

浦安一斉試験における各種動的サウンディング試験の比較

動的コーン貫入試験, 周面摩擦補正, エネルギー補正

大阪市立大学大学院 国 大島昭彦

1. まえがき

本稿では, 2011年11月に実施した浦安市高洲8丁目の地盤調査の一斉試験のうち, 動的サウンディング試験(各種動的コーン貫入試験と標準貫入試験)¹⁾⁻⁹⁾を対象として, 各試験結果の比較を報告する。まず, 各種動的貫入試験の打撃仕様をまとめ, 測定トルクによる周面摩擦補正方法, 単位面積・単位貫入量当たりのエネルギーによる補正方法を示す。次に, 各試験の測定打撃回数と測定トルクおよび周面摩擦補正打撃回数の比較を示す。さらに, 各試験のエネルギー補正した打撃回数を求め, 標準貫入試験によるN値との対応関係を考察した。

2. 各試験の打撃仕様と補正方法

表-1に各試験の打撃仕様をまとめた。SRS(ラムサウンディング)とラムダ(手動式ラム), MRS(ミニラム)とDPM-HT(手動式ミニラム), PDCPT(簡易動的コーン)とSHは, ハンマー・アンビル系の寸法以外は基本的に同一である。

表-1 各種動的貫入試験の打撃仕様

試験名	SRS	ラムダ	MRS	DPM-HT	PENNY	DSPT	PDCPT	SH	SPT	
メーカー	YBM	JDF	OYO	北信 Br.	Tecnotest	東邦地下	JGS仕様	表土層研究会	JIS仕様	
ハンマーガイドロッド径 (mm)	101.6	40.5	20	40.5	30	19	16	16	40.5	
ハンマー直径 D_h (mm)	246	180	160	180	178	95	60	40	180	
アンビル直径 D_a (mm)	175	97	90	75	51	50	50	40	71	
ハンマー質量 m (kg)	63.5		30	30	10	5	3, 5		63.5	
落下高 H (mm)	500		350	200	500	500		750		
コーン先端角(°)	90		90	60	S.P.	60		-		
コーンマントル長 (mm)	90		69	9	-	0		非閉塞*1	閉塞*2	
コーン直径 D_c (mm)	45		36.6	35.7	33	25		外径51-内径35	外径51	
コーン断面積 A ($\times 10^{-4} \text{m}^2$)	15.9		10.5	10.0	8.6	4.9		10.8	20.4	
ロッド直径 D_r (mm)	32		28	20	19	16		40.5		
コーン直径/ロッド直径 D_c/D_r	1.41		1.31	1.79	1.74	1.56		-		
トルクによる周面摩擦補正係数 β	0.040		0.139	0.170	-	0.510		-		
単位面積当たりのエネルギー $E=mgH/A$ (kJ/m ²)	195.8		97.9	58.8	57.3	50.0		432.6	229.0	
SRS基準のエネルギー比	1.00		0.500	0.300	0.293	0.255		2.21	1.17	
打撃回数測定での貫入量 P (m)	0.20		0.20	0.10	0.25	0.10		0.30	0.30	
単位貫入量当たりのエネルギー $E=mgH/AP$ (kJ/m ² /m)	979.2		489.5	588.0	229.4	499.6		1442.0	763.4	
SRS基準のエネルギー補正係数 α	1.00		0.500	0.601	0.234	0.510		1.47	0.780	

*1: SPT サンプラーの先端シューが閉塞せずに土が内部に入る状態,

*2: SPT サンプラーの先端シューが完全に閉塞した状態

2.1 測定トルクによる周面摩擦の補正方法

図-1に動的コーン貫入試験の概要を示す。測定トルクによる周面摩擦の補正は以下のようにSRS試験で用いられた方法である^{10),11)}。 f_s をロッドと土の周面摩擦応力(N/m²), L を地中のロッド長さ(m), D_r をロッド直径(m)とすれば, 打撃回数測定での貫入量 P (m)当たりの土とロッドの周面摩擦に費やされるエネルギー E_{skin} は次式で表される。

$$E_{skin} = f_s(\pi D_r L)P \tag{1}$$

次に, 測定されるトルク M_v (N・m)は, f_s から式(2)で求められ, 式(1)に式(2)を代入すると, E_{skin} は式(3)で求められる。

$$M_v = f_s(\pi D_r L) \frac{D_r}{2} \tag{2}$$

$$E_{skin} = \frac{2P}{D_r} M_v \tag{3}$$

一方, 質量 m (kg)のドライブハンマーの落下高 H (m)による1打撃当たりのエネルギー E_{blow} は次式となる(g は重力加速度(9.81m/s²))。

