

第3章 液状化判定可能な動的コーン貫入試験の開発

3.1 概要

第3章では大型動的コーン貫入試験（SRS）と中型動的コーン貫入試験（MRS）及びPDC（ピエゾドライブコーン）、第4章ではスウェーデン式サウンディング試験（SWS）を各地の現場で実施した結果を示す。さらに、各試験ともに標準貫入試験（SPT）の N 値や粘性土では一軸圧縮強さ q_u 値との相関性を検討する。

3.2ではまず現場実験の内容と敷地情報を示す。表-3.1.1に各現場で実施したサウンディング試験をまとめた。サウンディング試験のみの場合は○、簡易サンプラーによる土質判定も実施したものは●としている（SPT、PDCも●である）。

なお、表-3.1.1以外にも本研究助成を受ける前に、北海道勇払郡厚真¹⁾、東大阪市松原南²⁾、大阪市鶴見区浜³⁾、浦安市高洲地点1・地点3⁴⁾、東大阪市花園東⁵⁾、岡山市南区浦安南⁵⁾の現場での比較試験を行っており、3.5、4.3のとりまとめではそれらのデータも用いている（地盤調査一斉試験を行った浦安市高洲地点1・地点3の位置は図-3.2.11に示した）。

表-3.1.1 各現場で実施したサウンディング試験一覧

試験名 実施機関	SPT K社	SRS D社 Y社		MRS S社	PDC O社	SWS S社 H社 N社			その他の試験
大阪市東中浜	●	○		○		○		○**	粘土サンプリングと土質試験
神栖市堀割	●*	●		●	●	○	●**	○**	地盤調査一斉試験を実施 砂サンプリングと液状化試験
浦安市運動公園	●	●		●	●	○	○**	○**	砂サンプリングと液状化試験
浦安市鉄鋼通り	●	○		○		○	○	○**	粘土サンプリングと土質試験
守山市今浜***	●	●	○	●		○	●	○**	地盤調査一斉試験を実施 粘土サンプリングと土質試験
守山市水保***	●	●	●	●	●	○	●	○**	地盤調査一斉試験を実施 砂サンプリングと液状化試験
大阪市鶴町	●	●	○	●		○	○	○	粘土サンプリングと土質試験
浦安市港	●	●	●	●		○	●	●**	粘土サンプリングと土質試験 原位置ベーンせん断、他
唐津市原	●	○	●					○**	SRSの緩衝材硬度の比較
唐津市岸山	●	○	○					●**	
香取市地点1		○	●	●	●	●	●	○	地盤調査一斉試験を実施
香取市地点2	●*	○	●	●	●	●	●	●	地盤調査一斉試験を実施 砂サンプリングと液状化試験

K社：基礎地盤コンサルタンツ、D社：大和ハウス工業、Y社：ワイビーエム、S社：積水ハウス、

O社：応用地質、H社：報国エンジニアリング、N社：日本建築総合試験所

○：サウンディング試験のみ、●：簡易サンプラーによる土質判定も実施（SPT、PDCも）。

*：神栖、香取のSPTはO社（応用地質）による。**：二重管式のDT-SWS試験も実施。

***：守山市今浜、水保ではD社によるSWSも実施。

3.2 現場実験の内容と敷地情報

3.2.1 大阪市城東区東中浜

図-3.2.1 に示す大阪市城東区東中浜 4 丁目 6-35 (大阪府寝屋川水系改修工営所敷地内) で、2012 (平成 24) 年 6 月 4 日(月)～6 月 11 日(月)の 6 日間で現場実験を行った。本現場は大阪城より約 2km 東側の東大阪地域に属する地区となる。

実施したサウンディング試験の試験位置 (1m 間隔) を図-3.2.2 に、試験状況を写真-3.2.1 に示す。ボーリング調査は 2ヶ所行い、No.1 では SPT と乱れの少ない粘土サンプリング (調査深度 20m)、No.2 では地質分析用サンプリング (調査深度 10m) を行った。

図-3.2.3 にボーリング・標準貫入試験による柱状図と N 値、自然含水比 w_n ・細粒分含有率 F_c の深度分布を示す。深度 3.5～16.8m は沖積粘土層である。



図-3.2.1 大阪市東中浜の調査位置

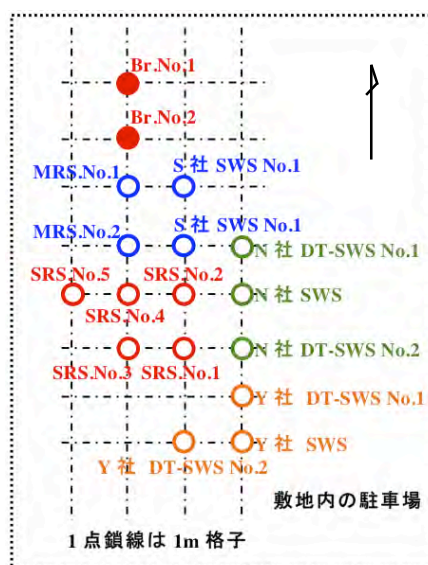


図-3.2.2 大阪市東中浜での試験位置



写真-3.2.1 大阪市東中浜での試験状況

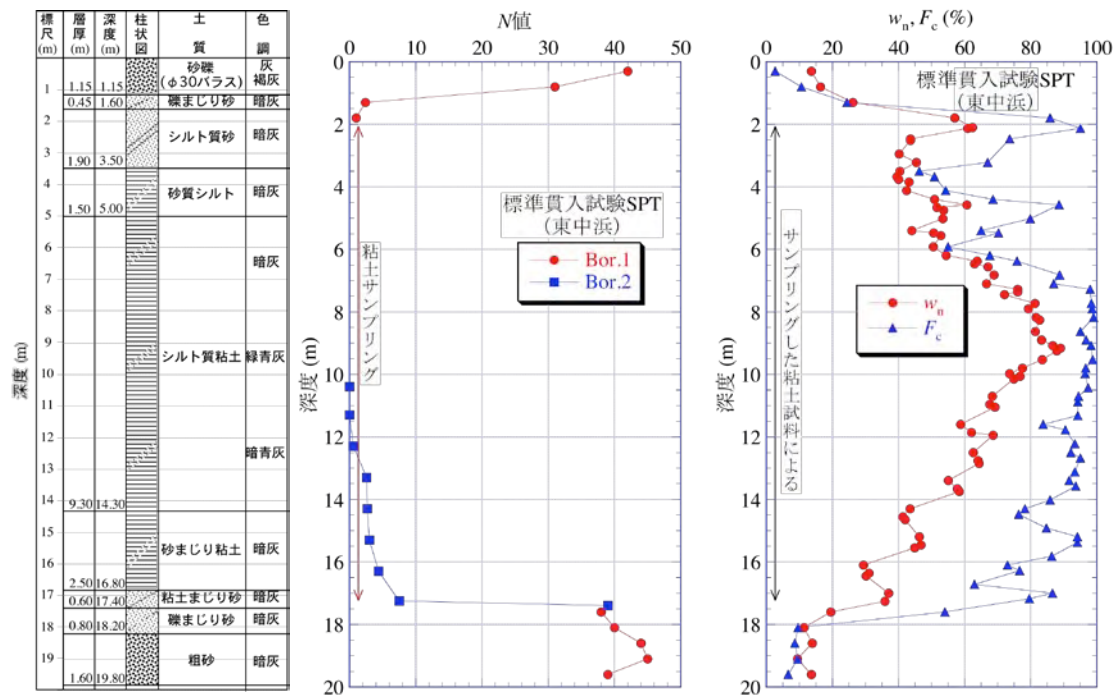


図-3.2.3 大阪市東中浜での柱状図と N 値、 $w_n \cdot F_c$ 値の深度分布

図-3.2.4 に連続サンプリングした東中浜沖積粘土層 (GL-2.0~-17.3m) の土質試験結果を示す。図(1)~(4)が物理性質、図(5)~(8)が力学性質を表している。本粘土層は東大阪地域に属する鋭敏性の高い粘土である。東中浜では表層が貝を含まない砂質シルトがあり、沖積粘土 (Ma13) 層は深度 6m から約 9m、下部は貝を含まない有機質粘土、礫まじり砂となっている。また深度 12.4m~12.5m にかけてアカホヤ火山灰 (K-Ah、約 7,300 年前に降灰) が確認されており土質に影響を与えている。図(1)の液性限界 w_L は貝なし粘土も含めて弓形分布を示している。自然含水比 w_n が w_L と同様、あるいは上回っているため、図(2)の液性指数 I_L は 1 以上の値をとっており鋭敏である。この傾向は下部の有機質粘土層では見られない。図(3)の土粒子密度 ρ_s は 2.65~2.67 程度で深度方向にほぼ一定である。図(4)の粒度含有率より Ma13 層の粘土分は w_L と同様の変化をしていることが確認できる。

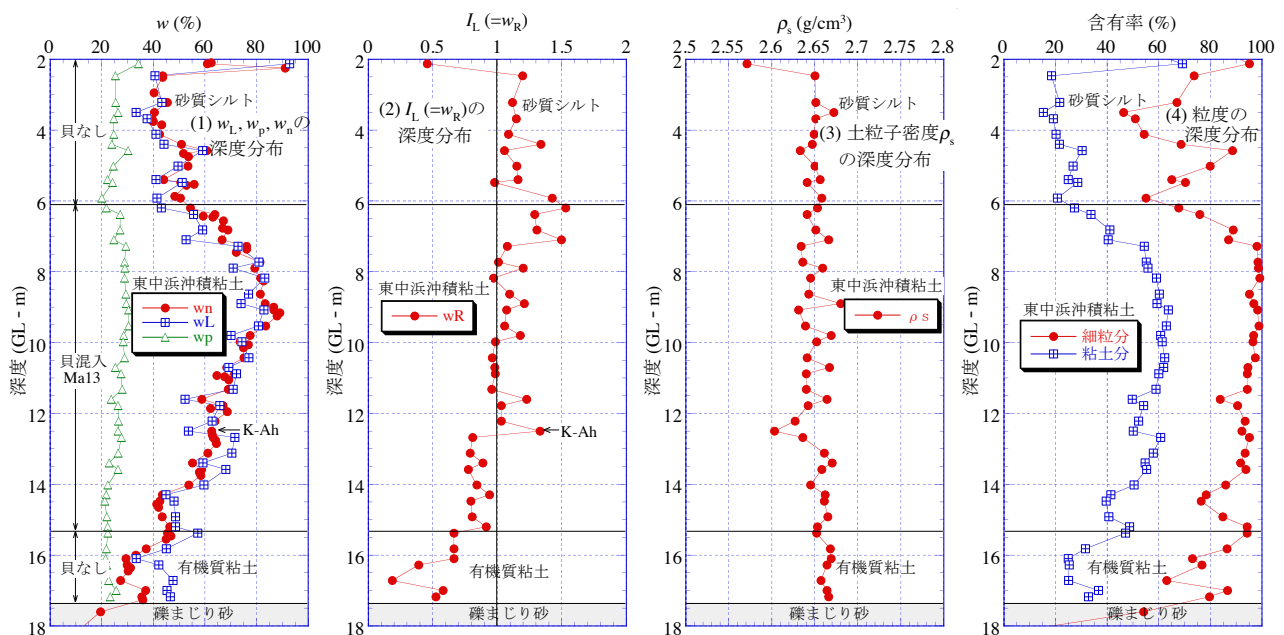


図-3.2.4 大阪市東中浜沖積粘土層の土質特性 (つづく)

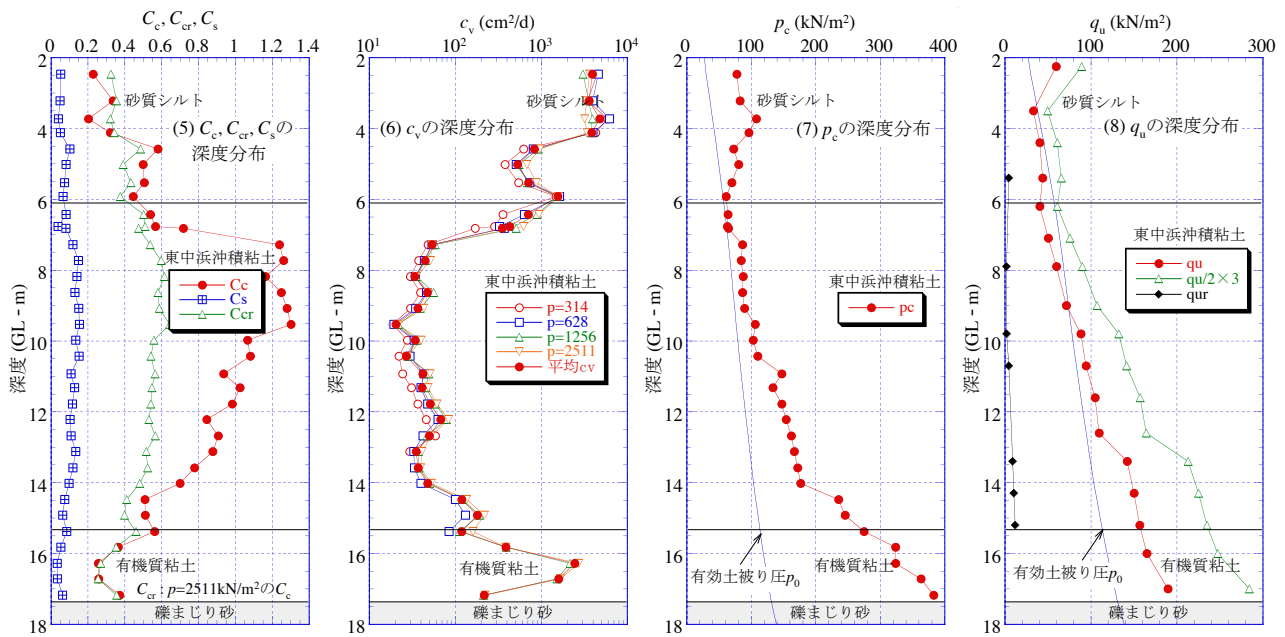


図-3.2.4 大阪市東中浜沖積粘土層の土質特性 (つづき)

図(5)の圧縮指数 C_c は w_L の分布を反映して弓形分布を示しており、図(6)の圧密係数 c_v は w_L と逆向きの弓形分布をしていて、相似性がみられる。東中浜では C_c が大きな値を示しているため、図(7)の圧密降伏応力 p_c は特に下部で、有効土被り圧 p_0 を大きく上回る過圧密粘土であると考えられる。下部の過圧密比 OCR は 2 を超えている。図(8)の一軸圧縮強さ q_u も深度方向に増加しており、非排水せん断強さ $s_u = q_u/2$ に対して強度増加率 $s_u/p_c = 1/3$ を仮定して推定した p_c に相当する $q_u/2 \times 3$ も p_0 を上回っている。

3.2.2 茨城県神栖市堀割

図-3.2.5 に示す茨城県神栖市堀割 2-55-87 (あすなろ児童公園敷地内) で、2012 (平成 24) 年 10 月 15 日 (月) ~ 11 月 2 日 (金) の間に現場実験を行った。なお、本現場は東北地方太平洋沖地震にて液状化被害が大きかった地点である。



図-3.2.5 神栖市堀割の調査位置

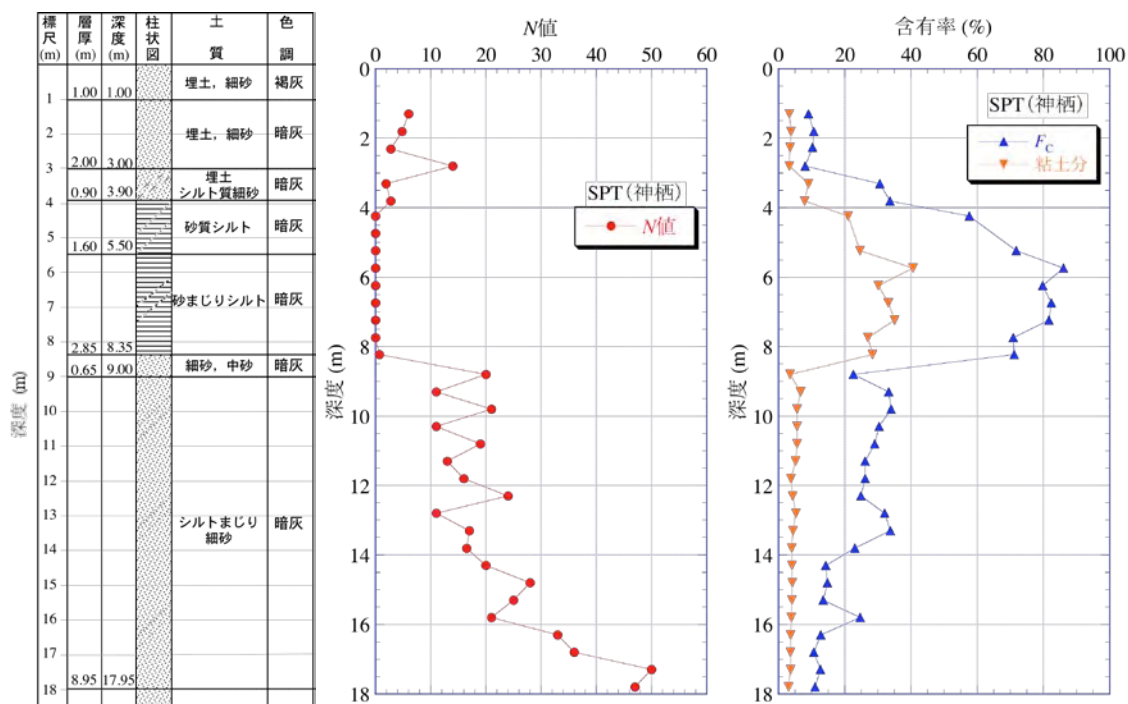


図-3.2.7 神栖市掘割での柱状図と N 値、 F_c 値の深度分布

3.2.3 千葉県浦安市運動公園

図-3.2.8 に示す千葉県浦安市舞浜 2-27 の浦安市運動公園南東部の敷地で、2012（平成 24）年 10 月 31 日（水）～11 月 9 日（金）の間に現場実験を行った。



図-3.2.8 浦安市運動公園の調査位置

実施したサウンディング試験の試験位置（1m 間隔）を図-3.2.9 に示す。試験状況を写真-3.2.3 に示す。ボーリング調査は2ヶ所行い、No.1 では SPT（調査深度 17.5m）、No.2 では土質試験用乱れの少ない砂試料サンプリング（調査深度 14m）を行った。

図-3.2.10 にボーリング・標準貫入試験による柱状図と N 値、細粒分含有率 F_c の深度分布を示す。表層 7.5m までは埋立層（浚渫土）で、特に深度 3.5～5.9m は浚渫粘性土で N 値=0（自沈）である。深度 7.5m～13m までが沖積砂層（シルト質砂）、13m 以深が沖積粘土層となっている。

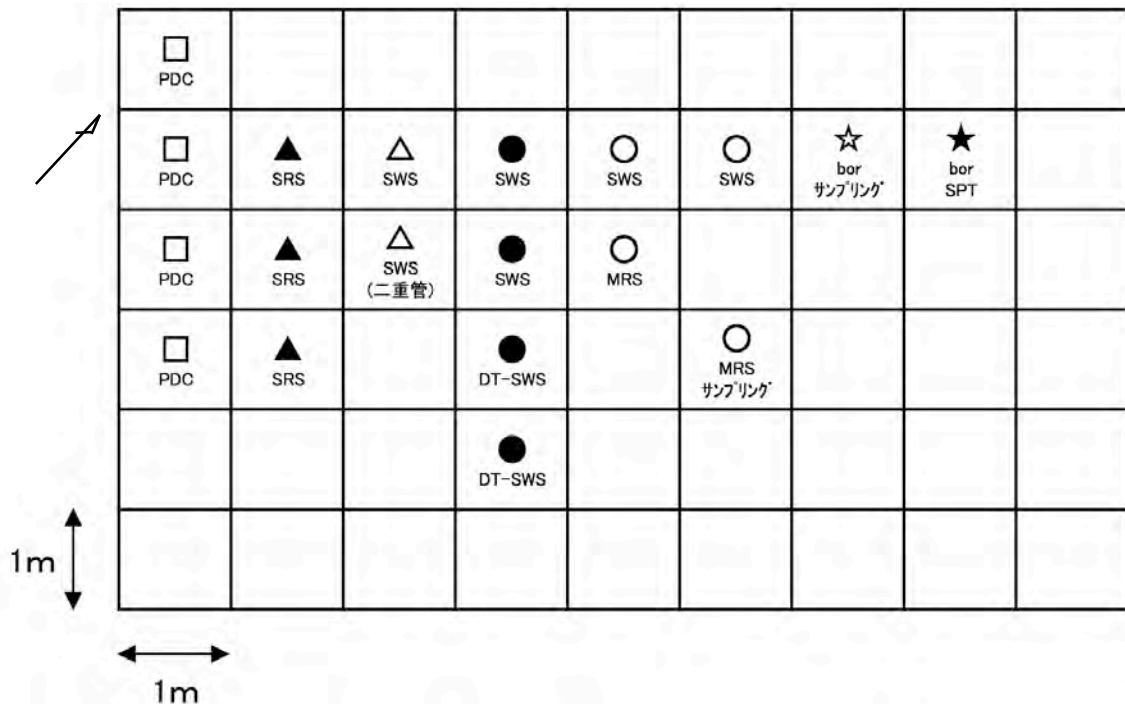


図-3.2.9 浦安市運動公園での試験位置



写真-3.2.3 浦安市運動公園での試験状況

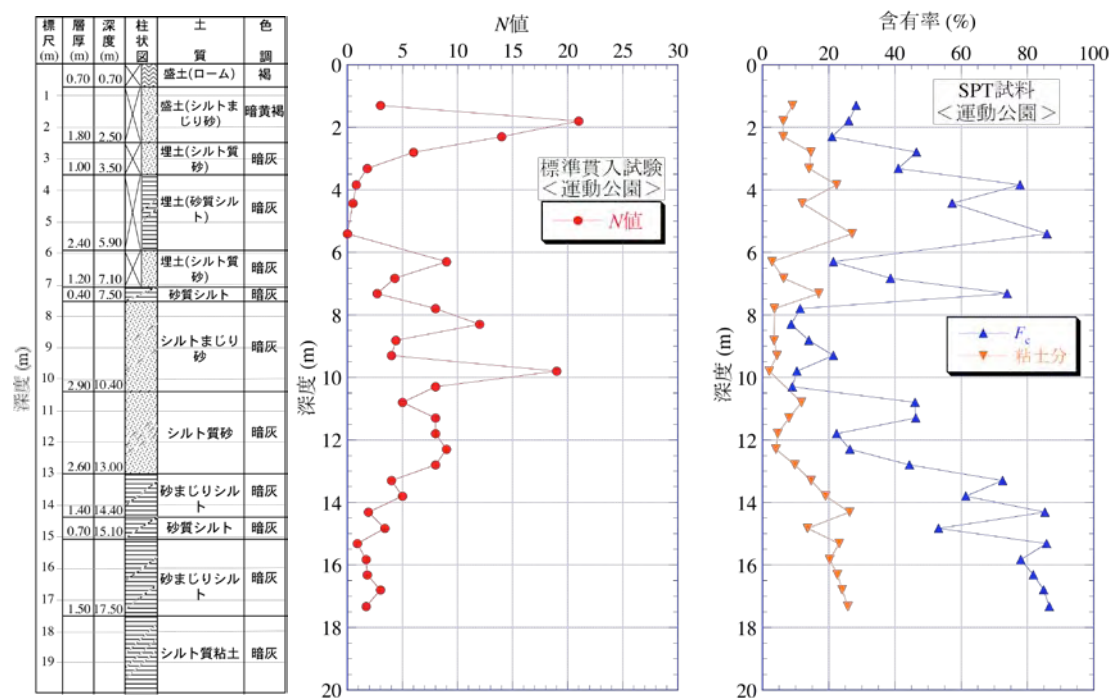


図-3.2.10 浦安市運動公園での柱状図と N 値、 F_c 値の深度分布

3.2.4 千葉県浦安市鉄鋼通り

図-3.2.11 に示す千葉県浦安市鉄鋼通り 3-198（西尾レントオール 軽仮設センター浦安機材ヤードの敷地内）で、2012（平成24）年10月31日（水）～11月9日（金）の間に現場実験を行った。なお、標準貫入試験（SPT）と沖積粘土層のサンプリングはそれよりも先行して10/9～10/16に実施している。



図-3.2.11 浦安市鉄鋼通りの調査位置

実施したサウンディング試験の試験位置（1m 間隔）を図-3.2.12 に示す。試験状況を写真-3.2.4 に示す。ボーリング調査は2ヶ所行い、No.1 では SPT（調査深度 16.5m）、No.2 では土質試験用乱れの少ない粘土試料サンプリング（調査深度 58.5m）を行った。

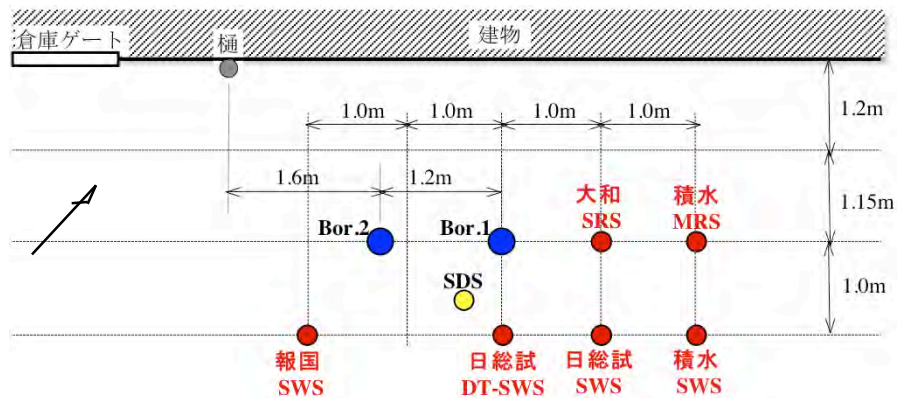


図-3.2.12 浦安市鉄鋼通りでの試験位置



写真-3.2.3 浦安市鉄鋼通りでの試験状況

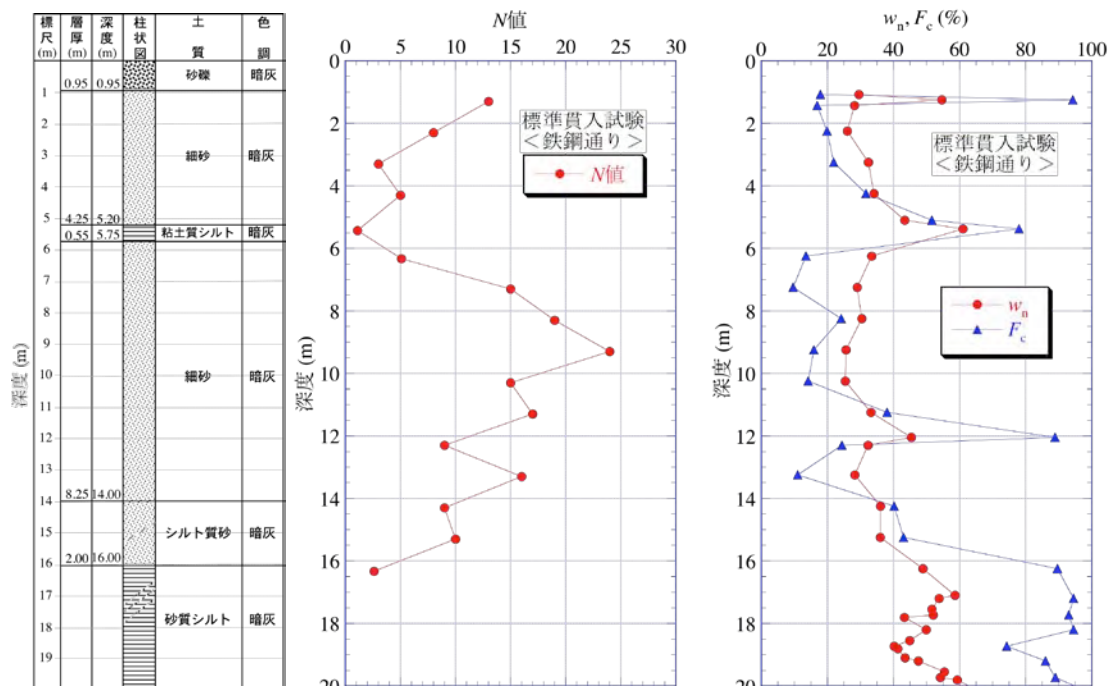


図-3.2.13 浦安市鉄鋼通りでの柱状図と N 値、 $w_n \cdot F_c$ 値の深度分布

図-3.2.13 にボーリング・標準貫入試験による柱状図と N 値、自然含水比 w_n ・細粒分含有率 F_c の深度分布を示す。3.2.3 の運動公園と同様に、表層 5.8m 程度までは埋立層（浚渫土）で、深度 5.8m～16m までが沖積砂層（シルト質砂）、13m 以深が沖積粘土層となっている。

図-3.2.14 に連続サンプリングした鉄鋼通り沖積粘土層（GL-16.5m～-57.4m）の土質試験結果を示す。図(1)～(4)が物理性質、図(5)～(8)が力学性質を表している。本粘土層は埋没谷に位置するため、非常に層厚が厚い。図(1)から粘土の塑性は深度 30m を境に堆積環境が変化して上下 2 つの弓形分布を示している。図(2)の液性指数 I_L は 1 前後であり、鋭敏ではあるが、後述する 3.2.7 の浦安港沖積粘土層ほど超鋭敏ではない。図(3)の土粒子密度 ρ_s は 2.65～2.67 程度で深度方向にほぼ一定である。図(4)より深度 30～34m 付近で砂分が多く混入している。浦安沖積粘土層の超鋭敏性と特異な性質については文献 6)～9)を参照されたい。

図(5)、(6)から、圧縮指数 C_c と圧密係数 c_v は w_L の分布と相関性が高いこと、圧密降伏応力 p_c と一軸圧縮強さ q_u から下部以外はほぼ正規圧密にあること（塑性の低い深度の q_u は過小）がわかる。

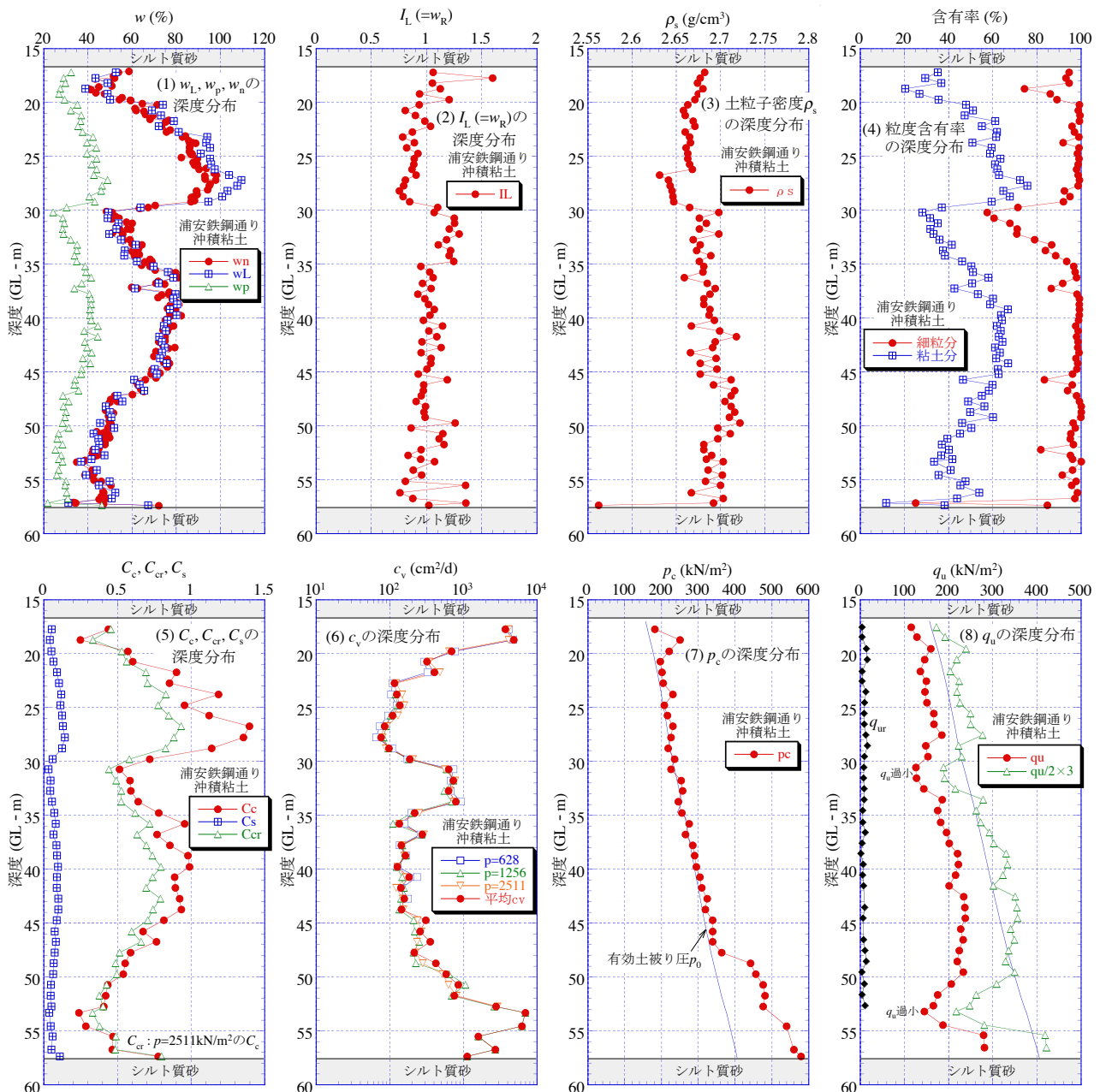


図-3.2.14 浦安市鉄鋼通り沖積粘土層の土質特性

3.2.5 滋賀県守山市今浜・水保

図-3.2.15 に示す滋賀県守山市今浜町(地点1)と水保町(地点2)の2箇所で、2012(平成24)年11月12日(月)～11月28日(水)に実施した。前者は湖成の粘性土地盤、後者は液状化の可能性がある砂質土地盤である(両地点間の距離は約1km)。両地点では地盤調査法の一斉試験(26種類の動的、静的サウンディング試験)を実施した。

表-3.2.2 に実施したサウンディング試験の一覧をまとめた(試験名称は図-3.2.16 参照)。各試験は再現性確認のため、両地点ともに原則2回ずつ行った。SPTは0.5mピッチで行い、採取試料を用いて物理試験を行った。また、今浜(地点1)では沖積粘土層(GL-4.5m～-18.9m)の、水保(地点2)では砂質土層(GL-4.0m～-9.7m)の乱れの少ない試料を連続サンプリングした。さらに、動的



図-3.2.15 守山市今浜・水保の調査位置

表-3.2.2 守山市今浜・水保で実施したサウンディング試験の一覧

動的サウンディング試験					静的サウンディング試験				
試験名	試験点数		調査 深度(m)	試験内容	試験名	試験点数		調査 深度(m)	試験内容
	地点 1	地点 2				地点 1	地点 2		
① SPT	1	2	27.5	0.5m ピッチで N 値測定	⑭ RI-CPT	1	1	24.7	三成分 (q_c, f_s, u_d) と ρ_v, w を測定
② SRS-Y1	7	6	20.0	63.5kg×0.5m、0.2m 貫入 N_d 値	⑮ S-CPT	1	1	25.3	三成分と V_s 測定 (1m ピッチ)
③ SRS-Y2	2	2	20.0	②と同じ仕様、打撃装置自重低減	⑯ HPT	1	1	15.0	送水圧と電気伝導率を測定
④ SRS-O	-	1	20.0	②と同じ仕様、OYO 製	⑰ SWS-1	2	2	20.5	Y 社製全自動試験機
⑤ Ramda	2	3	20.0	②と同じ仕様を手動測定	⑱ SWS-2	2	2	20.0	N 社製全自動試験機
⑥ MRS	2	2	20.0	30kg×0.35m、0.2m 貫入 N_d 値	⑲ SWS-3	2	2	20.0	H 社製全自動試験機、WL 測定
⑦ DPM-HT	2	2	20.0	⑥と同じ仕様を手動測定	⑳ SWS-4	2	2	22.0	Y 社製全自動試験機、②と比較
⑧ PDC	-	3	20.0	⑥と同じ仕様で間隙水圧測定	㉑ SWS-5	2	2	20.0	N 社製全自動試験機、③と比較
⑨ μ PDC	-	3	10.0	20kg×0.25m、間隙水圧測定	㉒ DT-SWS-1	2	2	20.0	Y 社製試験機で二重管式
⑩ Penny	1	2	20.0	30kg×0.2m、0.1m 貫入 N_d 値	㉓ DT-SWS-2	2	2	23.0	N 社製試験機で二重管式
⑪ DSPT	2	3	16.0	10kg×0.5m、先端 SP、0.25m 貫入 N_d 値	㉔ SDS	2	2	20.0	ロッドの回転トルク等を測定
⑫ PDCPT	3	3	10.0	5kg×0.5m、0.1m 貫入 N_d 値	㉕ F-Vane	1	-	17.5	原位置ベーンせん断試験
⑬ SH	2	2	8.0	⑫と同じ仕様で 1 打撃毎に N_d 値	㉖ SPS	1	-	18.9	水圧式サンプラーの水圧測定

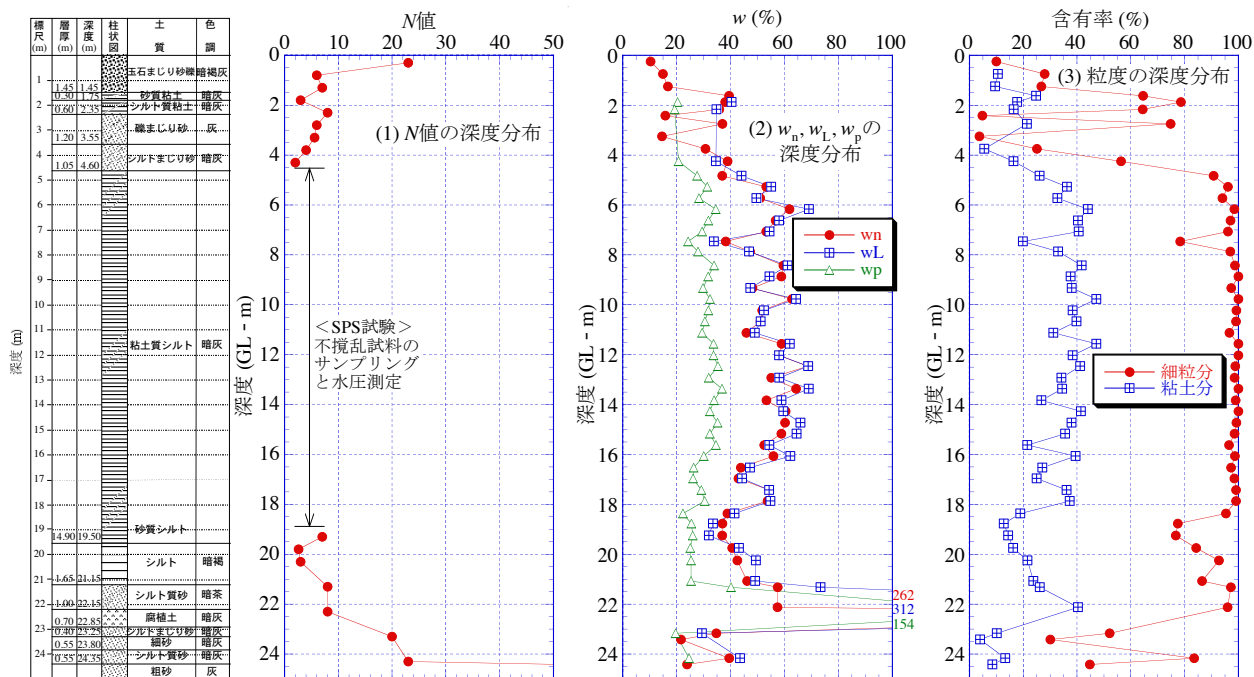


図-3.2.17 守山市今浜(地点1)の土質柱状図と N 値、物理試験結果の深度分布

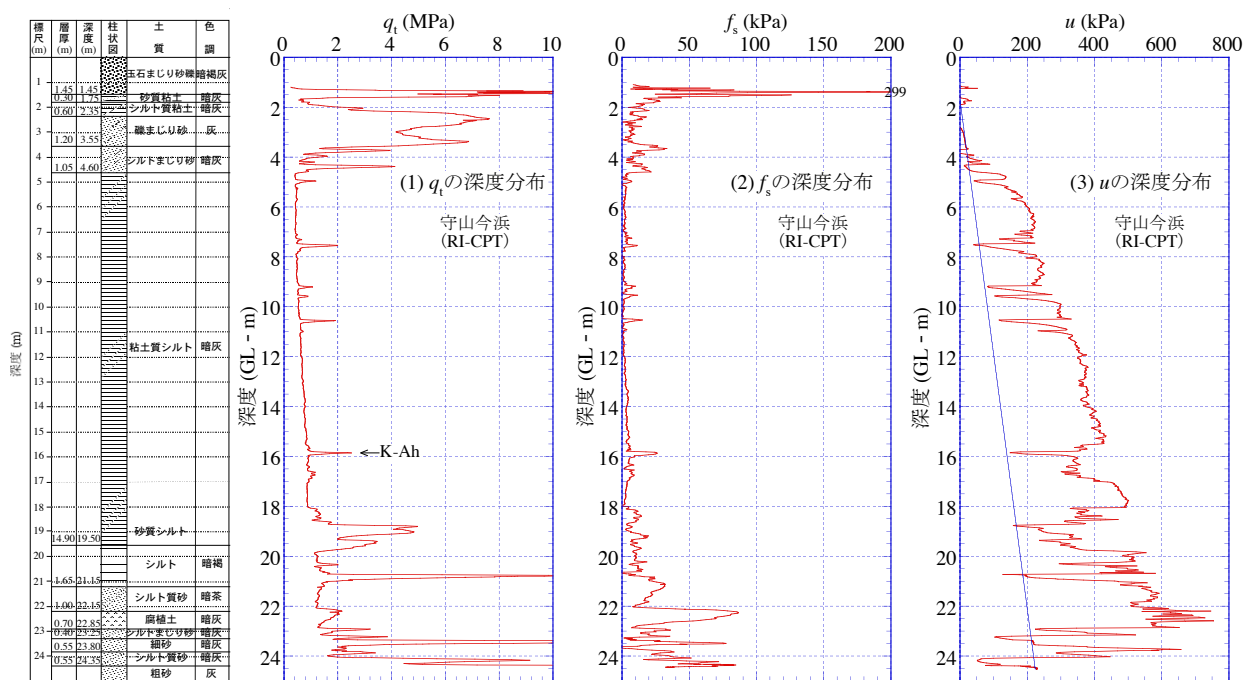


図-3.2.18 守山市今浜(地点1)の RI-CPT の結果

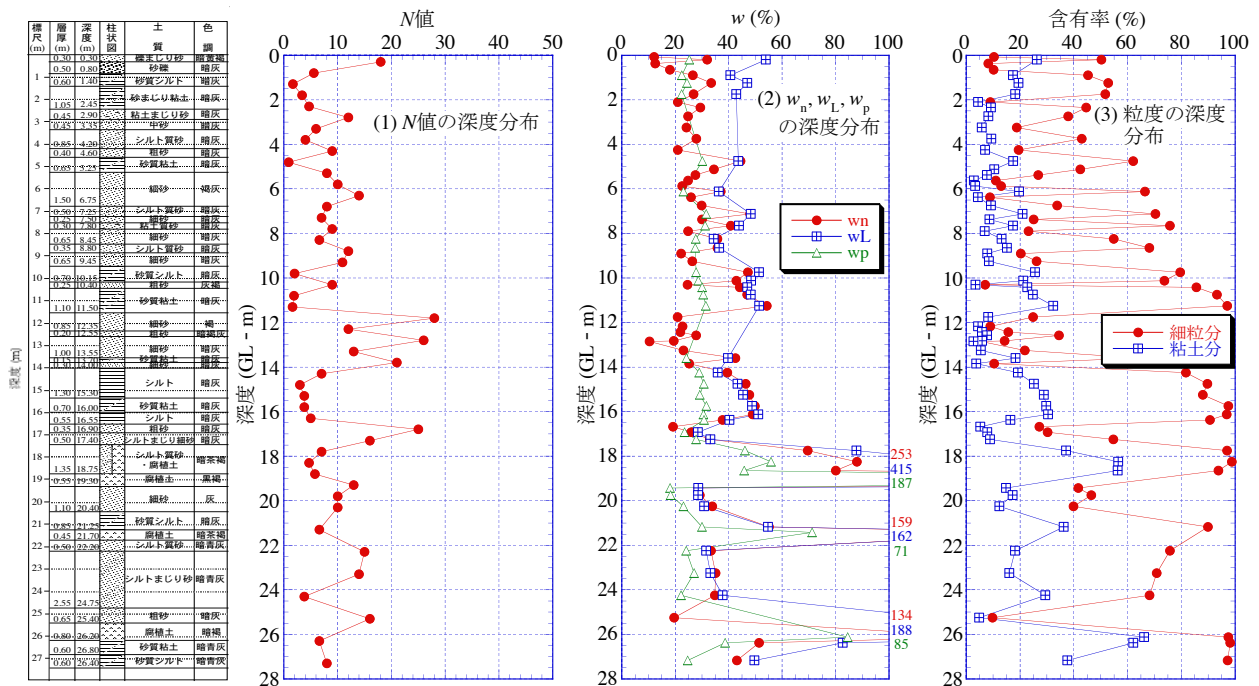


図-3.2.19 守山市水保(地点2)の土質柱状図と N 値、物理試験結果の深度分布

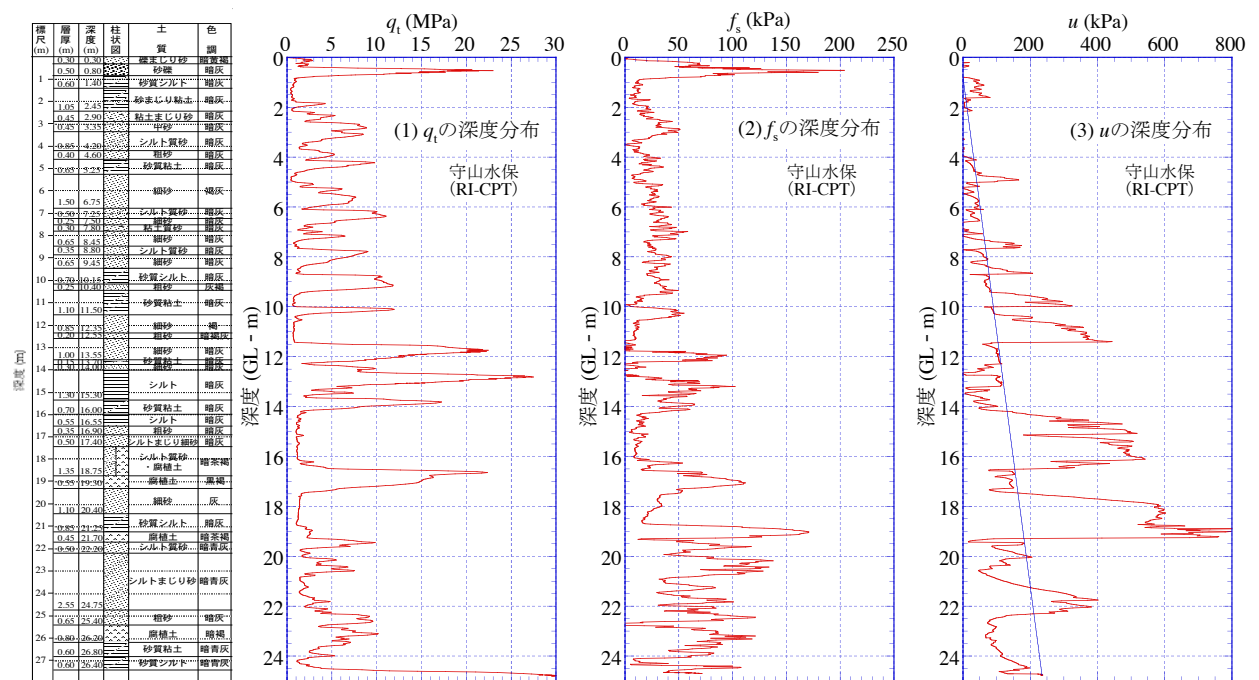


図-3.2.20 守山市水保(地点2)の RI-CPT の結果

図-3.2.21 に連続サンプリングした今浜沖積粘土層 (GL-4.5m~18.9m) の土質試験結果を示す。図(1)~(4)が物理性質、図(5)~(8)が力学性質を表している。粘土試料から藍鉄鉱が確認されており、淡水性の湖成粘土であることがわかっている。深度 15.9m でアカホヤ火山灰 (K-Ah、約 7,300 年前に降灰)、深度 18.1m で鬱陵隠岐火山灰 (U-Ok、約 10,000 年前に降灰) と推定される火山灰が出現し、土質特性に影響を与えている。

