤内で応答する過剰間隙水圧を計測し、地盤の N 値と共に土質区分が推定できる新しいサウンディング調査法である。打撃貫入することにより 1 打撃毎に貫入量から N_d 値、過剰間隙水圧の残留値から細粒分含有率 F_c を評価することができ、各種設計基準に準じた液状化判定を行うことができる。図-4 に PDC の構成概要を示した。

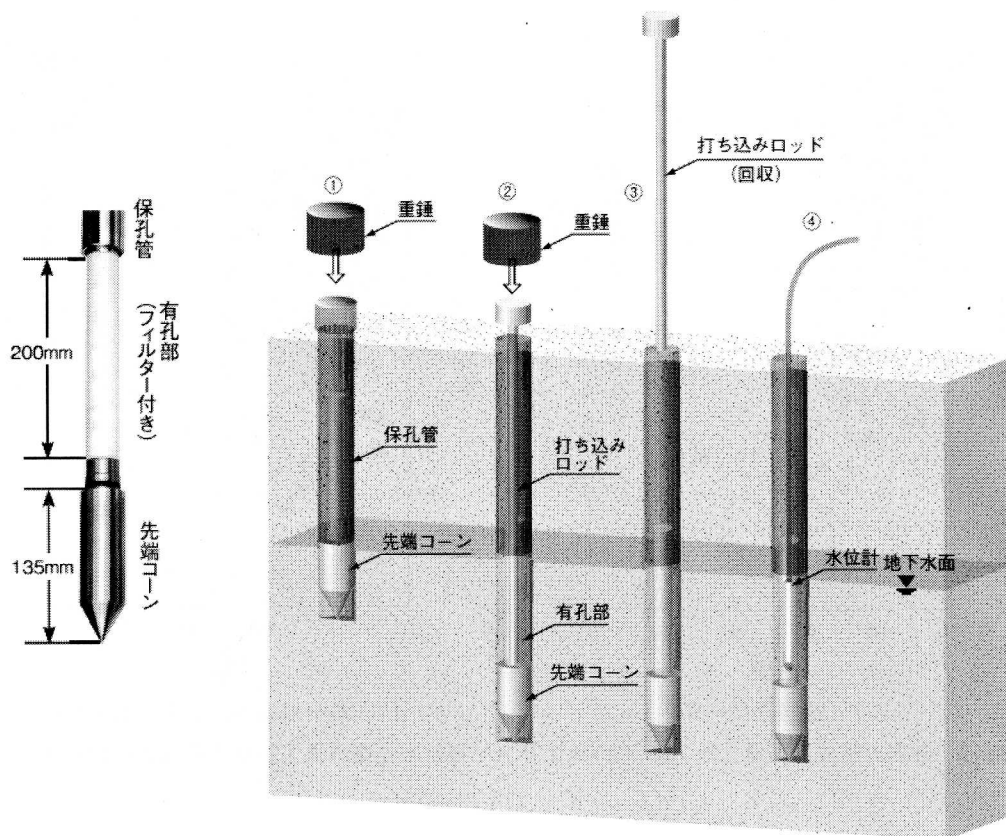


図-5 打ち込み式水位観測井の概要¹⁶⁾

また、盛土の安定性評価には地下水位の測定が重要であるが、地下水位が浅く N 値が 10 以下の砂質土地盤や粘性土地盤を対象に、動的コーン貫入試験を併用した打ち込み式水位観測装置が開発されている^{16), 17)}。本装置は先端コーン・有孔部・保孔管からなり、有孔部には目詰まり防止のためにプラスチック製のフィルターが装着されている。水位観測井の設置は動的コーン貫入試験によって目標深度まで先端コーンおよび保孔管を挿入し、その後、有孔部および先端コーンを打ち込むことによって保孔管から露出させることによって行う。図-5 に打ち込み式水位観測井の概要図¹⁶⁾を示した。

このように、動的コーン貫入試験に水圧測定を組み合わせることで地盤物性の評価精度向上を行う試みが行われている。ただし、PDC や打ち込み式水位観測井は大きな打撃力が加わるコーン先端部に水圧センサーを組み込んでおり、多くの盛土地盤のように礫打ちによって N_d 値が跳ね上がるような地盤に対しては損傷の恐れがあるため、適用例はあまり見られないのが実状である。

3. 動的コーン貫入試験値と標準貫入試験値の比較結果および考察

3. 1 試験結果の概要

今回、提供を受けた 9 地点のデータに基づき比較検討を実施した。内訳はミニラムが 4 地点、一般ラムが 5 地点である。いずれの地点も、ボーリングと動的コーン貫入試験の離隔は 3m 程度と、両者が同時に実施可能な限界の距離であり、地盤の不均質性が比較結果に与える影響を最小限に抑えている。