$$E_{blow} = mgH \tag{4}$$

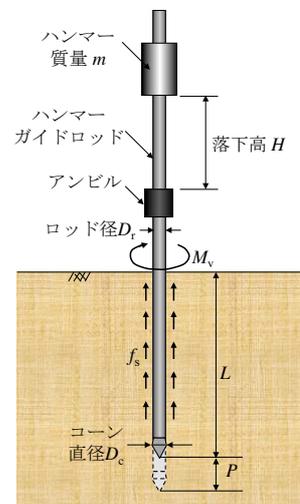


図-1 動的コーン貫入試験の概要

よって、周面摩擦による打撃回数の補正量 N_{skin} は式(5)で求められ、周面摩擦を補正した打撃回数 N_d 値は測定 N_{dm} 値より式(6)で求められる。

$$N_{skin} = \frac{E_{skin}}{E_{blow}} = \frac{2P}{mgH \cdot D_r} M_v \quad (5)$$

$$N_d = N_{dm} - N_{skin} = N_{dm} - \beta M_v \quad (6)$$

式(6)の β がトルクによる周面摩擦補正係数で、動的コーン貫入試験の打撃仕様で決まる。表-1 に各試験の β 値をまとめた。

2.2 エネルギー補正方法

表-1 に示したように、各種動的貫入試験では打撃エネルギー mgH 、コーン断面積 A 、打撃回数測定の貫入量 P がそれぞれ異なるが、次式に示す単位面積・単位貫入量当たりのエネルギー $mgH/A/P$ で換算した貫入抵抗 R_d を用いれば、結果を相互に比較できるといわれている¹²⁾。

$$R_d = \frac{mgH}{AP} \times N_d \quad (7)$$

そこで、SRS 試験の単位面積・単位貫入量当たりのエネルギーを基準とすれば、各試験の N_d 値から次式でエネルギー補正した打撃回数 N_d' 値を求めることができる。

$$N_d' = \left(\frac{mgH}{AP} \right) / \left(\frac{mgH}{AP} \right)_{SRS} \times N_d = \alpha N_d \quad (8)$$

α は SRS 基準のエネルギー補正係数である。表-1 に各試験の α 値をまとめた。

式(6)、(8)より、周面摩擦とエネルギーの補正は次式にまとめられる。

$$N_d' = \alpha (N_{dm} - \beta M_v) \quad (9)$$

以下では、上記の補正を用いて各試験の比較を行う。

3. 測定打撃回数 N_{dm} 、トルク M_v 、周面摩擦補正打撃回数 N_d

3.1 SRS とラムダの比較

図-2、3 にそれぞれ地点 1、地点 3 の打撃仕様が同じである SRS とラムダの N_{dm} 、 M_v 、 N_d の結果を示す。両試験の周面摩擦補正係数 β は 0.040 である。地点 1 では両試験はほぼ一致しているが、地点 3 ではラムダの N_d 値の方が大きい（特に 16m 以深の沖積粘土層で）。SRS の M_v は $N_{dm} \geq 6$ で測定しているため、上部の粘性土埋立層と下部の沖積粘土層では測定されていないが、データの連続性からは全層で測定した方が良さそうである（周面摩擦補正の連続性のためにも）。一方、ラムダの M_v は下部のみの測定（理由は不明）で、SRS よりも大きいため、周面摩擦の補正量が両試験で異なっている。さらに、ハンマーガイドロッド径、ハンマー直径、アンビル直径などが異なっており（表-1 参照）、かつ打撃装置全体の質量（自沈に作用）にも大きな違い（SRS で 177.5kg、ラムダで 100kg）があるため、それらが結果に影響したと考えられる。

3.2 MRS と DPM-HT の比較

図-3、4 にそれぞれ地点 1、地点 3 の打撃仕様が同じである MRS と DPM-HT の N_{dm} 、 M_v 、 N_d の結果を示す。両試験の β は 0.138 である。図中には PDC（ピエゾドライブコーン）も示したが、試験装置は MRS と同一である。両地点とも DPM-HT の N_d 値の方が大きく、特に深度 8m 以深の沖積砂層では 2 倍程度となっている。この違いにはハンマーガイドロッド径、ハンマー直径、アンビル直径の違い（表-1 参照）に加え、アンビルとロッドの固定方法の違い⁹⁾も影響しているようである。また、 M_v も DPM-HT の方が大きい（PDC も大きい）。MRS では $N_{dm} \geq 11$ で M_v を測定しているが、やはりデータの連続性からは PDC や DPM-HT のように全層で測定した方が良さそうである。全体に M_v が SRS よりも大きいのは、コーン直径/ロッド直径 D_c/D_r が SRS の 1.41 よりも MRS の 1.31 の方が小さく（表-1 参照）、周面摩擦の影響が大きいためと考えられる。すなわち、周面摩擦の影響は D_c/D_r に依存すると考えられる。