図(1)の液性限界 w_L は 50~60% の幅で小さく変化しており、海成粘土のように弓型分布は示していない。粘土の塑性が増減を繰り返しており、琵琶湖に面した地点での堆積環境が細かく変化したものと推定できる。自然含水比 w_n が w_L と同程度であるため、図(2)の液性指数 I_L は 1 付近の値をとつ

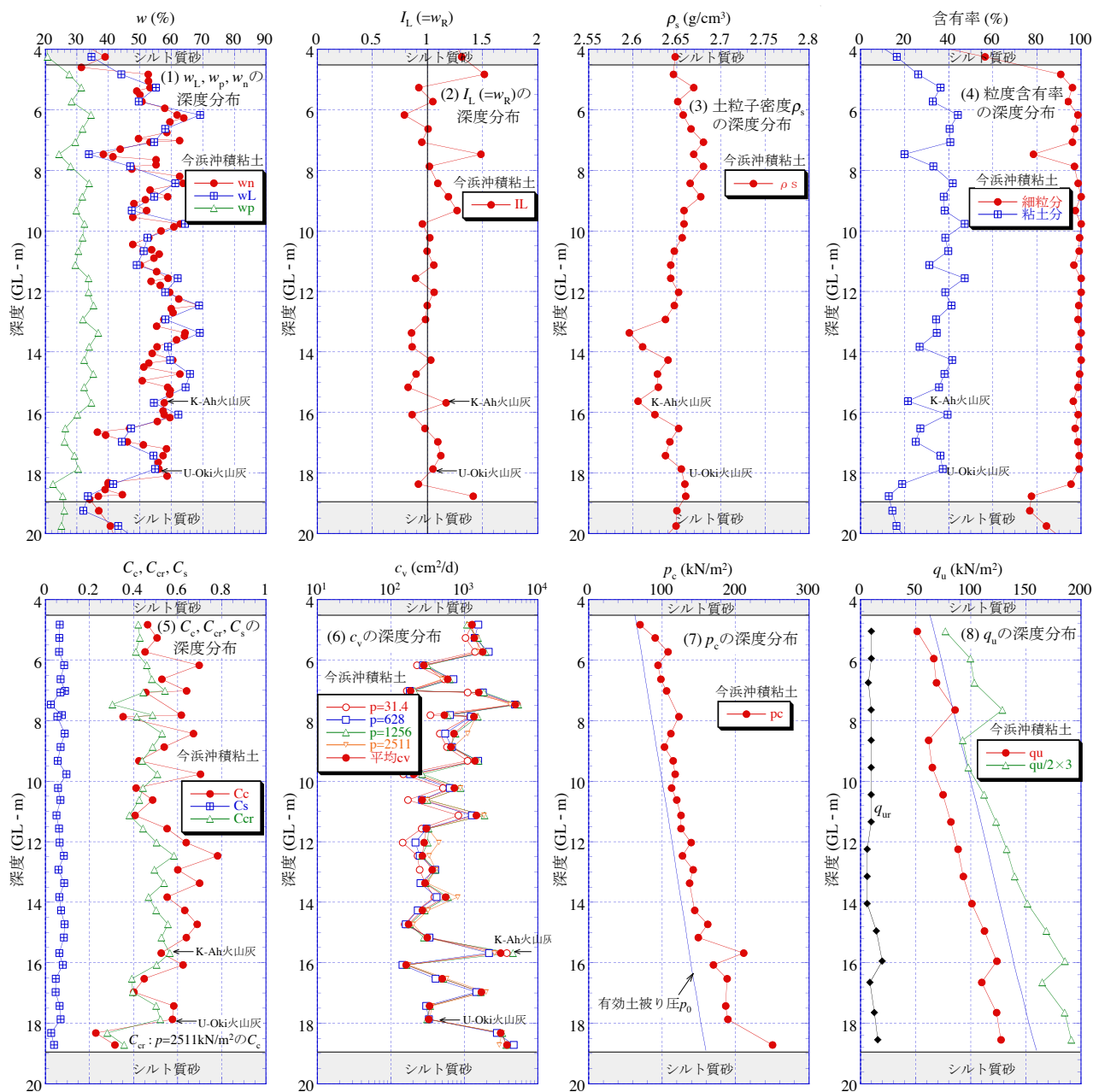


図-3.2.21 守山市今浜沖積粘土層の土質特性

ている。図(3)の土粒子密度 ρ_s は2.65程度で深度方向にほぼ一定である。図(4)より粘土分は w_L と同様の变化をしていることが確認できる。

図(5)の圧縮指数 C_c は w_L の分布を反映して弓形分布を示しており、図(6)の圧密係数 c_v は w_L と逆向きの弓形分布をしていて、相似性が見られる。図(7)の圧密降伏応力 p_c は深度8m付近で一部大きな値をとっているが基本的に深度方向に増加し、いずれの深度においても有効土被り圧 p_0 を上回り、過圧密比OCRが1を超える過圧密粘土である。図(8)の一軸圧縮強さ q_u も p_c と同様深度8m付近で一部大きな値をとり、深度方向に増加している。

3.2.6 大阪市大正区鶴町

図-3.2.22 に示す大阪市大正区鶴町2丁目5番39号（清和工業(株)敷地内）で、2013（平成25）年7月1日（月）～10日（水）の9日間に現場実験を行った。

実施したサウンディング試験の試験位置（1m 間隔）を図-3.2.23 に示す。試験状況を写真-3.2.6 に示す。ボーリング調査は2ヶ所行い、No.1 ではSPT（調査深度27.5m）、No.2 では土質試験用乱れの少ない粘土試料サンプリング（調査深度27.0m）を行った。



図-3.2.22 大阪市鶴町の調査位置

Br. No.1 SPT		Br. No.2 SPS		格子の間隔:1m ↑
● L=27.5m (7/1~3, K社)		● L=8~26m (7/4, OCU)		
MRS-1 ● L=20m (7/8, S社)		SRS-Y1-1 ● L=3.2m × (7/4, D社)		
MRS-2 ● L=20m (7/8, S社)		SRS-Y1-2 ● L=27.6m (7/4, D社)		
Vibro SP ● L=2m × (7/9, S社)	Vibro SP (下穴4m) ● L=10m (7/9, S社)	SRS-Y1-3 (開閉式SP) ● L=27.6m (7/5, D社)	SRS-Y1-4 ● L=0.8m × (7/5, D社)	
SWS(N)-1 ● L=1.2m × (7/6, N社)	SWS(Ya) (下穴3.8m) ● L=20m (7/6, Ya社)	SRS-Y1-5 ● L=14.5m (7/5, 音測定)	SRS-Y2-1 ● L=20m (7/8, Y社)	
SWS(N)-2 ● L=1.2m × (7/6, N社)	SWS(N)-3 (下穴4m) ● L=20m (7/8, N社)	SRS-Y2-2 ● L=23m (7/9, Y社)	PDCPT (下穴3.6m) ● L=10m (7/8, OCU)	

図-3.2.23 大阪市鶴町での試験位置



写真-3. 2. 6 大阪市鶴町の試験状況

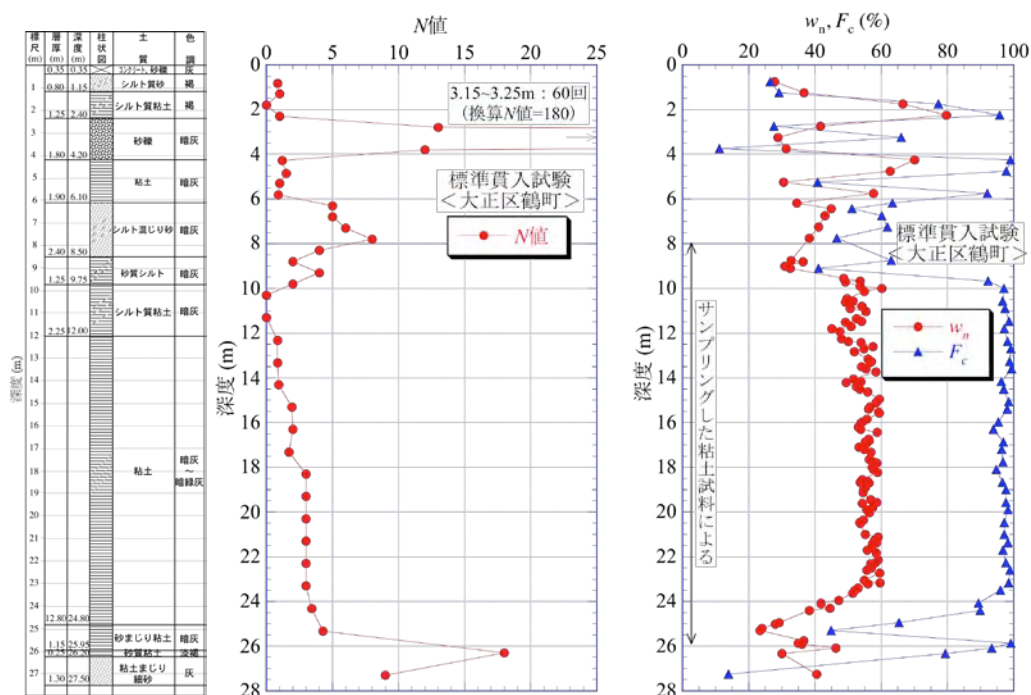


図-3. 2. 24 大阪市鶴町での柱状図と N 値、 $w_n \cdot F_c$ 値の深度分布

図-3. 2. 24 にボーリング・標準貫入試験による柱状図と N 値、自然含水比 w_n ・細粒分含有率 F_c の深度分布を示す。当地は表層 4.3m まで盛土（浚渫土と推定される）および砂礫層が存在し、間に砂層を挟んで、8.5m 以深に沖積粘土層が堆積している。

図-3. 2. 25 に連続サンプリングした鶴町沖積粘土層（GL-8.0m～-26.0m）の土質試験結果を示す。図(1)～(4)が物理性質、図(5)～(8)が力学性質を表している。沖積粘土層自体の層厚は 15m で、上部はシルト質砂、下部は礫まじりシルト質砂となっている。上町台地西縁地域である鶴町は、海進時に水深が浅くなるため、粗粒物が堆積しやすい環境にあったと考えられる。西大阪地域の典型では液性限界 w_L が弓型分布を示すが、先の理由で図(1)の w_L は弓型分布の傾向が弱く、全体に w_L は小さい。図(2)の液性指数 I_L は上部では 1 に近いが、下部に行くにしたがって漸減している。図(3)より、7,300 年前に降灰した火山灰（K-Ah）を含む 21m 前後で上下層と異なる値を取っており、火山灰による影響が考えられる。図(4)の粒度含有率から粘土分が w_L の変化と相似な増減が見られる。

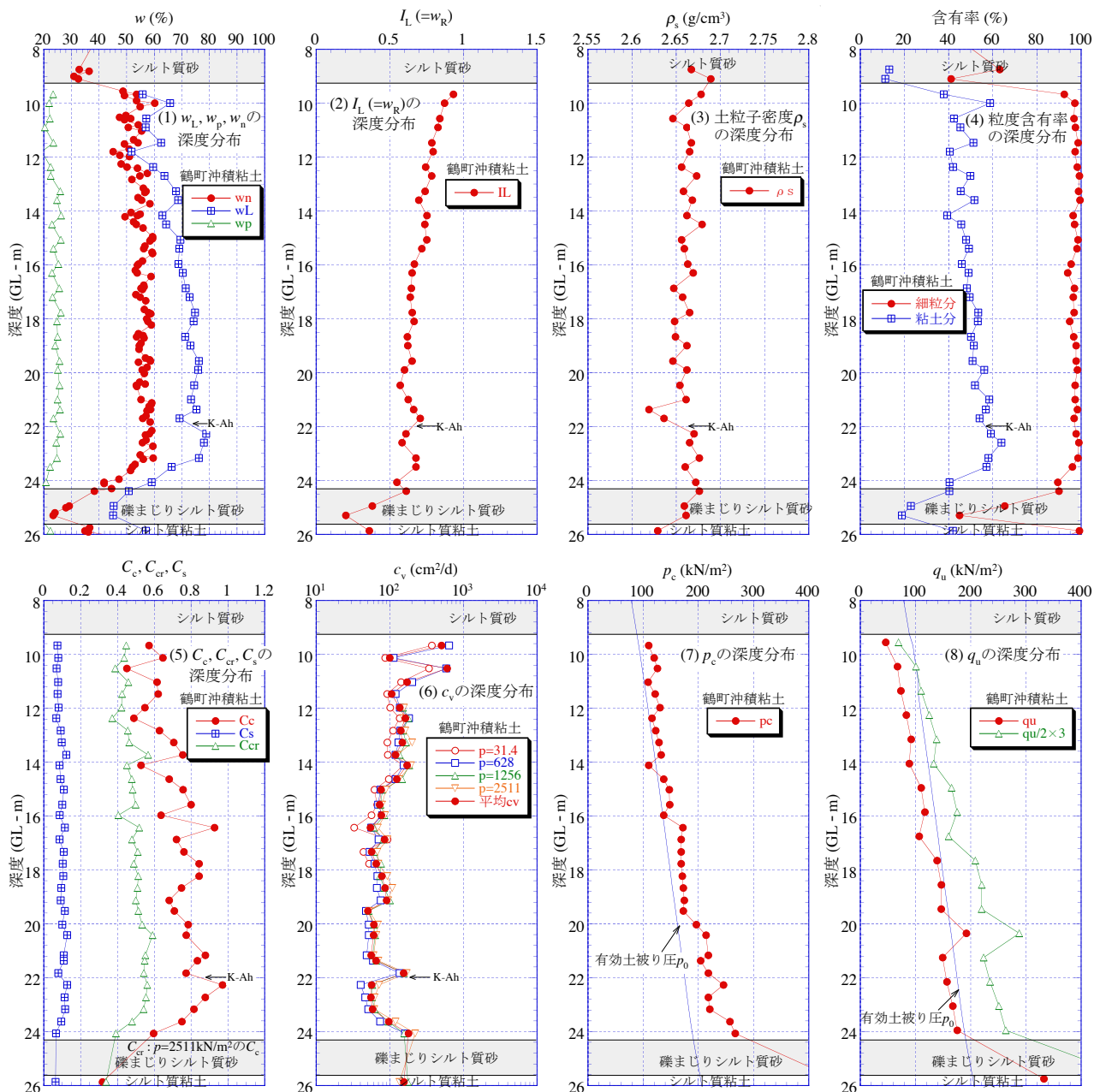


図-3. 25 大阪市大正区鶴町沖積粘土層の土質特性

図(5)の圧縮指数 C_c も w_L の変化と相似な増減が見られる。逆に図(6)の圧密係数 c_v は w_L と逆向きの変化を示している。図(7)の圧密降伏応力 p_c は、有効土被り圧 p_0 とほぼ等しい正規圧密粘土である (20m 以深はやや過圧密と言える)。図(7)、図(8)に共通して 14m 付近で上下層と異なる値を取るの、この層に特に多くの貝片、大貝を含むため、試料が乱れたと考えている。このことはサンプリング後、試料を成形した際に確認された。図(8)の一軸圧縮強さ q_u も p_c とほぼ同様な深度分布となっていることが確認できる。

3.2.7 千葉県浦安市港

図-3.2.26 に示す千葉県浦安市港 49（株）アールアンドアール サービスセンター敷地内）で、2013（平成 25）年 8 月 26 日（月）～9 月 7 日（土）の 13 日間に現場実験を行った。

実施したサウンディング試験の試験位置（1m 間隔）を図-3.2.27 に示す。試験状況を写真-3.2.7 に示す。ボーリング調査は 2ヶ所行い、No.1 では SPT（調査深度 20m）と原位置ベーンせん断試験（調査深度 20m～35m）、No.2 ではソリッドコーンを用いた SPT（調査深度 16m）と土質試験用乱れの少ない粘土試料サンプリング（調査深度 48.5m）を行った。

なお、2011 年 11 月に地盤調査一斉試験を行った浦安市高洲 8 丁目の地点 1、地点 3 の位置も図-3.2.26 に併せて示した。



図-3.2.26 浦安市港の調査位置

格子の間隔：1m			SWS(G)-2	SWS(G)-1	MRS-2	MRS-1	PDCPT-2	PDCPT-1
			 L=20m (9/5, S社)	 L=20m (9/4, S社)	 L=20m (9/5, S社)	 L=20m (9/4, S社)	 L=10m (8/30, OCU)	 L=10m (8/28, OCU)
	 SPT, Vane SPT:L=20m Vane:L=32m	開閉式SP	ドリル式SP	手動Vibro SP	SRS-Y1-2	SRS-Y1-1 (開閉式SP)	SRS-Y1-5	
		 L=1,2,4m (9/5, S社)	 L=5m (9/5, S社)	 L=8.8m (9/5, S社)	 L=30m (9/2, D社)	 L=20m (9/2, D社)	 L=20m (12/12,音測定)	
		SRS-Y3-1	SRS-Y3-2	改良型開閉 式SP	SRS-Y1-4	SRS-Y1-3 (先端式SP)	PDCPT-3	
		 L=23m (9/5, Y社)	 L=23m (9/5, Y社)	 L=10m (9/6, Y社)	 L=20m (9/3, 音測定)	 L=6.8m (9/2, D社)	 L=10m (9/2, OCU)	
	SPT, SPS  SPT:L=16m SPS:L=47.9m	Vibro SP-2 (Eco-1V)  L=10m (9/6, H社)	SWS(H)-1  L=20m (9/6, H社)	改良型開閉 式SP  L=1, 5, 6m (9/6, Y社)	SWS(Y2)  L=20m (9/4, N社)	DT- SWS(Y2)  L=16m (9/5, N社)		
手動SWS-1  L=6.87m (K社)		Vibro SP-1 (Eco-1V)  L=4m (9/6, H社)	Vibro SP-3 (Eco-1V)  L=10m (9/6, H社)	SWS(H)-2  L=20m (9/6, H社)	DT- SWS(Y1)  L=20m (9/5, Ya社)	SWS(Y1) (開閉式SP)  L=20m (9/4, Ya社)	手動SWS-2  L=8.75m (9/2, OCU)	

図-3.2.27 浦安市港での試験位置



写真-3.2.7 浦安市港の試験状況

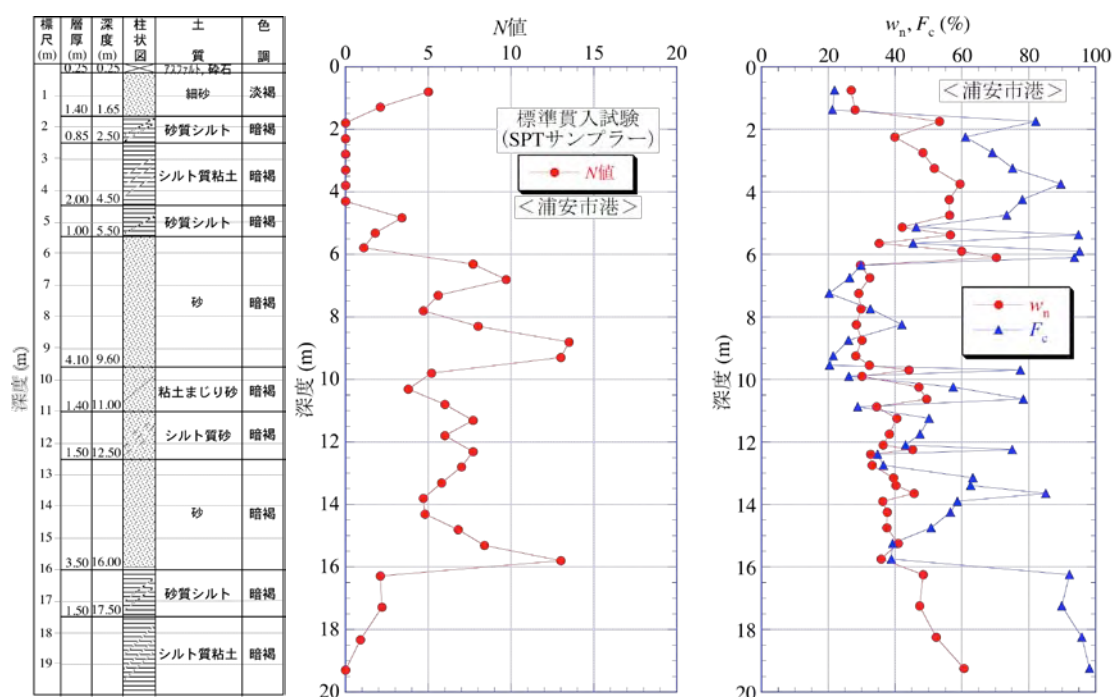


図-3.2.28 にボーリング・標準貫入試験による柱状図と N 値、自然含水比 w_n ・細粒分含有率 F_c の深度分布を示す。当地は深度 5.5m～16.0m にかけて砂層が存在し、その下に軟弱な粘土層が厚く堆積する。基本的には 3.2.3、3.2.4 の運動公園と鉄鋼通りと同じ構成で、表層 5.5m までは埋立層（浚渫土）で、特に深度 2.5～4.5m は浚渫粘性土で N 値=0（自沈）である。深度 5.5m～16m までが沖積砂層（シルト質砂）、16m 以深が沖積粘土層となっている。

図-3.2.29 に連続サンプリングした浦安市港沖積粘土層（GL-16.1m～-47.9m）の土質試験結果を示す。図(1)～(4)が物理性質、図(5)～(8)が力学性質を表している。図(1)の液性限界 w_L から、粘土の塑性は深度 27m、42m を境に 3 つの弓形分布を示しており（深度 35m には粗粒物を挟む）、堆積環境の変化を受けている。全体に自然含水比 w_n が w_L よりも大きく、特に深度 27～35m では図(2)の液性指数 I_L が 1.5～2.5 を示しており、3.2.4 の鉄鋼通りとは明らかに性状が異なり超鋭敏性を示している。これは 2011 年に調査した高洲⁶⁾と同様である。図(3)の土粒子密度 ρ_s は 2.60～2.75 の範囲で比較的变化が大きい。図(4)の粒度含有率より、粘土分の分布と w_L と相似である。また、塑性が低

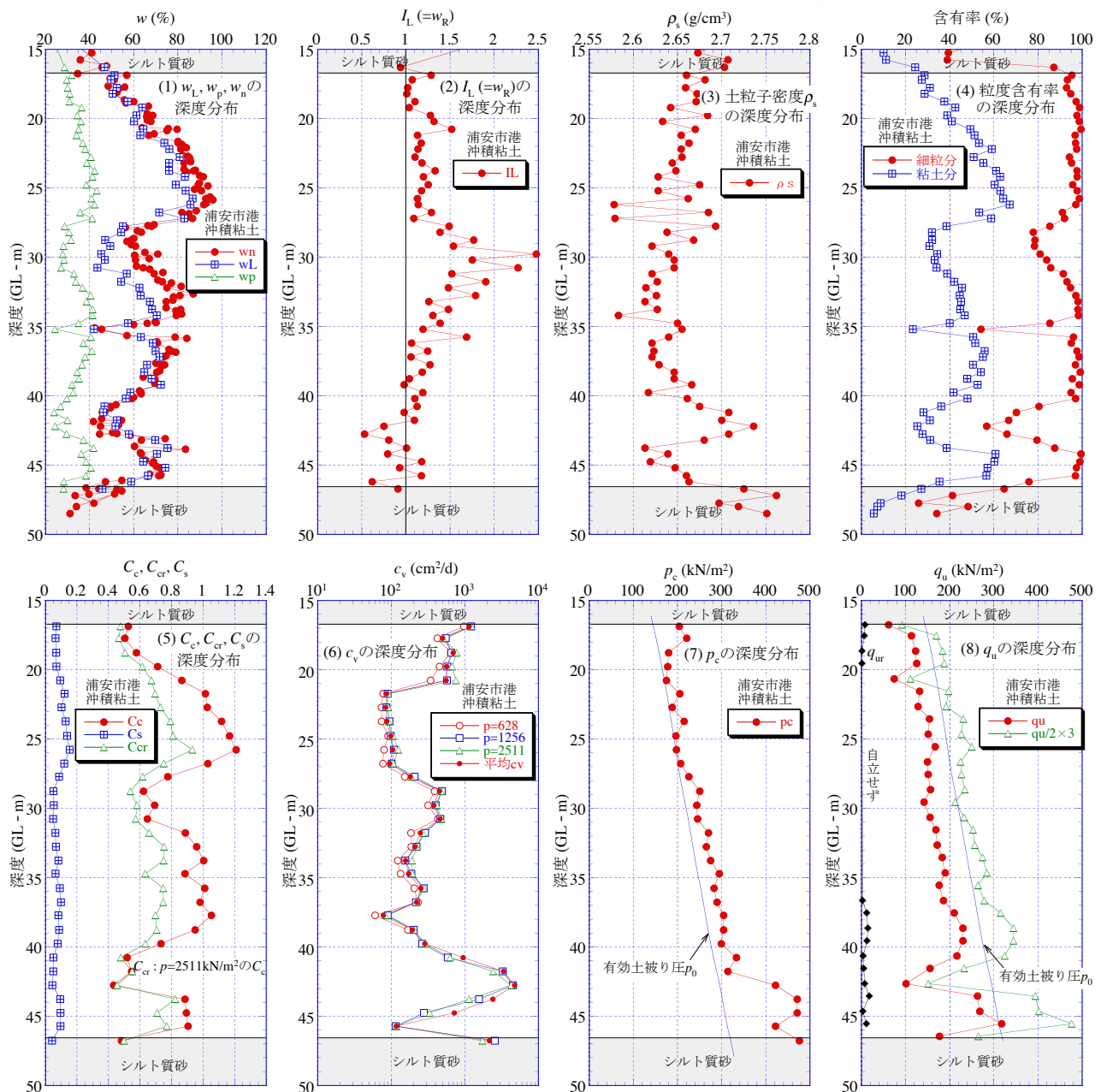


図-3.2.29 浦安市港沖積粘土層の土質特性

い深度では砂分の混入が大きいことがわかる。

図(5)、(6)から、圧縮指数 C_c と圧密係数 c_v は w_L の分布と相関性が高いことがわかる。図(7)の圧密降伏応力 p_c から、ほぼ正規圧密あるいはわずかに過圧密にあるといえる。図(8)の一軸圧縮強さ q_u からほぼ正規圧密($q_u/2 \times 3$ は p_c 相当)であることがわかる(塑性の低い深度の q_u は過小である)。ただし、深度 20～36m では繰り返すとトロトロの液体状になり、自立しなかったことから超鋭敏性を示すことがわかった。

なお、浦安沖積粘土層の超鋭敏性と特異な性質については文献 6)～9)を参照されたい。

3.2.8 佐賀県唐津市岸山・原

図-3.2.30、3.2.31 に示す佐賀県唐津市原 1297（(株)YBM サービス敷地内）と同市北波多岸山 589-1（(株)YBM 岸山第3工場敷地内）で、2013（平成25）年10月15日（火）～18日（金）の4日間に現場実験を行った。

唐津市原、岸山で実施したサウンディング試験の試験位置（1m 間隔）をそれぞれ図-3.2.32、3.2.33 に、試験状況を写真-3.2.8、3.2.9 に示す。



図-3.2.30 唐津市原の調査位置



図-3.2.31 唐津市岸山の調査位置

	SRS-Y3-3 ● $L=20m$ (11/26, Y社)	SRS-Y3-4 ● $L=20m$ (11/26, Y社)	SRS-Y3-5 ● $L=18m$ (12/5, Y社)	
格子の間隔:1m		SRS-Y3-1 ● $L=18m$ (10/17, Y社)	SRS-Y3-2 ● $L=20m$ (10/17, Y社)	
		SPT ● $L=19.2m$ (10/24, D社)	SRS-Y1-1 ● $L=18m$ (10/17, D社)	
		SWS-2 ● $L=15m$ (10/18, Ya社)	SRS-Y1-2 ● $L=18m$ (10/17, 音測定)	DT-SWS-2 ● $L=15m$ (10/18, Ya社)
SWS-1 ● $L=12.9m$ (10/18, N社)	DT-SWS-1 ● $L=15m$ (10/18, N社)			

図-3.2.32 唐津市原での試験位置

格子の間隔:1m		SRS-Y3-1 ● $L=10m$ (10/16, Y社)	SRS-Y3-2 ● $L=10m$ (10/16, Y社)	
DT-SWS-1 ● $L=7.8m$ (10/19, N社)		SPT ● $L=9.1m$ (10/25, D社)	SRS-Y1-1 ● $L=8.0m$ (10/16, D社)	
SWS-1 ● $L=8.4m$ (10/19, N社)	SWS-2 ● $L=7.4m$ (10/19, Ya社)	DT-SWS-2 ● $L=6.9m$ (10/19, Ya社)	SRS-Y1-2 ● $L=10m$ (10/16, 音測定)	

図-3.2.33 唐津市岸山での試験位置



写真-3.2.8 唐津市原の試験状況



写真-3.2.9 唐津市岸山の試験状況

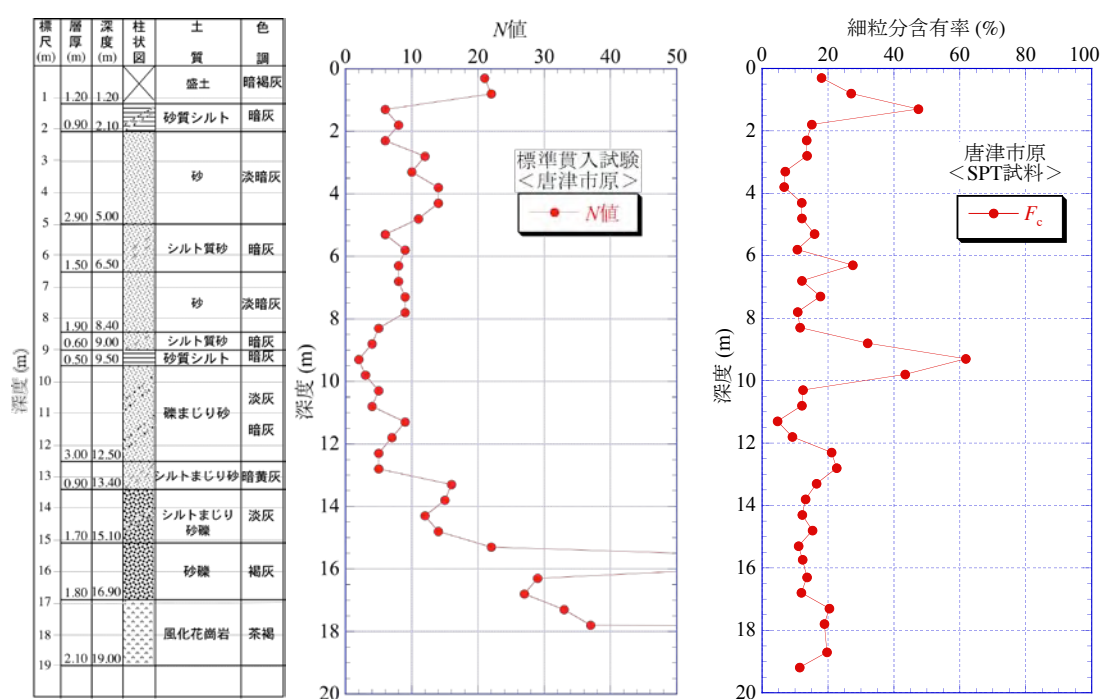


図-3.2.34 唐津市原での柱状図と N 値、 F_c 値の深度分布

図-3.2.34、3.2.35 にそれぞれ原、岸山のボーリング・標準貫入試験による柱状図と N 値、細粒分含有率 F_c の深度分布を示す。

図-3.2.34 の原は、深度 2.1m～13.4m にかけて砂層とシルト分の多い砂層が堆積しており、 N 値は 10 前後でかなり緩い。その下に堆積する礫まじり砂と砂礫では N 値が深度方向に増加し、深度 18m 当たりの硬質層で 50 を大きく越えて試験終了となった。

図-3.2.35 の岸山は、表層から深度 4.9m までが砂質粘土の盛土層（細粒分含有率 F_c が 60% 前後でほぼ一定）で、 N 値は深度方向にほぼ一定であるが、その下の砂層では深度方向に増加し、深度 7m 当たりの硬質層で N 値が 50 を大きく越えて試験終了となった。

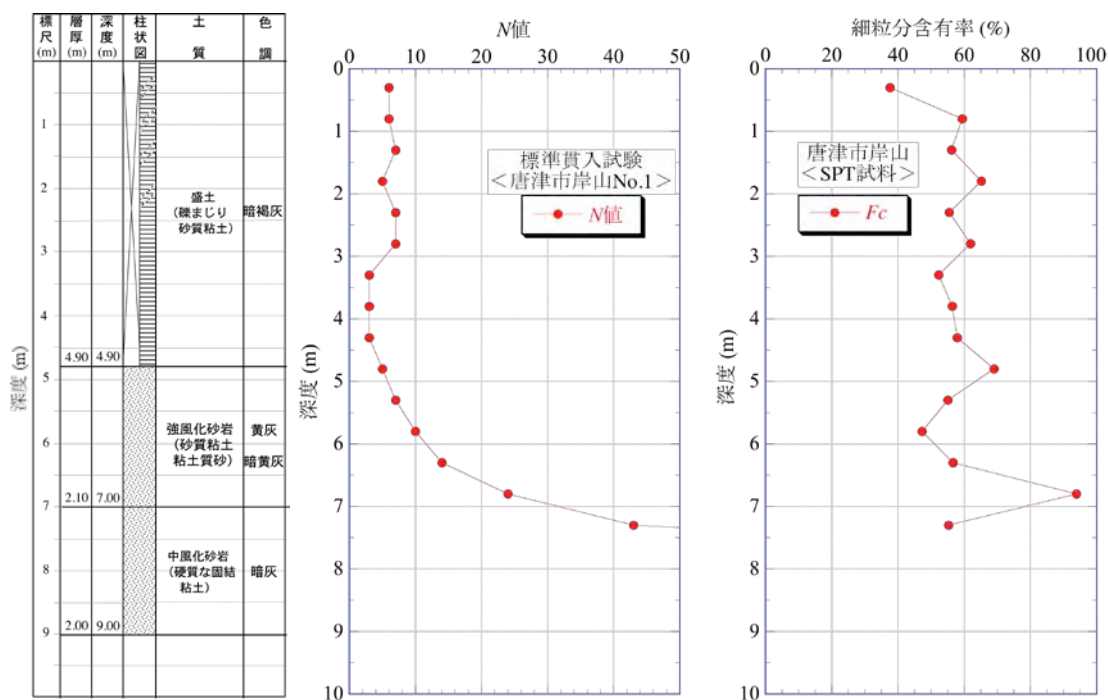


図-3.2.35 唐津市岸山での柱状図と N 値、 F_c 値の深度分布

3.2.9 千葉県香取市佐原地点 1・地点 2

図-3.2.36 に示す千葉県香取市佐原口（佐原河川敷緑地の敷地内）の地点 1、地点 2 で、2013（平成 25）年 12 月 2 日（火）～12 日（木）の間に現場実験を行った。

当敷地では、地盤工学会関東支部の「各種サウンディングの液状化対策手法としての適用性に関する研究委員会」（委員長：規矩大義 関東学院大学）が地盤調査一斉試験として実施されたものである⁷⁾。なお、本現場は東北地方太平洋沖地震にて液状化被害が大きかった地点である。



図-3.2.36 香取市佐原地点 1、地点 2 の調査位置

地点 1、地点 2 で実施したサウンディング試験の試験位置（1.5m 間隔）をそれぞれ図-3.2.37、3.2.38 に、試験状況を写真-3.2.10、3.2.11 に示す。

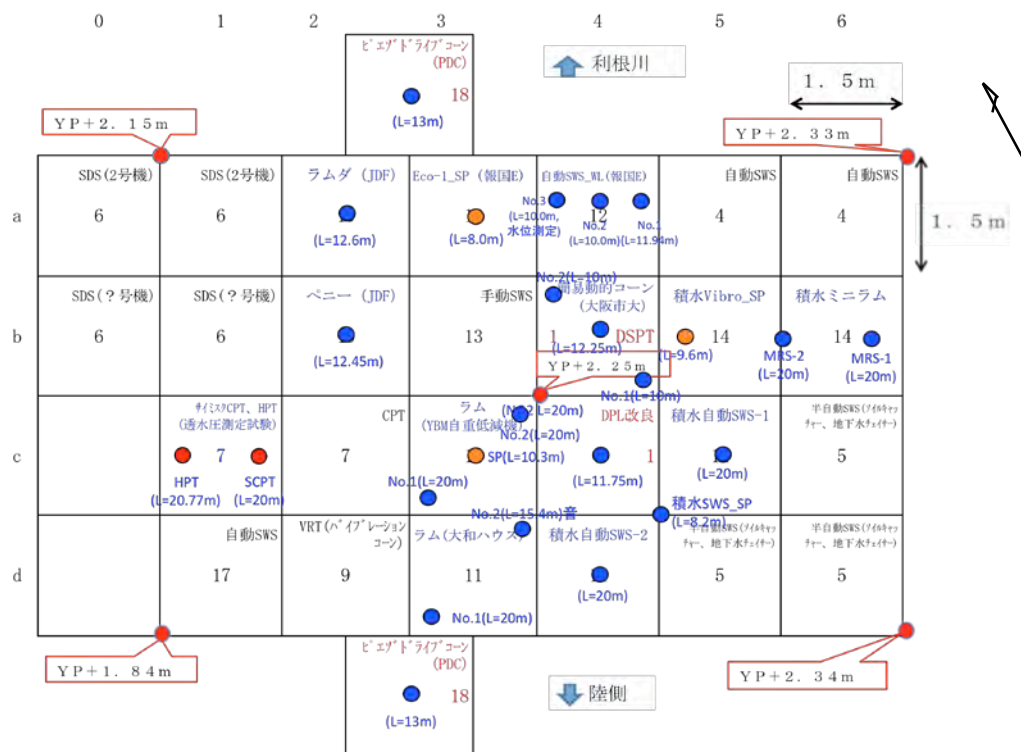


図-3.2.37 香取市佐原地点 1 での試験位置

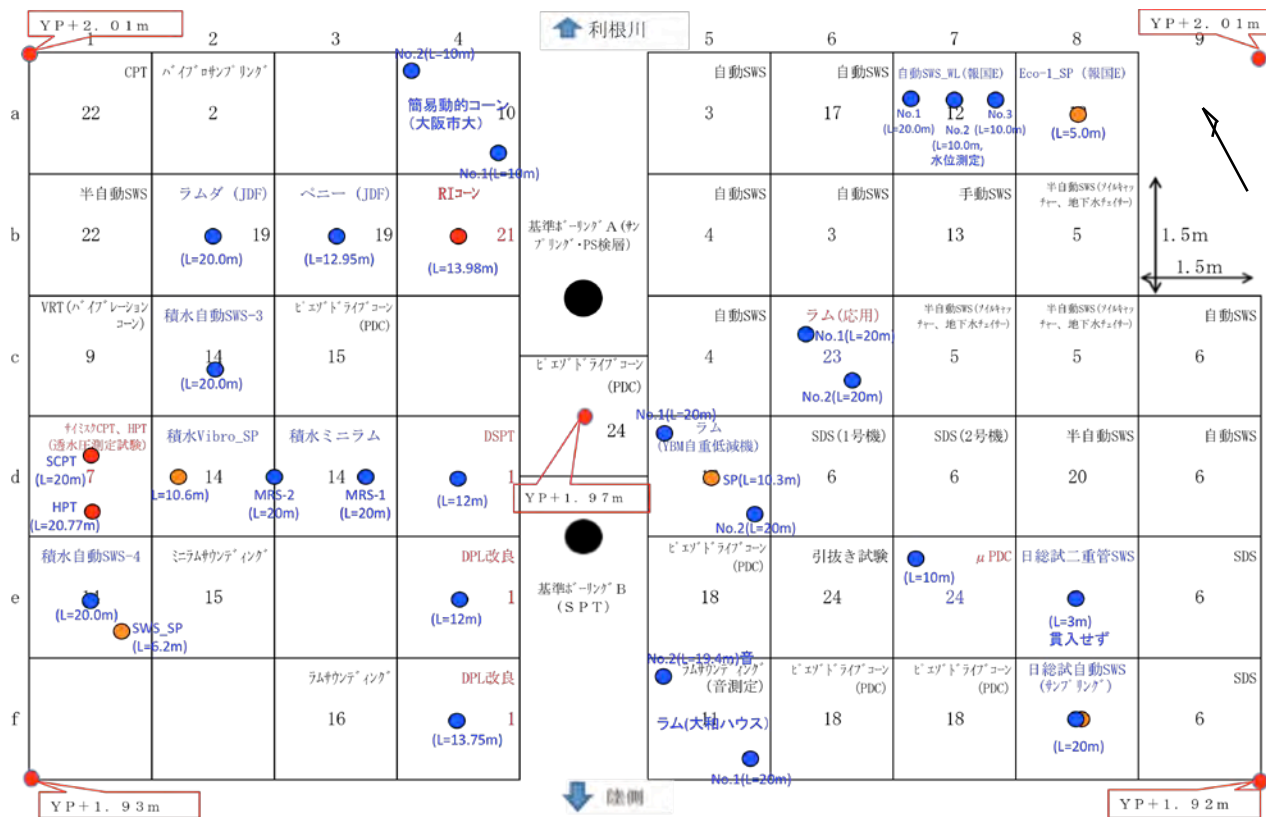


図-3.2.38 香取市佐原地点 2 での試験位置



写真-3.2.10 香取市佐原地点1の試験状況



写真-3.2.11 香取市佐原地点2の試験状況

図-3.2.39、3.2.40 にそれぞれ地点1、地点2のボーリング・標準貫入試験による柱状図と N 値、細粒分含有率 F_c の深度分布を示す。なお、地点1はボーリング・標準貫入試験を実施していないので、SRS と手動パイプロサンプラー試料による結果で示している。