表-2 に、比較地点の基礎地盤表層地質、盛土厚、地下水位一覧を示した。これより、盛土材料と密接な関係があると考えられる基礎地盤の表層地質は、第四紀層の大阪層群・古琵琶湖層群や、第三紀層の神戸層群、火成岩である花崗岩類、中古生層である丹波層群と多岐にわたっており、盛土材も礫質土～砂質土～粘性土と一般的な盛土材料を網羅していることがわかる。表中には盛土内水位を示しているが、この観測方法について、動的コーン貫入試験で得られた水位は R-4 孔、R-5 孔以外はロッドの濡れ具合で、R-4 孔、R-5 孔は試験後に全区間ストレーナを設けた塩ビ管を挿入して一

表-2 比較地点の基礎地盤の表層地質、盛土厚、地下水位一覧

試験方法	地点名	基礎地盤の表層地質	主な盛土材	盛土厚(m)		地下水位(GL-m)	
				動的コーン貫入試験	ボーリング	動的コーン貫入試験	ボーリング
ミニラム	M-1	大阪層群	礫質土(シルト混り礫質土～粘土質砂礫)、一部粘性土	15	14.5	3.8	4.95
	M-2	神戸層群	砂質土(シルト質砂～砂～礫混りシルト質砂～シルト質砂礫)	11.6	10.6	測定せず	5.5
	M-3	神戸層群	砂質土(礫混り粘土質砂～礫混り砂)	11.6	11.5	測定せず	2.35
	M-4	神戸層群	砂質土(礫混り粘土質砂～礫混りシルト質砂～礫混り砂)	13.6	12	測定せず	10.5
一般ラム	R-1	大阪層群	粘性土(砂混り粘土～礫混り砂質粘土) 礫質土(粘土質砂礫～粘土混り砂礫)の互層	10.6	8	1.8	1.81
	R-2	大阪層群	粘性土(粘土～砂質粘土～礫混り砂質粘土)、一部礫質土	7.6	5.8	無し	無し
	R-3	丹波層群	礫質土(玉石混り粘土質砂礫)	4.8	3.95	2.4	2.03
	R-4	古琵琶湖層群	粘性土(砂質シルト～礫混り粘土) 礫質土(粘土質砂礫)の互層	10	8	0.8	0.7
	R-5	花崗岩類	砂質土(礫混り細砂)	7.8	6.8	5.55	8.3

表-3 比較地点の土被り圧補正した盛土の N_1 値の平均、および N_{da1} 値・ N_{d1}' 値・ N_{db1} 値・ N_{d1} 値の平均一覧
(添え字の"1"は土被り圧補正していることを表す)

試験方法	地点名	動的コーン貫入試験 礫打ち補正なし		動的コーン貫入試験 礫打ち補正あり		N_1 平均値
		N_{da1} 平均値 or N_{d1}' 平均値	N_{db1} 平均値 or N_{d1} 平均値	N_{da1} 平均値 or N_{d1}' 平均値	N_{db1} 平均値 or N_{d1} 平均値	
ミニラム	M-1	10.3	5.9	9.6	5.2	6.3
	M-2	15.2	9.6	12.5	7.1	17.5
	M-3	13.9	8.5	11.4	6	12.9
	M-4	16.4	9.7	13.2	6.8	7.4
一般ラム	R-1	13.8	12.8	-	-	15.2
	R-2	11.8	10.2	8.7	7.3	8.1
	R-3	24.9	21	17.1	13.4	34
	R-4	10	6.4	-	-	4.7
	R-5	4.5	4.2	-	-	3.6

※R-1、R-4、R-5 地点は礫打ち補正の対象なし

N_{d1}' : 一般ラムの換算 N 値 (トルク補正なし)、 N_d : 一般ラムの換算 N 値 (トルク補正あり)

N_{da} : ミニラムの換算 N 値 (トルク補正なし)、 N_{db} : ミニラムの換算 N 値 (トルク補正あり)

昼夜空けた後の水位であり、ボーリングによる水位は、無水掘りの翌朝水位で確認されたものである。なおM-2孔、M-3孔、M-4孔については水位計測を実施しなかった。両者の水位差について、R-5孔には3m近い差があるものの、それ以外は1m程度の差に収まっており、動的コーン貫入試験による水位観測の精度は比較的高いものと考えられる。R-5孔は、動的コーン貫入試験ではGL-5.55mを地下水位と認識したが、ボーリングでは、同深度付近(GL-5.10m)に宙水の存在が報告されており、この宙水を地下水位と認識したため、差が生じたと推定される。

地山と盛土境界については、ボーリングは採取試料の土質観察を行った結果に基づき評価し、動的コーン貫入試験はボーリング結果を考慮せずにDEMデータによる切盛境界の深度と N_d 値の変化から設定した⁴⁾。精度の高いボーリングに