3.3 Penny の結果

図-5、6 にそれぞれ地点 1、地点 3 の Penny の N_{dm} 、 M_v 、 N_d の結果を示す。 β は 0.170 である。Penny の打撃回数測定の貫入量は 10cm であるが、両地点とも N_d 値は SRS と MRS の中間的な値を示している。SRS と MRS との違いとしては Penny のコーン先端角は 60°で、マントル長が短い点が挙げられる。 M_v が SRS、MRS よりもかなり小さいのは D_c/D_r が 1.79 と大きく、周面摩擦の影響が小さいためと考えられる。

3.4 DSPT の結果

図-7 に DSPT の N_{dm} の結果を示す。DSPT では M_v は測定していない。DSPT の打撃回数測定の貫入量が 25cm であるせいもあり、 N_{dm} 値はかなり大きめの値を示している（特に地点 1 で）。ただし、この試験では先端がスクリーポイントであるので、他のコーン貫入試験と単純な比較はできないと考えられる。

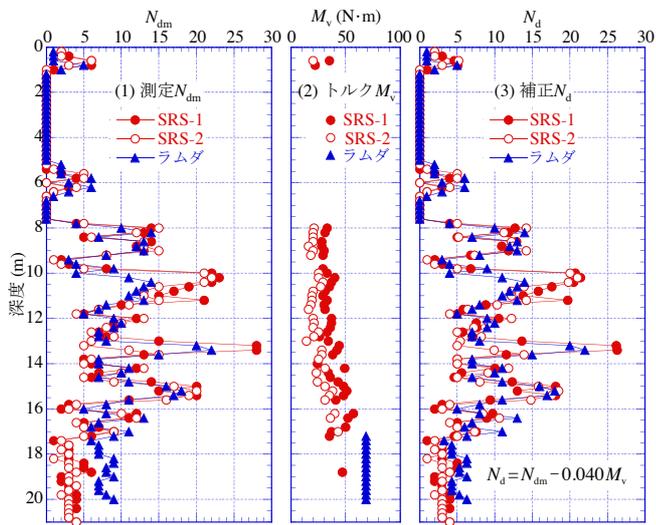


図-2 SRS とラムダの比較 (地点 1)

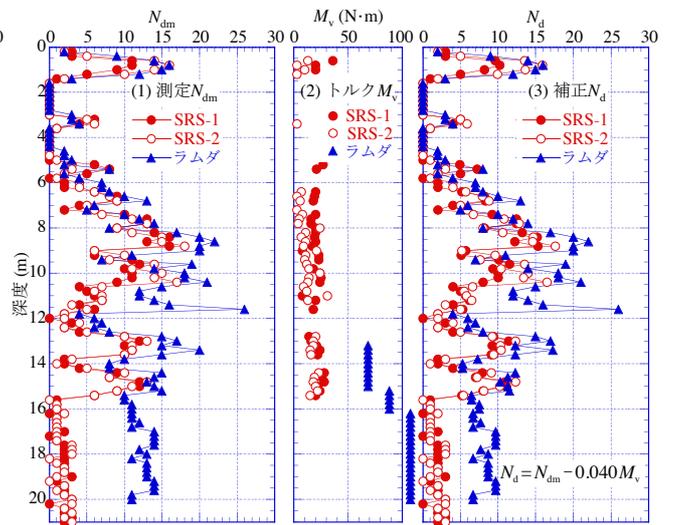


図-3 SRS とラムダの比較 (地点 3)

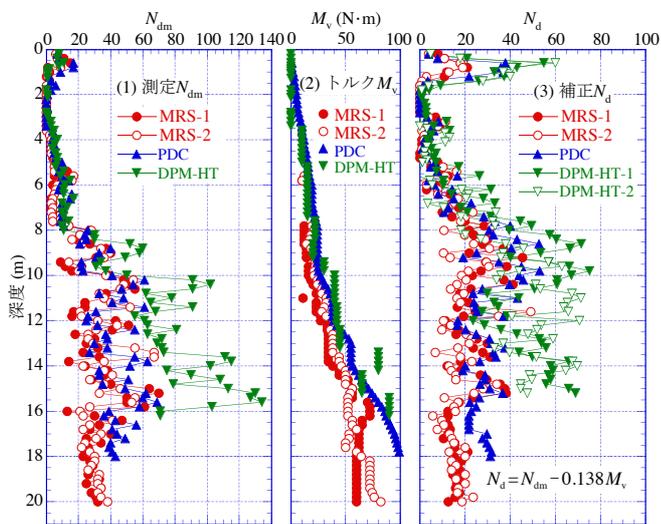


図-4 MRS と DPM-HT の比較 (地点 1)