図-3.2.39 に香取市調査地点の明治期の地形図に示す。地点1は明治期より河川の深掘れ（12m程度）した箇所に対応し、昭和になってから浚渫された場所で、浚渫による緩い砂質土が分布しているようである。地点2は明治期より河川の中州であった箇所で、自然地盤の沖積砂質土が分布しているようである。

図-3.2.40 の地点1では、深度2.5～5.5mに軟弱な粘性土層があり、それ以深には砂層が堆積している。ただし、9.6m以深は試料が採取できていないので、土質の判定ができていない。

図-3.2.41 の地点2では、浅層3mまでが軟弱な粘性土層で、それ以深の N 値は10前後であり深度14m～16m付近で N 値 >20 を示す。細粒分含有率 F_c は、深度3～15mまではほぼ10%（7、8m付近で局所的に高いが）、15m以深で20%程度とかなり均一な地盤と言える。ただし、地点2では図-3.2.38に示すように、調査範囲が広いので、中央の基準ボーリングを挟んで左右の地盤の性状が異なり、不均一性が見られた（3.3.1、4.2.1で後述）。



図-3.2.39 香取市調査地点の明治期の地形図

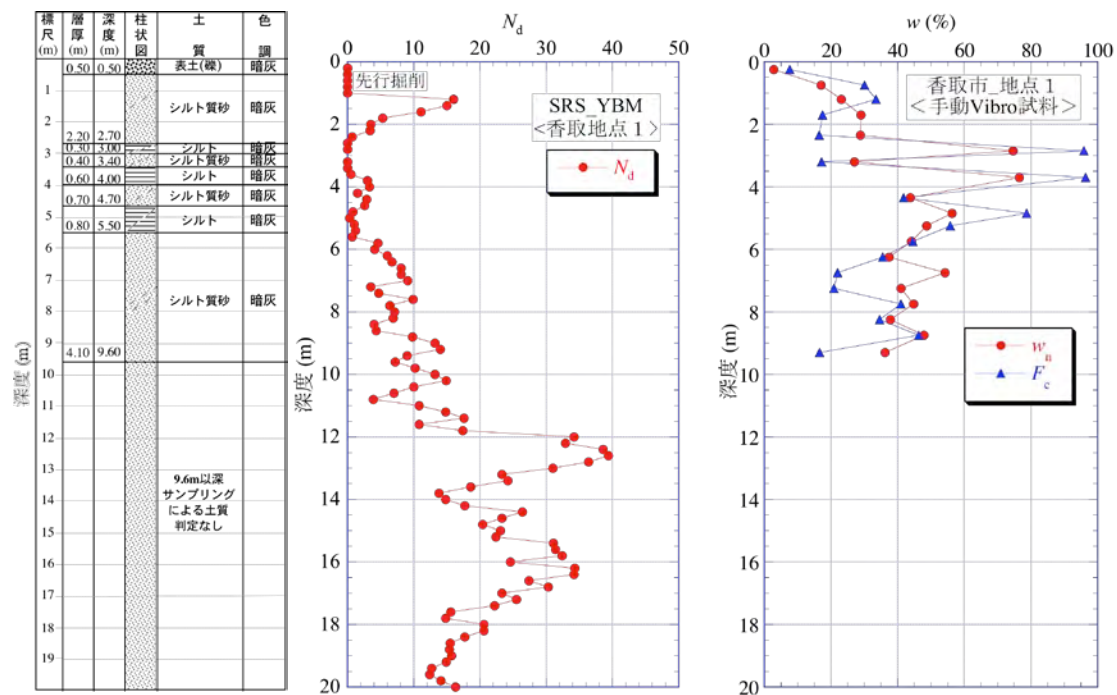


図-3.2.40 香取市佐原地点1での柱状図とSRSの N_d 値、 $w_n \cdot F_c$ 値の深度分布

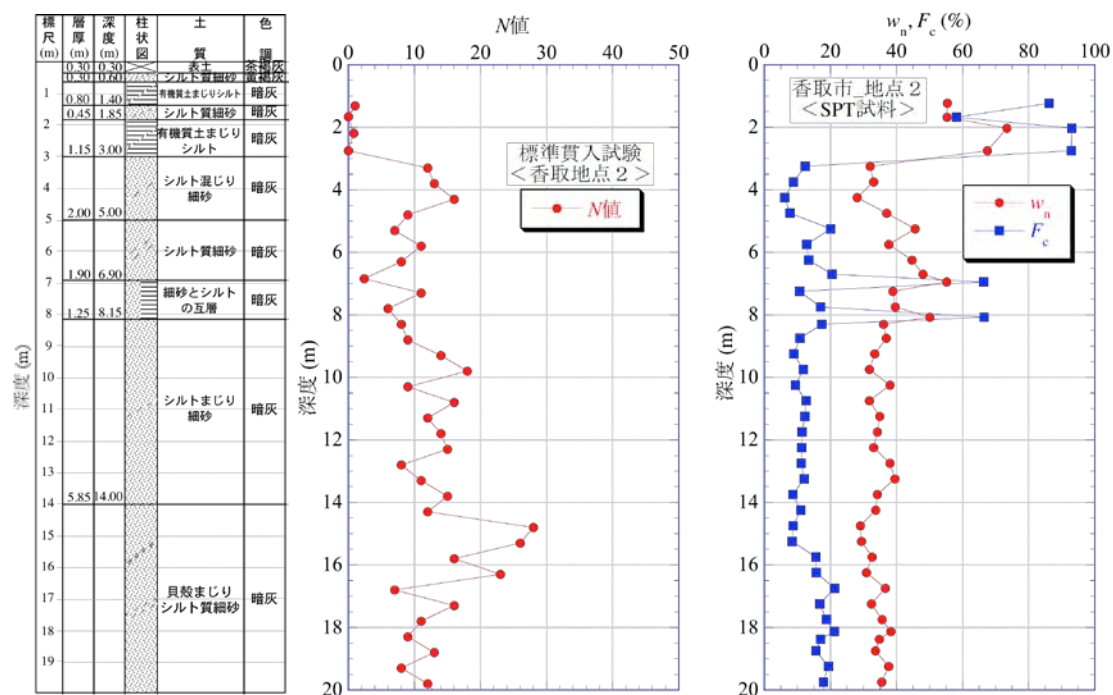


図-3.2.41 香取市佐原地点2での柱状図と N 値、 $w_n \cdot F_c$ 値の深度分布

参考文献

- 1) 柴田芳彦・大島昭彦・平田茂良・山本明弘・田中洋行・平林弘：動的コーン貫入試験と静的コーン貫入試験の比較の一例，第46回地盤工学研究発表会，No.48，pp.103-104，2011.
- 2) 大島昭彦・鈴木達也・和田昌大・田中洋行・松岡達也・平田茂良：東大阪での各種サウンディング試験の比較（その1：調査概要），第46回地盤工学研究発表会，No.32，pp.71-72，2011.
- 3) 鈴木達也・大島昭彦・宮田尚樹・和田昌大・久保田耕司：水圧式サンプラーによるサンプリング・サウンディング試験と力学試験との比較，土木学会第67回年次学術講演会，III-006，pp.11-12，2012.
- 4) 大島昭彦・田中洋行・三村衛・吉村貢・浅尾一巳・和田昌大：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：調査概要），第47回地盤工学研究発表会，No.67，pp.131-132，2012.
- 5) 廣瀬竜也・大島昭彦・下平祐司・平田茂良・深井公・平田拓也：二重管スウェーデン式サウンディングの開発と測定例，第47回地盤工学研究発表会，No.96，pp.189-190，2012.
- 6) 鈴木達也・大島昭彦・久保田耕司・笹尾憲一：千葉県浦安市沖積粘土層の土質特性の測定例，土木学会第68回年次学術講演会，III-315，pp.229-230，2013.
- 7) 大島昭彦・久保田耕司・笹尾憲一：千葉県浦安市沖積粘土の液性限界の経時変化の測定例，土木学会第68回年次学術講演会，III-316，pp.231-232，2013.
- 8) 新井瞬・大島昭彦・久保田耕司・深井晴夫・笹尾憲一・栗津和也：千葉県浦安市沖積粘土層の土質特性と液性限界の経時変化の測定例(第2報)，土木学会第69回年次学術講演会(投稿中)，2014.
- 9) 大島昭彦・新井瞬・久保田耕司・深井晴夫・笹尾憲一・栗津和也：千葉県浦安市沖積粘土の鋭敏性と塩化物含有量の関係，土木学会第69回年次学術講演会(投稿中)，2014.
- 10) 三村衛・後藤政昭・吉村貢・寺尾庸孝：滋賀県守山市における地盤調査一斉試験の比較（その2：RI-CPT），第48回地盤工学研究発表会，No.87，pp.173-174，2013.
- 11) 規矩大義・利藤房男・信本実：千葉県香取市佐原河川敷におけるサウンディング現地実験，第49回地盤工学研究発表会，No.113，2014.

3.3 現場実験結果

3.3.1 大型動的コーン貫入試験 (SRS) 結果

大型動的コーン貫入試験 (Swedish Ram Sounding、SRS) は、コーンの単位面積当たりの打撃エネルギーは、ISO 規格 (ISO22476-2 : 2005) の DPSH-A (Super Heavy-A) に対応している

表-3.3.1 に SRS 試験機の打撃仕様をまとめた。写真-3.3.1 に示す YBM 製の全自動型の従来機 (SRS-Y1 と表す) は 2002 年から販売され、国内で普及している試験機であるが、打撃前にアンビルとロッドにかかる打撃装置の総質量が 177.5kg と過大である。これはハンマー吊上げ機構を含むバケットの自重が直接アンビルにかかるためである。そこで、SRS-Y1 を改造して写真-3.3.2 に示す自重低減機 (SRS-Y2 と表す) が開発された¹⁾。この試験機ではバケット部を常に支えるリフト機構を導入し、質量を 77.5kg (ハンマーとアンビルの質量) に低減している。さらに、写真-3.3.3 に示す新型自重低減機 (SRS-Y3 と表す) では、アンビル/ハンマー径比を ISO 規格の 0.5 に合わせるためにハンマーガイド径を細くし、アンビル径を小さくしたもので、質量は 80.5kg となった。図-3.3.1 に SRS-Y1、SRS-Y2、SRS-Y3 試験機の機構の比較を示す²⁾。なお、SRS-Y2 と SRS-Y3 を現場調査 (8) 唐津市原を参照) で比較した結果、両者の N_d 値に違いはなかった³⁾、以下では同じ自重低減機として扱う。試験機の詳細は文献 1)、2)を参照されたい。

さらに、試験機としては写真-3.3.4 に示す半自動型の SRS-O (応用地質製) と写真-3.3.5 に示す手動型の Ramda (JDF 製) があり、守山市今浜・水保と香取市地点 1・2 で比較試験を行った³⁾、⁴⁾。

表-3.3.1 大型動的コーン貫入試験機の打撃仕様

試験機名	SRS-Y1 (YBM 従来機)	SRS-Y2 (YBM 自重低減機)	SRS-Y3	SRS-O (応用地質)	Ramda (JDF)
ハンマー質量 m (kg)	63.5				
落下高 H (mm)	500				
ハンマー外径 D_h (mm)	246			198	180
ハンマーガイド径 (mm)	101.6		48.6	25	40.5
アンビル直径 D_a (mm)	155		120	100	97
アンビル質量 (kg)	14		17	14	4.5
アンビル/ハンマー径比 D_a/D_h	0.63		0.49	0.51	0.54
打撃装置の総質量 (kg)	177.5	77.5	80.5	90	93



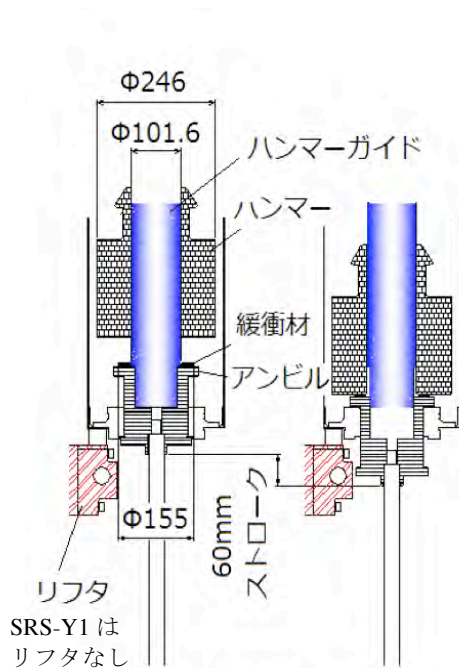
写真-3.3.1 SRS-Y1 試験機



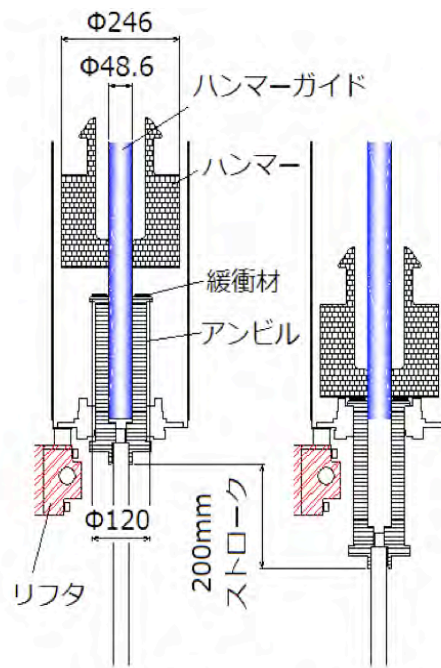
写真-3.3.2 SRS-Y2 試験機



写真-3.3.3 SRS-Y3 試験機



(1) SRS-Y1 と SRS-Y2



(2) SRS-Y3

図-3.3.1 SRS-Y1、SRS-Y2、SRS-Y3 の機構比較²⁾



写真-3.3.4 SRS-O 試験機（半自動型）



写真-3.3.5 Ramda 試験機（手動型）

(1) 大阪市東中浜

図-3.3.2 に東中浜における SRS-Y1（従来機）の試験結果を示す。試験結果は柱状図とともに測定打撃回数 N_{dm} 、トルク M_v 、周面摩擦後の補正打撃回数 N_d の深度分布を示す（以下、同様）。なお、周面摩擦の補正方法は付録 A1 を参照されたい。SRS ではコーン先端角 90° 、コーンとロッドの連結は回転型、緩衝材 C（クッション）有りが標準であるが、本地点では、それらの条件を変えた 5 ケースの試験を行った。結果は 5 ケースで大きな差はなく、それらの条件の影響はほとんどないと言える。なお、緩衝材 C がない No.3 の試験結果は深度約 15m 付近で他よりも大きい、異常値と考えられる。

(2) 神栖市堀割

図-3.3.3 に神栖における SRS-Y1（従来機）の試験結果を示す。コーン先端角【90°、60°】とコーンとロッドの連結【回転、固定】の条件を変えた 3 ケースの試験を行った。結果はコーン固定の No.3 ではトルク M_v がやや大きい、 N_d 値では大差ないので、コーン先端角と連結の条件の影響はほとんどないと言える。

(3) 浦安市運動公園

図-3.3.4 に浦安運動公園における SRS-Y1（従来機）の試験結果を示す。コーン先端角【90°、60°】とコーンとロッドの連結【回転、固定】の条件を変えた 3 ケースの試験を行った。神栖と同様に、コーン固定の No.3 ではトルク M_v がやや大きい、 N_d 値では大差ないので、コーン先端角と連結の条件の影響はほとんどないと言える。

(4) 浦安市鉄鋼通り

図-3.3.5 に浦安鉄鋼通りにおける SRS-Y1（従来機）の試験結果を示す。当地では深度 40m まで試験を実施したので（40m までは沖積粘土が続いた）、図は深度 20m までと 40m までの 2 種類で示している。沖積粘土部では単調に M_v 、 N_d が増えることがわかる。

(5) 守山市今浜

図-3.3.6 に守山市今浜における SRS-Y1（従来機）の試験結果を示す。コーン先端角【90°、60°】とコーンとロッドの連結【回転、固定】及び緩衝材 C なしの条件を変えた 4 ケースの試験を行った。 N_d 値は大差なく、それらの影響はほとんどないと言える。

図-3.3.7 に守山市今浜における SRS-Y2（自重低減機）の試験結果を示す。同条件の 2 ケースはほとんど一致しており、再現性がよいことがわかる。図-3.3.6 の従来機と比較すると、粘土部で N_d 値がかなり大きいことがわかる。なお、従来機と自重低減機の比較は 3.4.1 で詳述する。

図-3.3.8 に守山市今浜における Ramda（手動型）の試験結果を示す。本来の落下高 $H=50\text{cm}$ に加えて、 $H=75\text{cm}$ も実施した。なお、深度 11m までトルク M_v を測定しない。当然ながら測定打撃回数 N_{dm} は $H=75\text{cm}$ の方が小さいが、エネルギー換算すれば、両者は一致することが確認できた。また、図-3.3.7 の自重低減機とほぼ近い結果が得られていることがわかる。

(6) 守山市水保

図-3.3.9 に守山市水保における SRS-Y1（従来機）の試験結果を示す。6 ケース（No.5 のみ固定コーン）を実施したが、非常に再現性がよいことがわかる。

図-3.3.10 に守山市水保における SRS-Y2（自重低減機）の試験結果を示す。同条件の 2 ケースはほとんど一致しており、再現性がよいことがわかる。図-3.3.6 の従来機と比較すると、砂質土系の地盤では N_d 値にあまり違いはない。

図-3.3.11 に守山市水保における SRS-O（O 社製）の試験結果を示す。結果は従来機と自重低減機とほぼ一致している。

図-3.3.12 に守山市水保における Ramda（手動型）の試験結果を示す。本来の落下高 $H=50\text{cm}$ に加えて、 $H=30$ 、 75cm も実施した。なお、深度 16m までトルク M_v を測定しない。当然ながら測定打撃回数 N_{dm} は $H=30\text{cm}$ で大きく、 $H=75\text{cm}$ で小さいが、エネルギー換算すれば、3 者は一致することが確認できた。また、図-3.3.9～3.3.11 とほぼ同じ結果が得られていることがわかる。

(7) 大阪市鶴町

図-3.3.13 に鶴町における SRS-Y1（従来機）の試験結果を示す。当地では深度 28m まで試験を実施したので、図は深度 20m までと 28m までの 2 種類で示している。やはり沖積粘土部では単調

に M_v 、 N_d が増えている。

図-3.3.14 に鶴町における SRS-Y2（自重低減機）の試験結果を示す。図-3.3.13 の従来機と比較すると、4m 以深の粘土、砂、粘土部で N_d 値が大きいことがわかる。

(8) 浦安市港

図-3.3.15 に浦安市港における SRS-Y1（従来機）の試験結果を示す。3 ケースの内 No.4 はコーン固定型（摩擦音測定のため）である。多少のばらつきはあるが、再現性があると言える。

図-3.3.16 に浦安市港における SRS-Y3（新型自重低減機）の試験結果を示す。SRS-Y3 ではハンマーとアンビルに挟む緩衝材（クッション）の硬度を 60（軟球とプラスチック消しゴムの間程度）に変更している（SRS-Y1、SRS-Y2 では硬度 90（硬球程度）である）。図-3.3.15 の従来機と比較すると、全体に N_d 値が大きく、特に深度 16m 以深の粘土部で大きいことがわかる。なお、新型自重低減機を含めた従来機との比較は 3.4.1 で詳述する。

(9) 唐津市原

図-3.3.17 に唐津市原における SRS-Y1（従来機）の試験結果を示す。深度 14m まで緩い砂地盤となっており、2 ケースの結果は再現性がよい。

図-3.3.18 に唐津市原における SRS-Y3（自重低減機）の試験結果を示す。図-3.3.17 の従来機とほぼ同様な結果が得られている。砂地盤では従来機と自重低減機の違いは小さい。

図-3.3.19 に同じ自重低減機の SRS-Y2 と SRS-Y3 で緩衝材の硬度を 60、90 に変えた試験の比較を示す。試験機及び硬度による差はほとんどないので、SRS-Y2 と SRS-Y3 は同等と言え、緩衝材の硬度の影響もないと言える。

(10) 唐津市岸山

図-3.3.20 に唐津市岸山における SRS-Y1（従来機）の試験結果を示す。本地点は砂質粘土を主体とする盛土地盤で、ばらつきが大きく、深度 7m 以深で硬質な地盤に当たるケースがあった。

図-3.3.21 に唐津市岸山における SRS-Y3（自重低減機）の試験結果を示す。図-3.3.20 の従来機とほぼ同様な結果が得られている。

(11) 香取市地点 1

図-3.3.22 に香取市地点 1 における SRS-Y1（従来機）の試験結果を示す。2 ケースの結果は再現性がよい。ただし、No.2 はコーン固定型（摩擦音測定）のため、 M_v がやや大きい。

図-3.3.23 に香取市地点 1 における SRS-Y3（自重低減機）の試験結果を示す。緩衝材の硬度を 90、60 に変えたが、唐津市原と同様に結果はほとんど一致しており、緩衝材硬度の影響はない。

図-3.3.24 に香取市地点 1 における Ramda（手動型）の試験結果を示す。深度 12.5m までしか実施していないが、図-3.3.22、3.3.23 と同様な結果が得られている。

(12) 香取市地点 2

図-3.3.25 に香取市地点 2 における SRS-Y1（従来機）の試験結果を示す。2 ケースの結果は再現性がよい。ただし、No.2 はコーン固定型（摩擦音測定）のため、 M_v がやや大きい。

図-3.3.26 に香取市地点 2 における SRS-Y3（自重低減機）の試験結果を示す。緩衝材の硬度を 90、60 に変えたが、地点 1 と同様に結果はほとんど一致しており、緩衝材硬度の影響はない。

図-3.3.27 に香取市地点 2 における SRS-O（O 社製）の試験結果を示す。図-3.3.25 と同様な結果が得られている。

図-3.3.28 に香取市地点 2 における Ramda（手動型）の試験結果を示す。14m 以深で N_d 値が大きい、地点 2 は調査範囲が広く（図-3.2.31 参照）、地盤の不均質性があったようである。