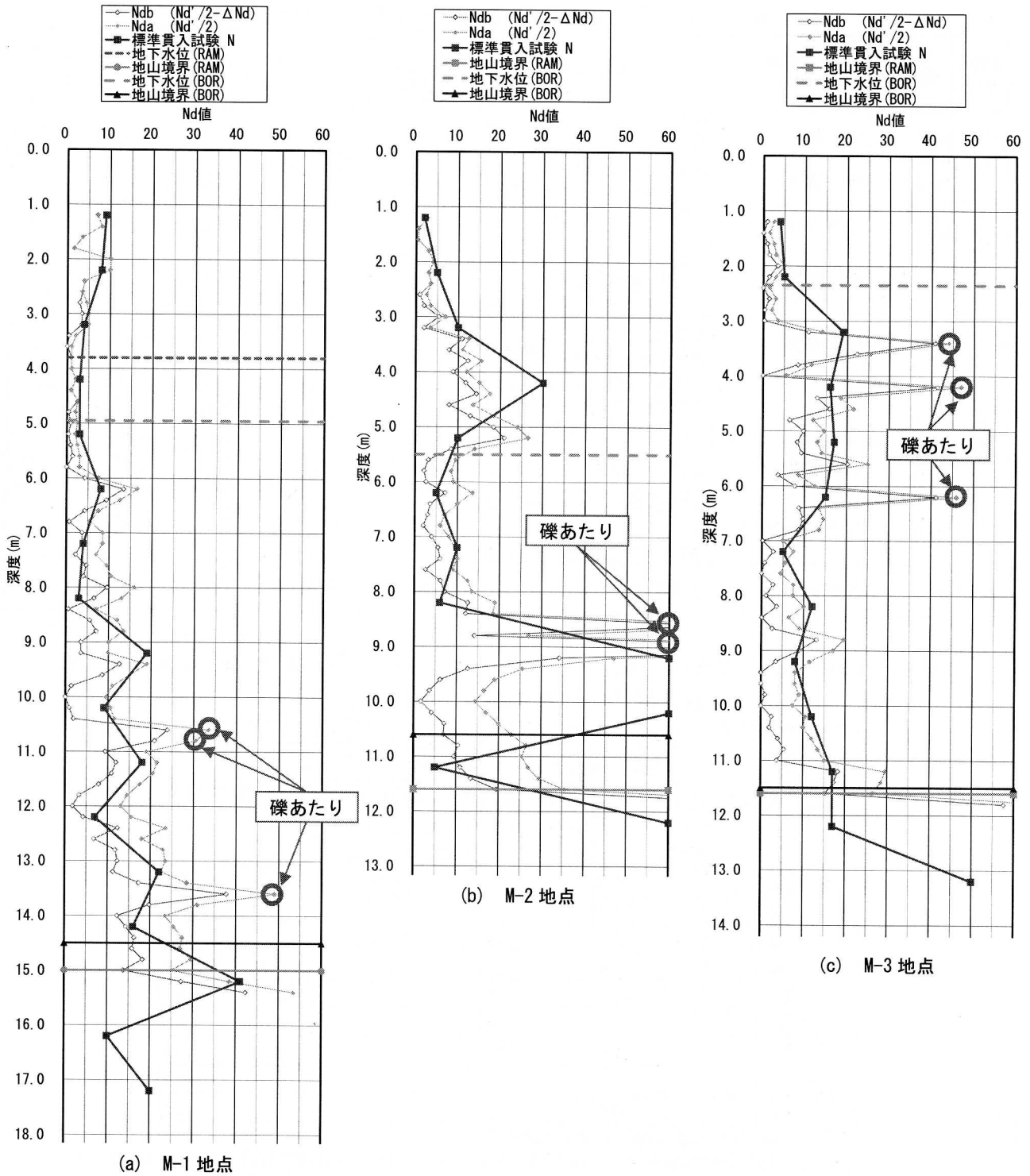


図-6(1) ミニラムとボーリング比較箇所の N 値・ N_{da} 値, N_{db} 値の深度方向分布図

よる境界深度と比べて、動的コーン貫入試験による境界深度は1~2mほどのずれを生じており、概ね後の方が切盛り境界を深く評価している。これは、試験結果のばらつきに加えて、動的コーン貫入試験によるものは基礎地盤表層の強風化層など、強度の小さな箇所を盛土として評価している可能性がある。

表-3 に、比較地点の土被り圧補正した N_1 値の平均値および、 N_{da1} 値・ N_{d1}' 値・ N_{db1} 値・ N_{d1} 値の平均値一覧を示した。ここで、添え字の“1”は土被り圧補正した N 値および N_d 値を示すものであり、以下に示す道路橋示方書の式¹⁸⁾に基づいて行っている。