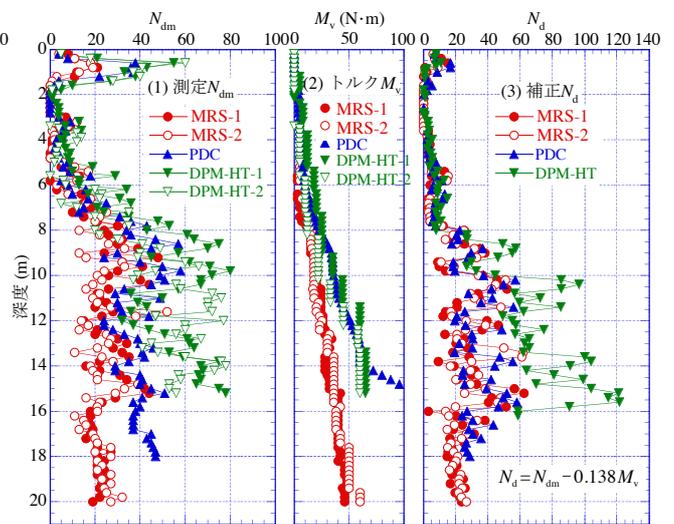


図-5 MRS と DPM-HT の比較 (地点 3)

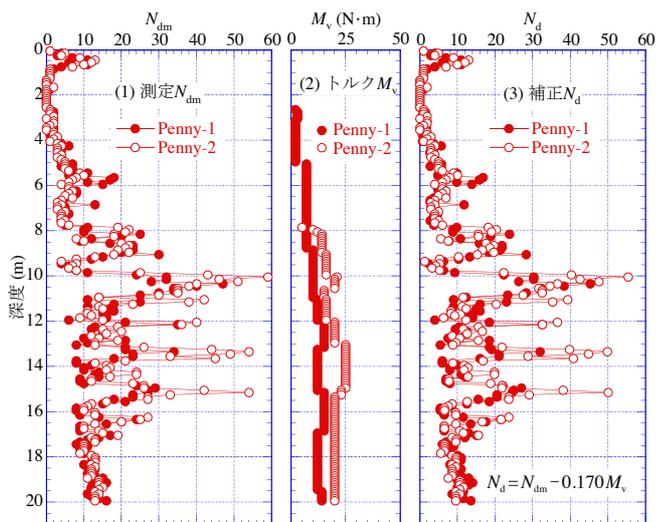


図-6 Penny の結果 (地点 1)

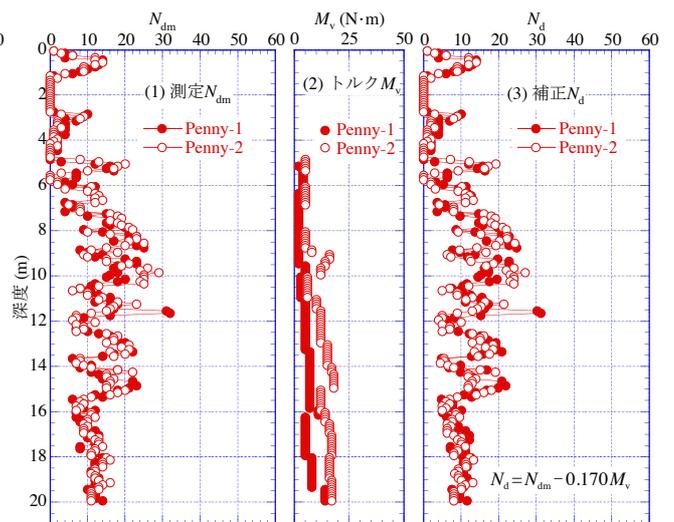


図-7 Penny の結果 (地点 3)

3.5 PDCPT と SH の比較

図-9 に PDCPT と SH の N_{dm} , M_v の結果を示す (M_v は PDCPT のみ)。両試験の打撃回数測定の貫入量は 10cm である。深度 8m までの測定であるが、地点 1 で若干 SH の N_{dm} 値の方が大きい傾向が見られるものの、両試験はよく一致している。PDCPT の M_v はかなり小さいが、 $\beta=0.510$ と大きい (表-1 参照) ので、2~3 回の補正回数となる (図-16 参照)。