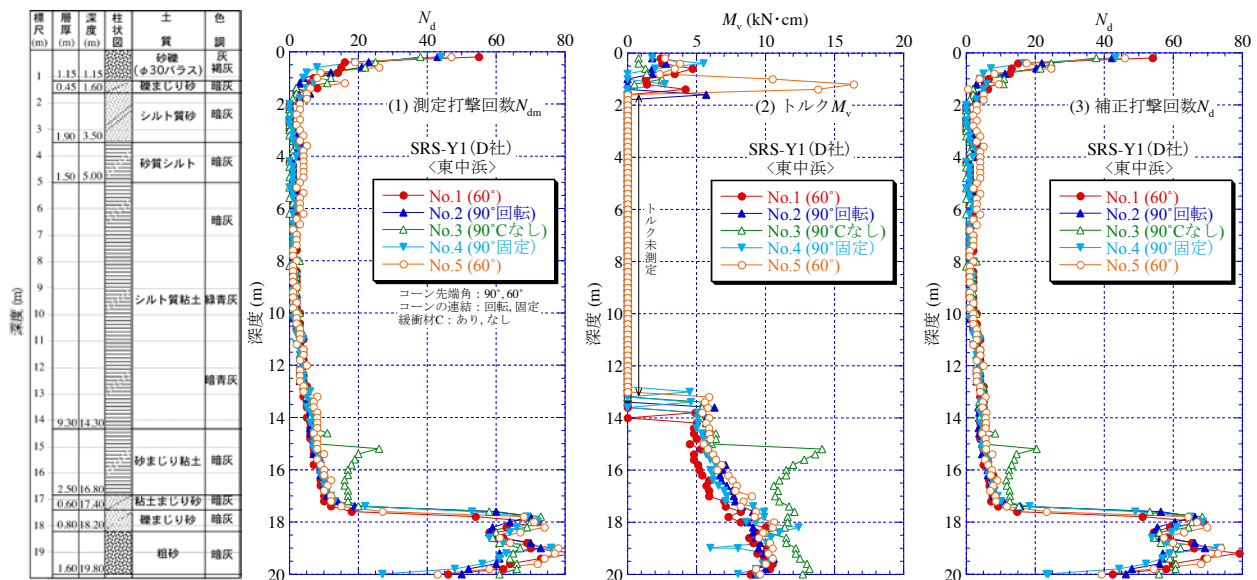


図-3.3.2 大阪市東中浜での SRS-Y1 (従来機) の試験結果

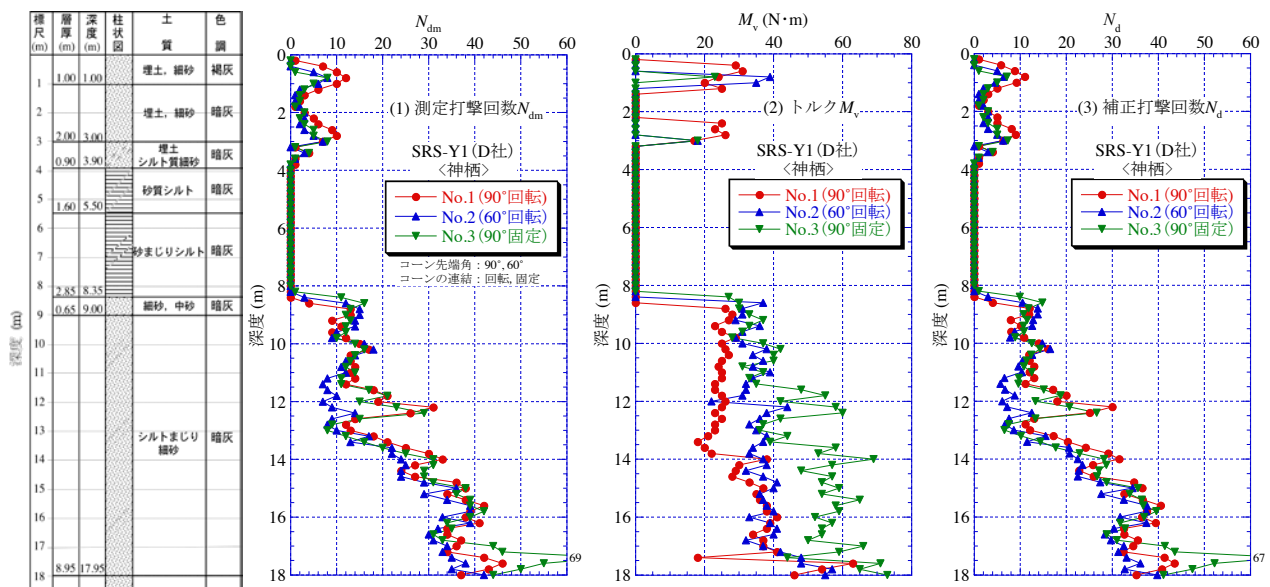


図-3.3.3 神栖市堀割での SRS-Y1 (従来機) の試験結果

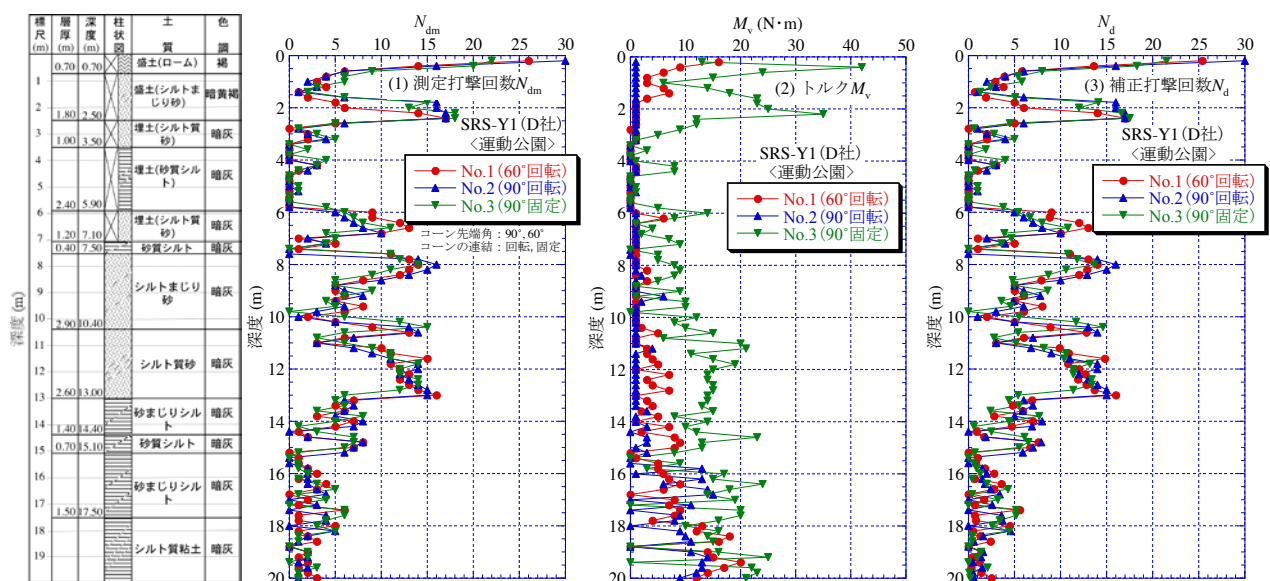


図-3.3.4 浦安市運動公園での SRS-Y1 (従来機) の試験結果

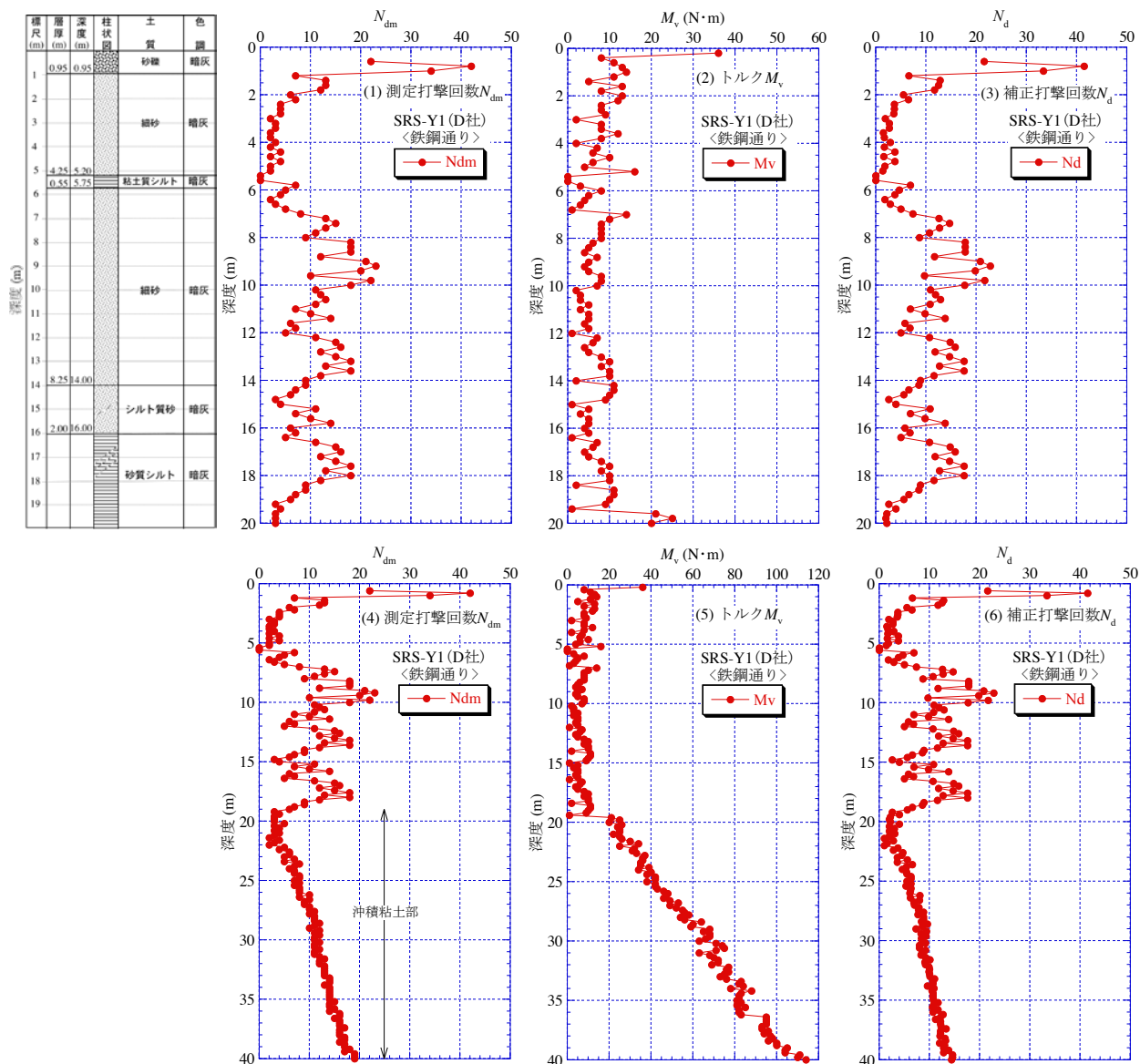


図-3.3.5 浦安市鉄鋼通りでの SRS-Y1（従来機）の試験結果

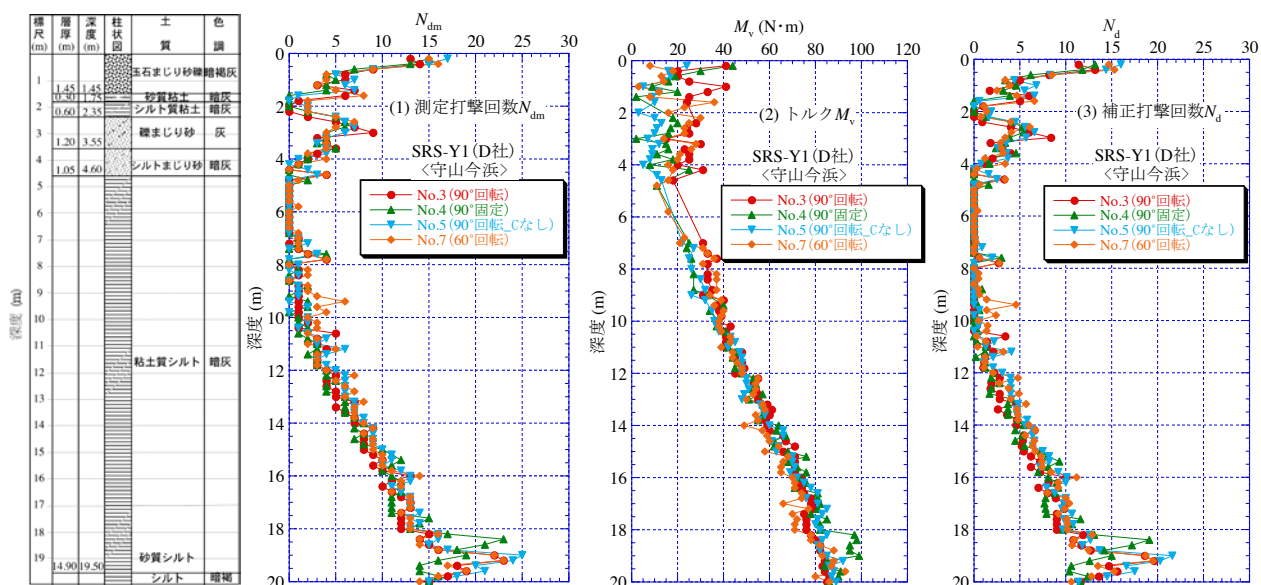


図-3.3.6 守山市今浜での SRS-Y1（従来機）の試験結果

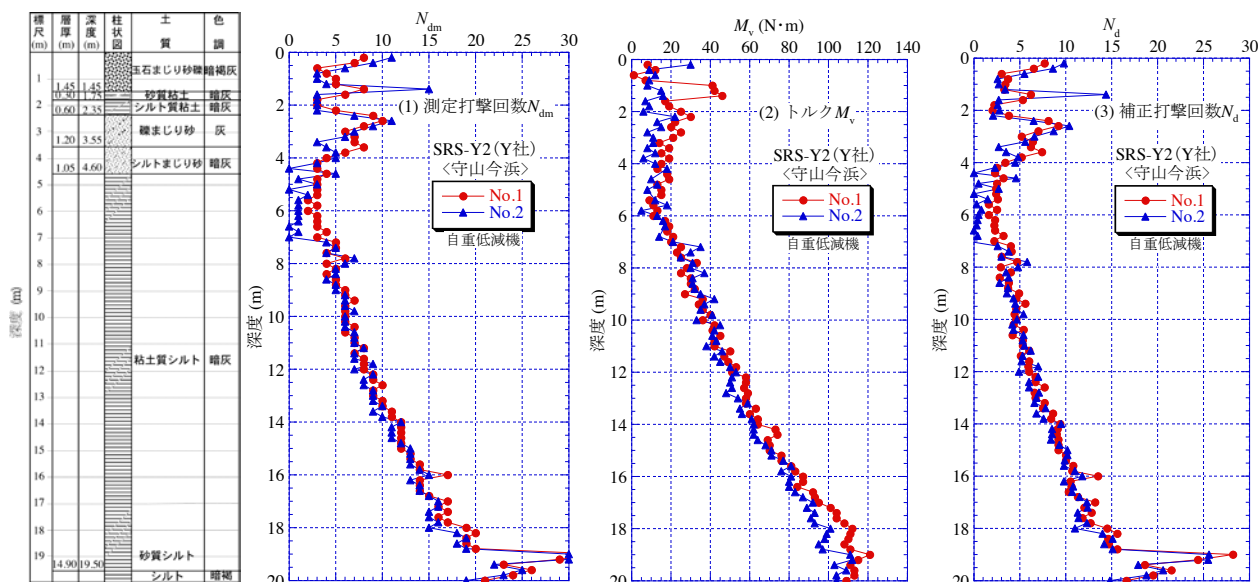


図-3.3.7 守山市今浜での SRS-Y2（自重低減機）の試験結果

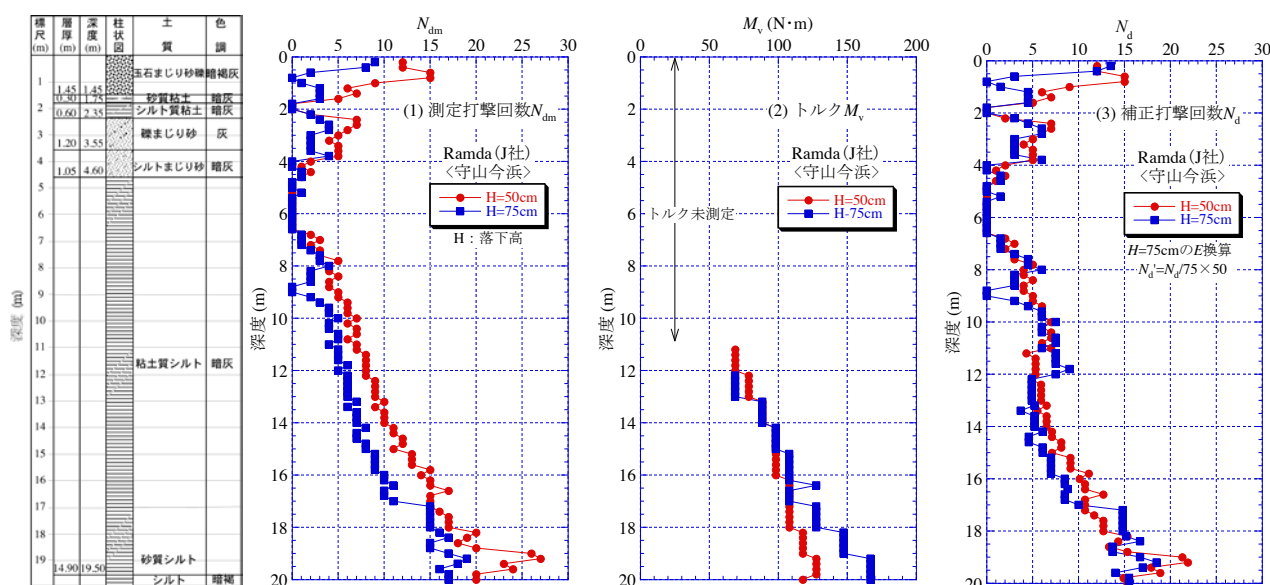


図-3.3.8 守山市今浜での Ramda（手動型）の試験結果

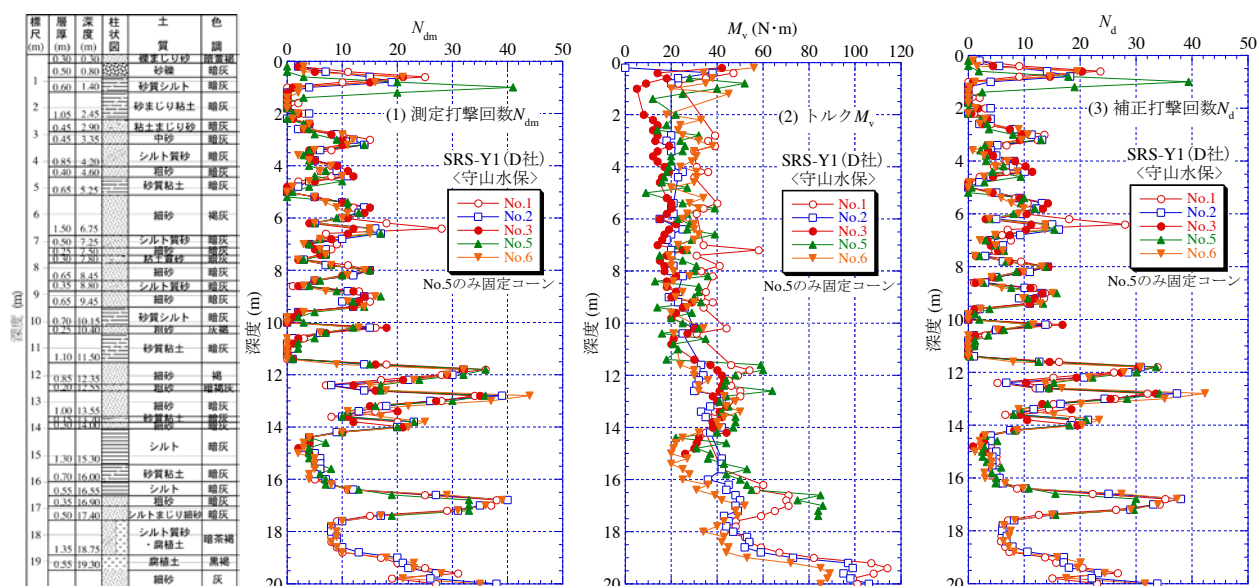


図-3.3.9 守山市水保での SRS-Y1（従来機）の試験結果

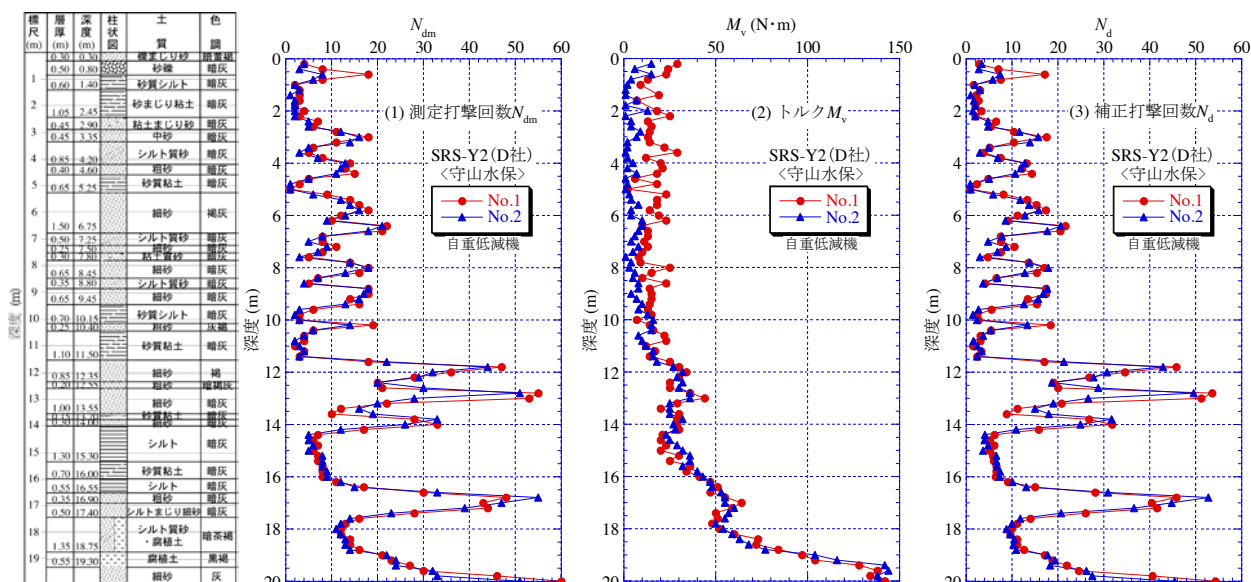


図-3.3.10 守山市水保での SRS-Y2（自重低減機）の試験結果

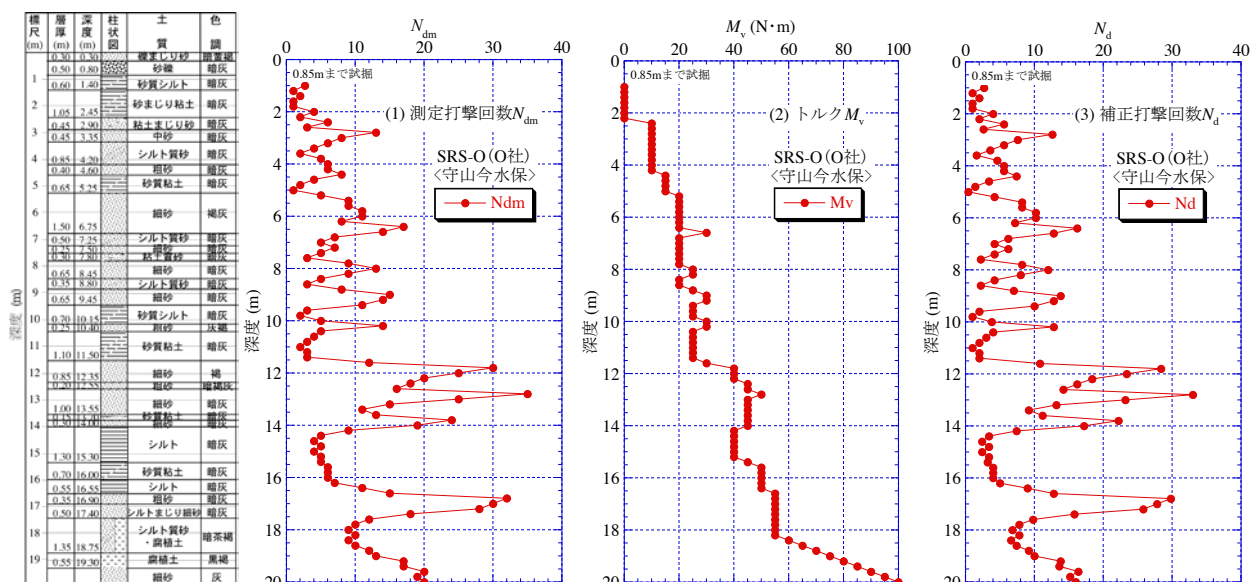


図-3.3.11 守山市水保での SRS-O（O 社製）の試験結果

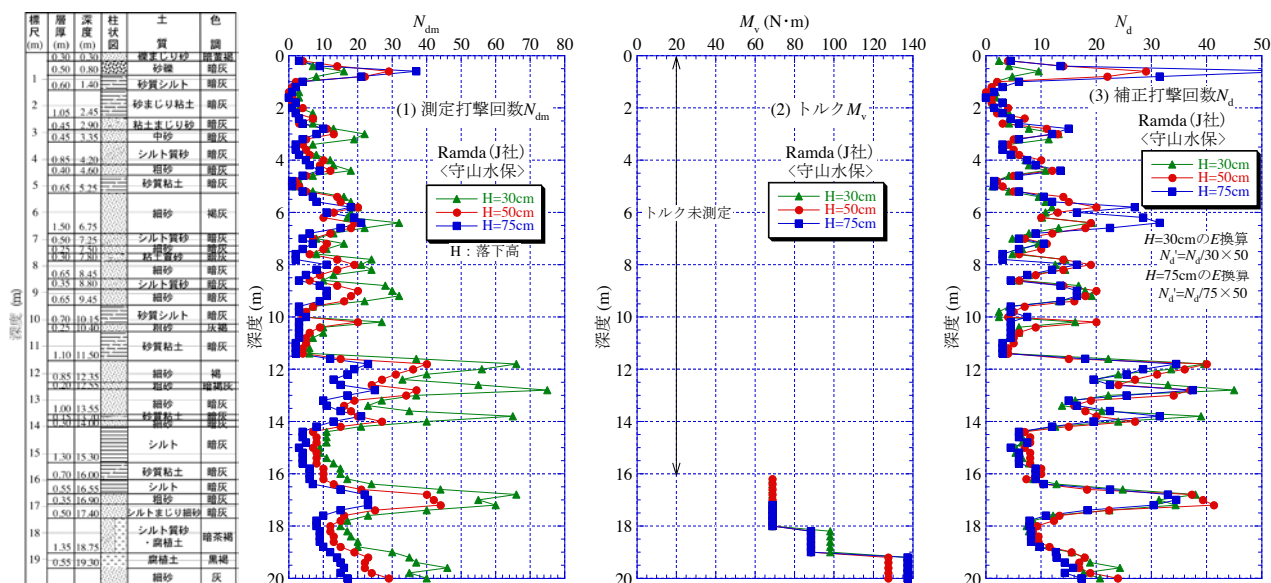


図-3.3.12 守山市水保での Ramda（手動型）の試験結果

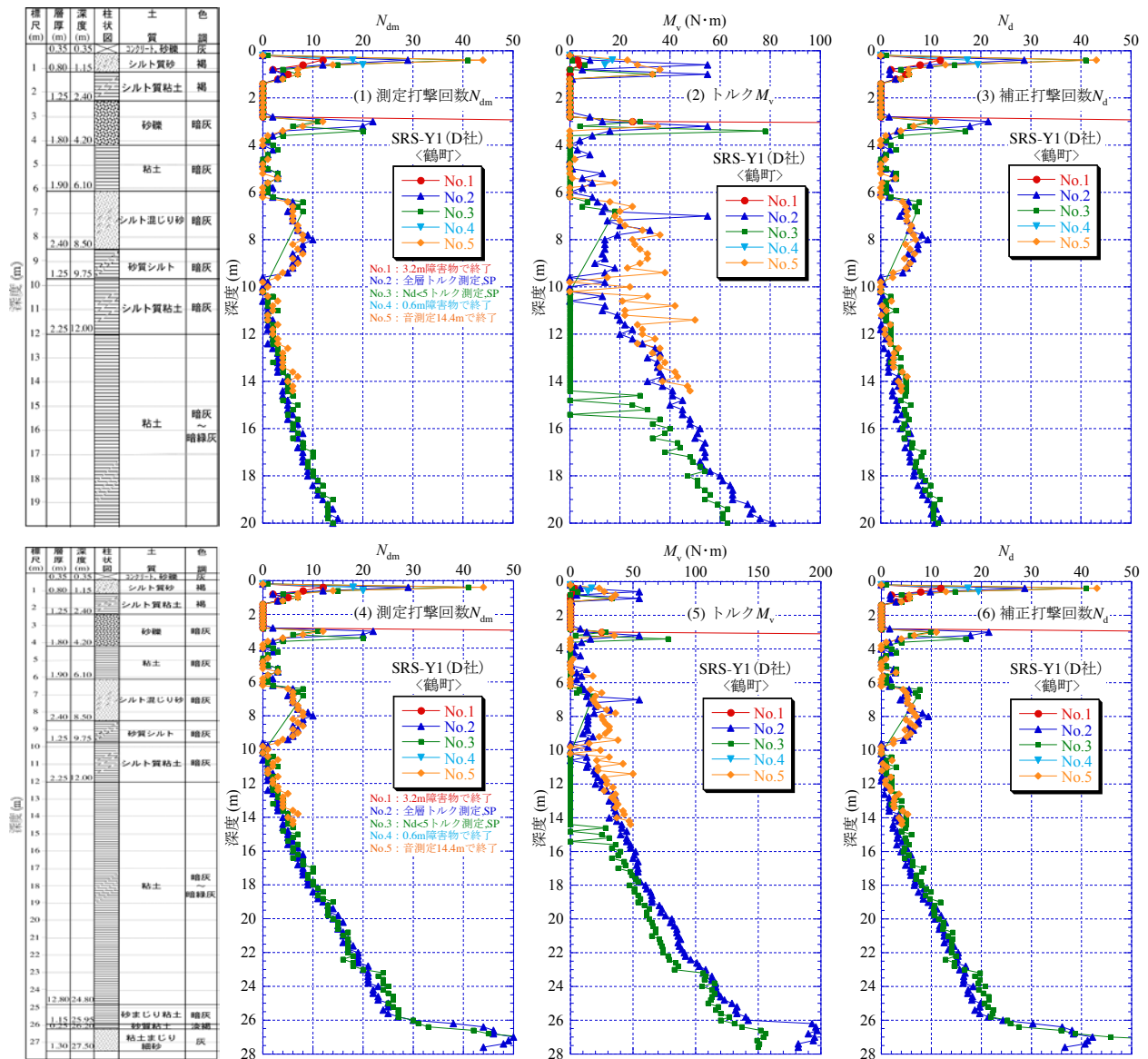


図-3.3.13 鶴町での SRS-Y1（従来機）の試験結果

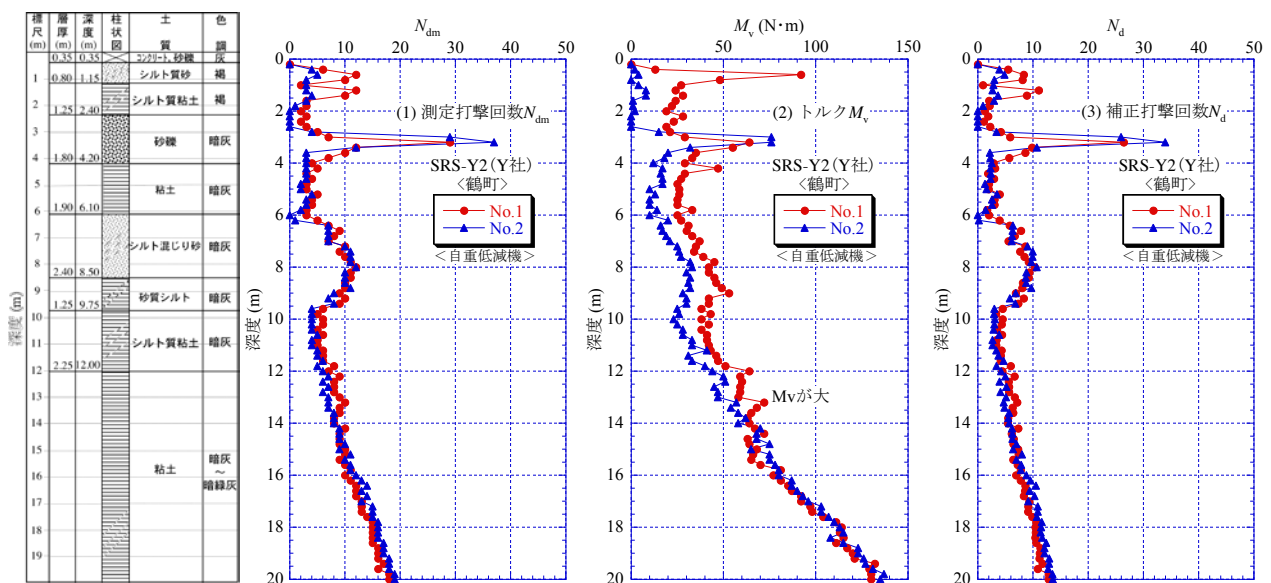


図-3.3.14 鶴町での SRS-Y2（自重低減機）の試験結果

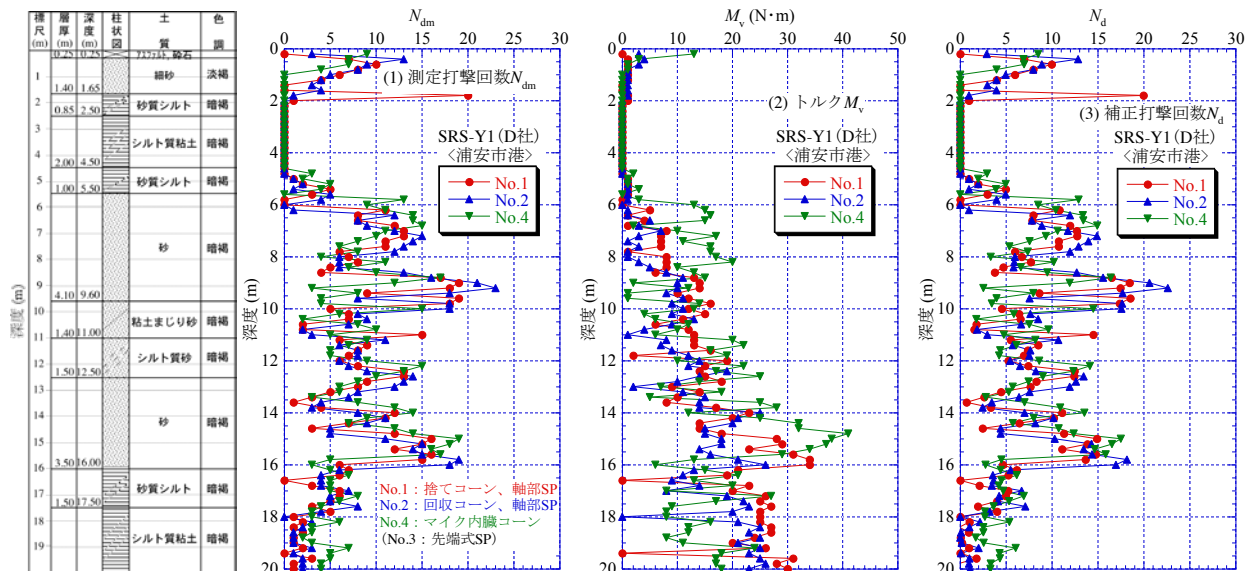


図-3.3.15 浦安市港での SRS-Y1（従来機）の試験結果

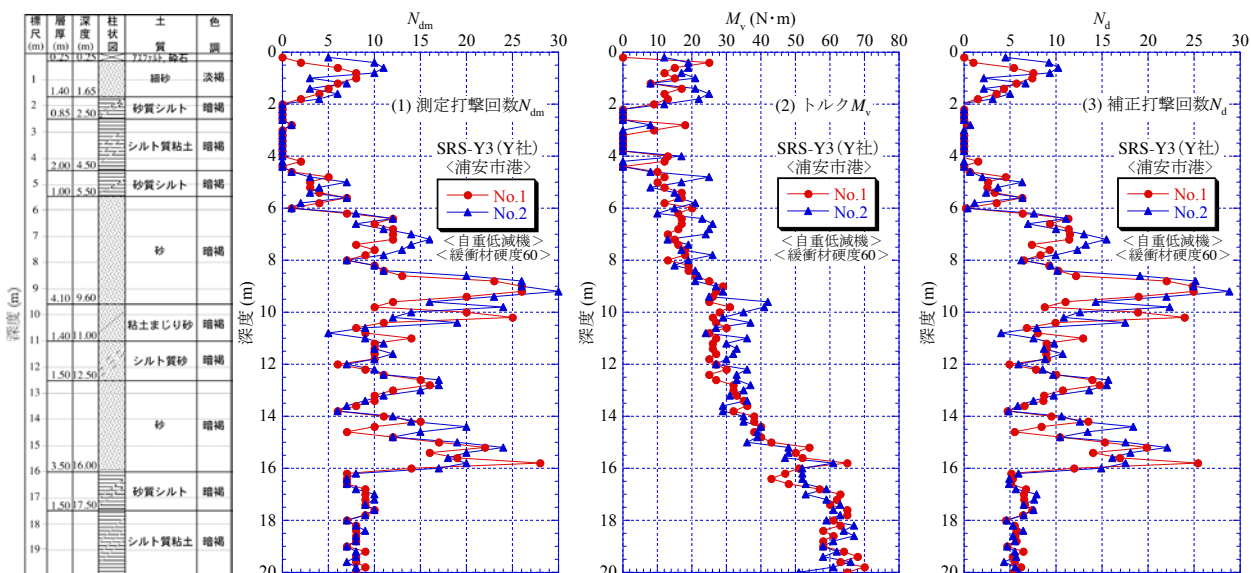


図-3.3.16 浦安市港での SRS-Y3（自重低減機）の試験結果

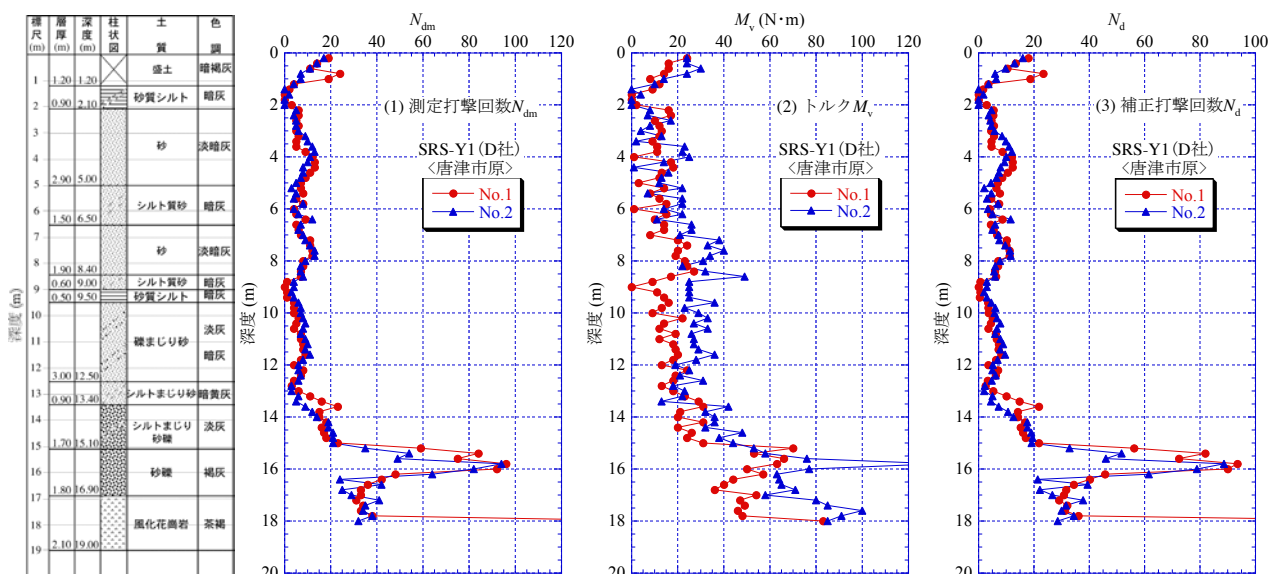


図-3.3.17 唐津市原での SRS-Y1（従来機）の試験結果

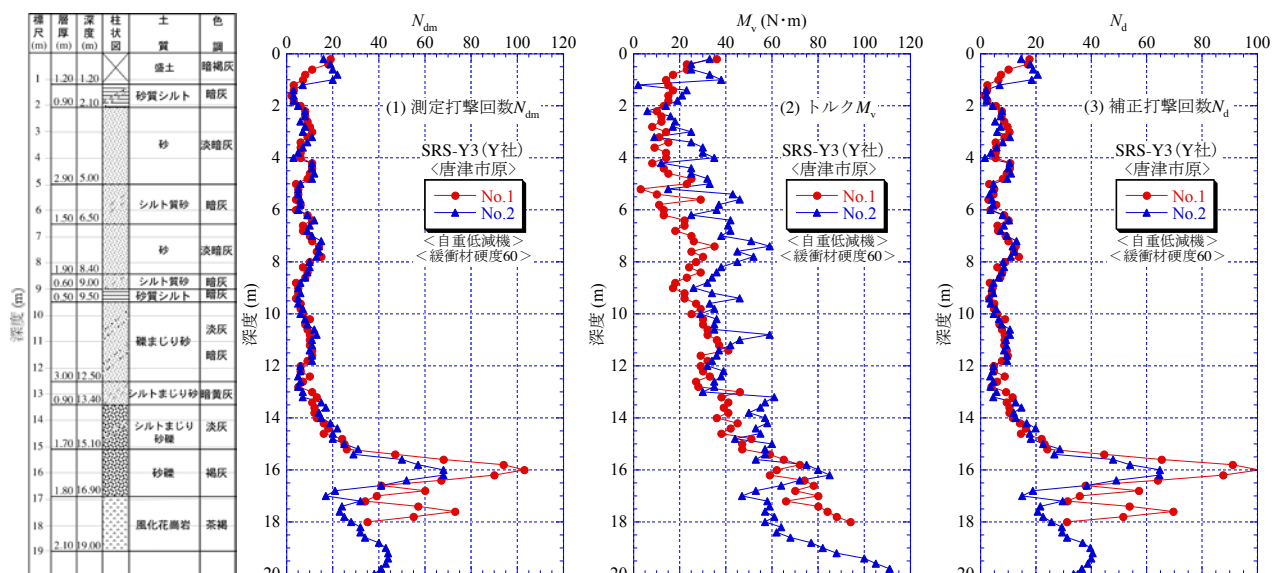


図-3.3.18 唐津市原での SRS-Y3（自重低減機）の試験結果

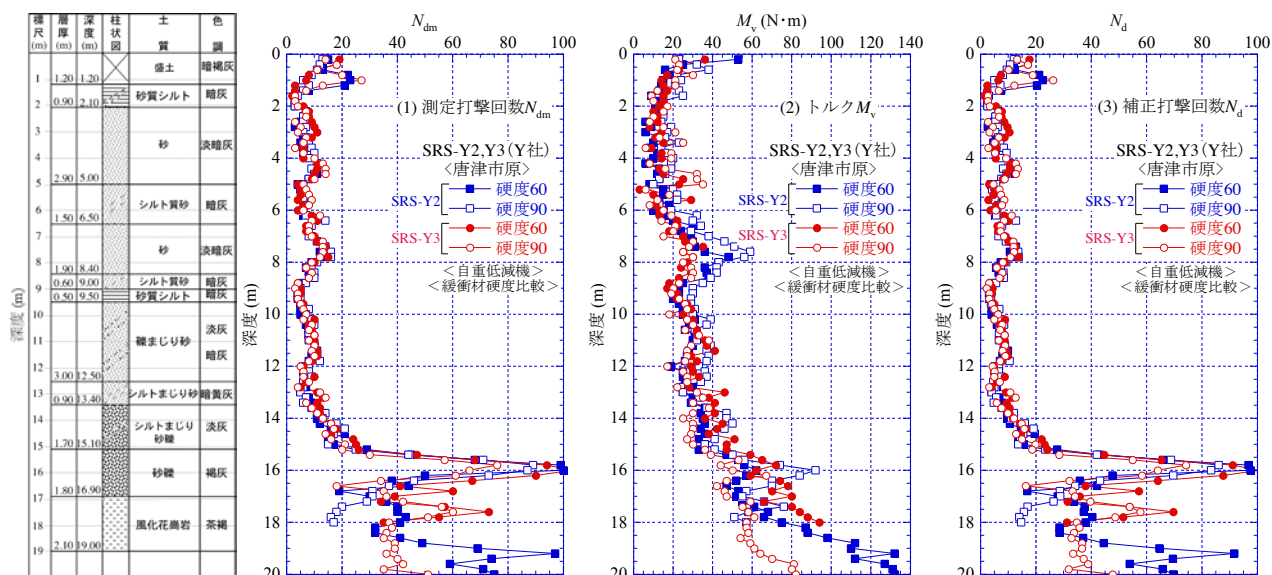


図-3.3.19 唐津市原での SRS-Y2、SRS-Y3（自重低減機）の比較結果

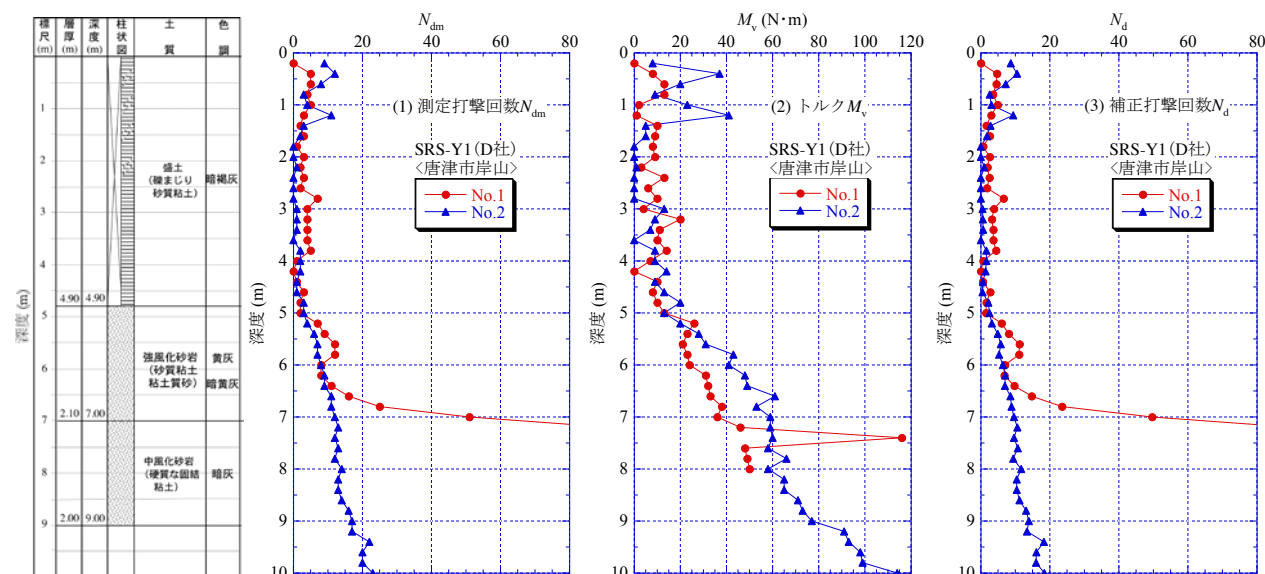


図-3.3.20 唐津市岸山での SRS-Y1（従来機）の試験結果

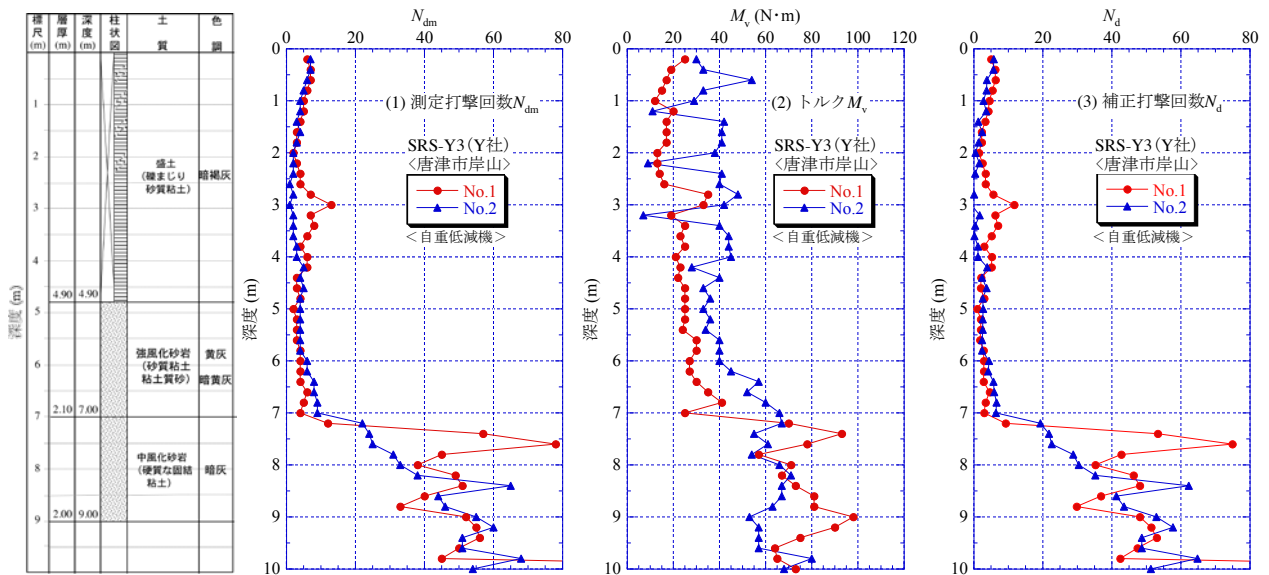


図-3.3.21 唐津市岸山での SRS-Y3 (自重低減機) の試験結果

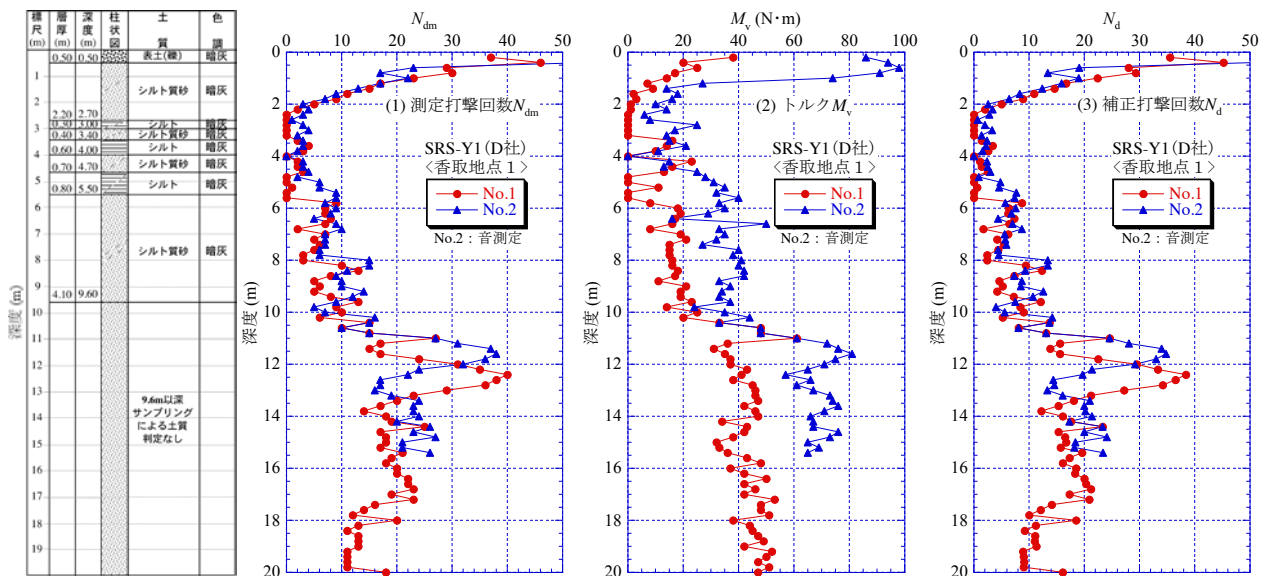


図-3.3.22 香取市地点 1 での SRS-Y1 (従来機) の試験結果

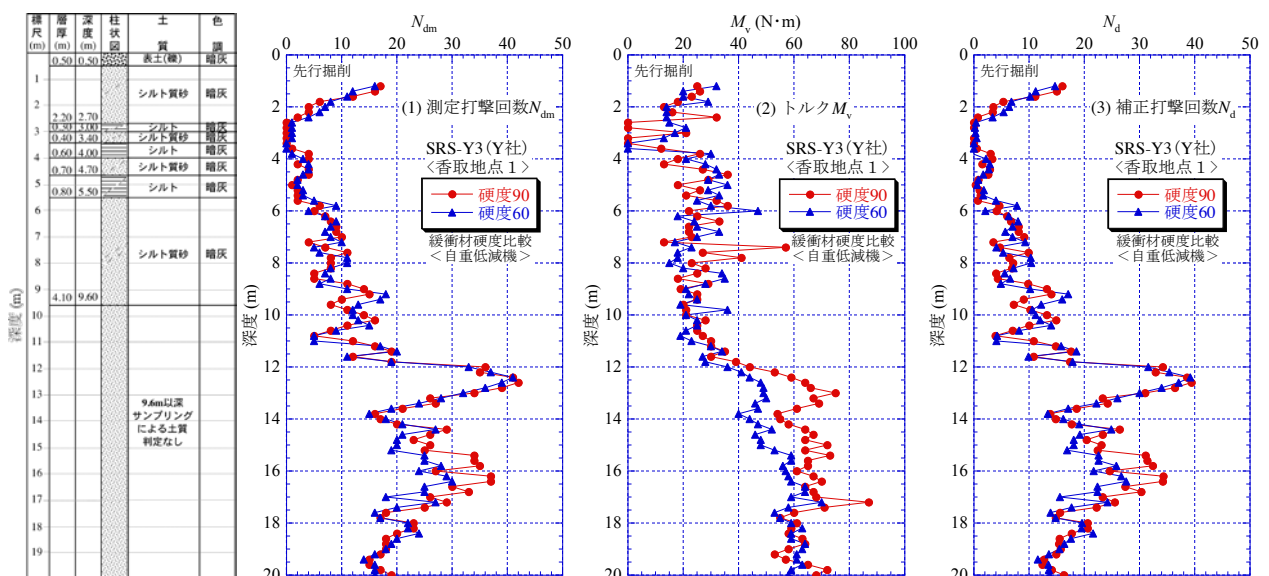


図-3.3.23 香取市地点 1 での SRS-Y3 (自重低減機) の試験結果

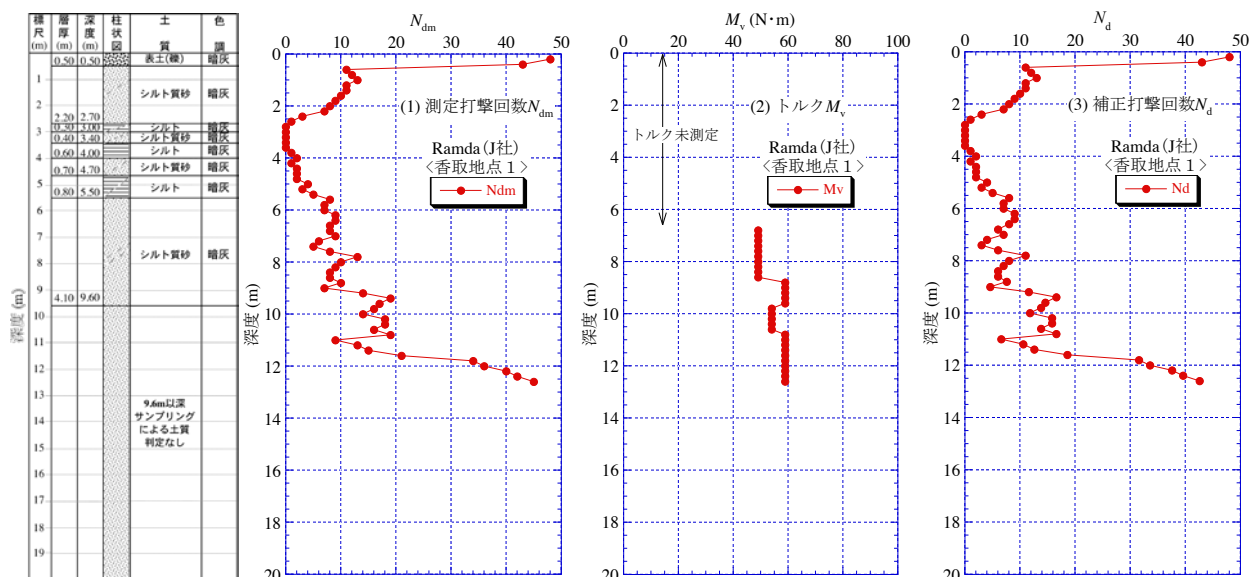


図-3.3.24 香取市地点1でのRamda（手動型）の試験結果

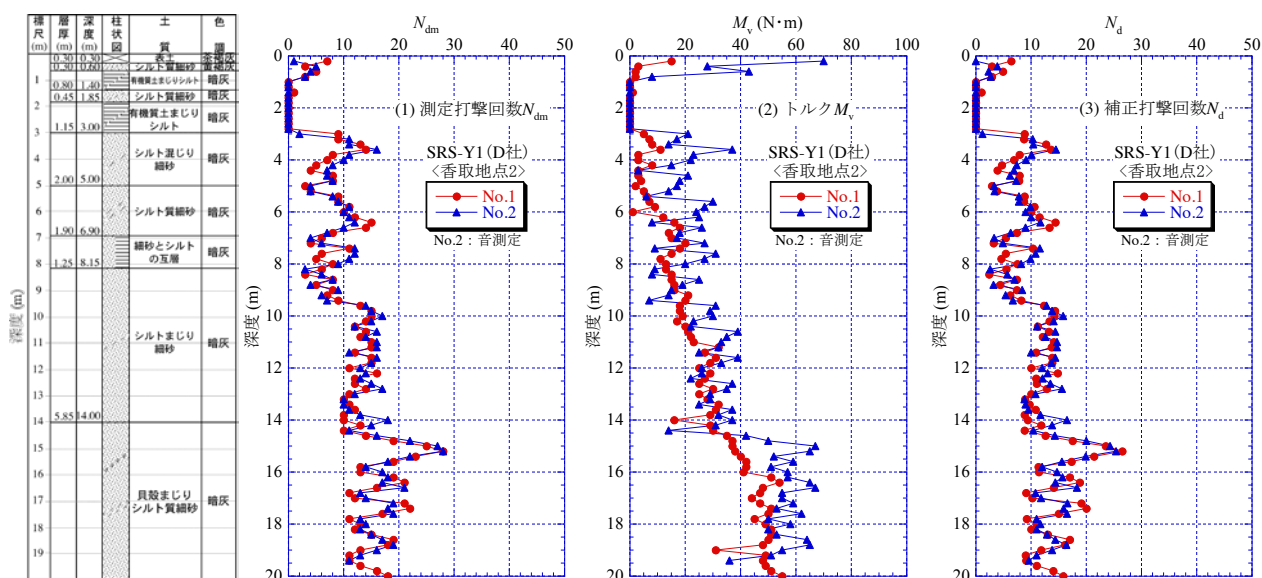


図-3.3.25 香取市地点2でのSRS-Y1（従来機）の試験結果

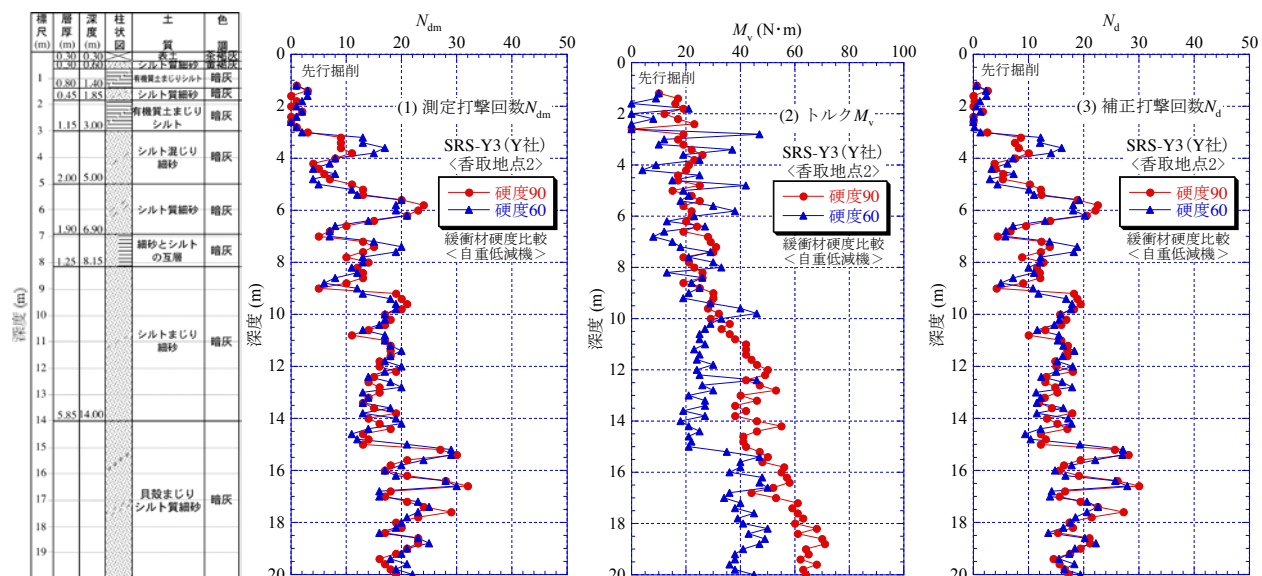


図-3.3.26 香取市地点2でのSRS-Y3（自重低減機）の試験結果

3.3.2 中型動的コーン貫入試験(MRS)結果

中型動的コーン貫入試験 (Mini Ram Sounding、MRS) は、SRS 試験機と同じ構成で軽量・小型化した試験機で、コーンの単位面積当たりの打撃エネルギーは、ISO 規格 (ISO22476-2 : 2005) の DPM (Medium) に対応している (ただし、ハンマー質量及び落下高は対応しない)。

MRS の従来の補正方法は菅原ら¹⁾によるものである。まず、MRS (ハンマー質量 $m=30\text{kg}$, 落下高 $H=0.35\text{m}$, コーン断面積 $A=10.52\text{cm}^2$) の単位面積当たりのエネルギー $E_n=98\text{kJ/m}^2$ が、SRS ($m=63.5\text{kg}$, $H=0.5\text{m}$, $A=15.9\text{cm}^2$) の $E_n=196\text{kJ/m}^2$ の $1/2$ であるため、測定打撃回数 N_{dm} を $1/2$ とする。次に、回転トルク $M_v(\text{N}\cdot\text{m})$ で周面摩擦の補正を行い、補正打撃回数 N_d を式(3.3.1)で求める。ただし、補正係数 0.16 は SRS に合うように決められた値¹⁾で、理論的根拠はない。

$$\text{従来補正式: } N_d' = N_{dm}/2 - 0.16M_v \quad (3.3.1)$$

一方、理論的には周面摩擦による打撃回数の補正量は $N_{skin}=2P\cdot M_v/(mgH\cdot D_r)$ (P : N_d 測定の貫入量, D_r : ロッド直径) で、SRS は $0.040M_v$, MRS は $0.138M_v$ となる (周面摩擦の補正方法の詳細は付録 A1 を参照されたい)。SRS ではこの補正係数 0.040 が使われており、式(3.3.1)の MRS の補正係数は整合しない。さらに、補正の順序が逆で、式(3.3.2)のように N_{dm} をまず周面摩擦補正して、その後でエネルギー補正するのが正しいと考えられる。式(3.3.1), (3.3.2)を比較すると、式(3.3.1)の周面摩擦補正量は式(3.3.2)の 2.3 倍となることがわかる。

$$\text{新補正式: } N_d' = (N_{dm} - 0.138M_v)/2 \quad (3.3.2)$$

以下では、従来補正と新補正の両方による結果を示す (3.4.3 で両者をまとめた比較を示す)。

写真-3.3.6 に応用地質製の半自動型の試験機 (MRS) を示す。また、写真-3.3.7 に東邦地下工機製の手動型の試験機 (DPM-HT) を示す。DPM-HT は守山市今浜・水保で実施した。



写真-3.3.6 MRS 試験機

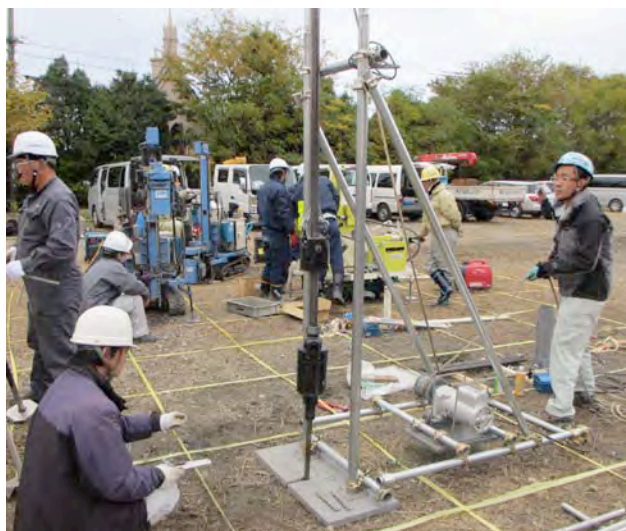


写真-3.3.7 DPM-HT 試験機

(1) 大阪市東中浜

図-3.3.29 に東中浜における MRS の試験結果を示す。試験結果は柱状図とともに測定打撃回数 N_{dm} 、トルク M_v 、式(3.3.1)の従来補正による補正打撃回数 N_d' 、式(3.3.2)の新補正による補正打撃回数 N_d' の深度分布を示す (以下、同様)。なお、補正方法の詳細は付録 A1 を参照されたい。No.2 の M_v は過大 (異常値) であり、従来補正では過大に補正され、 N_d' 値は過小となっている (No.1 についても同様)。新補正では粘土部で N_d' 値が単調に増加している。

(2) 神栖市堀割

図-3.3.30 に神栖における MRS の試験結果を示す。トルク M_v は SRS (図-3.3.3) と比較するとかなり小さい。2 ケースの結果はほぼ一致しており、再現性はよいことがわかる。また、補正方法による N_d' 値の違いはあまり見られない。

(3) 浦安市運動公園

図-3.3.31 に浦安運動公園における MRS の試験結果を示す。やはり再現性がよく、補正方法による N_d' 値の違いはあまり見られない。

(4) 浦安市鉄鋼通り

図-3.3.32 に浦安鉄鋼通りにおける MRS の試験結果を示す。16m 以浅の砂層では補正方法による N_d' 値の違いはあまり見られないが、16m 以深の粘土層では新補正の N_d' 値の方がかなり大きい。

(5) 守山市今浜

図-3.3.33 に守山市今浜における MRS の試験結果を示す。2 ケースの再現性はよい。東中浜と同様に、粘土部では従来補正では過大に補正され、 N_d' 値は過小と考えられる。新補正では N_d' 値が単調に増加している。

図-3.3.34 に守山市今浜における DPM-HT (手動型) の試験結果を示す。2 ケースの再現性はよい。図-3.3.33 の MRS と比較すると、 N_d' 値の分布は相似的ではあるが、全体に N_d' 値が大きめに得られている。これはハンマーやアンビルの形状や支柱の構造の違いなどに起因すると考えられる。

(6) 守山市水保

図-3.3.35 に守山市水保における MRS の試験結果を示す。2 ケースの再現性はよい。当地は砂質土主体に地盤であるが、粘性土との互層となっている。砂質土部では補正方法による N_d' 値の違いはあまり見られないが、深度 11、15、18m 前後の粘性土部ではやはり新補正の N_d' 値の方が大きい。

図-3.3.36 に守山市水保における DPM-HT (手動型) の試験結果を示す。やはり 2 ケースの再現性はよい。図-3.3.35 の MRS と比較すると、やはり N_d' 値の分布は相似的ではあるが、全体に N_d' 値が大きめに得られている。

(7) 大阪市鶴町

図-3.3.37 に鶴町における MRS の試験結果を示す。2 ケースの再現性はよい。やはり深度 9m 以深の粘土部では新補正の N_d' 値の方が大きく、深度方向に単調に増加している。

(8) 浦安市港

図-3.3.38 に浦安市港における MRS の試験結果を示す。浦安鉄鋼通りと同様に、16m 以浅の砂層では補正方法による N_d' 値の違いはあまり見られないが、16m 以深の粘土層では新補正の N_d' 値の方が大きい。当地では 2 ケースでのばらつきが見られる。

(9) 香取市地点 1

図-3.3.39 に香取地点 1 における MRS の試験結果を示す。深度 12m までは補正方法による N_d' 値の違いはあまり見られないが、12m 以深では新補正の N_d' 値の方がやや大きい。

(10) 香取市地点 2

図-3.3.40 に香取地点 2 における MRS の試験結果を示す。深度 14m までは補正方法による N_d' 値の違いはあまり見られないが、14m 以深では新補正の N_d' 値の方がやや大きい。

参考文献

- 1) 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.