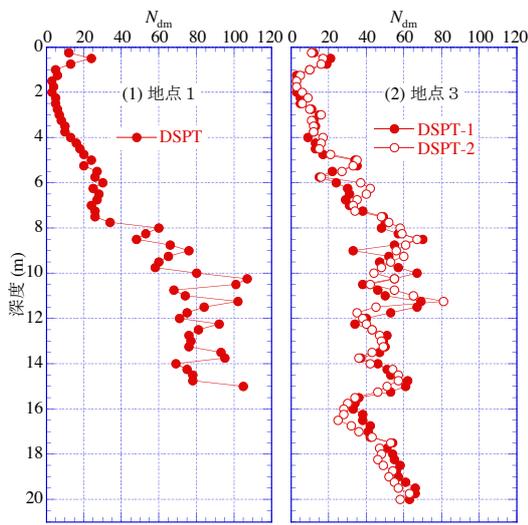


図-8 DSPTの結果

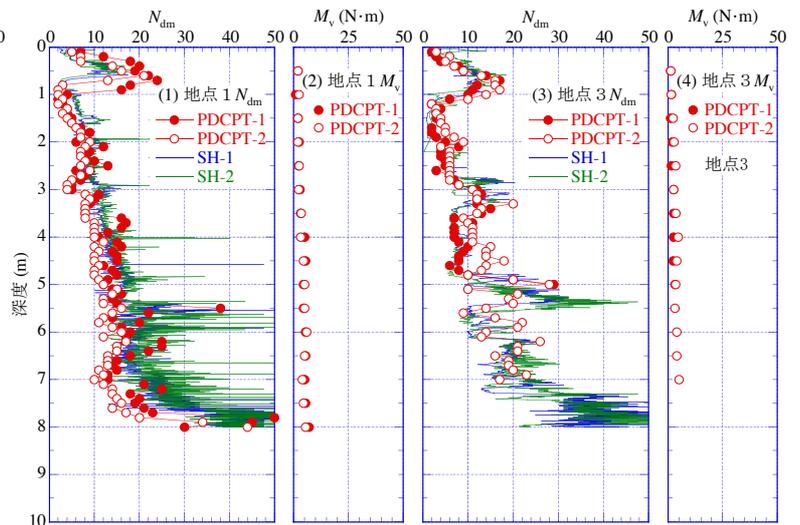


図-9 PDCPTとSHの比較

4. 単位面積・単位貫入量当たりのエネルギー補正による比較

式(8)のSRS試験に基づくエネルギー補正係数 α を用いてエネルギー補正した N_d' 値を標準貫入試験(SPT)の N 値と比較し、各試験の対応関係を考察する。

4.1 SRSとSPTの比較

図-10にSRSの N_d 値とSPTの N 値の比較を示す。当然ながらSRSを基準としているので、 N_d 値は図-2(3)、図-3(3)と同じものである。地点1で若干 N_d 値の方が大きい、沖積砂層部では比較的良好に整合している。ただし、深度16m以深の沖積粘土部では N_d 値の方が大きい。これまでの両試験の比較結果から、砂質土では N_d 値 $\approx N$ 値、粘性土では N_d 値 $> N$ 値となることを既に報告している¹³⁾、今回も同様な結果である。

両試験を比較する場合には、中空のサンプラーを用いるSPTと中実なコーンを用いるSRSでは貫入メカニズムが異なることを考えなければならない。図-11にSPTサンプラーの貫入機構を示す¹⁴⁾。図(1)はサンプラー刃先が閉塞せず、土が内部に入る場合で、打撃エネルギーは先端抵抗 F_d と周面摩擦 F_s に伝達される。一方、図(2)はサンプラー刃先が閉塞状態となり、土が内部に入らない場合で、打撃エネルギーは地盤に直接伝達される(動的コーン貫入試験はこの状態に相当する)。基本的にはSPTの初期は図(1)の状態、貫入量増加とともに図(2)の状態に移行すると考えられるが、軟らかい粘土層は図(1)の非閉塞状態で、砂質土層では図(1)から図(2)の中間的で、密な砂礫質土層では図(2)の閉塞状態で貫入すると想定できる。表-1に示したSPTで非閉塞、閉塞とした場合の断面積に基づくエネルギー補正係数 α はそれぞれ1.47、0.78となり、非閉塞の場合にはSRSよりも貫入しやすく、閉塞の場合には貫入しづらいことになる(中間では α は1に近い)。すなわち、軟らかい粘土層では N_d 値 $> N$ 値に、砂質土では N_d 値 $\approx N$ 値、密な砂礫質土層では N_d 値 $< N$ 値となると考えられ、先の傾向が説明できる。

4.2 MRSとSPTの比較

図-12にMRSの N_d' 値とSPTの N 値の比較を示す。MRSの α は0.5である。両地点とも N_d' 値の方が大きく、特に深度16m以深の沖積粘土部で N 値に比べて大きい。図-10との比較からSRSよりもMRSの N_d' 値の方が大きいといえる。