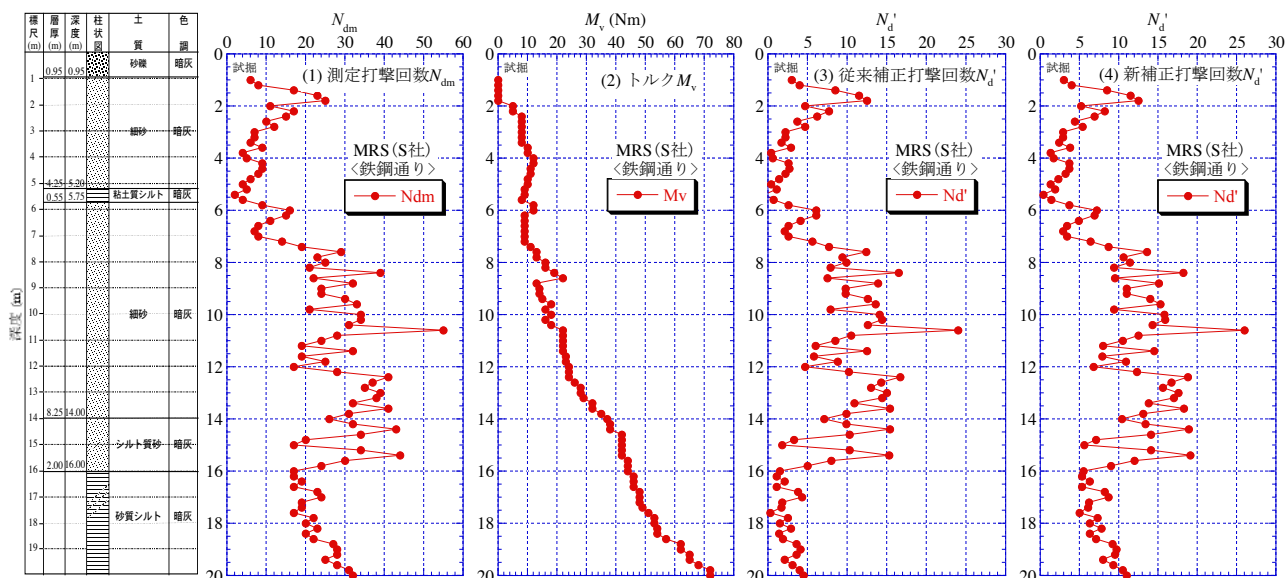


図-3.3.32 浦安市鉄鋼通りでの MRS の試験結果

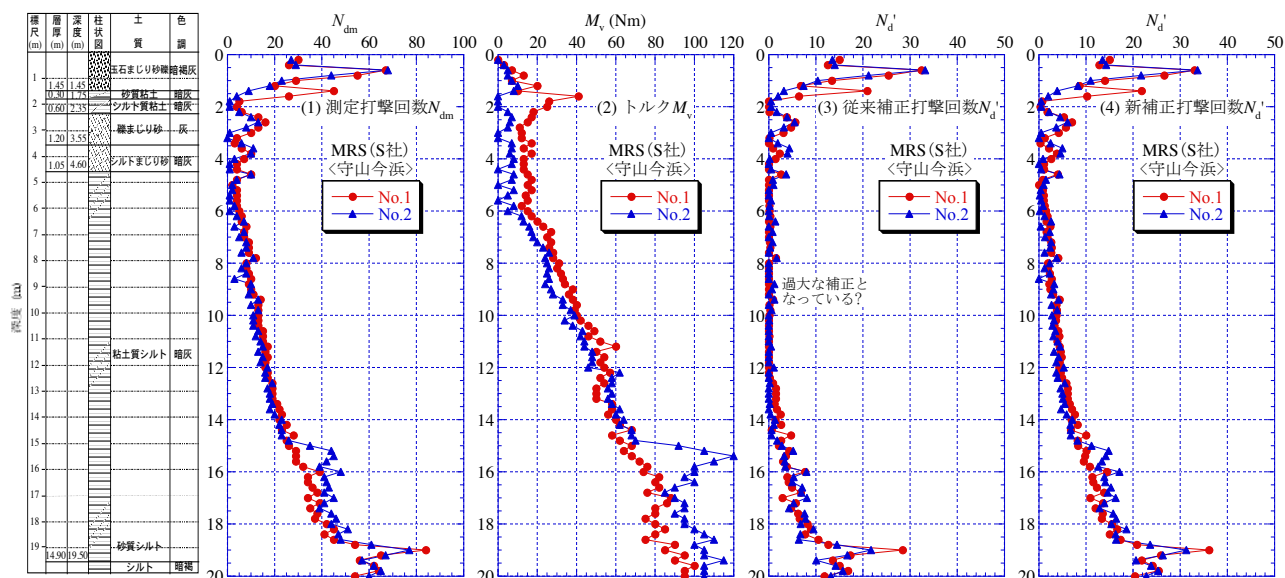


図-3.3.33 守山市今浜での MRS の試験結果

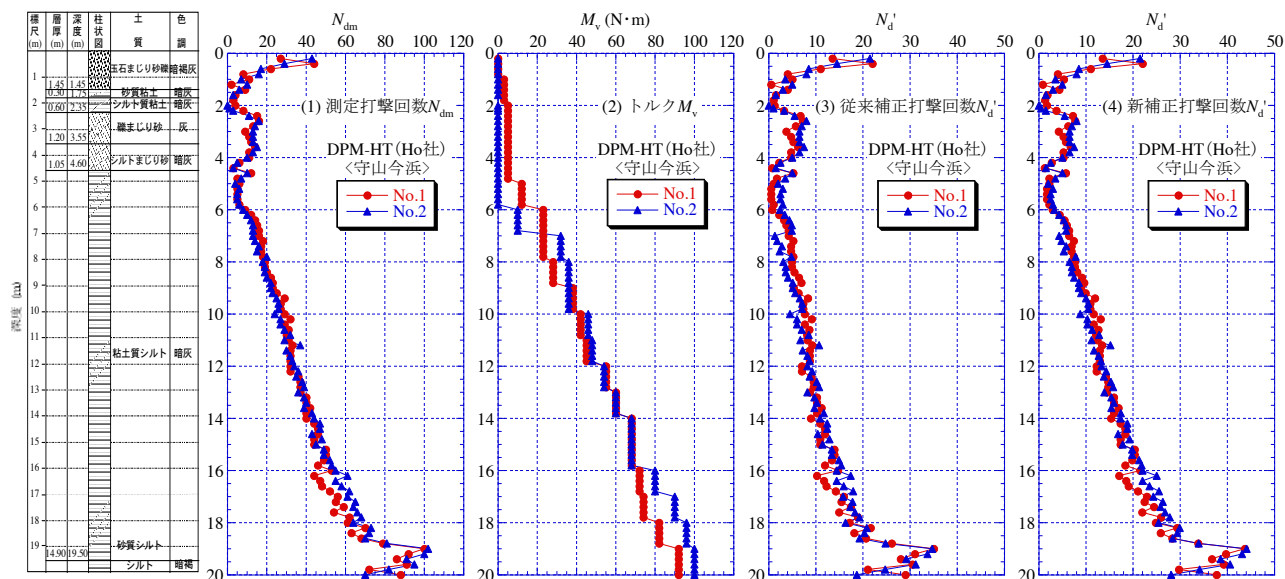


図-3.3.34 守山市今浜での DPM-HT (手動型) の試験結果

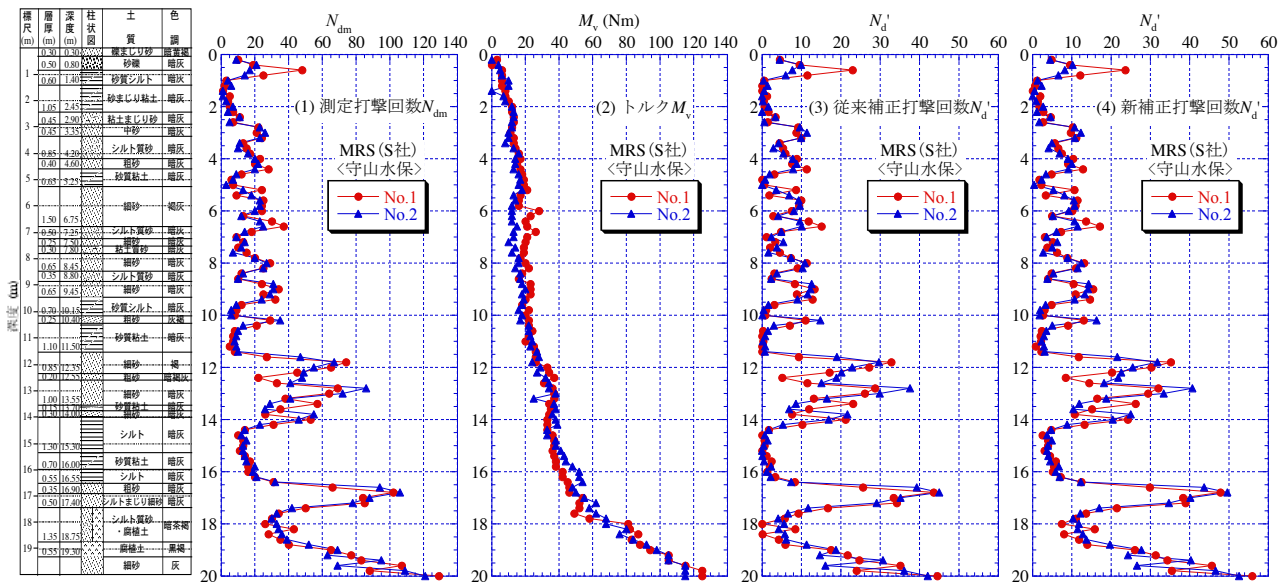


図-3.3.35 守山市水保での MRS の試験結果

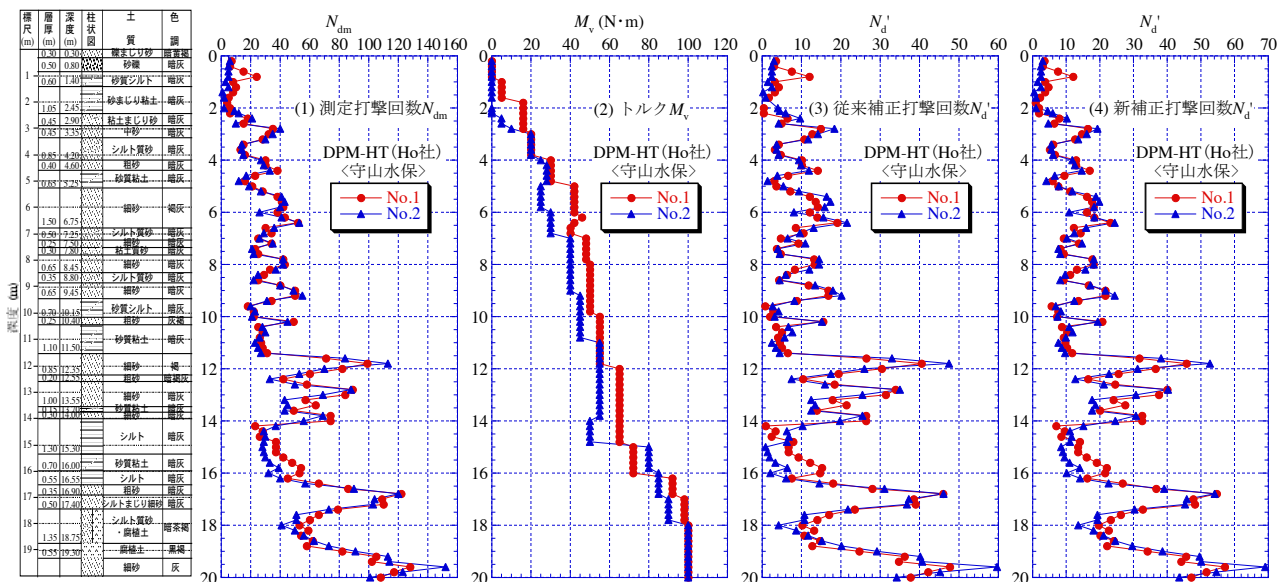


図-3.3.36 守山市水保での DPM-HT (手動型) の試験結果

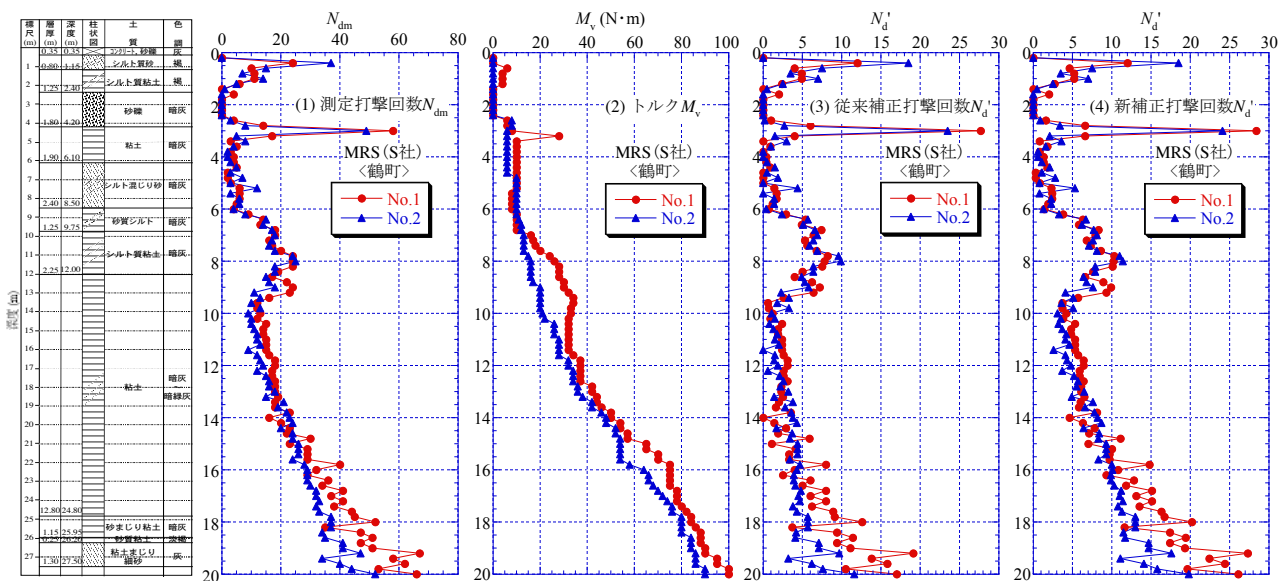


図-3.3.37 鶴町での MRS の試験結果

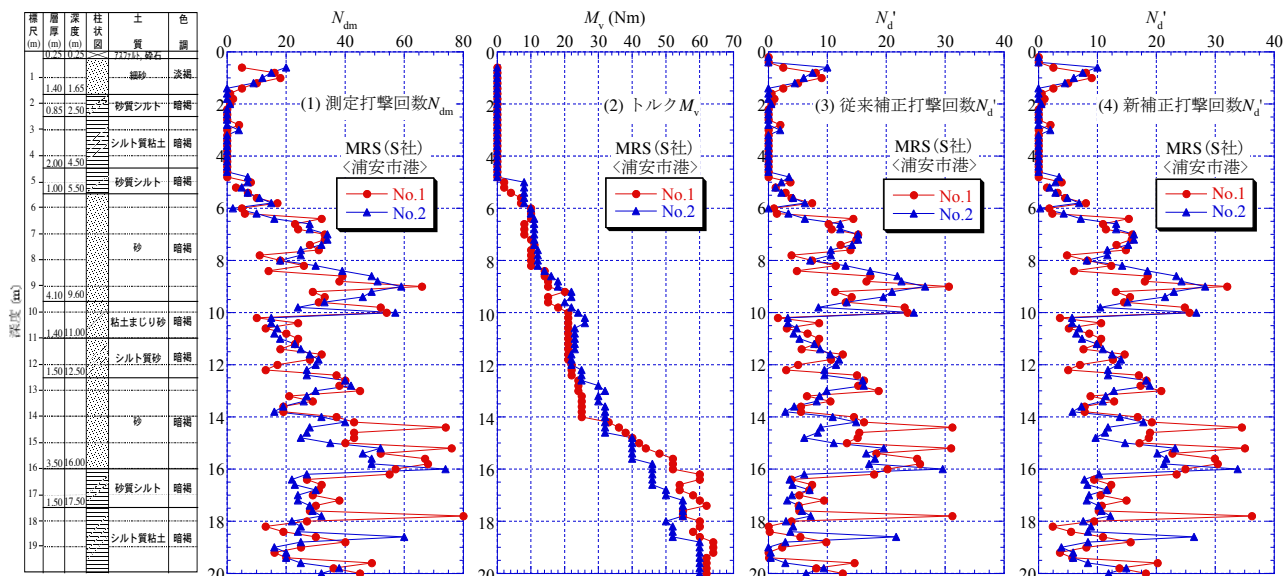


図-3.3.38 浦安市港での MRS の試験結果

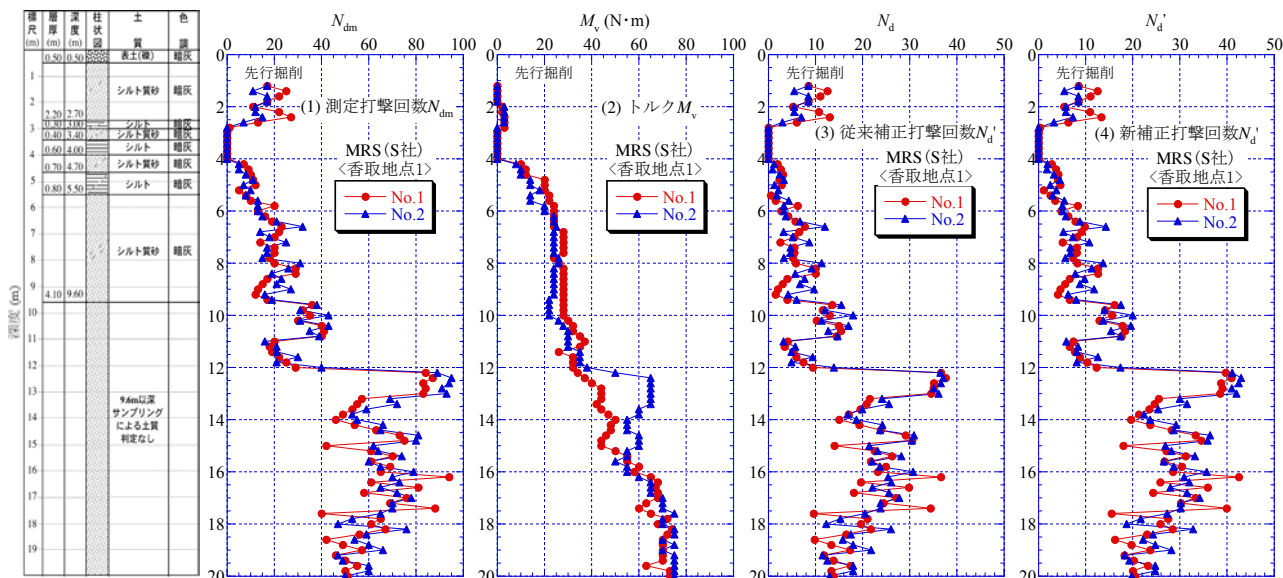


図-3.3.39 香取市地点 1 での MRS の試験結果

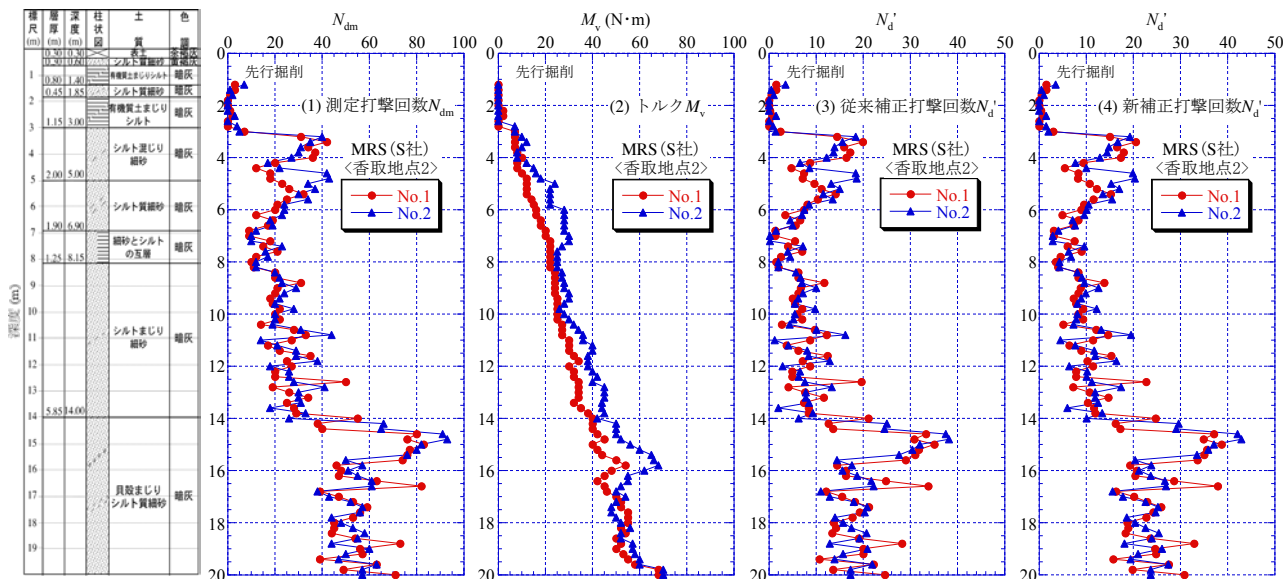


図-3.3.40 香取市地点 2 での MRS の試験結果

3.3.3 ピエゾドライブコーン貫入試験(PDC)結果

(1) 試験方法

1) 試験概要

ピエゾドライブコーン（以降、PDC という）は、先端コーン位置に間隙水圧計、地上部には変位計を設置し、1 打撃毎の貫入量とともに地盤中に発生する過剰間隙水圧の測定を行う動的コーン貫入試験装置である¹⁾。試験装置の概要図を図-3.3.41 に示す。PDC は、1 打撃毎の貫入量から地盤の動的貫入抵抗 N_d 値（ N 値に相当）、過剰間隙水圧応答から細粒分含有率 F_c を推定する。

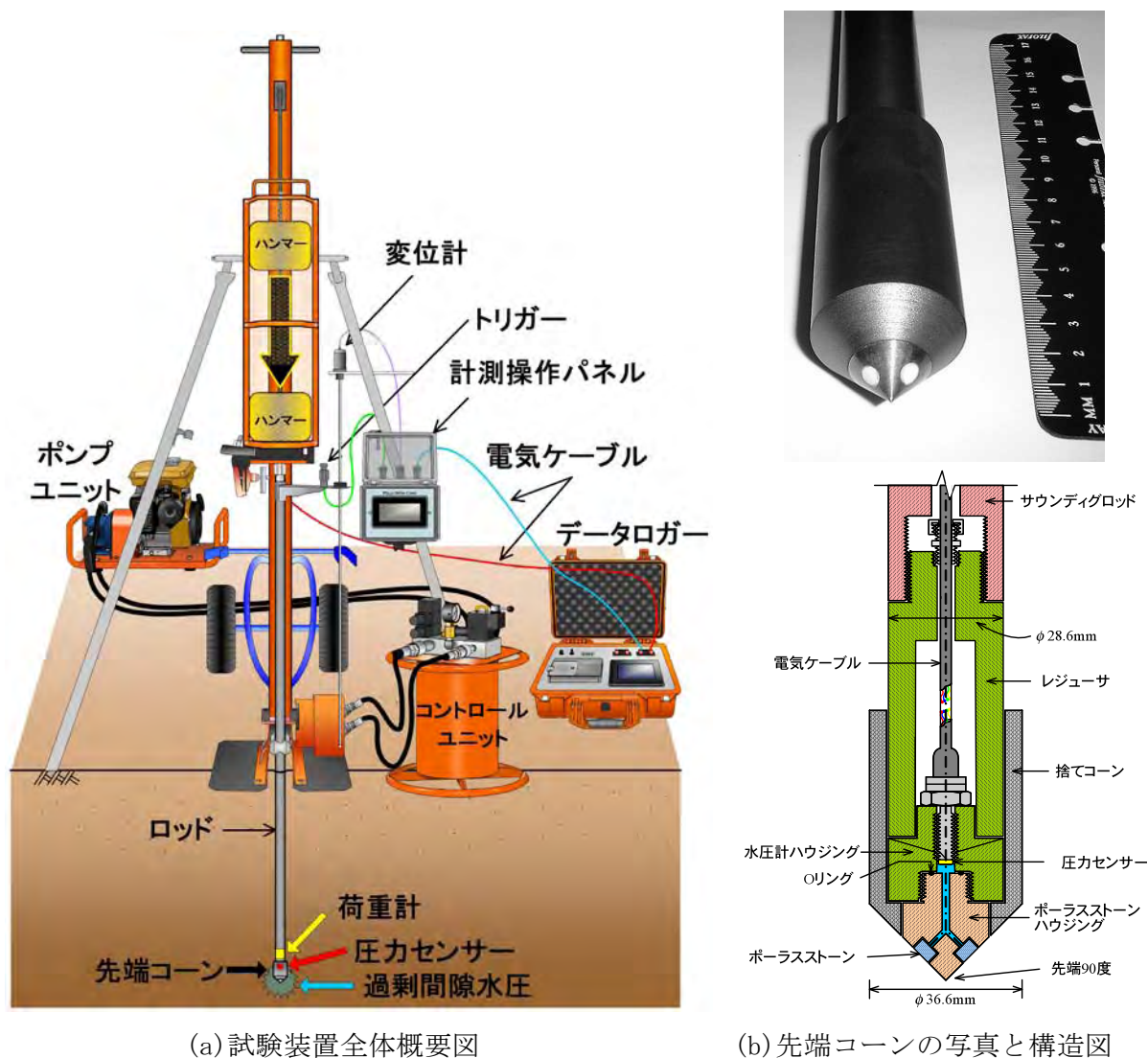


図-3.3.41 PDC試験装置の概要図

2) 貫入装置

PDCは、貫入装置にミニラムサウンディング（以降、MRSと言う）とスウェーデン式ラムサウンディング（以降、SRSと言う）に装着可能である。今回の現場実験では、MRSを使用した。なお、貫入ロッドはMRSの中実ロッド（ $\phi 28.0\text{mm}$ ）ではなく、PDC専用の中空ロッド（ $\phi 28.6\text{mm}$ ）を使用した。

3) PDC 計測装置

貫入装置に付加する PDC の試験装置は、間隙水圧計、変位計、トリガーおよびデータ収録装置である。

①間隙水圧計

間隙水圧計の圧力センサは、先端コーンに内蔵されている。なお、先端コーンの外形および寸法は、MRS と同一である。圧力センサには、米国の MEGGITT 社製（旧 Endevco 社）の半導体ゲージ型圧力トランスデューサ（8530B）を用いている。圧力センサの測定レンジは、0～3、450 kPa（測定感度 0.087 ± 0.029 mV/kPa）である。また、 $9,800 \text{ m/s}^2$ （1,000 G）の耐振動性能と $196,000 \text{ m/s}^2$ （20,000G）の耐衝撃性能を有する小型で堅牢・高感度なセンサである。

②変位計

変位計には、磁歪リニア変位センサを用いている。磁歪リニア変位センサは、Wiedemann 効果による磁歪現象を応用したセンサである。図-3.3.42 に磁歪リニア変位センサの測定原理の概念図を示す。剛なセンサプローブ（磁歪線）に非接触で移動するマグネットを配置することにより磁歪線上にねじり歪を発生させて、そのねじり歪の伝播時間でマグネットの位置を計測する方式である。高速となる打撃貫入速度に対し、高精度・高応答を可能としたセンサである。

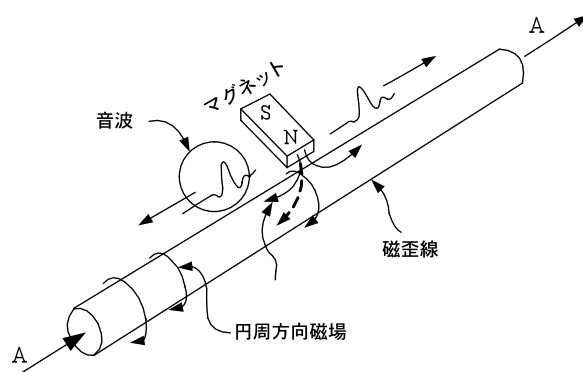


図-3.3.42 磁歪リニアセンサの概念図

③トリガー

ハンマーがアンビルに当たるタイミング（貫入開始）をデータ収録装置に知らせるためのトリガーには、近接センサを用いている。図-3.3.43 に近接センサによるトリガーの概念図、写真-3.3.8 に近接センサの設置状況を示す。

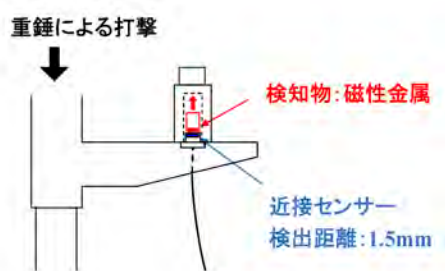


図-3.3.43 トリガーの概念図



写真-3.3.8 トリガーの設置状況

④データ収録装置

データ収録装置は、圧力センサの応答電圧と磁歪リニア変位センサの応答電圧値のアナログ値を A/D 変換した後、校正值を用いて換算した圧力値と変位量を 1 打撃毎に収録する。1 回の打撃で収録されるデータは、サンプリング周期 100 μsec （10 kHz）、プレトリガー 10 msec（100 データ/CH）を含む 0.2 秒間（2,000 データ/CH）である。

4) 試験の作業手順

PDC は、以下の手順で行う。

- ① 調査地点にMRSの貫入装置を垂直に立て、サポートで固定する。
- ② 貫入装置とコントロールユニットを油圧ホースで接続する。
- ③ 変位計とトリガーを貫入装置にセットし、それぞれをデータ収録装置と接続する。
- ④ 先端コーンを専用ロッドに取り付けるとともに、所定貫入深度+1m分のロッド内に信号ケーブルをとおり、データ収録装置に接続する。
- ⑤ 先端コーン部内を脱気した後、間隙水圧計の作動状況を確認する。
- ⑥ 専用脱気コーン+捨てコーンを取り付け、先端コーン部を仕上げる。
- ⑦ データ収録装置に記録媒体（SDカード）を挿入する。
- ⑧ 間隙水圧計の検定値をデータ収録装置に入力する（検定値の入力）。
- ⑨ 先端コーンを取り付けた1本目のロッドを貫入装置にセットし、コーン先端の深度をデータ収録装置に入力する（初期深度の入力）。
- ⑩ データ収録装置のカウント数に「1」を、トルク値に「0」を入力する。
- ⑪ 貫入装置の打撃回数カウンターを「0」にする。
- ⑫ コントロールユニットを操作し、ハンマー（30kg）、落下高（35cm）による打撃を開始する。
このとき1打撃毎の貫入量と過剰間隙水圧は、データロガーに自動収録される（写真-3.3.9）。
- ⑬ 20cm貫入毎の打撃回数をデータシートに記録する。
- ⑭ 1mの貫入後（1本目は80cm）、コントロールユニットを操作して打撃を中断させ、トルクレンチを用いてロッドのトルクを測定する（写真-3.3.10）。トルクを計測後、ロッドを1回転させる。
- ⑮ ロッドを1m分継ぎ足し、⑪～⑮を所定の深度に達するまで繰り返し行う。
- ⑯ 所定貫入深度までの試験が終了したら、変位計、データロガー、トリガーをセットする。
- ⑰ 貫入装置を移動し、引抜装置とコントロールユニットを用いてロッドの引抜きを行う。
- ⑱ 試験孔の水位を水位計で計測する。

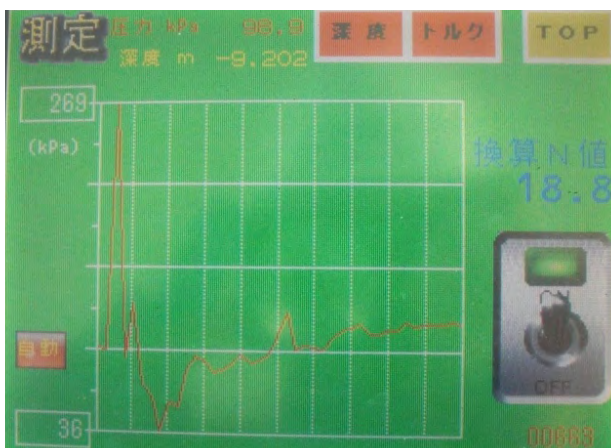


写真-3.3.9 間隙水圧測定状況



写真-3.3.10 トルク測定状況

5) データ整理

①貫入抵抗 N_d 値（推定 N 値）

動的貫入試験における単位面積・単位貫入量あたりの貫入抵抗 R_d は、一般に式(3.3.3)で定義される。MRSは、単位面積・単位貫入量あたりの貫入抵抗 R_d がSRSと等しくなるように設計されており、式(3.3.4)に示すように20cmの貫入に要する打撃回数に0.5を乗じて貫入抵抗 N_d 値を算出する。また、ロッド周面摩擦の影響を受けやすい粘性土地盤については、周面摩擦相当の打撃回数をロッドのトルク M_v を用いて式(3.3.5)より算出する。なお、式(3.3.4)におけるトルクによる周面摩擦補正の係数0.16は、現場実験による経験的な値である²⁾。

一方、PDCは1打撃毎の貫入量 d を測定していることから、式(3.3.6)を用いて式(3.3.7)より1打撃に N_d 値を算出する。また、土質に依らずトルクによる周面摩擦補正を行う。

$$R_d = \frac{MgH}{A} \times \frac{N}{D} \quad (3.3.3)$$

ここで、 R_d : 単位面積・単位貫入量あたりの貫入抵抗
 M : ハンマー質量
 H : 落下高さ
 A : 先端コーンの断面積
 g : 重力加速度
 D : 所定の貫入深度間隔
 N : 所定の D に達する打撃回数

$$\text{砂質土地盤の場合} \quad N_d = \frac{1}{2} N_{dm} \quad (3.3.4)$$

$$\text{粘性土地盤の場合} \quad N_d = \frac{1}{2} N_{dm} - N_{\text{mantle}} = \frac{1}{2} N_{dm} - 0.16 M_v \quad (3.3.5)$$

ここで、 N_d : MRS の貫入抵抗 N_d 値 (N 値に相当)
 N_{dm} : 20cm 貫入に要する打撃回数
 N_{mantle} : 周面摩擦相当の打撃回数
 M_v : ロッドのトルク ($\text{N} \cdot \text{m}$)

$$N_{dm} = \frac{20}{d} \quad (3.3.6)$$

ここで、 d : 1 打撃あたりの貫入量 (cm)

$$N_d = \frac{1}{2} \cdot \frac{20}{d} - 0.16 M_v = \frac{10}{d} - 0.16 M_v \quad (3.3.7)$$

なお、 $N_d \leq 0$ の場合は、 $N_d = 0$ とする。

②細粒分含有率 F_c

打撃貫入時に発生する過剰間隙水圧は、地盤の透水係数 k に依存する。砂質土と粘性土で測定された過剰間隙水圧 Δu と貫入量 D の時刻歴波形の一例を図-3.3.44 に示す。細粒分を主体とする粘性土は、砂質土に比べて過剰間隙水圧 Δu が消散し難く、水圧が残留する。

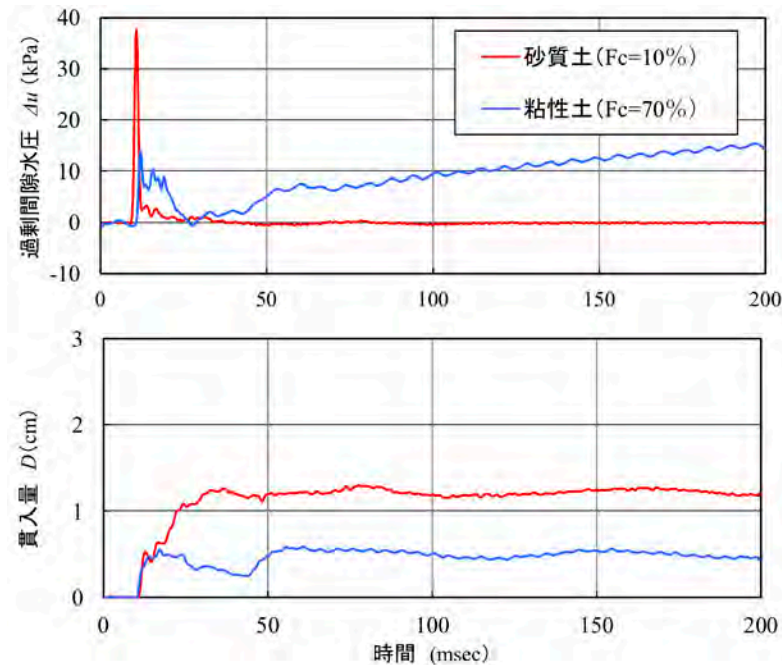


図-3.3.44 過剰間隙水圧 Δu の貫入量 D の時刻歴波形記録の一例

PDC で得られた間隙水圧 u_R を有効上載圧 σ'_v で除した間隙水圧比 u_R/σ'_v と、室内土質試験（粒度試験）による細粒分含有率 F_c の関係図を図-3.3.45 に示す。この間隙水圧 u_R は、貫入が概ね終了する 190msec～200msec の平均値である。また、大気圧を基準とする値であり、静水圧も含む水圧である。図-3.3.45 に示すとおり間隙水圧比 u_R/σ'_v と細粒分含有率 F_c の相関性は良く、式(3.3.8)で近似式されることが確認されている。PDC では、式(3.3.8)を用いて間隙水圧比 u_R/σ'_v より細粒分含有率 F_c を推定する。

$$F_c = 18 \cdot u_R / \sigma'_v \quad (3.3.8)$$

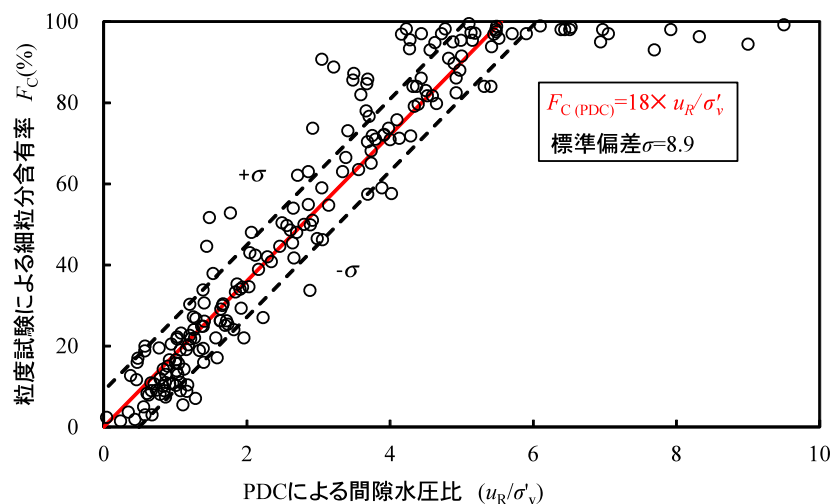


図-3.3.45 間隙水圧比 (u_R/σ'_v) と細粒分含有率 F_c の関係

(2) 試験結果

PDC の試験結果は、トルク補正前の貫入抵抗 N_{dm} およびロッドのトルク M_v 、トルク補正後の貫入抵抗 N_d 値、細粒分含有率 F_c について、深度分布図で整理した。貫入抵抗 N_d 値と細粒分含有率 F_c の深度分布図については、標準貫入試験と粒度試験の結果を併記した。また、貫入抵抗 N_d 値は、これまで一般的に用いられてきたトルク補正係数（0.16、以降“経験値”という）を用いた場合と SRS による試験条件から理論的に求められる補正係数³⁾ ($\beta/2=0.136/2=0.068$ 、以降“理論値”)を用いた場合の 2 通りの結果を示した。表-3.3.2 に PDC (MRS) のトルクによる周面摩擦補正係数の理論値 β を示す。

写真-3.3.11 に PDC の作業状況を示す。茨城県神栖市掘割、千葉県浦安市運動公園、滋賀県守山市水保、千葉県香取市佐原（地点 2）の 4 現場の試験結果を次頁以降に示す。

表-3.3.2 PDC (MRS) の周面摩擦補正係数の理論値 β

ハンマー	ハンマー質量	M (kg)	30.0
	落下高	H (mm)	350
コーン	コーン直径	D_c (mm)	36.6
	コーン断面積	A_c (mm ²)	1052.1
ロッド	ロッド径	D_r (mm)	28.6
打撃エネルギー		MgH (kJ)	0.103
打撃回数測定 of 貫入量		P (mm)	200
トルクによる周面摩擦補正係数		β ((N・m) ⁻¹)	0.136

$$\beta = (2P \cdot M_v) / (MgH \cdot D_r)$$



写真-3.3.11 PDC の試験状況（茨城県神栖市掘割）

1) 茨城県神栖市掘割

図-3.3.46 に神栖市掘割の試験結果を示す。PDC の貫入抵抗 N_d 値は、深度 11m 付近までは標準貫入試験の N 値と一致しているが、11m 以深は N 値より大きくなった。なお、深度 11m のトルク M_v は $30\text{N}\cdot\text{m}$ である。トルク補正係数については、理論値より経験値を用いた方が N 値に近い値を示した。

細粒分含有率 F_c は、粒度試験と概ね一致している。8.4m 以深において、細粒分含有率 F_c がスパイク状に大きくなる所が見られるが、砂層中にシーム状に挟在するシルトによるものと考えている。

2) 千葉県浦安市運動公園

図-3.3.47 に浦安市運動公園の試験結果を示す。PDC の貫入抵抗 N_d 値は、深度 11m 付近までは標準貫入試験の N 値と一致しているが、11m 以深は N 値より大きくなった。なお、深度 11m のトルク M_v は $18\text{N}\cdot\text{m}$ である。トルク補正係数については、理論値より経験値を用いた方が N 値に近い値を示した。

細粒分含有率 F_c は、粒度試験と概ね一致した。なお、深度 4m～5m に分布する砂質シルトの細粒分含有率は、粒度試験より小さくなった。

3) 滋賀県守山市水保

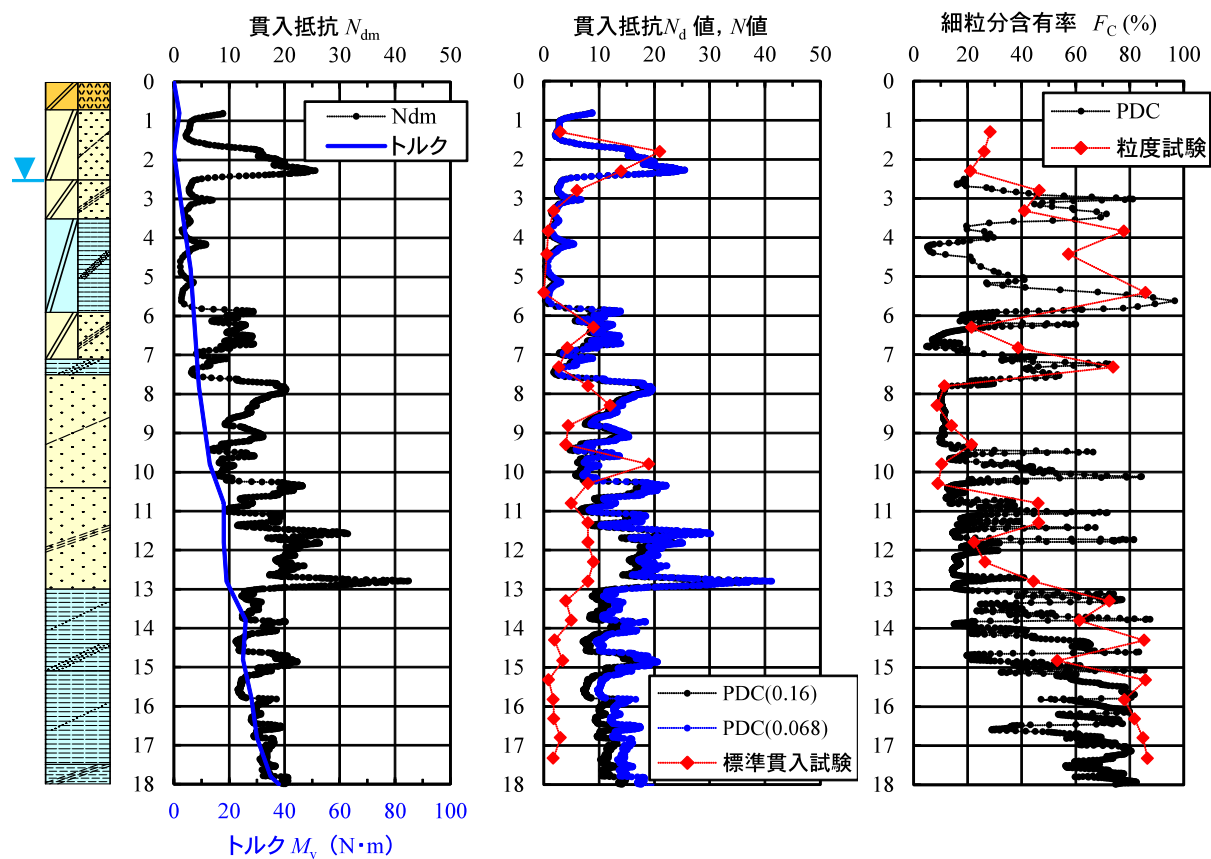
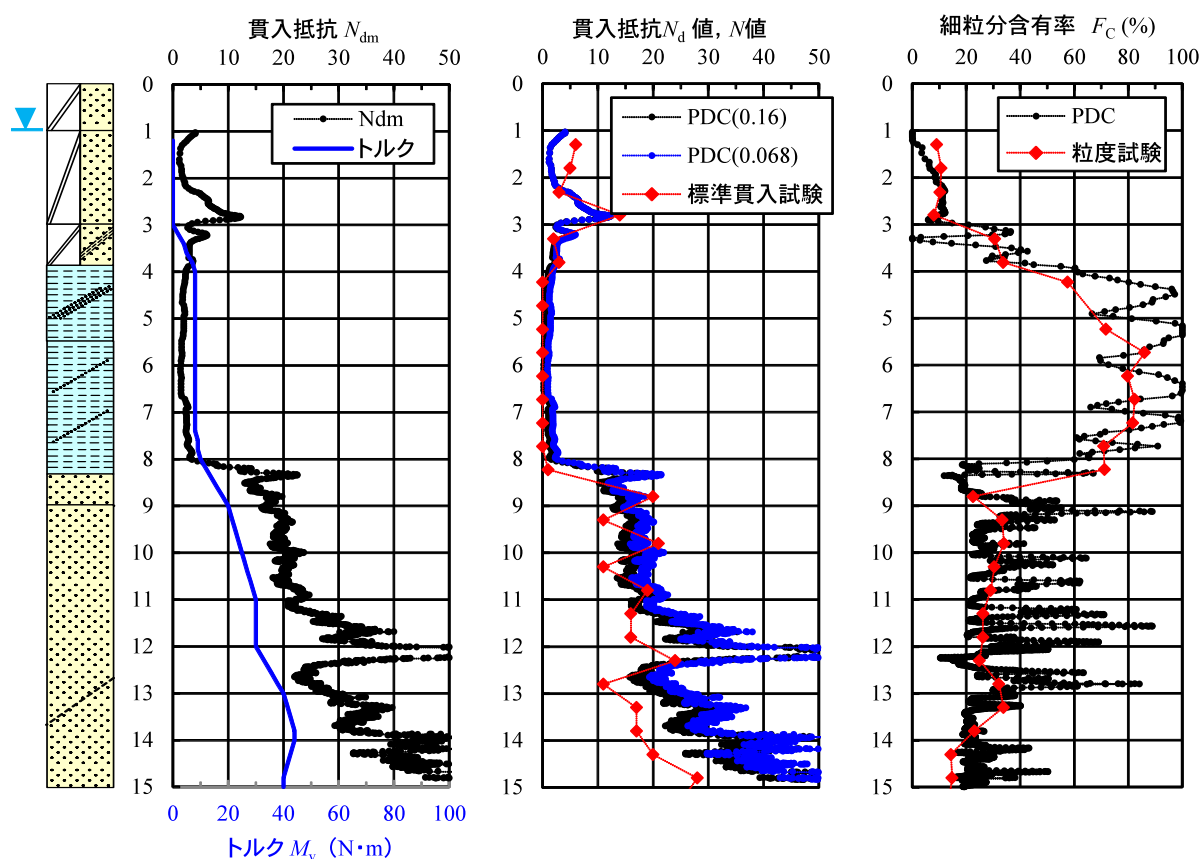
図-3.3.48 に守山市水保の試験結果を示す。PDC の貫入抵抗 N_d 値は、深度 9m 付近までは標準貫入試験の N 値と概ね一致しているが、9m 以深は N 値より大きくなった。なお、深度 10m のトルク M_v は $18\text{N}\cdot\text{m}$ である。トルク補正係数については、9m 以深では理論値より経験値を用いた方が N 値に近い値を示すが、一方、9m 以浅では顕著な違いは見られない。

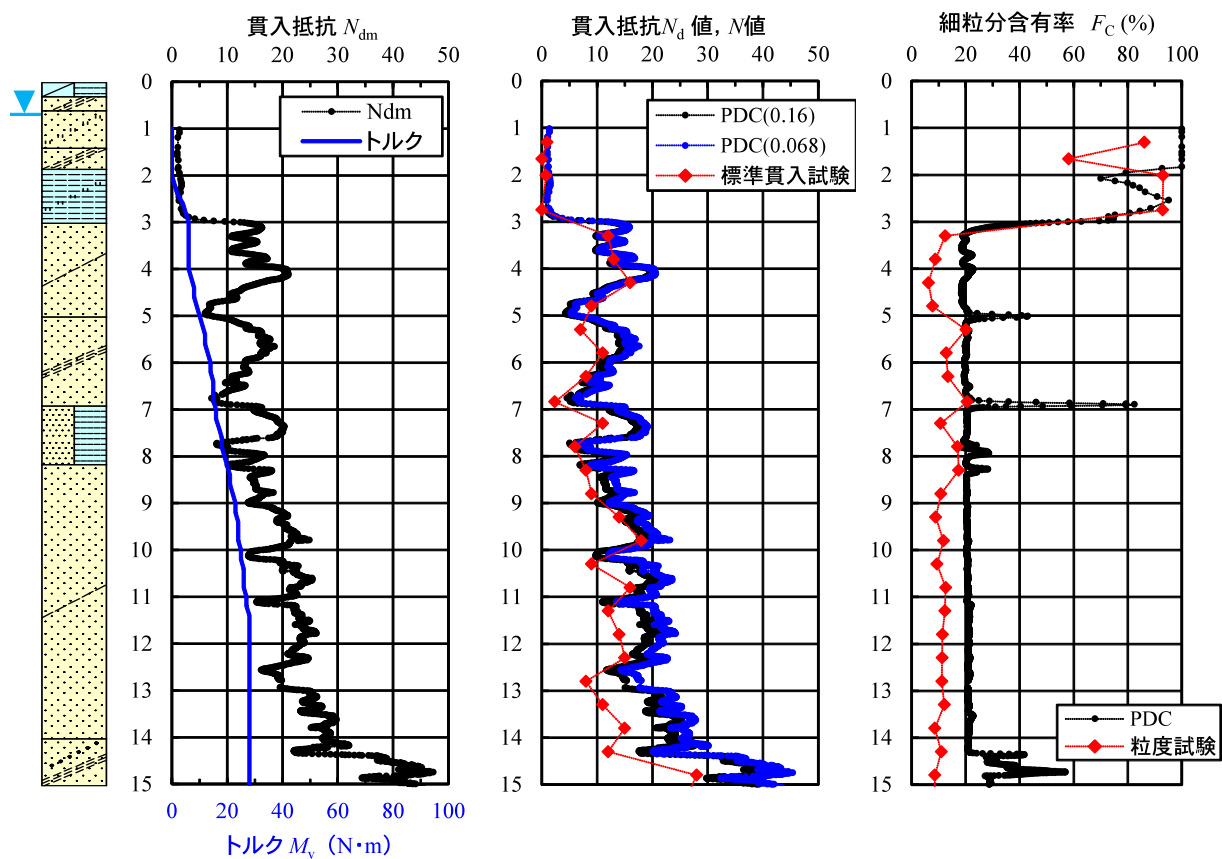
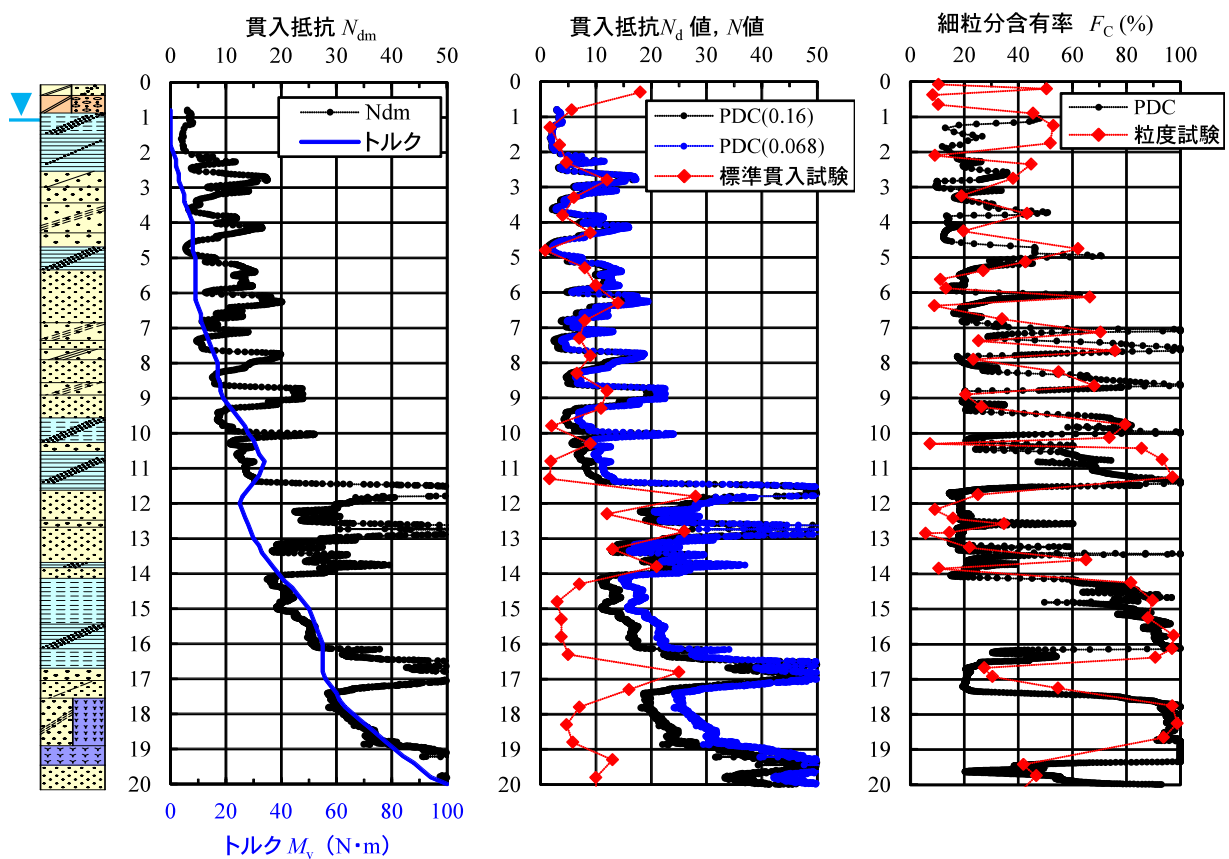
細粒分含有率 F_c は、粒度試験と概ね一致した。なお、深度 1～2m に分布する砂質シルトの細粒分含有率は、粒度試験より小さくなった。

4) 千葉県香取市佐原（地点 2）

図-3.3.49 に香取市佐原（地点 2）の試験結果を示す。PDC の貫入抵抗 N_d 値は、深度 11m 付近までは標準貫入試験の N 値と一致しているが、11m 以深は N 値より大きくなった。なお、深度 10m のトルク M_v は $27\text{N}\cdot\text{m}$ である。トルク補正係数については、理論値より経験値を用いた方が理論値よりも N 値に近い値を示した。

細粒分含有率 F_c は、全体の傾向は粒度試験と一致した。ただし、3m 以深の均質な砂層の細粒分含有率は、粒度試験よりやや大きめの値を示した。





(3) まとめ

1) 貫入抵抗 N_d 値

PDC の貫入抵抗 N_d 値は、深度 10m 付近までは N 値と良く一致している。10m 以深はトルクの増加に伴い N 値よりも大きくなるが、 N_d 値の凹凸は N 値に調和的であることから、適宜 N 値とキャリブレーションすることで精度を向上させることは可能と考えられる。トルク補正係数については、理論値よりも経験値を用いた方が N 値に近い値を示す。

2) 細粒分含有率 F_C

PDC の細粒分含有率 F_C は、粒度試験と概ね一致している。砂分を多く混入する砂質シルトでは、細粒分含有率が粒度試験よりも小さめに評価される場合がある。

参考文献

- 1) Shun-ichi Sawada and Ikuo Towhata : ISSMGE Bulletin : Volume5, pp.15-25, 2011.
- 2) 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.
- 3) R.Dahlberg and U.Bergdahl : Investigations on the Swedish Ram-Sounding Method, Proceedings of the European Symposium on Penetration Testing, June5-7, pp.93-102, 1974.
- 4) 馬場香奈江・利藤房男・澤田俊一・吉澤大造・藤井紀之・規矩大義，山口恵美：ピエゾドライブコーンによる細粒分含有率の推定に関する現場実験、第 48 回地盤工学研究発表会，pp.357-358，2013.
- 4) 西山備・馬場香奈江・規矩大義・山口恵美・利藤房男・澤田俊一・吉澤大造・藤井紀之：ピエゾドライブコーンによる N 値の推定精度に関する現場実験，第 48 回地盤工学研究発表会，pp.359-360，2013.

3.3.4 その他の動的コーン貫入試験結果

守山市今浜、水保及び香取市地点1、地点2では、大型動的コーン貫入試験（SRS）と中型動的コーン貫入試験（MRS）に加えて、小型及び簡易動的コーン貫入試験を実施した。それらの打撃仕様を表-3.3.3にまとめた。Penny¹⁾はイタリア製の小型機、μPDC²⁾は3.3.3のPDC(Piezo Drive Cone)を小型化したものである。DSPT³⁾(Dynamic Screwpoint Penetration Test)は先端をSWS試験で用いるスクリーポイントとしたもの、DPM改⁴⁾はDSPTと同じ仕様で、先端のスクリーポイントをコーンに替えたものである。PDCPT⁵⁾は簡易動的コーン貫入試験（JGS 1433）、SH⁶⁾はPDCPTと同じ仕様で、1打撃毎の貫入量を自動測定して打撃回数を換算するものである。各試験のトルクによる周面摩擦補正と単位面積・単位貫入量当たりのエネルギー補正については、付録A1を参照されたい。

写真-3.3.12～3.3.17に各試験機による試験状況を示した。

表-3.3.3 各種動的コーン貫入試験の打撃仕様

試験種別	大型	中型	小型				簡易	
試験名	SRS-Y3	MRS	Penny	μPDC	DSPT	DPM 改	PDCPT	SH
メーカー	YBM	OYO	Tecnotest	OYO	東邦地下	東邦地下	JGS 仕様	表土層研究会
ハンマーガイド径 (mm)	48.6	20	30	15	19	19	16	16
ハンマー直径 D_h (mm)	246	160	178	135	95	95	60	40
アンビル直径 D_a (mm)	120	90	51	35	50	50	50	40
打撃装置総質量 (kg)	80.5	62	40	38.4	15	15	6	6
ハンマー質量 m (kg)	63.5	30	30	20	10	10	5	5 (3)
落下高 H (mm)	500	350	200	250	500	500	500	
コーン先端角 (°)	90	90	60	90	Screwpoint	90	60	
コーンマントル長 (mm)	90	69	9	30	20	94.8	0	
コーン直径 D_c (mm)	45	36.6	35.7	25	33	25	25	
コーン断面積 A ($\times 10^{-4} \text{ m}^2$)	15.9	10.5	10.0	4.9	8.6	4.9	4.9	
ロッド直径 D_r (mm)	32	28	20	19	19	19	16	
直径比 D_c/D_r	1.41	1.31	1.79	1.32	1.74	1.32	1.56	
トルクによる周面摩擦補正係数 β	0.040	0.139	0.170	0.429	—	0.537	0.510	
N_d 測定の貫入量 P (m)	0.20	0.20	0.10	0.20	0.25	0.25	0.10	
単位面積・単位貫入量当たりのエネルギー $E=mgH/A/P$ ($\text{kJ/m}^2/\text{m}$)	979.2	489.5	588.0	499.6	229.4	399.7	499.6	
SRS 基準のエネルギー補正係数 α	1.00	0.500	0.601	0.510	0.234	0.408	0.510	

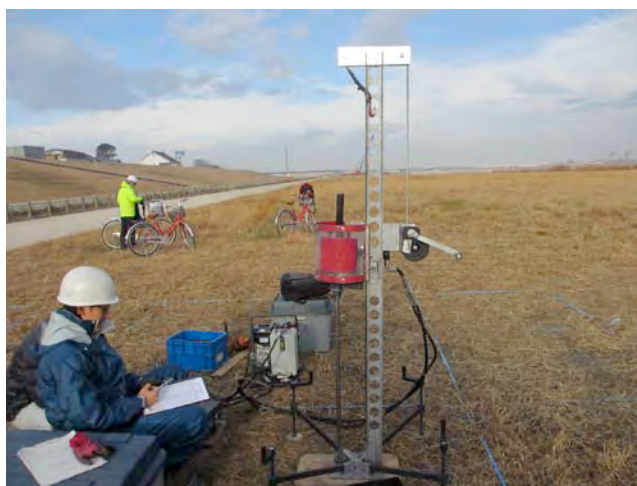


写真-3.3.12 Penny 試験機



写真-3.3.13 μPDC 試験機



写真-3.3.14 DSPT 試験機

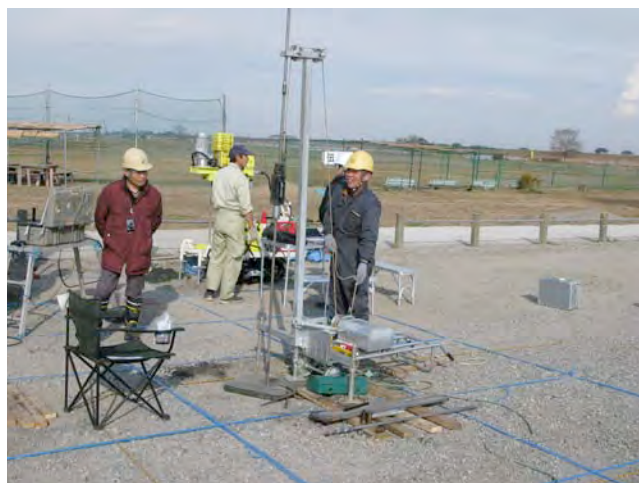


写真-3.3.15 DPM 改 試験機



写真-3.3.16 PDCPT 試験機



写真-3.3.17 SH 試験機

(1) 守山市今浜・水保

図-3.3.50、3.3.51 にそれぞれ守山市今浜、水保の Penny の測定打撃回数 N_{dm} 、トルク M_v 、周面摩擦とエネルギー補正後の打撃回数 N_d' の深度分布を示す。図(3)には比較のため、SRS-Y2 (自重低減機) の N_d 値、SPT の N 値も示している (以下、同様)。両地点とも M_v は大型(SRS)よりもかなり小さい。これは Penny のコーンとロッドの直径比 D_c/D_r が 1.79 と大きく、周面摩擦の影響が小さいためである。両地点ともに N_d' 値は N_d 値、 N 値とよく整合しており、周面摩擦とエネルギー補正の有効性がうかがえる。

図-3.3.52、3.3.53 にそれぞれ今浜、水保の DSPT の N_{dm} 、 N_d' の深度分布を示す。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 (複数の試験の再現性は高い)。両地点ともに補正 N_d' 値は N_d 値、 N 値よりも大きい。これは、DSPT の先端はスクリーポイントであるので、他のコーン貫入試験と同様な補正はできないこと (別途補正係数が必要かもしれない)、また、周面摩擦の補正を行っていないことによると考えられる。

図-3.3.54、3.3.55 にそれぞれ今浜、水保の PDCPT と SH の N_{dm} 、 M_v 、 N_d' の深度分布を示す。両地点とも PDCPT の M_v が小さいのは Penny と同じ理由である。図-3.3.54 の今浜の PDCPT と SH の測定 N_{dm} 値はほぼ一致しているが、補正 N_d' 値は深度 5m 以深で SRS の N_d 値より大きい。粘土地盤では M_v による補正を行ってもなお周面摩擦の影響が現れていると考えられる。一方、図-3.3.55

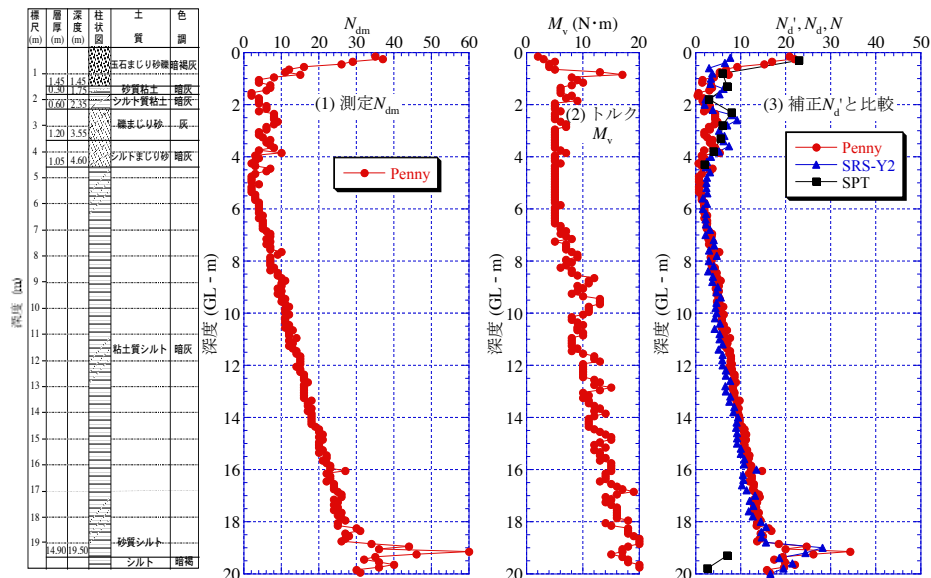


図-3.3.50 守山市今浜の Penny の試験結果

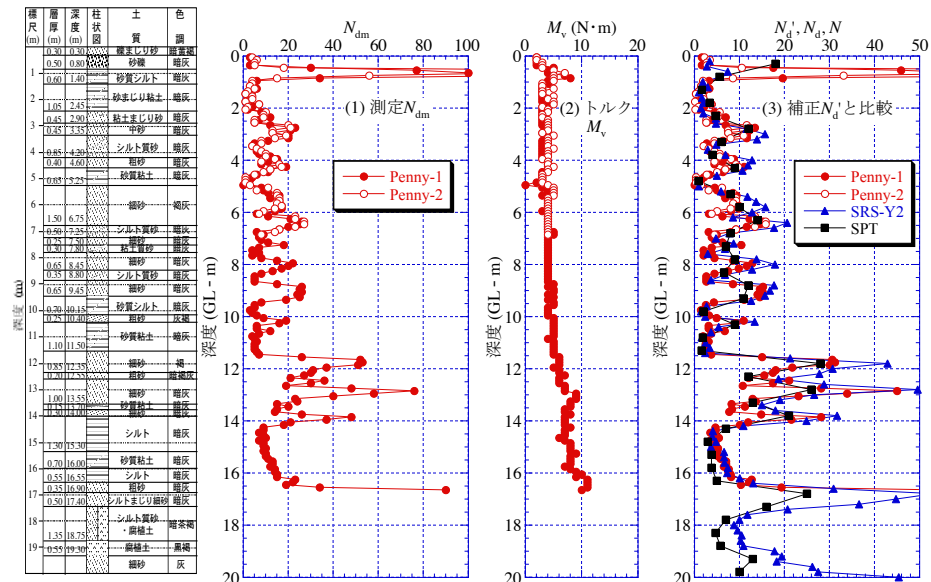


図-3.3.51 守山市水保の Penny の試験結果

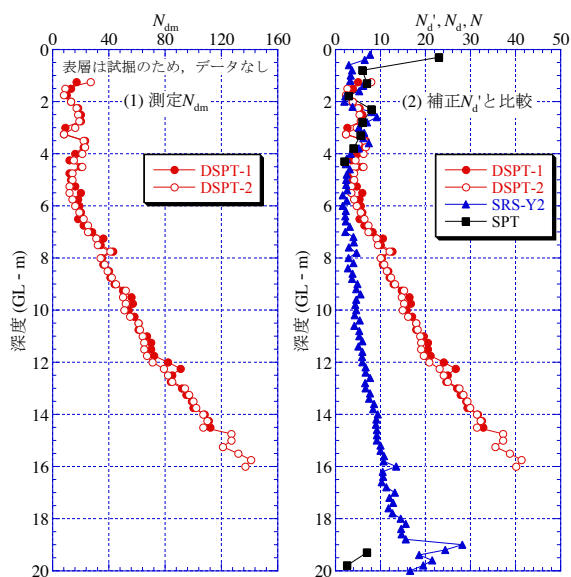


図-3.3.52 守山市今浜の DSPT の試験結果

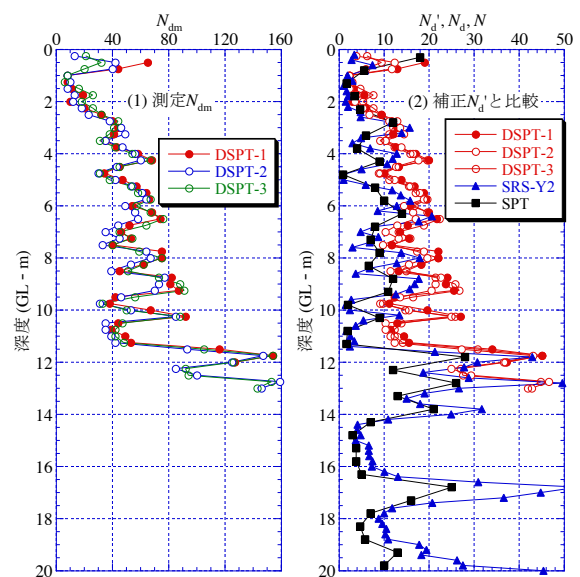


図-3.3.53 守山市水保の DSPT の試験結果

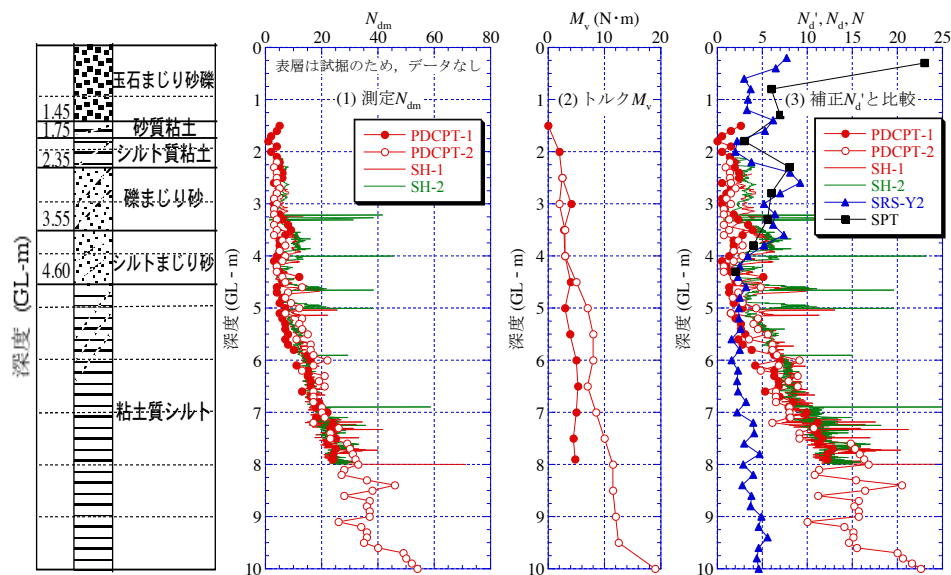


図-3.3.54 守山市今浜の PDCPT と SH の試験結果

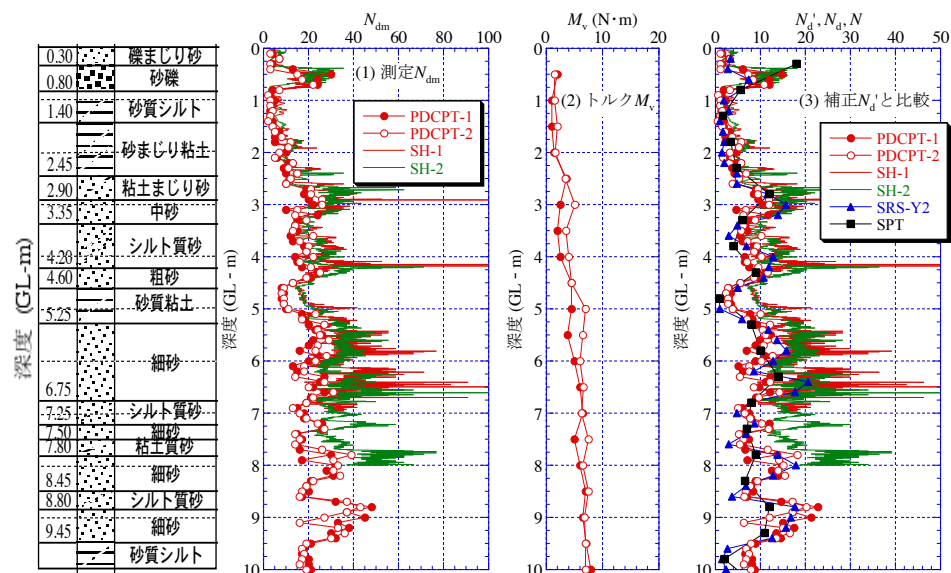


図-3.3.55 守山市水保の PDCPT と SH の試験結果

の水保では SH の測定 N_{dm} 値は PDCPT よりもやや大きい（その理由は不明である）。PDCPT の補正 N_d' 値は N_d 値、 N 値とよく整合しており、砂質土主体の地盤では深度 10m まで十分適用できることがわかる。

(2) 香取市地点 1、地点 2

図-3.3.56、3.3.57 にそれぞれ香取市地点 1、地点 2 の Penny の N_{dm} 、 M_v 、 N_d' の深度分布を示す。図(3)には比較のため、SRS-Y3（自重低減機）の N_d 値と SPT の N 値も示している（ただし、地点 1 の SPT は実施していない、以下同様）。地点 1 の Penny の補正 N_d' 値は SRS の N_d 値とよく整合しており、周面摩擦とエネルギー補正の有効性がうかがえる。一方、地点 2 では N_d' 値は N 値とは比較的良好に整合しているが、 N_d 値と比べるやや小さい（むしろ深度 6～8m 付近の N_d 値は過大と考えられる）。

図-3.3.58、3.3.59 にそれぞれ地点 1、地点 2 の DSPT と DPM 改の N_{dm} 、 M_v 、 N_d' の深度分布を示す。打撃回数測定の一貫量が 25 cm であるため、 N_{dm} 値はかなり大きい、両試験の先端形状と単

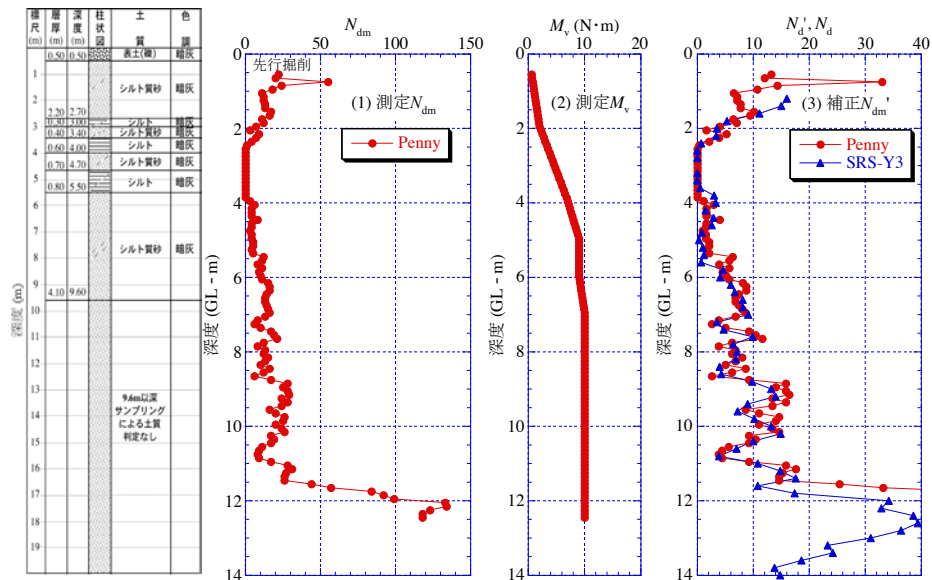


図-3.3.56 香取市地点1のPDCPTとSHの試験結果

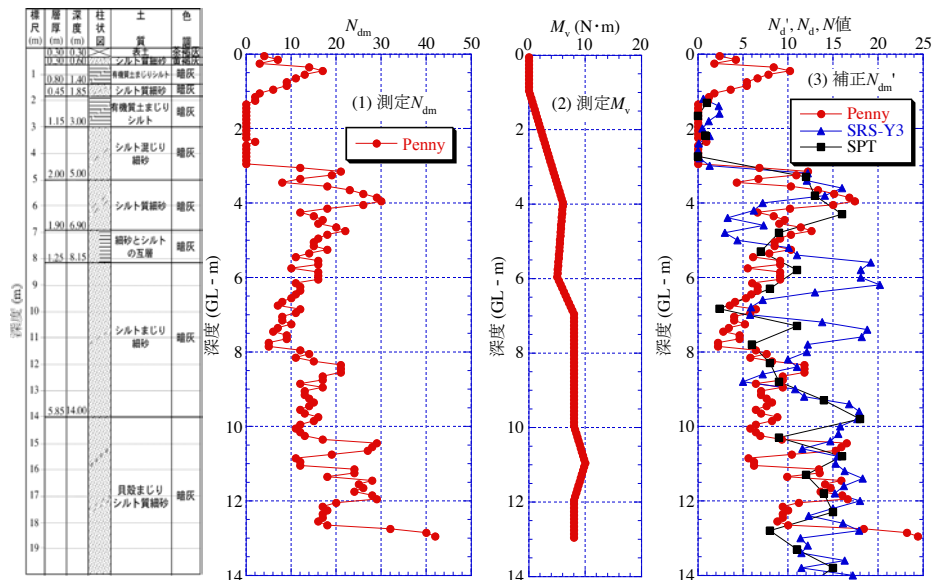


図-3.3.57 香取市地点2のPDCPTとSHの試験結果

位面積当たりのエネルギー E_n （表-3.3.3 参照）が異なるにも関わらず、 N_{dm} 値は同程度となっている。これはDSPTのスクリーポイントによる抵抗とDPM改の E_n が大きい効果が相殺していると考えられる。しかし、 N_d' 値は、地点1、2ともにDPM改の方が大きくなった（DSPTの先端はスクリーポイントであるので、他のコーン貫入試験と同等な補正にはならないが）。地点1ではDPM改の N_d' 値はSRSの N_d 値よりもやや大きくなった。地点2では N_d' 値は N 値と N_d 値（深度6～8m付近を除く）と比較的よく整合している。

図-3.3.60、3.3.61にそれぞれ地点1、地点2のPDCPTの N_{dm} 、 M_v 、 N_d' の深度分布を示す。地点1のPDCPTの補正 N_d' 値は深度4m程度までSRSの N_d 値と整合しているが、それ以深ではやや大きくなった。一方、地点2ではやはり N_d' 値は N 値と N_d 値（深度6～8m付近を除く）と比較的よく整合している。

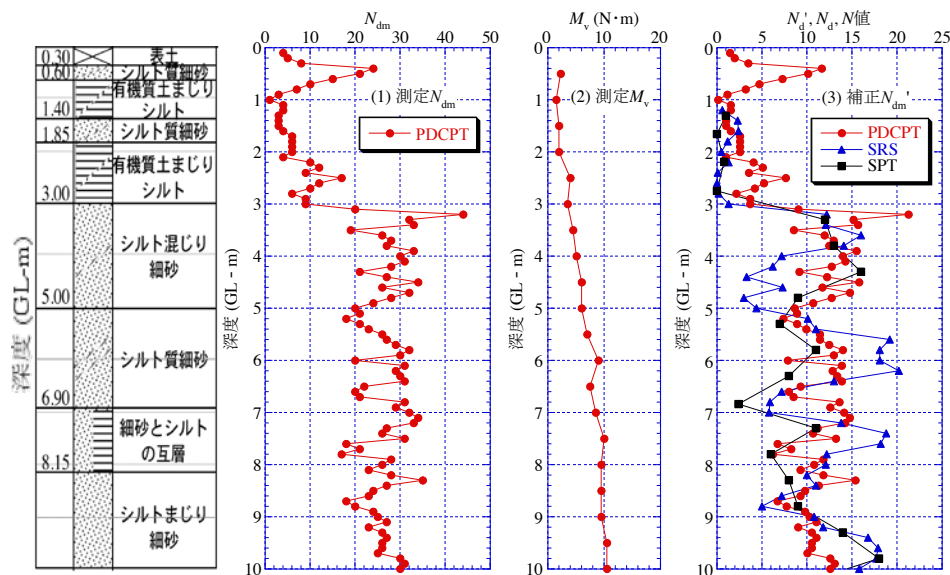


図-3.3.61 香取市地点 2 の PDCPT の試験結果

なお、上流側の地点 2 で SRS との整合性が悪かった原因は、試験実施位置の違いによる地盤の不均一性の影響と考えられる（SRS 実施地点から、Penny、DSPT、DPL 改、PDCPT はそれぞれ 12.2、7.1、7.3、10.8m 離れであった、図-3.2.38 参照）。香取市地点 2 での試験位置による違いは他の試験比較でも見られている。

以上より、動的コーン貫入試験同士の比較は付録 A1 の式(A1.10)による単位面積・単位貫入量当たりのエネルギーによる補正が有効であり、小型動的コーン貫入試験は深度 10m 程度までの調査に十分適用できると考えられる。ただし、各試験で器具の寸法や質量が異なるため、打撃効率も異なる可能性があるが、各試験の打撃効率の違いは 3.4 で詳しく述べる。

参考文献

- 1) 村田芳信・森口周二・沢田和秀：滋賀県守山市の一斉試験における小型動的貫入試験と 2 次元表面波探査による宅地地盤評価，第 48 回地盤工学研究発表会，No.185，pp.369-370，2013.
- 2) 山口恵美・利藤房男・澤田俊一・規矩大義：滋賀県守山市における地盤調査一斉試験（その 5 PDC），第 48 回地盤工学研究発表会，No.90，pp.179-180，2013.
- 3) 柳信一郎・片山浩明・大島昭彦：滋賀県守山市における DSPT の報告，第 48 回地盤工学研究発表会，No.186，pp.371～372，2013.
- 4) 張林松・大島昭彦・平田拓也・山路雅之・片山浩明・佐藤博：千葉県香取市佐原における小型動的コーン貫入試験の比較，No.117，2014.
- 5) 深澤和行・島津多賀夫・篠川俊夫・大島昭彦・平田拓也・張林松：滋賀県守山市における動的コーン貫入試験の比較（PDCPT，SH），第 48 回地盤工学研究発表会，No.187，pp.373-374，2013.
- 6) 表土層調査技術研究会：SH 型貫入試験調査要領，2007.