ただし、一般にMRSは菅原ら¹⁵⁾による次式の方法でエネルギーと周面摩擦の補正が行われる(従来補正法)。

$$N_d'' = 0.5N_{dm} - 0.16M_v \quad (10)$$

式(10)による N_d'' 値と N 値の比較を図-13に示す。図-12に比べて N_d'' 値が小さくなり、 N 値に近づくが、 N_d'' 値の方が大きい傾向は変わらない。実は式(10)の周面摩擦の補正係数0.16はSRSの N_d 値と合うように決められた値である¹⁵⁾。さらに補正の順序が逆で、先に示したように N_{dm} をまず周面摩擦補正して、その後でエネルギー補正の方が正しいと考えられる。図-12での補正は次式となる。

$$N_d' = 0.5(N_{dm} - 0.138M_v) \quad (11)$$

結果的に式(10)の周面摩擦補正係数 β は式(11)の2.3倍となり、過大な補正と考えられる。

4.3 PennyとSPTの比較

図-14にPennyの N_d' 値とSPTの N 値の比較を示す。Pennyの α は0.601である。地点1では N_d' 値の方が大きい、地点3では比較的良好に N 値と整合している。やはり、深度16m以深の沖積粘土部では N_d' 値の方が大きい。図-10との比較からSRSよりもPennyの N_d' 値の方がやや大きいといえる。

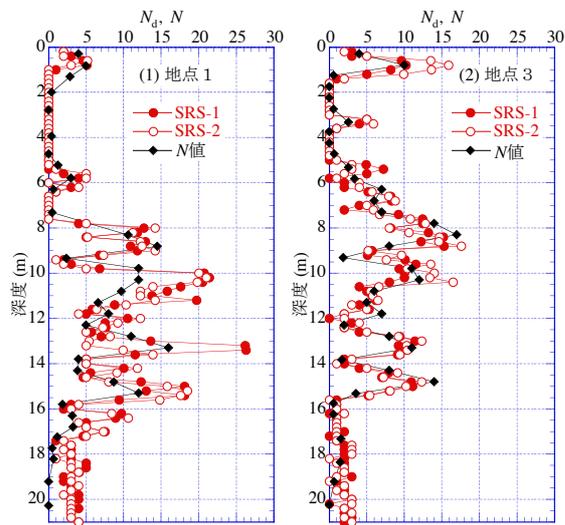
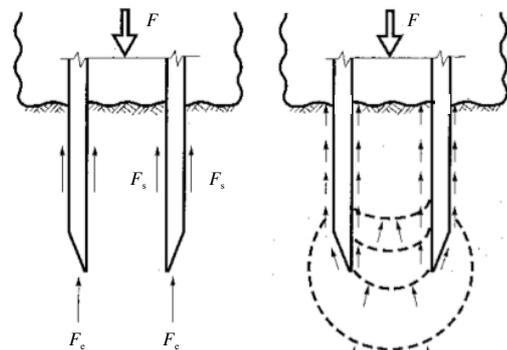


図-10 SRS の N_d 値と N 値の比較



(1) 非閉塞状態 (2) 閉塞状態
図-11 SPTサンプラーの貫入機構¹⁴⁾

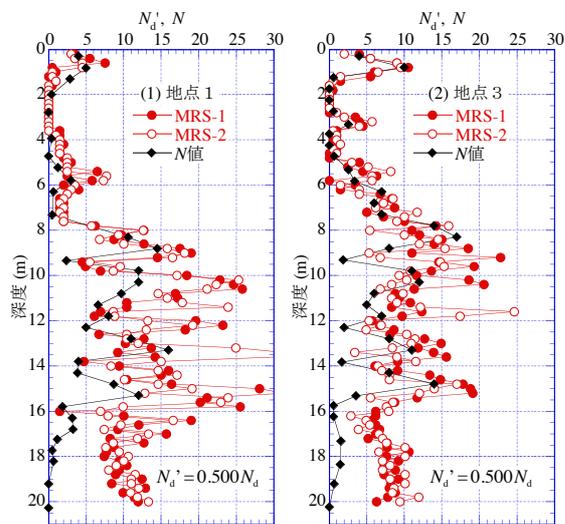


図-12 MRS の N_d' 値と N 値の比較

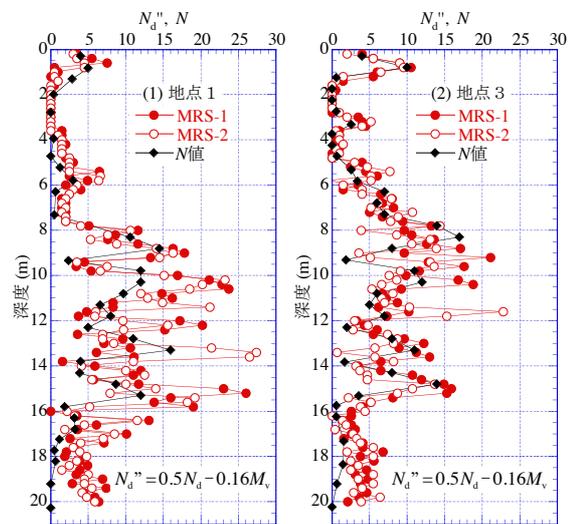


図-13 MRS の N_d'' 値と N 値の比較 (従来補正法)