3.3.5 地下水位測定と簡易サンプラーによる土質判定結果

(1) SRS、MRS 試験時の地下水位測定結果

SRS 試験実施後の試験孔を利用して、通電型の水位計（写真-3.3.18）によって地下水位（安定水位）を測定した。表-3.3.4 に 6 地点で実施した結果をボーリングでの孔内水位とあわせて示す。測定はすべて液状化を対象とした沖積低地で実施した。ボーリングでの測定結果と若干の差がみられる地点もあったが、測定日が違うこともあり、精度は問題ないと判断できる。

一方、MRS 試験孔を利用して、地下水位（安定水位）を測定した。測定には、通電型のロープ水位計を使用した（写真-3.3.19）。8 地点で実施した結果をボーリングでの孔内水位とあわせて表-3.3.4 に示す。測定はすべて液状化を対象とした沖積低地で実施したため、自然水面が比較的浅く測定された。ボーリングでの測定結果と若干の差がみられる地点もあったが、測定日が違うこともあり、精度は問題ないと判断できる。また、SRS での測定値とも大差ない。

今回実施した SRS 試験 6 地点、MRS 試験 8 地点での測定は問題なくできたが、孔内崩壊によって測定ができなくなることも想定される。孔内崩壊は主に表層付近の土質（均一な砂など）により発生するが、GL-2m 程度以浅に自然水位がある場合は多少崩壊しても、孔中に砂が沈降するのほとんどの場合、問題なく測定できる。一方、表層付近に不均質な盛土（砂礫材）が厚く存在する場合や自然水位面が深くなっている場合には、孔内が閉塞され測定不能となる可能性はある。その場合、中空ロッドを挿入し、ロッド内水位を計測するなどの対策が必要となる。



写真-3.3.18 SRS 試験で用いた通電型水位計



写真-3.3.19 MRS 試験で用いた通電型水位計

表-3.3.4 地下水位測定結果

地点名	SRS での測定結果 (GL -m)	MRS での測定結果 (GL -m)	ボーリングでの測定結果 (GL -m)
茨城県神栖市堀割	0.60	0.45	0.35
千葉県浦安市運動公園	2.00	2.20	2.30
滋賀県守山市今浜	1.80	1.65	1.80
滋賀県守山市水保	1.20	1.15	0.74
大阪市大正区鶴町	2.00	1.45	1.62
千葉県浦安市港	1.00	0.83	0.92
千葉県香取市佐原地点 1	—	1.22	—
千葉県香取市佐原地点 2	—	0.95	1.30

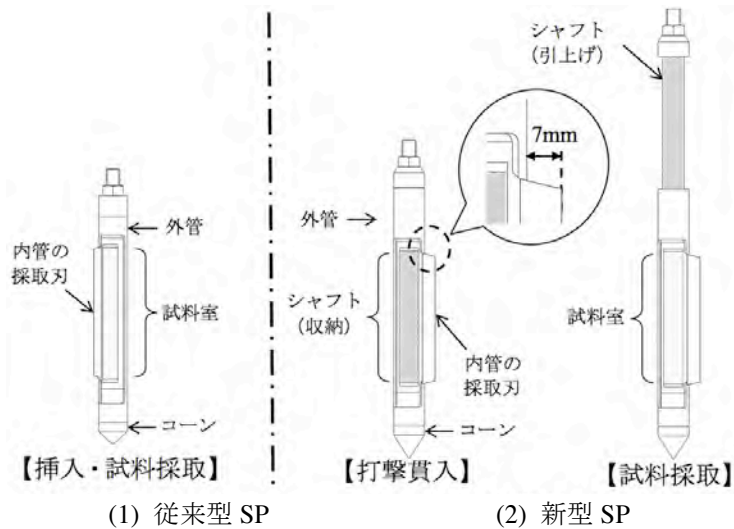
(2) SRS 試験時の土試料のサンプリング方法

SRS におけるサンプリングは、YBM 社製の開閉式の従来型 SP と新型 SP を使用して実施した¹⁾。採取試料を粒度試験に供して、液状化判定に必要な細粒分含有率 F_c を求めた。サンプラーの仕様を表-3.3.5、概略図を図-3.3.62、試料採取手順を図-3.3.63 に、試料採取状況を写真-3.3.20 に示す。

従来型 SP はコーン、内管及び外管の 3 部品で構成されている。内管は中空、外管はコーンと一体となっているが、打撃貫入に耐える強度は有していない。内管は外管内を左右軸方向に 120°回転でき、外管を左に回すと試料室が開く。内管の採取刃は外管より数ミリ外へ出ており、外管を左に 2~3 回転ほど回すと採取刃が孔壁の試料を掻き取る。サンプラーを引き上げ、外管を右に逆転すると試料室が閉じる。一方、新型 SP は従来型 SP を改良したもので、コーン、内管、外管及びシャフトの 4 部品で構成されている。シャフトは内管内を試料室上端から下端まで垂直方向に移動す

表-3.3.5 サンプラーの仕様¹⁾

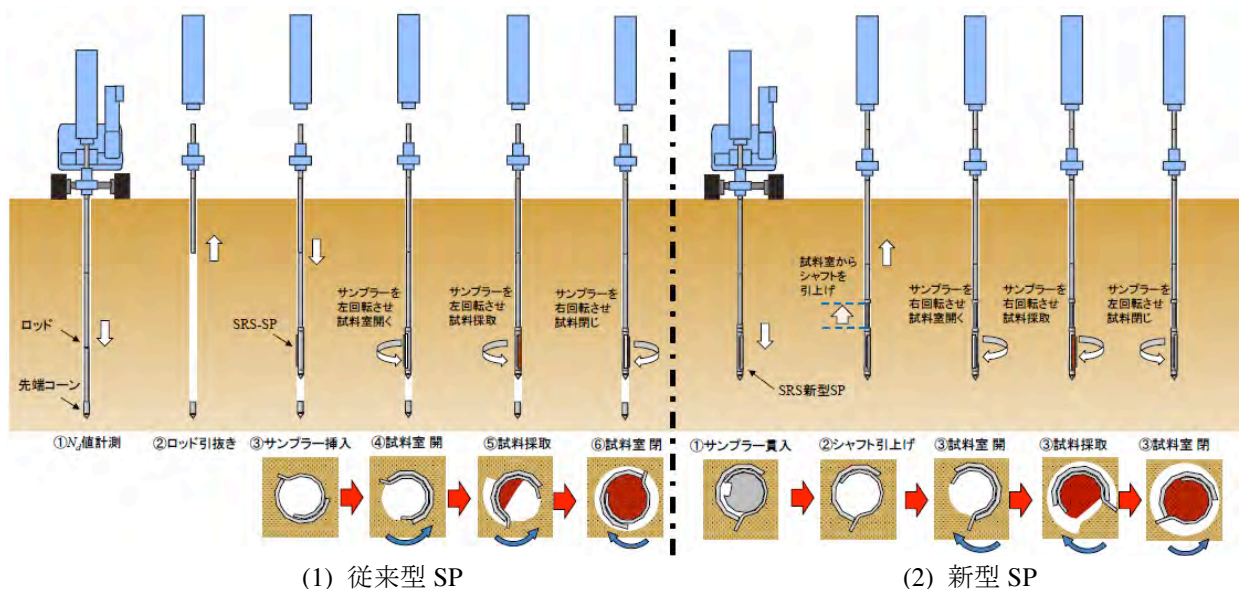
サンプラー	コーン先端角	採取刃高さ	シャフト
従来型 SP	90°	2 mm	なし
新型 SP	60°	7 mm	あり



(1) 従来型 SP

(2) 新型 SP

図-3.3.62 サンプラーの概略図¹⁾



(1) 従来型 SP

(2) 新型 SP

図-3.3.63 試料採取手順¹⁾



(1) 従来型 SP



(2) 新型 SP

写真-3. 3. 20 試料採取状況

る。内管内に収納したシャフトの先端とコーンが直接接しており、別孔での打撃貫入が可能である。内管にあるシャフトを引き上げることで内管内に試料室を確保する機構となっている。

図-3. 3. 64(1)～(8)に、それぞれ神栖市堀割、守山市今浜、守山市水保、大阪市鶴町、浦安市港、唐津市原、唐津市岸山、香取市地点 2 の従来型 SP、新型 SP で採取した試料の細粒分含有率 F_c を SPT 試料による値と比較した結果を柱状図とともに示す。なお、守山市水保では SPT と同様なサンプラーを打撃貫入する貫入式 SP²⁾も実施した。

図(1)～(5)の地点では、液状化対象層となる砂質土層（細粒分が少ない層）を選んで F_c を測定したため、従来型 SP のデータのピッチは粗いものの、SPT 試料と大きく異なる F_c 値が測定された。この原因としては、サンプラー内に異なる部位の土が混入したこと、採取後にサンプラーを引き上げる過程で試料が流出したことなどが考えられる。一方、図(5)～(8)の浦安市港、唐津市原、唐津市岸山、香取市地点 2 では、新型 SP の F_c 値は SPT 試料の試験結果と一致している。なお、香取市地点 1 での SRS 新型 SP の結果は図-3. 3. 66(7)に示している。

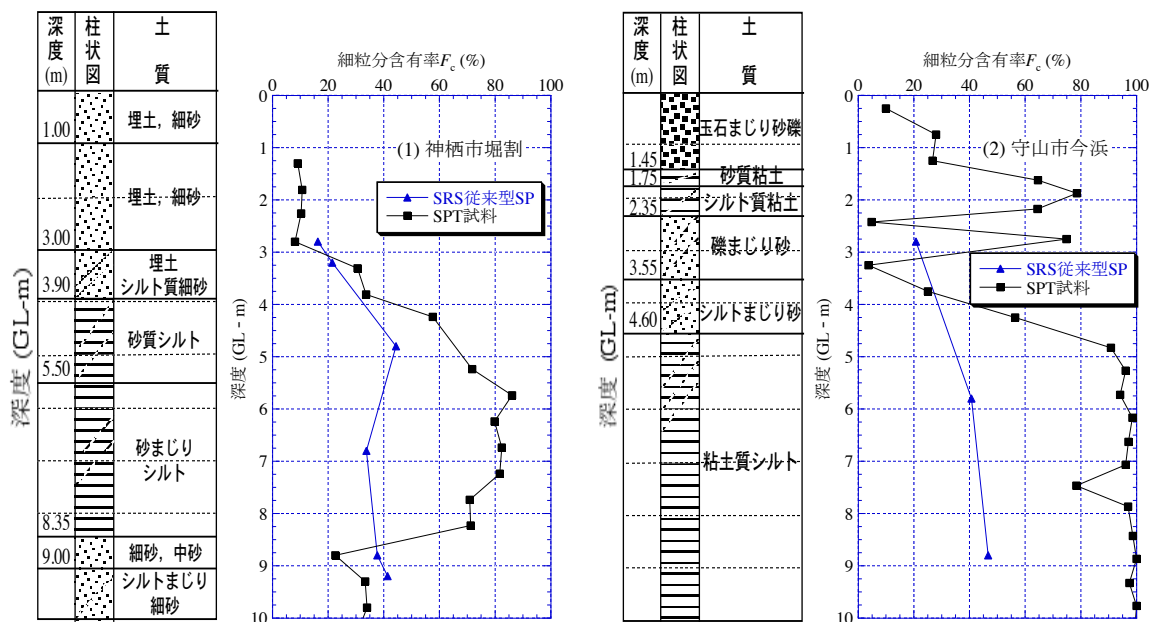


図-3. 3. 64 SRS 従来型 SP、新型 SP と SPT 試料の細粒分含有率 F_c の比較（つづく）

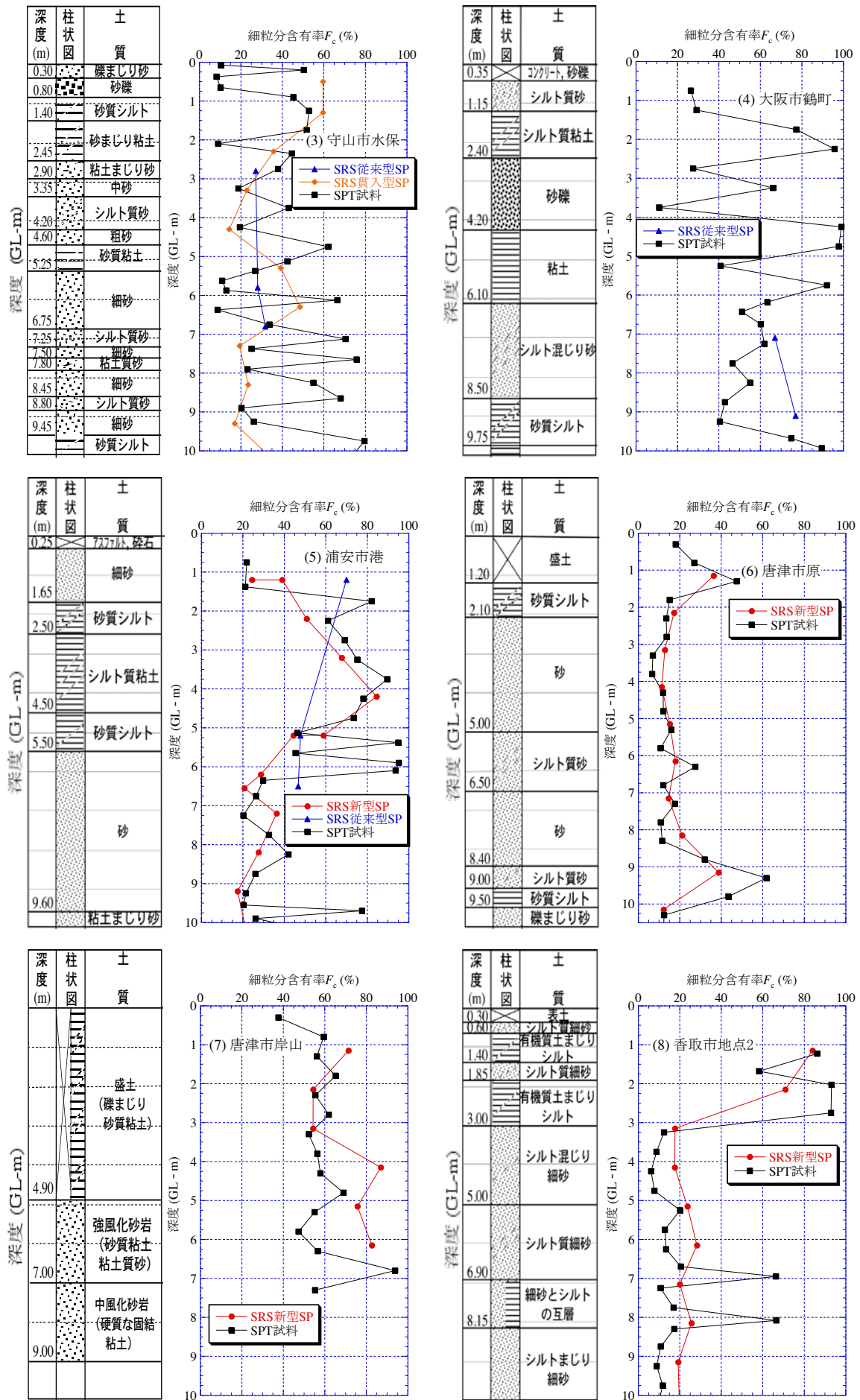


図-3.3.64 SRS 従来型 P、新型 SP と SPT 試料の細粒分含有率 F_c の比較 (つづき)

従来型 SP の機構上の欠点を改良した新型 SP は液状化判定の実務において、精度よく F_c 値を把握できるものと考えられる。

(3) MRS 試験時の土試料のサンプリング方法

MRS における土のサンプリングは、手動式バイブロサンプラー³⁾ (写真-3.3.21) を使用し、別孔削孔による連続サンプリングを、GL-10m を基本として実施した。このサンプリング装置は MRS に使用するロッド引抜き装置などを併用でき、資機材を少なくできる利点がある。

サンプラーは小型バイブロハンマーにより地盤に貫入させる。サンプラーの構造はサンプルチューブの内面に 0.2mm の薄肉シートを内蔵した外径 $\phi 39$ mm、試料採取長 1m の筒状ロットとなっている。貫入後、サンプリングチューブを地盤から引抜き、シートと共に採取試料を取り出すことを繰り返す。先端にコアキャッチャーを取付けることで、引抜き時に採取試料が脱落しない。また、貫入時には、試料を採取する直前の深さまで、サンプラーを塞ぐ内部ロットを装着するため、途中の土が混入しない構造となり、孔壁の保護が不要となっている。採取した試料については、粒度試験に供することで、液状化判定に必要な細粒分含有率 F_c を把握することができる。

サンプリングした例として、茨城県神栖市堀割での結果を写真-3.3.22、図-3.3.65 に示す。



写真-3.3.21 手動式バイブロサンプラー

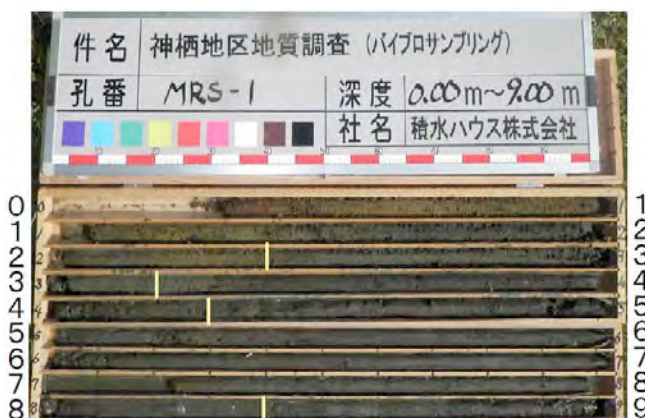


写真-3.3.22 採取コア写真例（神栖）

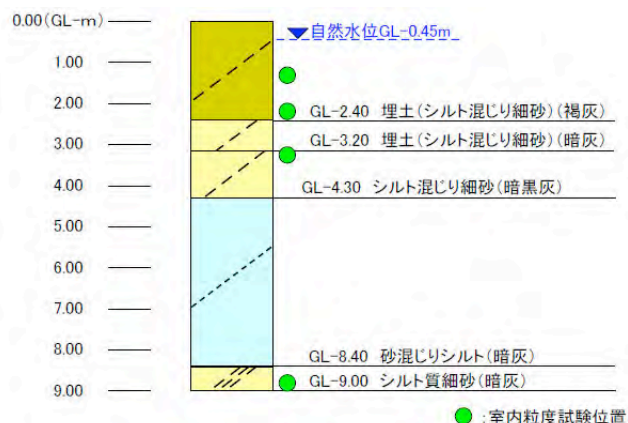


図-3.3.65 簡易柱状図例（神栖）

図-3.3.66(1)～(8)に、それぞれ神戸市堀割、浦安市運動公園、守山市今浜、守山市水保、大阪市鶴町、浦安市港、香取市地点1、地点2の自動式バイブロサンプラーで採取した試料の細粒分含有率 F_c をSPT試料による値と比較した結果を柱状図とともに示す。ただし、香取市地点1では標準ボーリング・SPTが実施されなかったため、先のSRS新型SPの結果と比較している（柱状図は自動式バイブロサンプラーによって作成している）。

図(1)～(6)の地点では、明らかに液状化対象層となる砂質土層（細粒分が少ない層）を選んで F_c を測定した。そのため、SPT試料に比べて、データのピッチが粗く、またやや低い F_c 値となっている。一方、図(7)、(8)の香取市地点1、地点2では、土質状況に関わらず1mに1ヶ所程度、 F_c を測定した。地点2はほぼSPTの試験結果と一致している。

自動式バイブロサンプラーは、10m程度までの連続サンプリングが可能な方法といえる。液状化判定の実務では、連続サンプリングのメリットを活かし、砂質土層に絞りながら粒度試験を実施すればよいと考えられる。

参考文献

- 1) 檜田智之・武藤真幸・丸尾史郎・大島昭彦・平田茂良・柴田芳彦・西田功：動的コーン貫入試験用の簡易サンプラーの適用性，第49回地盤工学研究発表会，No.44，2014。
- 2) 平田茂良・山本明弘：宅地地盤の新たな地盤調査法－オートマチックラムサウンディング，基礎工，Vol.34，No.10，pp.68～71，2006。
- 3) 応用計測サービス株式会社 HP：<http://www.oyoks.co.jp/catarog/s-60.pdf>。

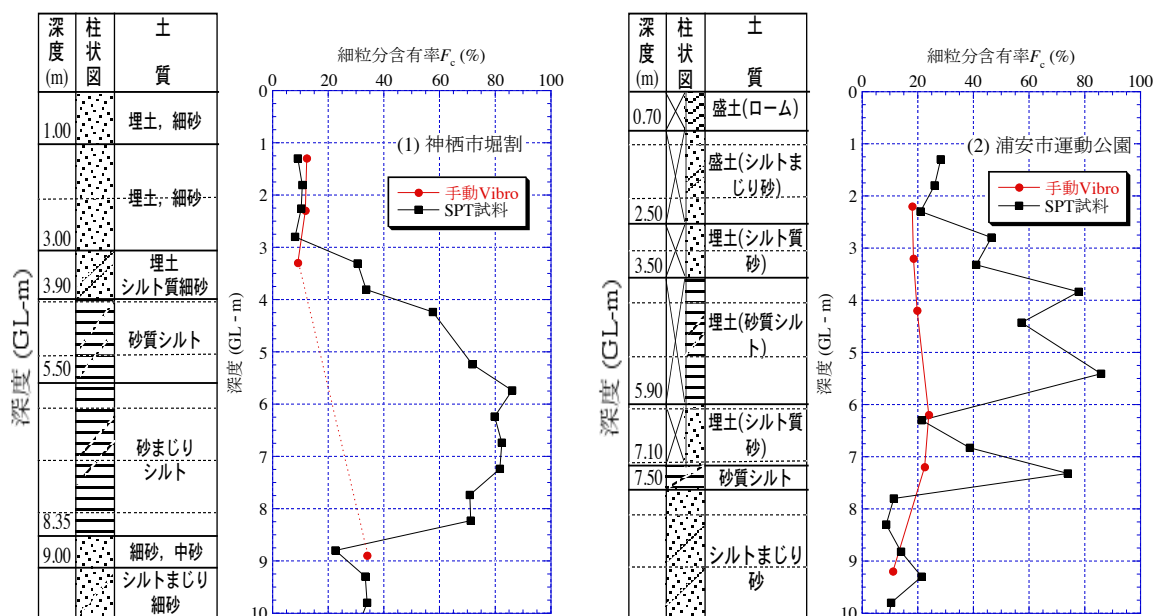


図-3.3.66 自動式バイブロサンプラー試料とSPT試料の細粒分含有率 F_c の比較（つづく）

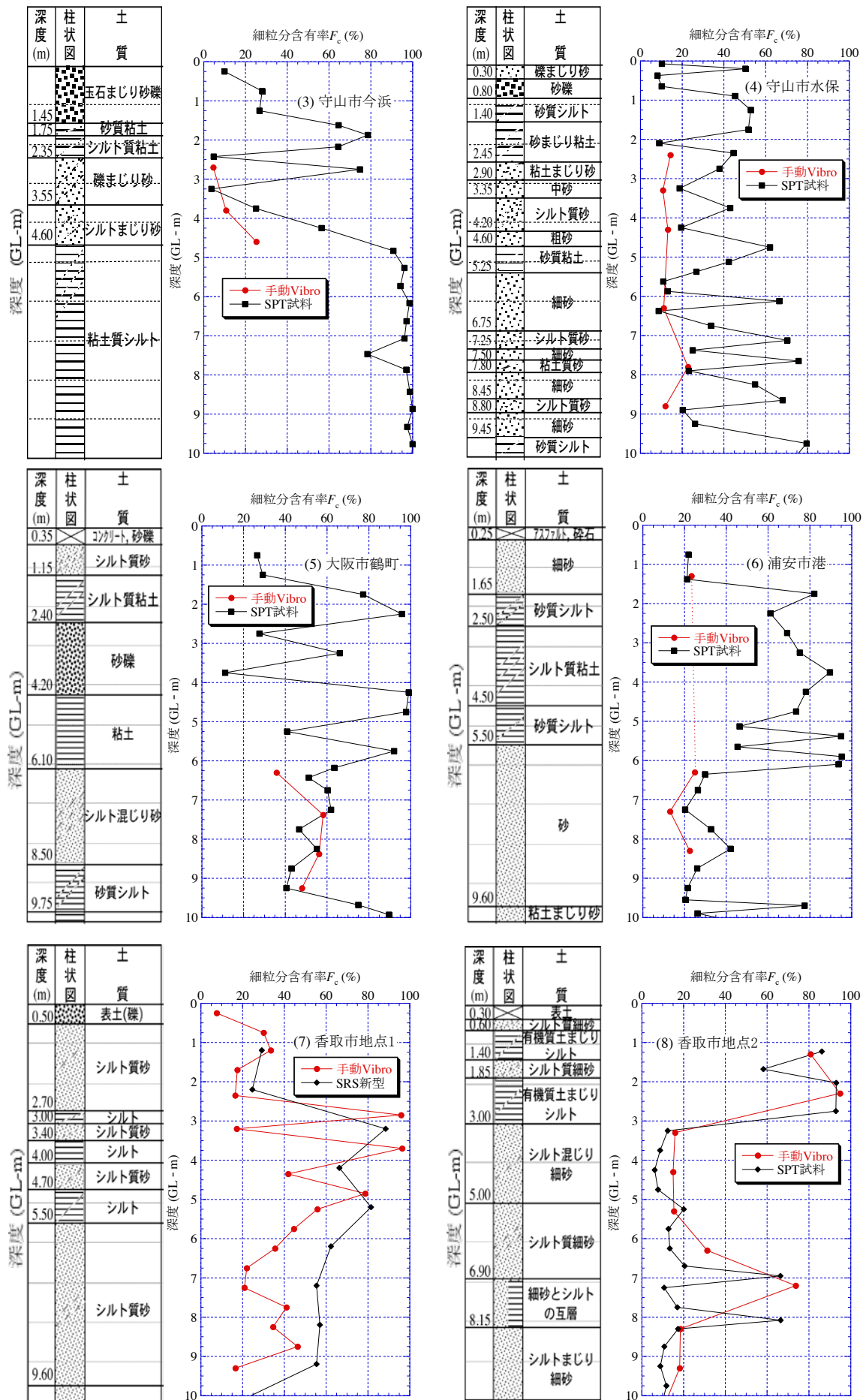


図-3.3.66 手動式バイプロサンプラー試料と SPT 試料の細粒分含有率 F_c の比較 (つづき)

3.3.6 音測定による土質判定の試み

(1) はじめに

建築基礎構造設計指針¹⁾や道路橋示方書²⁾等の土木建築関連の設計指針の多くで、地盤の液状化判定方法に FL 法が採用されている。FL 法による液状化判定では、液状化判定の必要の有無や液状化抵抗比（動的せん断強度比ともいう） R の算出のために、土層の細粒分含有率 F_c や平均粒径 D_{50} 等の粒度特性値が必要とされる。例えば 2.3.2 で示した建築基礎構造設計指針による液状判定手法¹⁾では、液状化抵抗比 R の算定で N 値の補正に細粒分含有率 F_c が用いられている。

土層の粒度特性値は、通常は実地盤から採取した試料に対する粒度分析から求められる。しかし、動的コーン貫入試験では地盤からの土試料採取ができないために細粒分含有率等の土の粒度特性値を得ることができず、FL 法による液状化判定を実施するためには別途試料採取を行う必要がある。そこで本研究では、大型動的コーン貫入試験（SRS）によって地盤の液状化判定を可能とすることを目標として、土試料の採取の代わりに SRS 試験の実施中に土中で発生するコーンと土の摩擦音を利用した土の粒度特性の評価を試みた。

SRS 試験では試験結果に対するロッドの周面摩擦の影響を補正するために、貫入深さ 0.2m 毎にロッドを回転させてトルクを計測する。本研究では、トルク計測中にロッド先端のコーン周面と周辺の地盤の摩擦で生じる音に着目し、コーンと土の摩擦音のスペクトル形状と土の粒度特性の関係を検討した。SRS 試験用の貫入コーンは直径 45mm、長さ 105mm（通常の仕様では長さ 90mm）のマントル部を持つステンレス鋼製で、トルク計測時には地中で約 47°/sec の角速度で 2 回転（約 15.3 秒間）しており、この間に摩擦音を計測する。これをステンレス鋼と土のせん断と考えた場合、計測する摩擦音は、せん断速度と拘束圧が一定の条件でステンレス鋼と土の間のせん断変形が大きいときの音と考えることができる。そこで、ステンレス鋼と土の摩擦音の性状を、一面せん断試験装置を用いたステンレス鋼と粒度調整砂のせん断実験で調べ、得られた知見を SRS 試験で得られた摩擦音の分析に適用した。

(2) 摩擦音の計測実験の方法と条件

1) 一面せん断試験

本研究では、一面せん断試験装置の上部せん断箱をステンレス鋼（SUS304）の板に取り換え、内部に設置したコンデンサーマイクでせん断中に発生するステンレス鋼と砂の摩擦音を録音した。実験に用いた上部せん断箱と下部せん断箱の模式図を図-3.3.67 に示す。直径 9.4mm のコンデンサーマイクを直径 60mm の円形供試体の中央直上に設けた直径 10mm のマイク室内に設置した。マイクとマイク室の隙間にエポキシ樹脂を充填し、マイク室に蓋をしてマイクの受圧面をステンレス鋼板に密着させた。

実験に用いた土は細粒分含有率 $F_c=0$ 、10、20、50、100%となるように市販の硅砂 5 号と市販の細粒硅砂（ $F_c=98\%$ ）を混合して作製した土であり、これらの名称を細粒分含有率が小さい順にそれぞれ SM0、SM10、SM20、SM50、SM100 とする。供試体は気乾状態の土試料を下部せん断箱内に最小密度試験（JIS A 1224:2009）の方法³⁾で作製した。供試体の寸法は高さ 10mm、直径 60mm である。表-3.3.6 に用いた土試料の細粒分含有率 F_c 、圧密応力 σ_c 、圧密後の乾燥密度 ρ_{dc} 、せん断変位速度をまとめた。圧密応力 σ_c は全ての実験において $\sigma_c=100\text{kN/m}^2$ とし、定圧条件で一定速度のせん断変位を上部せん断板に与え、せん断開始からせん断変位 25mm に至るまでの摩擦音を録音した。なお、表-3.3.6 に示したせん断変位速度が試験毎に少し異なるのは、実験中に試験室内の雑音が録

表-3. 3. 6 一面せん断試験で用いた試料と実験条件

Soil name	$F_c(\%)$	$\rho_{dc}(g/cm^3)$	$\sigma_c(kN/m^2)$	Shear rate (mm/sec)
SM0 (Silica No.5)	0	1.55	100	0.16
SM10	9.8	1.50	100	0.18
SM20	19.6	1.58	100	0.19
SM50	49.0	1.47	100	0.17
SM100 (Fine Silica)	98.0	1.72	100	0.17

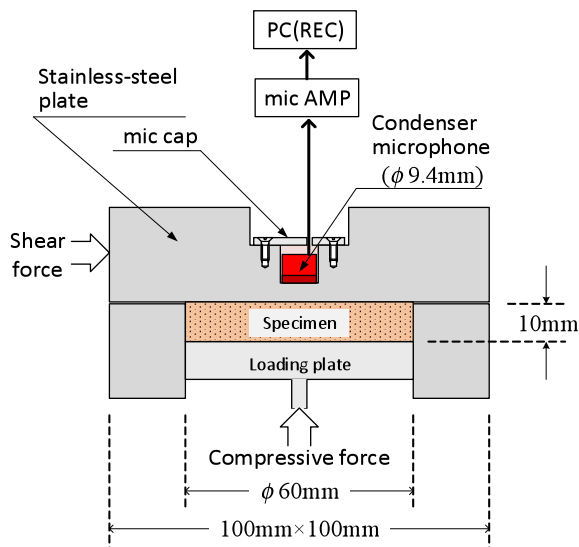


図-3. 3. 67 一面せん断試験で摩擦音計測に用いた
上下せん断箱

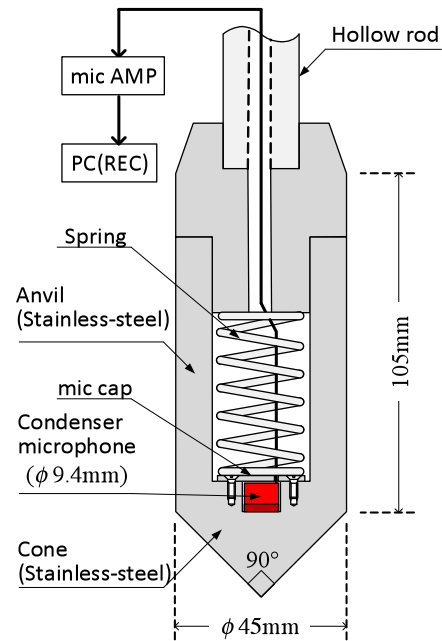


図-3. 3. 68 SRS 試験で摩擦音計測に用いた
コーン

音されることを避ける目的で、ジャッキハンドルを手動で回転させてせん断力を供試体に与えたためである。

2) SRS 試験による実地盤の摩擦音計測実験

SRS 試験は千葉県浦安市港、千葉県香取市地点 2 および佐賀県唐津市原の 3 か所で実施した。図-3. 3. 68 に SRS 試験で摩擦音の計測に用いたコーンの模式図を示す。コーン内部底面中心部に設けたマイク室内に一面せん断試験と同型のコンデンサーマイクを設置した。SRS 試験中にマイクが脱落するのを防ぐ目的で、マイク室とコンデンサーマイクの間をエポキシ樹脂で充填し、マイクキャップをコーンにネジで固定した。さらに、バネを用いてマイクキャップを上部から押さえつけて打撃貫入による衝撃でネジの緩みを防ぐ構造とした。コーンはロッドに固定しており、トルク計測時にロッドとともにコーンが地中で回転する仕組みとした。また、マイク線を地上に引き出すために中空のロッドを使用した。SRS 試験では、貫入深さ 20cm 毎に実施されるトルク計測時にコーン周面と周辺地盤の摩擦音を録音した。SRS 試験による摩擦音測定実験の様子を写真-3. 3. 23(a)～(c)に示す。各写真における作業状況の説明を以下に記す。



(a) マイク線引出し用治具の設置



(b) 計測準備：マイク線を中空ロッドに通す



(c) 摩擦音計測中の様子

写真-3.3.23 SRS 試験による摩擦音測定実験の様子

写真-3.3.23(a)：マイク線を中空ロッドから取り出すために治具を設置している様子。

写真-3.3.23(b)：一度の実験で使用する全てのロッドにマイク線を通した様子。

写真-3.3.23(c)：摩擦音計測中の様子。PC ソフトウェアを用いて摩擦音を計測したので、現場で波形の確認や計測した音の確認が可能である。

(3) 摩擦音の分析方法

摩擦音は、一面せん断試験と SRS 試験のいずれにおいても、マイクアンプで増幅した後に PC のソフトウェアを用いて録音した。摩擦音の可聴域(20~20kHz)における周波数特性を調べるために、サンプリング周波数を 44.1kHz とした。

浦安市港で実施した SRS 試験による摩擦音の計測結果を例として、摩擦音の分析方法を説明する。図-3.3.69 は SRS 試験中（深度 10.4~11.4m）に連続して記録した音の波形であり、図の上部に SRS 試験の作業（SRS process）を、下部にマイク（コーン）の位置（深度）をあわせて表示している。ここで、SRS process の blow は打撃貫入を、rev.（回転）はトルク計測を意味する。打撃貫入中に記録された振幅の大きな音は打撃音であり、録音量の最大値を超えている。図-3.3.69 より、トルク計測中にはほぼ一定振幅の音が発生していることがわかる。また、打撃貫入終了からトルク計測開始までの間ロッドは地中で静止しており、この間は無音に近いことを考慮すると、トルク計測中に計測された音は地中で回転するコーンの周面と周辺地盤の摩擦音であると判断できる。

摩擦音のパワースペクトルの形状は以下の方法で求めた。

①背景雑音信号（ノイズ）の除去

トルク計測開始直前の2秒間のデータをノイズサンプルとしてスペクトル減算法^{4),5)}により記録音波データからノイズを除去して摩擦音のみのデータを取得した。一面せん断試験では、せん断開始直前と、せん断終了直後の2秒間のデータをノイズサンプルに用いた。図-3.3.69中の深度10.6mにおける計測音について、図-3.3.70(a)にノイズ除去前の音圧時刻歴を、図-3.3.70(b)にスペクトル減算法によるノイズ除去後の音圧時刻歴を示す。両図の比較より、図-3.3.70(a)ではトルク計測前後に0.08Pa程度の一定振幅のノイズが認められるが、図-3.3.70(b)ではこれが除去されている様子がわかる。また図-3.3.70(b)より、この土層の摩擦音の音圧レベルは約65dBであり、トルク計測中に生じる摩擦音の音圧振幅の変動が小さいことがわかる。

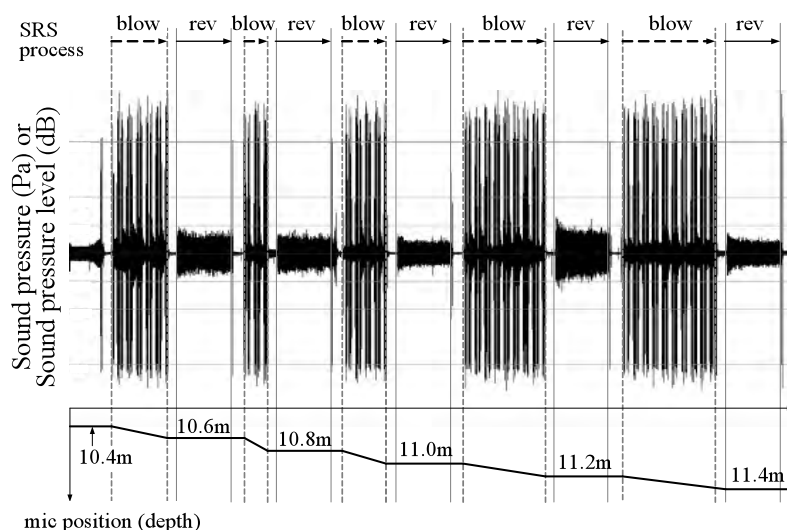
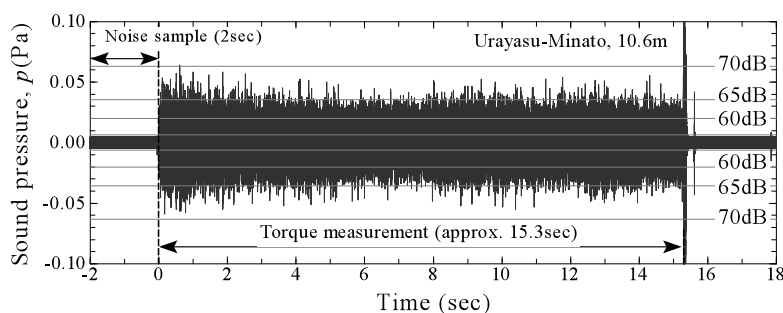
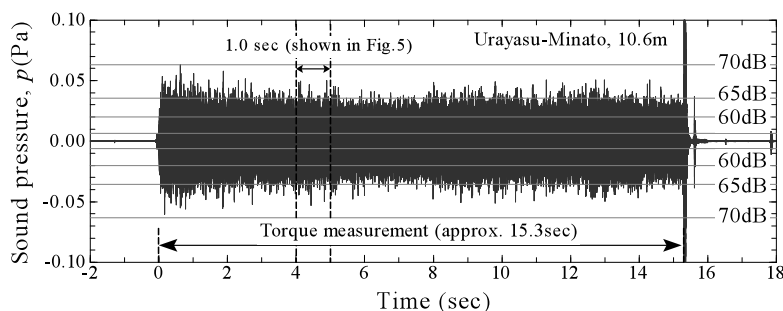


図-3.3.69 SRS 試験による音の計測例（浦安市港、深度 10.4m～11.4m）



(a) ノイズ除去前



(b) ノイズ除去後

図-3.3.70 トルク計測中の摩擦音（浦安市港、深度 10.6m）

②摩擦音（音圧）データの分割

人工音声合成の分野で常用されているスペクトログラムの作成方法のひとつである、短時間フーリエ変換（STFT）を用いて摩擦音データを時間領域で分割（区間分け）した。具体的には、ノイズ除去後のデータを先頭から 2048 プロット（約 0.0464 秒）ずつシフトさせて 4096 プロット（約 0.0929 秒）のデータに分割した。

③分割した音圧波形データのパワースペクトルの算出

分割された各々の音圧波形データについてパワースペクトルを算出し、その最大値で正規化した正規化パワースペクトルを求めた。図-3.3.71 は図-3.3.70(b) の音圧時刻歴のうち、4～5 秒（1 秒間）のデータを示したものである。このデータを用いて短時間フーリエ変換によって得られた各音圧波形データの正規化スペクトルを図-3.3.72 に示す。これは図-3.3.71 のデータの先頭から 43008 プロット（0～0.9752 秒）までの 20 個（データ区間）の音圧波形データの正規化パワースペクトルを並べて描いたものである。いずれのスペクトルもその概形は同様であり、最大ピークの周波数もほとんど等しいことから、トルク計測中に生じる摩擦音の周波数特性は同様であると考えられる。

図-3.3.72 では 1 秒間の計測データを用いた 20 個（区間）の正規化スペクトルを例示したが、実際の摩擦音の分析では短時間フーリエ変換を摩擦音全体に適用している。ここで、摩擦音全体とは、SRS 試験では一回のトルク測定の間（約 15.3 秒間）に計測された摩擦音であり、一面せん断試験ではせん断開始からせん断変位 2.5mm まで連続して計測された摩擦音を意味する。

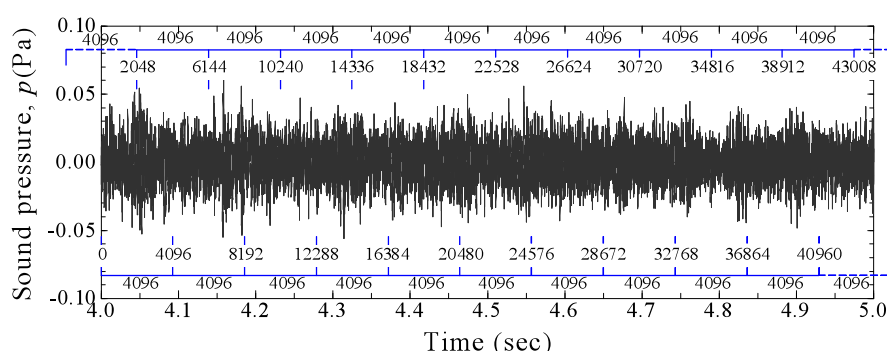


図-3.3.71 摩擦音データの分割（図-3.3.70 中の 4～5 秒のデータ）

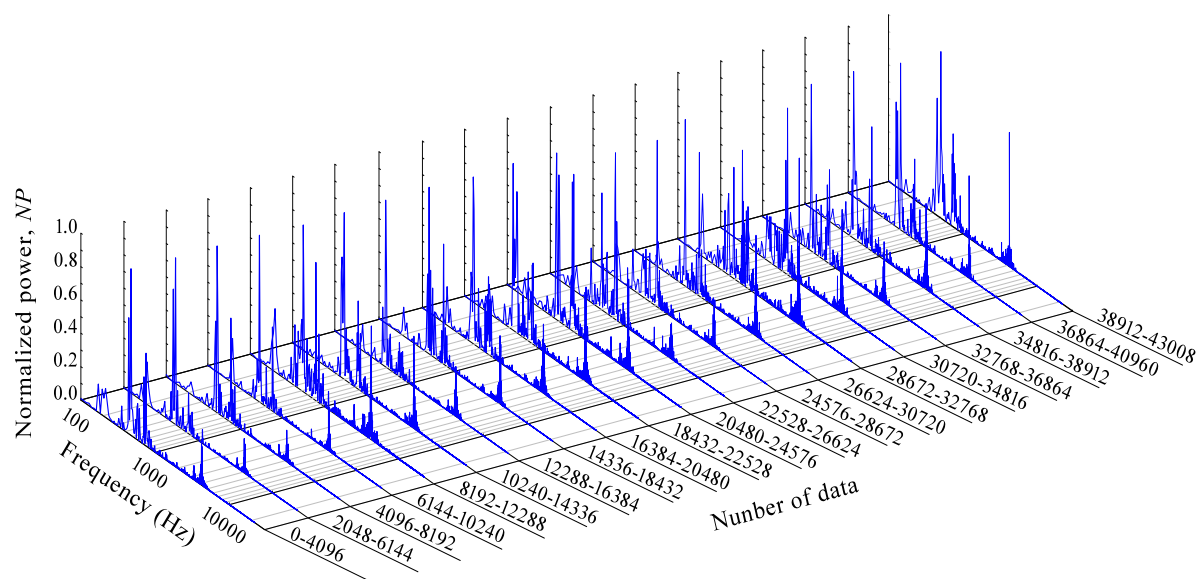


図-3.3.72 分割音圧データの正規化パワースペクトル（図-3.3.71 中の 0～0.9752 秒間分）

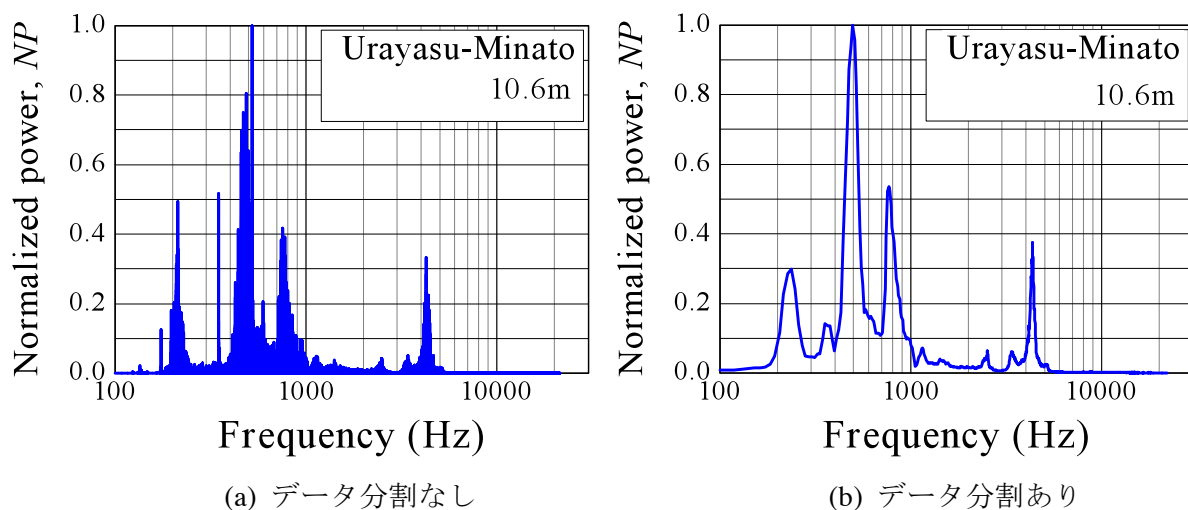


図-3.3.73 トルク計測中に計測された摩擦音全体の正規化パワースペクトル（浦安市港、深度 10.6m）

④摩擦音全体のパワースペクトルの算出

全ての分割されたデータの正規化パワースペクトルを平均化し、これを最大値で正規化したものを摩擦音全体の正規化パワースペクトルとして結果の検討に用いた。

浦安市港の深度 10.6m におけるトルク計測中に測定された摩擦音全体の正規化パワースペクトルを図-3.3.73 に示す。図-3.3.73(a) のスペクトルは摩擦音全体のデータを分割せずにフーリエ変換して求めたものである。同図では、横軸方向に 524288 ($=2^{19}$) 個のデータが約 0.042Hz 毎の密な間隔でプロットされている。一方、図-3.3.73(b) に示したスペクトルは、摩擦音全体のデータを 4096 プロット毎に 328 分割して個々に求めた正規化パワースペクトルの平均値であり、2048 点のプロット（プロット間隔は約 10.74Hz）で描かれている。両図を見比べると、いずれも 500Hz 付近で最大パワーを示し、その他に 3 つの大きなピークが 200Hz～15000Hz の広い周波数の範囲に分布しており、スペクトル形状は概ね一致している。しかし、図-3.3.73(a) ではヒゲのように突出したデータが幾つかの周波数で認められる。