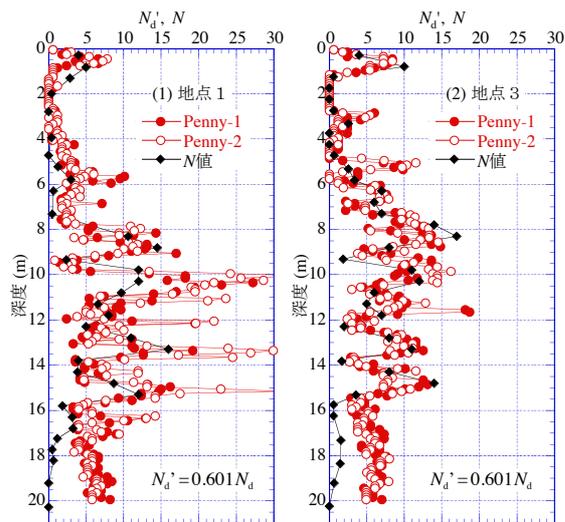


図-14 Penny の N_d' 値と N 値の比較

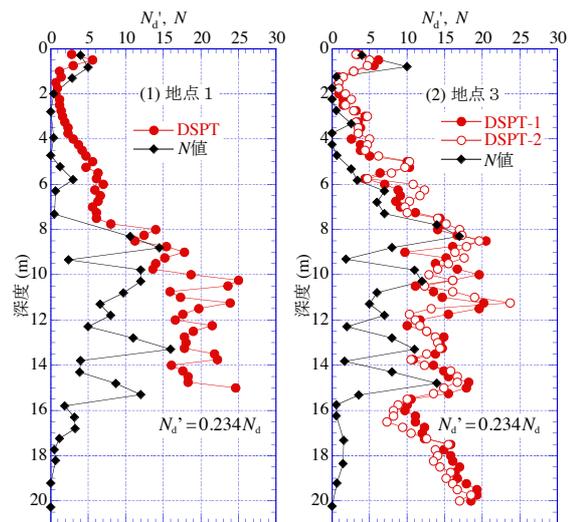


図-15 DSPT の N_d' 値と N 値の比較

4.4 DSPT と SPT の比較

図-14 に DSPT の N_d' 値と SPT の N 値の比較を示す。両地点とも N_d' 値の方が大きいですが、DSPT の α は 0.234 と最も小さく、エネルギー補正量が大きいため、図-8 に比べれば、 N 値に近い値となっている。やはり、深度 16m 以深の沖積粘土部では N_d' 値の方がかなり大きい。

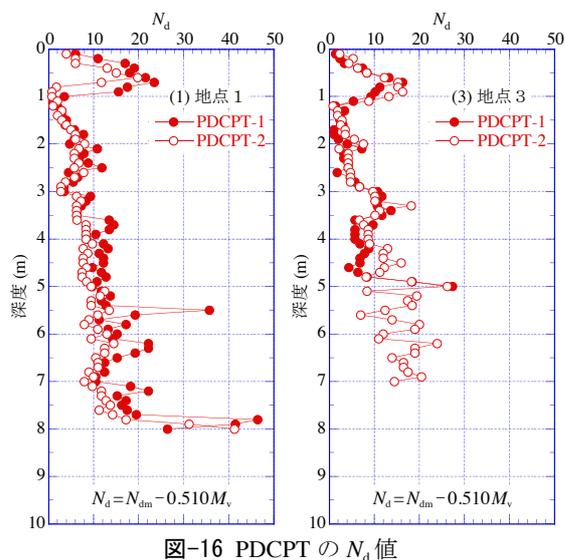


図-16 PDCPT の N_d 値

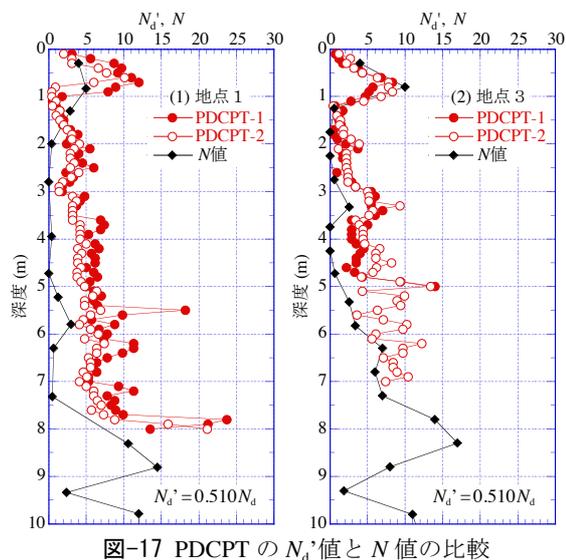


図-17 PDCPT の N_d' 値と N 値の比較

4.5 PDCPT と SPT の比較

図-16 に PDCPT の周面摩擦補正後の N_d 値を、図-17 に PDCPT の N_d' 値と SPT の N 値の比較を示す。PDCPT の α は 0.510 である。DSPT と同様に、両地点とも N_d' 値の方が大きいですが、図-16 の N_d 値と比べれば、 N 値に近い値となっている。むしろ SPT は打撃装置の自重が大きく自沈が生じやすいことを考慮すれば、PDCPT の N_d' 値は地盤強度をそれなりに表しているともいえる。

5. あとがき

SRS は SPT の N 値と同等な N_d 値を得るために開発された試験法といわれているが、中実コーンと中空サンプラーでは貫入メカニズムが異なり、特に SPT サンプラーは土質によって非閉塞、閉塞状態が変化する（先端断面積も変化する）と考えられるので、両試験の対応関係は土質によって変わると考えられる。一方、動的コーン貫入試験同士の比較では単位面積・単位貫入量当たりのエネルギーによる補正が有効と考えられる。

しかし、各試験でハンマーガイドロッド径、ハンマー直径、アンビル直径およびコーン先端角、コーンマンテル長さ、打撃装置全体の質量などが異なるため、単純にエネルギー補正だけでは対応しない。さらに、ハンマー直径、アンビル直径などの器具寸法が打撃効率（入力される打撃エネルギーとアンビル直下のロッドへの伝達エネルギーの比率）に与える影響が報告されている¹⁶⁾。さらに、SPT、SRS、MRS の打撃効率がそれぞれ 50、80、20% となることが報告されている^{17),18)}（ただし、MRS の 20% は過小と考えられるが）。既に ISO の SPT および Dynamic Probing（動的貫入試験）では打撃効率を測定することを義務づけている。今後、各動的貫入試験の打撃効率を測定し、それも含めたエネルギー補正を行う必要があると考えられる。

参考文献

- 1)~9) 浦安市における各種動的サウンディング試験の比較(その1)~(その9), 第47回地盤工学研究発表会, No.67~75, 2012.
- 10) R. Dahlberg and U. Bergdahl : Investigations on the Swedish Ram-Sounding Method, Proceedings of the European Symposium on Penetration Testing, Stockholm, June 5-7, pp.93-102, 1974.
- 11) 佐藤勝英, 岩崎恒明 : オートマチックラムサウンドの試験装置と結果の一例について, 土質工学会サウンディングシンポジウム発表論文集, pp.213-222, 1980.
- 12) 地盤工学会 : 地盤調査の方法と解説, p.331, 2004.
- 13) 平田拓也, 大島昭彦, 平田茂良 : 大型動的コーン貫入試験の N_d 値と標準貫入試験の N 値の比較例, 土木学会第 67 回年次学術講演会, III-012, 2012.
- 14) 西垣好彦 : 砂地盤における N 値, サウンディングシンポジウム発表論文集, 土質工学会, p.109-114, 1980.
- 15) 菅原紀明, 鈴木勝久, 菅原章治 : 小型動的貫入試験機の開発とその利用, 全地連「技術フォーラム'97」講演集, pp.461-464, 1997.
- 16) 大野睦雄, 藤田圭一, 落合英俊, 松本江基, 三反畑勇 : 標準貫入試験の器具寸法が N 値に及ぼす影響とその補正, 地盤工学ジャーナル, Vol.2, No.4, pp.319-328, 2007.
- 17) 石原幸, 堀之内富夫, 村田芳信, 高原利幸, 松本樹典 : 異なる動的貫入試験における打撃エネルギーの比較, 第 37 回地盤工学研究発表会, pp.117-118, 2002.
- 18) 長谷川順三, 石原幸, 高原利幸, 松本樹典, 村田芳信 : 打撃エネルギー効率に与えるロッド形状の影響, 第 38 回地盤工学研究発表会, pp.115-116, 2003.