本研究では、スペクトルの形状を表す指標として摩擦音全体の正規化パワースペクトルにおける最大ピークを示す周波数（ピーク周波数）と周波数分布の広がり具合（スペクトル幅）を採用して土層の粒度特性との関係を比較検討した。特に、スペクトル幅を正規化パワー NP が 0.2 を超えるピークの周波数の範囲と定義した。ここで、多数の摩擦音のスペクトル幅を機械的に精度良く読み取るためには、スペクトルの輪郭が単純である方が都合がよい。したがって本研究では、図-3.3.73(b) のようにあえて少数のプロットで平滑化（単純化）したスペクトルを描き、これからピーク周波数とスペクトル幅を読み取り、実験結果の検討に用いた。

(4) 摩擦音の計測実験の結果

1) 一面せん断試験

一面せん断試験より得られたステンレス鋼板と粒度調整した硅砂の摩擦音の正規化パワースペクトルを図-3.3.74 に示す。図より、SM0（硅砂 5 号）、SM10 及び SM100（細粒硅砂）のスペクトルはひとつのピークを有し、スペクトル幅が狭いことがわかる。一方、SM20 と SM50 は複数の大きなピークを有し、また他の 3 試料と比べて広い帯域にスペクトルが広がっていることがわかる。SM0 と SM100 の 100~200Hz 付近に小さなピークが認められるが、これは十分に除去できなかった

ノイズの成分であると考えられる。また、最大ピークを示す周波数（ピーク周波数）は試料毎に異なっていることもわかる。図-3.3.74 の各スペクトルよりピーク周波数および正規化パワー NP が $NP=0.2$ に対応したスペクトル幅を読み取り、これらと F_c の関係を図-3.3.75 にプロットした。図より、ピーク周波数と F_c の関係には一定の相関は認められず、SM10、SM20、SM50 はいずれも硅砂 5 号 (SM0) と細粒硅砂 (SM100) の混合土であるにも関わらず、ピーク周波数が硅砂 5 号や細粒硅砂単体よりも低くなる、または高くなる結果となった。しかし一方で F_c が異なる混合硅砂のスペクトルの幅には明瞭な違いが認められ、SM20 と SM50 は他の 3 試料よりもスペクトル幅が明らかに大きい。これは、硅砂 5 号と細粒硅砂の両者ともが単一粒径に近い土であるが、両者の混合土は粒径幅が広い土となるため、様々な粒径の土粒子が複雑にステンレス鋼と擦れるために摩擦音の帯域が広がったと考察される。また、ピーク周波数の違いにも粒度の違いが影響しているとも考えられるが、密度や圧密応力等の影響についても調べる必要がある。

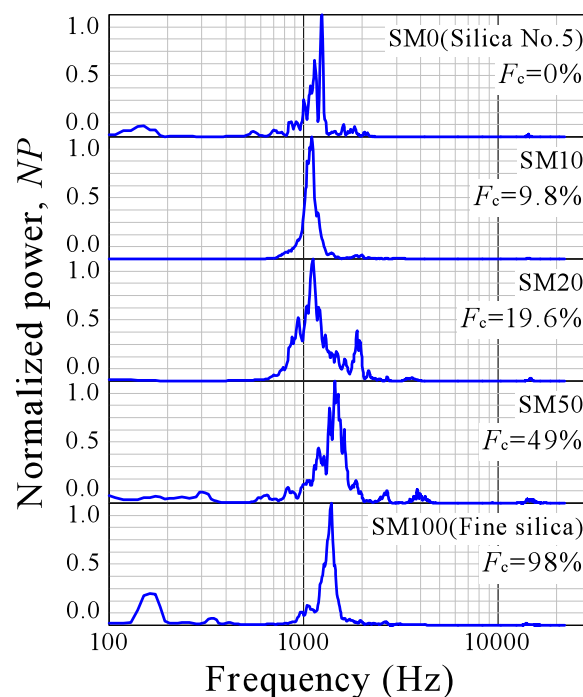


図-3.3.74 一面せん断試験によるステンレス鋼と粒度調整珪砂の摩擦音の正規化パワースペクトル

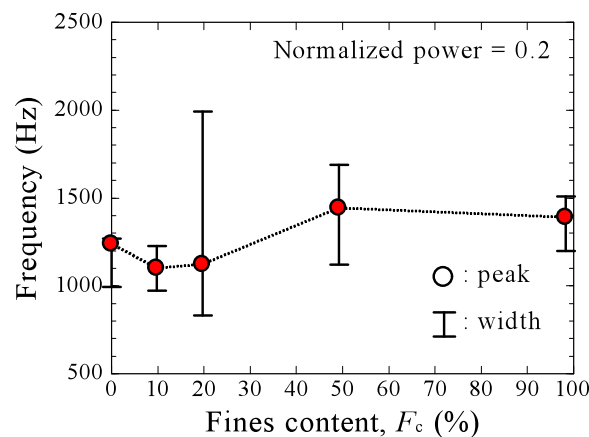


図-3.3.75 ピーク周波数及びスペクトル幅と細粒分含有率の関係（一面せん断試験）

2) SRS 試験

図-3.3.76 に千葉県浦安市港、千葉県香取市地点 2 及び唐津市原の地盤で計測された摩擦音の正規化パワー $NP=0.2$ に対応したスペクトル幅と細粒分含有率 F_c の深度分布を示す。ここで、 F_c は数 m 離れた地点で実施された標準貫入試験のペネ試料の粒度分析結果である。各地点の結果において、スペクトル幅と F_c の深度分布には、相当のばらつきは否めないが、ある程度の一致が認められる。この結果は、SRS 試験で摩擦音を計測し、そのスペクトル幅を用いて土層の F_c を推定することが可能であることを示唆している。

ここで、スペクトル幅の値に着目すると、香取市地点 2 と唐津市原では大部分が 1000Hz 未満であるのに対して、浦安市港では最大約 4500Hz と大きく、その変化幅も大きいことがわかる。このスペクトル幅の違いは各地盤の細粒分の性質の違いによると考えられる。つまり、浦安市港の細粒分は低塑性シルトであり、香取市地点 2 と唐津市原は非塑性シルトであることから、同じ F_c であっても含まれる細粒分の塑性の有無によって摩擦音の帯域が異なることが推察される。

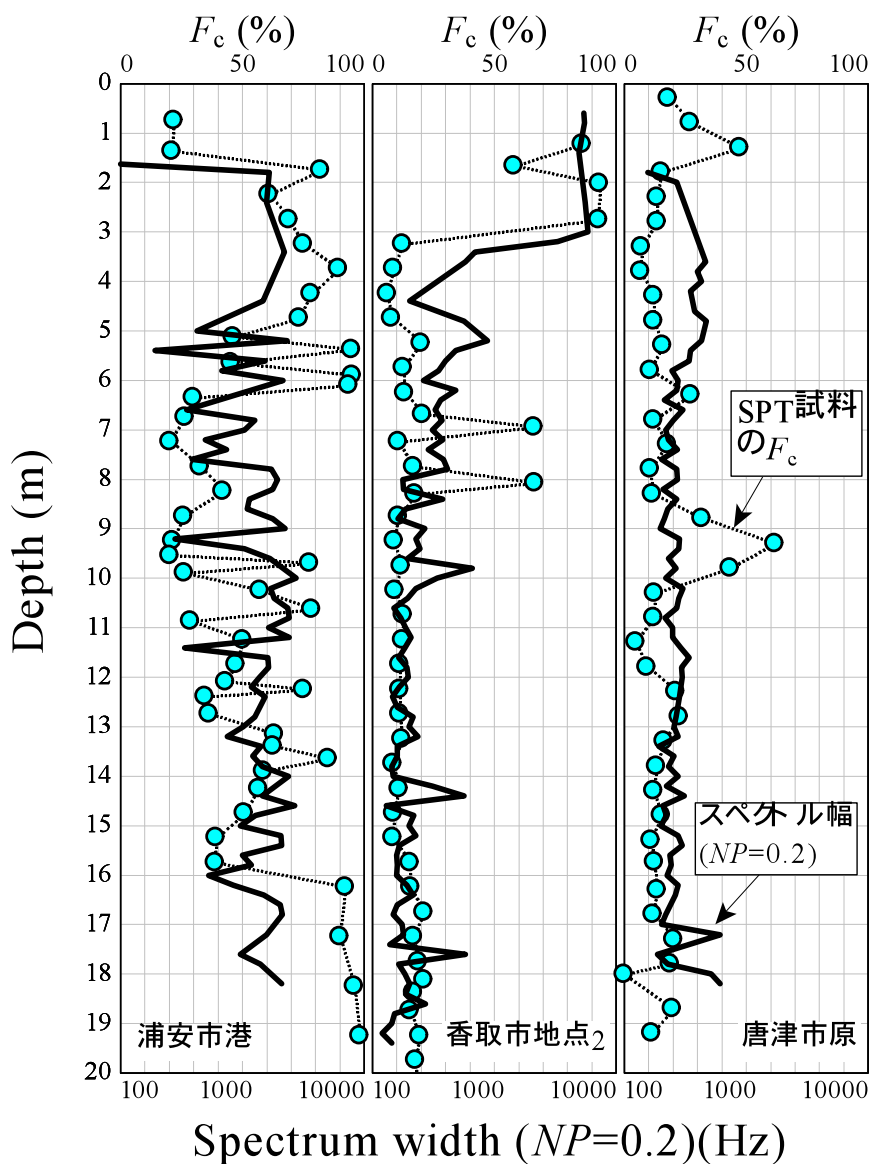


図-3.3.76 SRS 試験による摩擦音のスペクトル幅と SPT による細粒分含有率の深度分布

そこで、同一の F_c に対する摩擦音のスペクトル形状を比較するために、各地点において F_c が約 20、60、90% の土層で得られた摩擦音の正規化パワースペクトルを図-3.3.77 に示す。ただし、唐津市原では $F_c=90\%$ の土層がないため、代わりに F_c が小さい $F_c=11\%$ の結果を示している。また、図中には F_c と併せて土質分類記号を表示している。各地点における $F_c=20\%$ 及び 60% のスペクトル（それぞれ図中の破線と実線）に着目すると、細粒分が非塑性である香取市地点 2 と唐津市原では 1000～2000Hz の範囲でひとつのピークを有しかつスペクトル幅が狭いのに対して、細粒分が塑性を有する浦安市港のスペクトルは約 800～5000Hz の広い帯域で複数のピークを有することがわかる。また、浦安市港と香取市地点 2 の $F_c=90\%$ のスペクトルは両者とも広い帯域で複数ピークを有しており、これは両方の土層が塑性を有する細粒土であるからと考えられる。さらに、唐津市原の三つのスペクトルはいずれも礫を含む土層の摩擦音であるが、 $F_c=10\sim60\%$ の違いに対してスペクトル幅には差異が認められないが、 F_c が大きいほどピーク周波数が低周波域にシフトする傾向が認められる。しかし、香取市地点 2 の $F_c=21\%$ と $F_c=66\%$ では、 F_c が大きい $F_c=66\%$ のピーク周波数が高く、唐津市原とは反対の傾向であることから、塑性を有する細粒分を含まない土の摩擦音は主構成土粒子の粒径によってピーク周波数が異なると推察される。

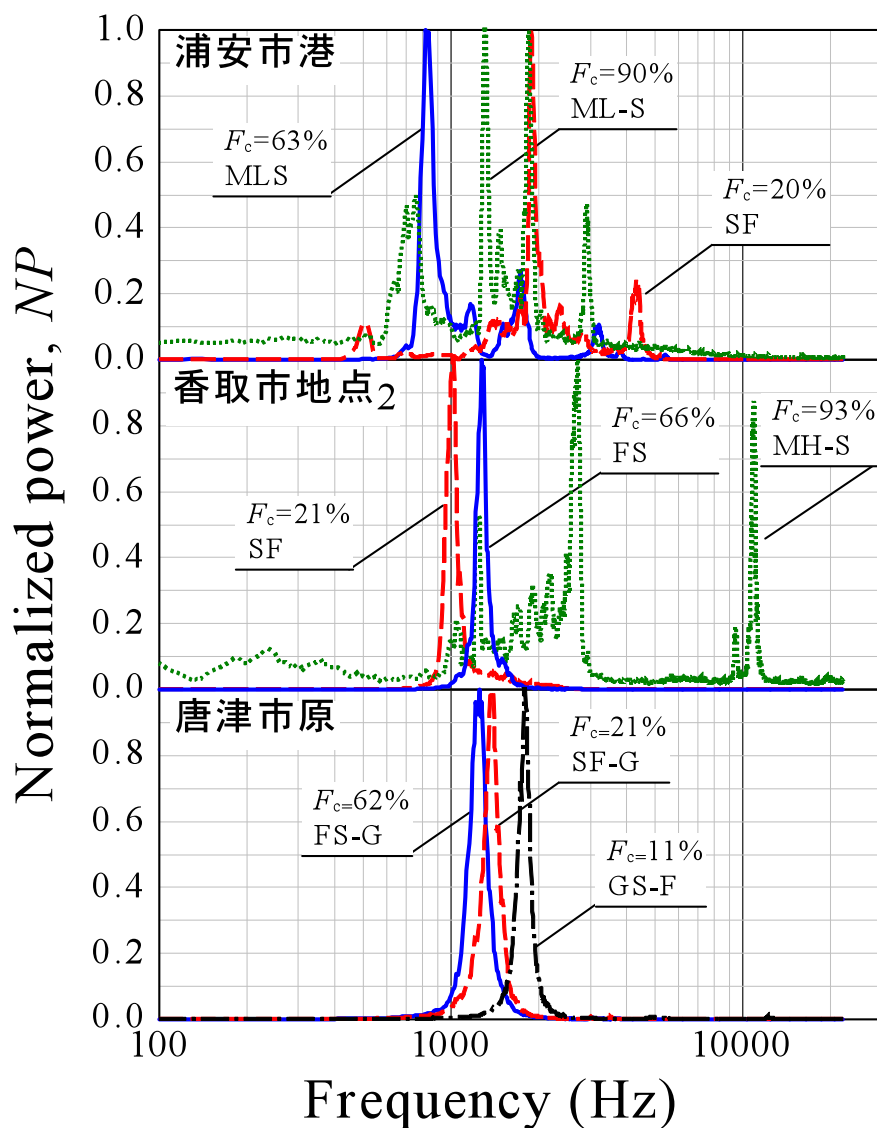


図-3.3.77 細粒分含有率によるスペクトル形状の比較

(5) おわりに

SRS 試験のトルク計測中に生じるコーン周面と周辺地盤の摩擦音を計測し、そのスペクトル形状と土層の粒度特性の関係を調べた。その結果、摩擦音のスペクトル形状（スペクトル幅）から F_c および細粒分の塑性の有無を推定できる可能性を見出した。また、非塑性の土は摩擦音の帯域が狭いが、ピーク周波数は粒径の影響を受けると考えられる。今後、データを蓄積し、粒径や密度、土被り圧など影響を調べ、摩擦音から粒度を推定する手法の確立を目指したい。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，pp.85-86，2008.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，pp.120-123，2002.
- 3) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，pp.195-198，2009.
- 4) Boll S.F: Suppression of acoustic noise in speech using spectral subtraction. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, Vol.27, Issue.2, pp. 113–120, 1979.
- 5) Saeed V. Vaseghi: Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction, Second Edition, Wiley & Sons Ltd, pp.333-354, 2000.

3.4 打撃効率の測定結果

3.4.1 打撃効率測定の目的

動的サンディングの一つである標準貫入試験（SPT）は、我が国で最も広く利用されている地盤調査方法である。SPT は、乱れた土試料の採取を伴うという大きなメリットを有する。一方、土試料採取のためのボーリング工程が必要なため試験時間が比較的長くなり、また試験費用のため、調査点数（調査密度）が限られることは否めない。また、 N 値の深さ方向の調査密度は、通常 1m 間隔であり、静的コーン貫入試験に比べて、粗いものである。

SPT 結果を補完するため、現在多様な動的コーン貫入試験方法 (Dynamic Cone Penetration Test: DCPT) が提案されている。これらの DCPT では、コーン、ロッド、アンビル、ハンマーの寸法、ハンマーの落下高さは、必ずしも統一されていない。DCPT では、所定の貫入長さに対する打撃回数（ハンマーの落下回数） N_d を測定し、これを何らかの方法で、SPT における N 値に換算し、これまで N 値に対して用いられている経験式によって、各種の地盤パラメータを推定している。DCPT では、コーン先端抵抗に加えて、ロッドの周面摩擦も貫入抵抗として存在する。そのため、3.3.1 の大型動的コーン貫入試験（SRS）、3.3.2 の中型動的コーン貫入試験（MRS）、3.3.3 のピエゾドライブコーン（PDC）及び 3.3.4 のその他の動的コーン貫入試験では、ロッドの回転トルクの測定値を用いて、補正打撃回数 N_d' を求めるなどの方法も行われている¹⁾。

以上のような DCPT による地盤パラメータの推定方法では、推定精度の向上におのずと限界がある。DCPT による地盤パラメータ推定の精度向上の方法の一つとして、波動解析の適用がある^{2),3)}。また、多種多様な DCPT の結果（ N_d 値）を統一的に解釈するには、ハンマーの打撃によって実際に打撃ロッドに伝達されるエネルギーを測定することが不可欠である。そこで、滋賀県守山市水保の液化危険度が高いと推定される砂質土地盤⁴⁾において、SPT を含めた各種 DCPT において、打撃エネルギーの測定を行い、打撃効率を求めた^{5),6)}。

3.4.2 SPT 及び各種 DCPT 装置の仕様

表-3.4.1 に示すように、SPT (Test 9) を含む計 13 種類の動的貫入試験において、打撃エネルギーの測定を行った。打撃ロッドは、中実および中空のものがあり、外径および内径は装置によって、多様である。

表-3.4.2 に、これらの試験装置のハンマー、アンビル、ロッド、コーンの寸法、公称打撃エネルギー、などをまとめている。SRS を基準とした打撃回数補正係数 α とは、コーン単位面積当たりの公称打撃エネルギー E と打撃回数測定貫入量 S を考慮して、各試験における打撃回数 N_d を、SRS における打撃回数に換算する係数である（詳細は付録 A1 を参照）。

図-3.4.1 に、打撃エネルギー測定を行った SPT と DCPT の試験位置を示す。

3.4.3 打撃効率の測定方法

原則的にアンビルから 150～200 mm 下方の位置で、ロッドにひずみゲージと加速度計を対称位置に取り付けた（図-3.4.2、写真-3.4.1）。曲げの影響を除くため、これらの測定値の平均値から、ひずみ ε と加速度 α を求めた。サンプリング周波数は 1000 kHz である。ひずみ ε にロッドのヤング率と断面積を乗じて力 F を求めた。また、加速度 α を時間積分することで、速度 v を求めた。

打撃エネルギー $E_{drv}(t)$ を、次式⁷⁾で算定した。

$$E_{drv}(t) = \int_0^t F(t) \cdot v(t) \cdot dt \quad (3.4.1)$$

表-3.4.1 標準貫入試験と動的コーン貫入試験装置の仕様、及び打撃エネルギー測定結果

Test No.	Device name	Rod						Cushion	Hammer		Ratio of dia. of anvil to hammer	Driving efficiency	
		O.D. (mm)	I.D. (mm)	Area (mm ²)	Density (ton/m ³)	Young's mod. (kPa)	Wave veloc. (m/s)	Cushion	Mass (kg)	Fall height (mm)	D_a/D_h	Mean e_f (%)	COV of e_f
1	Ramda	32.0	–	804.2	7.647	2.06×10^8	5190	Yes	63.5	500	0.54	59.4	0.234
2	MRS	28.0	–	615.8	7.665	2.06×10^8	5184	Yes	30.0	350	0.56	74.7 (8 blows)	0.056
3	SRS-Y1a	32.0	–	804.2	7.925	1.93×10^8	4935	Yes	63.5	500	0.71	67.5	0.059
4	Penny	20.0	–	314.2	7.671	2.00×10^8	5106	Yes	30.0	200	0.29	51.6	0.247
5	PDC (μ MRS)	19.0	7.0	245.0	7.590	2.06×10^8	5210	No	5.0	500	0.26	59.8	0.265
6a	SRS-O	32.0	–	804.2	7.647	2.06×10^8	5190	No	63.5	500	0.71	78.7 (16 blows)	0.051
6b	SRS-O	32.0	–	804.2	7.647	2.06×10^8	5190	1 sheet	63.5	500	0.71	72.7 (5 blows)	0.024
6c	SRS-O	32.0	–	804.2	7.647	2.06×10^8	5190	2 sheets	63.5	500	0.71	60.7 (16 blows)	0.134
7	PDC (MRS)	28.6	18.6	370.7	8.201	2.06×10^8	5012	Yes	30.0	350	0.56	76.2	0.126
8	SRS-Y1b	32.0	16.0	603.2	7.930	1.93×10^8	4934	Yes	63.5	500	0.71	62.1	0.186
9	SPT	40.5	31.0	533.5	8.529	2.00×10^8	4843	No	63.5	750	0.39	63.0	0.090
10	DPM-HT	28.0	–	615.8	7.600	2.06×10^8	5206	Yes	30.0	350	0.42	61.2	0.058
11	DSPT	19.0	–	283.5	7.724	2.06×10^8	5164	No	10.0	500	0.53	58.1	0.113
12	PDCPT	16.0	–	201.1	7.809	2.06×10^8	5136	No	5.0	500	0.83	74.0	0.037
13a	SH	16.0	–	201.1	7.858	1.93×10^8	4956	No	3.0	500	1.0	56.1	0.037
13b	SH	16.0	–	201.1	7.858	1.93×10^8	4956	No	5.0	500	1.0	68.4	0.067

Note: O.D. = Outer diameter, I.D. = Inner diameter

SRS = Swedish Ram Sounding, MRS = Mini Ram Sounding

他の Device name については、3.3.4 参照

表-3. 4. 2 標準貫入試験と動的コーン貫入試験装置のハンマー，アンビル，ロッドの仕様

Device	SRS-Y1 [SRS-O]	Ramda	MRS, PDC (MRS)	DPM- HT	PDC (μ RS)	Penny	DSPT	PDCPT	SH	SPT
Diam. of hammer guide rod (mm)	101.6 [25.0]	40.5	20.0	40.5	15.0	30.0	19.0	16.0	16.0	40.5
Diam. of hammer D_h (mm)	246.0 [198]	180.0	160.0	180.0	135.0	178.0	95.0	60.0	40.0	180.0
Diam. of anvil D_a (mm)	155.0 [100]	97.0	90.0	75.0	35.0	51.0	50.0	50.0	40.0	71.0
D_a/D_h	0.63 [0.51]	0.54	0.56	0.42	0.26	0.29	0.53	0.83	1.00	0.39
Mass of hammer M_H (kg)	63.5		30.0		20.0	30.0	10.0	5.0	3.0, 5.0	63.5
Fall height of hammer h (mm)	500		350		250	200	500	500		750
Apex angle of cone (deg)	90		90		90	60	S.P.	60		
Length of cone mantle (mm)	90		69		30	9	-----	0		Open Closed
Diam. of cone D_c (mm)	45.0		36.6		25.0	35.7	33	25		O.D. 51 I.D. 35 O.D. 51
Area of cone A_c ($\times 10^{-4} \text{ m}^2$)	15.9		10.5		4.9	10.0	8.6	4.9		10.8 20.4
Diam. of rod D_r (mm)	32.0		28.0		19.0	20.0	19.0	16.0		40.5
D_c/D_r	1.41		1.31		1.32	1.79	1.74	1.56		-
Driving energy per unit area of cone $E=mgh/A_c$ (kJ/m ²)	195.8		97.9		99.9	58.8	57.3	50.0		432.6 229.0
Energy ratio with reference to SRS	1.0		0.50		0.51	0.30	0.23	0.26		2.21 1.17
Penetration length for counting blow numbers L (m)	0.20		0.20		0.20	0.10	0.25	0.10		0.30 0.30
Correction factor for blow counts with reference to SRS	1.00		0.500		0.51	0.601	0.234	0.510		1.47 0.780

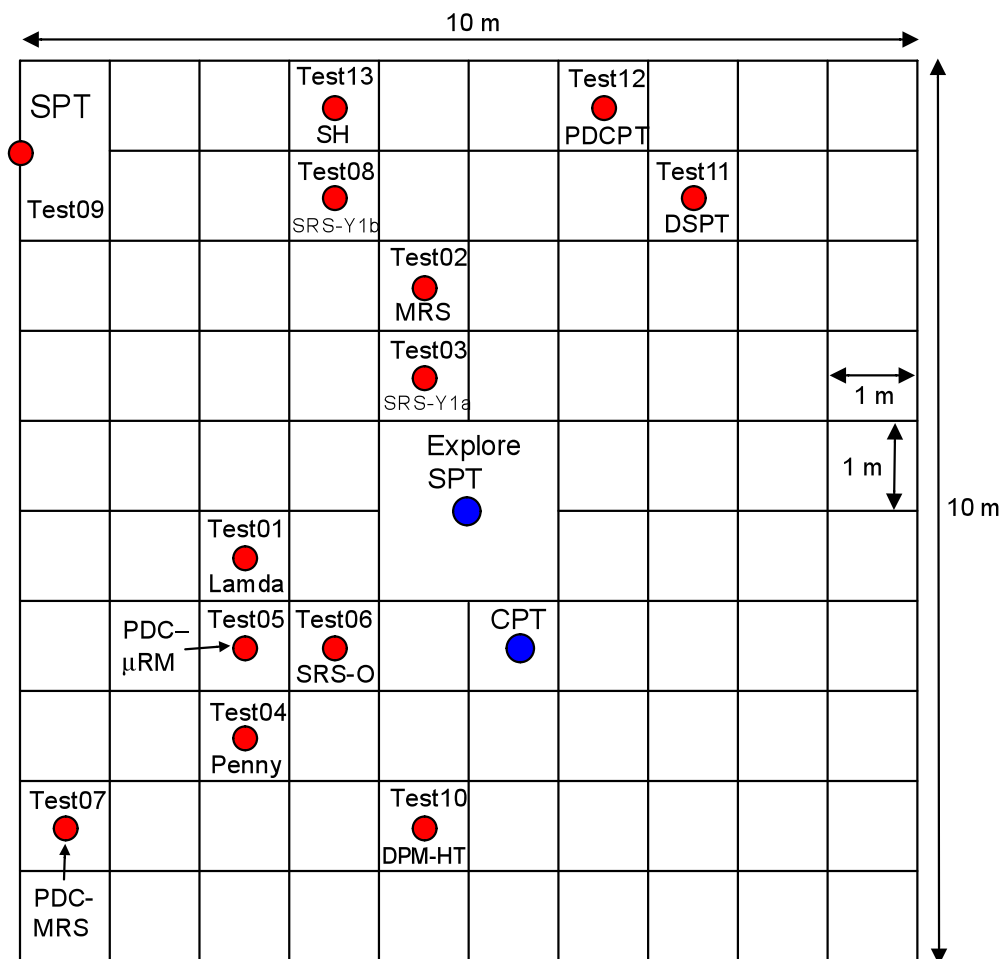


図-3.4.1 打撃エネルギー測定を行った SPT と DCPT の試験位置

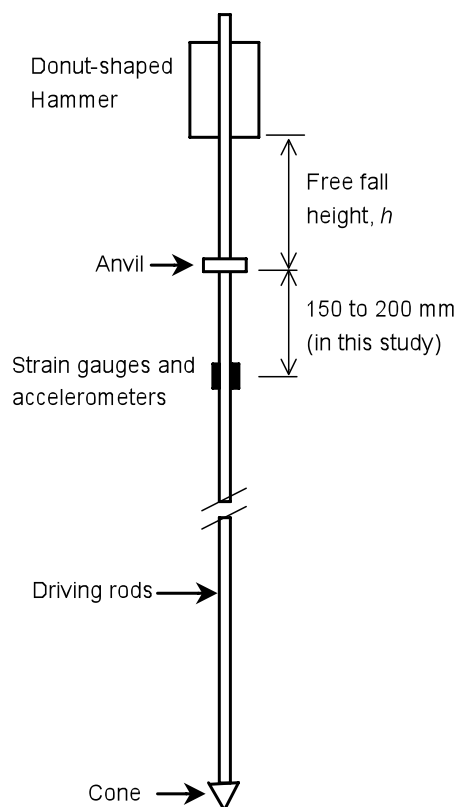


図-3.4.2 DCPT の典型的な形状と動的測定方法

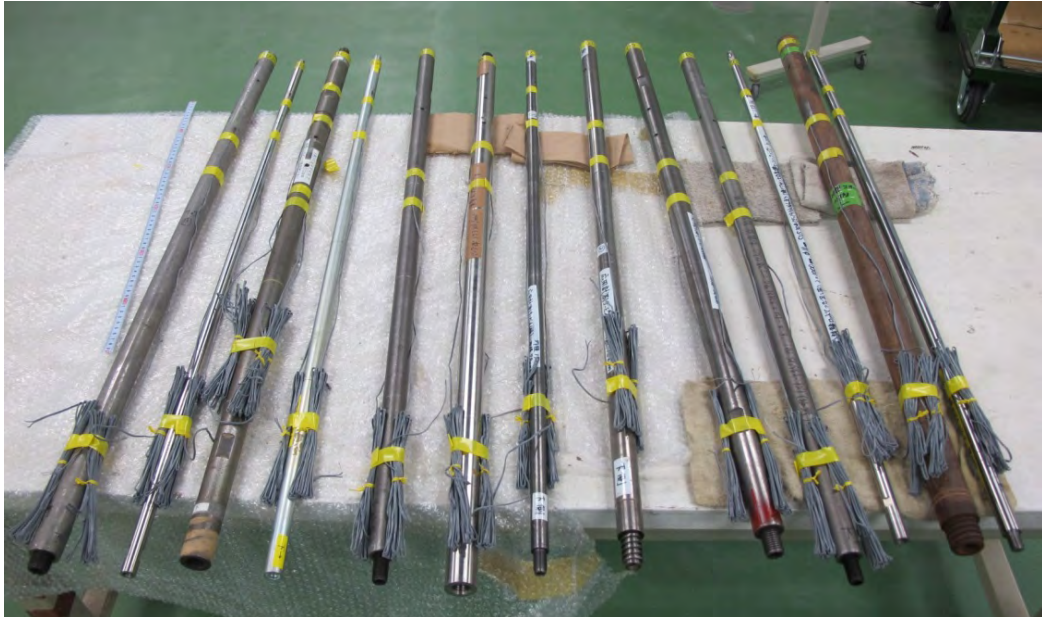


写真-3.4.1 SPT 及び DCPT の計測ロッド

図-3.4.3 は、SPT (Test 9) における測定動的シグナルと伝達エネルギーの計算結果の例である。この打撃では、サンプラー先端深さが 6.4 m であり、ハンマーの落下高さを標準の 0.75 m とした。実測した 1 打撃当たりの貫入量 S は、19 mm であった。打撃応力が先端で反射され測定レベルに戻ってくる時刻 $t = t_r$ までは、一次元波動理論に基づいて、 $v = v_d = \sigma_d / \rho$ によって、速度 v を求めた。ここで、 σ_d は下降応力波による応力、 ρ はロッドの密度である。 $t = t_r$ 以降では、 $t = t_r$ での速度と $t = t_r$ 以降の測定加速度 α から速度を求めた (図-(c))。このようにして求めた速度 v の時間積分から変位 w を求めた (図-(d))。計算による 1 打撃当たりの貫入量 S は 19 mm であったが、これは実測値 18 mm とほぼ同様な結果であった。

打撃エネルギー $E_{drv}(t)$ を算定した結果を図-(e) に示す。打撃エネルギーの大半は、 $t = t_r$ までにロッドに伝達されているが、それ以降も時間とともに少しずつ増加し、一定値に到達する。この一定値 (最終値) を、最終伝達エネルギー E_{meas} と定義した。打撃効率 e_f を、 E_{meas} とハンマーのポテンシャルエネルギー $M_H gh$ の比で表した。

$$e_f = E_{meas} / (M_H gh) \quad (3.4.2)$$

また、DCPT の動的貫入抵抗 R_{dyn} を、エネルギー保存則から、簡易的に式(3.4.3)で算定した。

$$R_{dyn} = E_{meas} / S \quad (3.4.3)$$

DCPT の動的貫入抵抗 R_{dyn} は、コーン抵抗に加え、ロッドに作用する摩擦力の和である。しかしながら、本報告では、ロッドに作用する摩擦は無いものと仮定して、動的コーン抵抗 q_{dyn} を、 A_c をコーン面積として、式(3.3.4)で求めた。

$$q_{dyn} = R_{dyn} / A_c \quad (3.4.4)$$

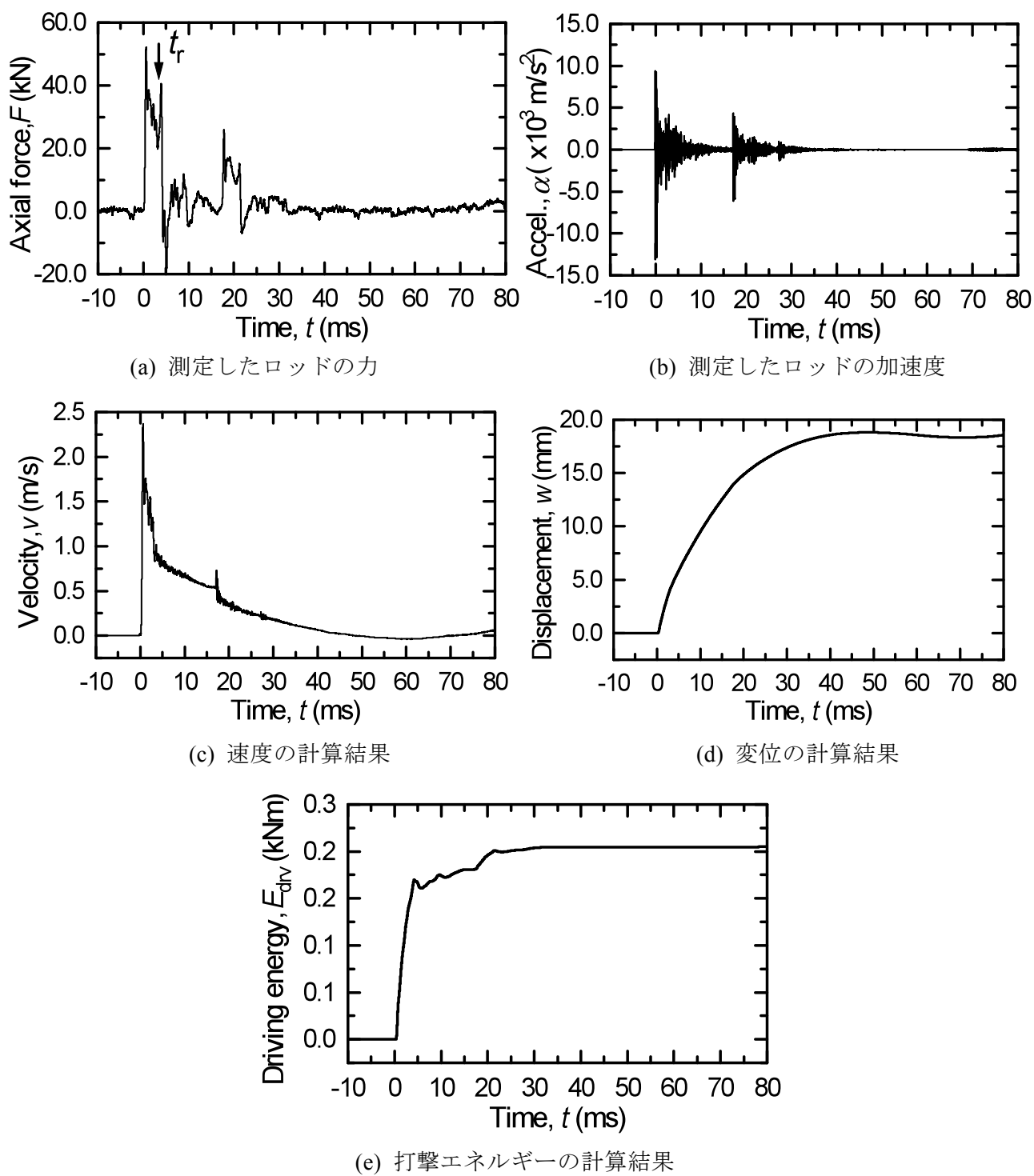


図-3.4.3 SPT (Test 9) における測定動的シグナルと計算結果の例

3.4.4 打撃効率の測定結果

SPT 及び各 DCPT において、基本的に連続した 21 打撃について動的測定を行った（写真-3.4.2 参照）。ただし、Test 2 (MRS)に関しては、測定シグナルにノイズが発生したため、8 打撃のみ解析が可能であった。

Test 6 (SRS)では通常、厚さ 2 mm のウレタンゴムクッション（緩衝材）を 2 枚使用している（Test 6a）。クッションの枚数が e_f に及ぼす影響を調べるため、Test 6b ではクッションを 1 枚、Test 6c ではクッション無しで打撃を行った。Test 13 (SH) では、ハンマー質量が打撃効率 e_f に及ぼす影響を調べるため、ハンマー質量 m を 3 kg (Test 13a) と 5 kg (Test 13b) として、試験を実施した。

図-3.4.4 から図-3.4.19 は、各 DCPT の解析結果を示したものである。各 DCPT について、(a) 深さ z と打撃効率 e_f の関係、(b) 打撃効率 e_f の頻度分布、(c) 深さ z と一打撃当りの貫入量 S の関係、(d) 深さ z と動的コーン貫入抵抗 q_{dyn} および CPT によるコーン値 q_t の関係、を示している。表-3.4.1 に、打撃効率 e_f の平均値および変動係数 COV (Coefficient Of Variance)を示している。

これらから得られる知見は、以下の通りである。

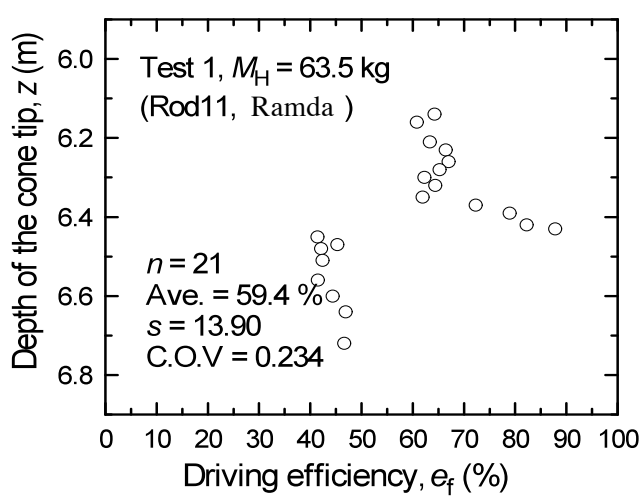
- 1) 打撃効率 e_f の平均値は、Test 4 (Penny)および Test 13a (SH、 $m=3\text{kg}$) を除けば、おおよそ 60 % を超えている。
- 2) Test 9 (SPT)では、 e_f の平均値は 61 % となった。この値は、これまでに報告されている値⁸⁾と近似している。
- 3) 打撃効率 e_f の変動係数 COV は、大きくても 0.25 であり、 e_f のバラツキは通常の土質定数のバラツキに比べて小さい。
- 4) Test 6 の結果を見ると、クッション枚数が 0 および 1 枚では、 e_f に大きな違いは見られなかった。クッション枚数が 0 および 1 枚の場合に比べて、クッション枚数が 2 枚の場合、 e_f が 20%程度減少する結果となった。
- 5) Test 13 の結果では、同じ装置であれば、ハンマー質量が大きくなると、明らかに打撃効率 e_f の平均値は増加した。
- 6) 測定した打撃エネルギー E_{meas} と一打撃当りの貫入量 S を用いて、エネルギー式から算定した動的コーン貫入抵抗 q_{dyn} は、コーン貫入試験におけるコーン値 q_t と比較的良い一致を示した。
- 7) したがって、深度 10m までの砂地盤に対しては、動的測定を伴う動的コーン貫入試験は、地盤構成を比較的高い精度で測定できる可能性が示された。そのため、動的測定を伴う動的コーン貫入試験は宅地の液状化被害予測のために有効に利用できる可能性がある。



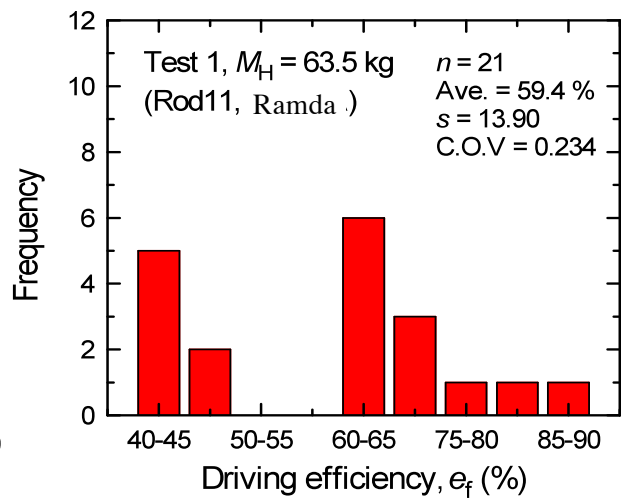
写真-3.4.2 計測風景



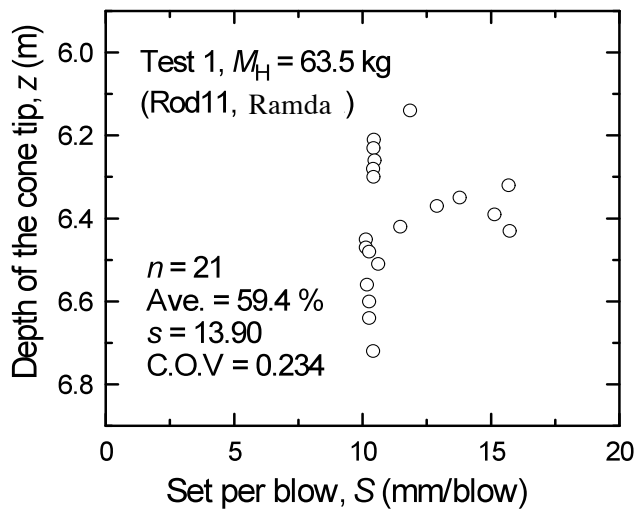
写真-3. 4. 3 Test 1 (Ramda)の計測風景



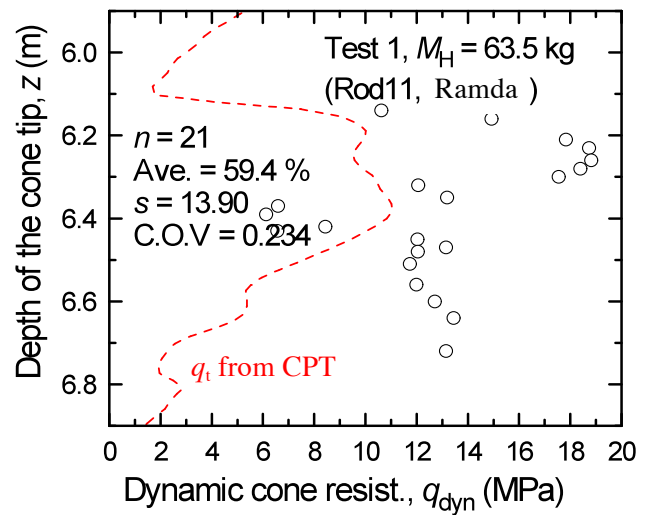
(a) 深さ z と打撃効率 e_f の関係



(b) 打撃効率 e_f の頻度分布



(c) 深さ z と一打撃当りの貫入量 S の関係

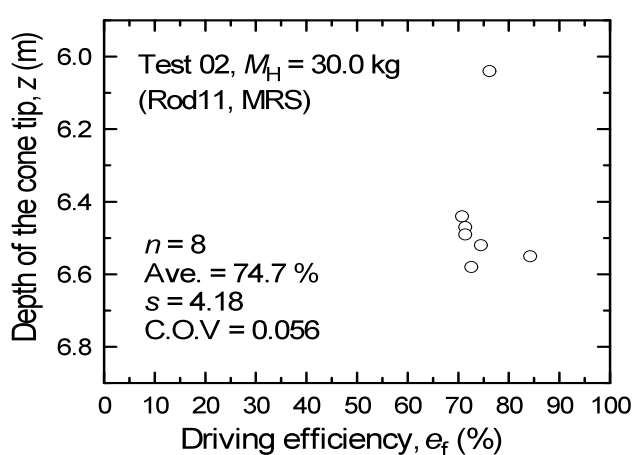


(d) 深さ z と動的コーン貫入抵抗 q_{dyn} および CPT によるコーン値 q_t の関係

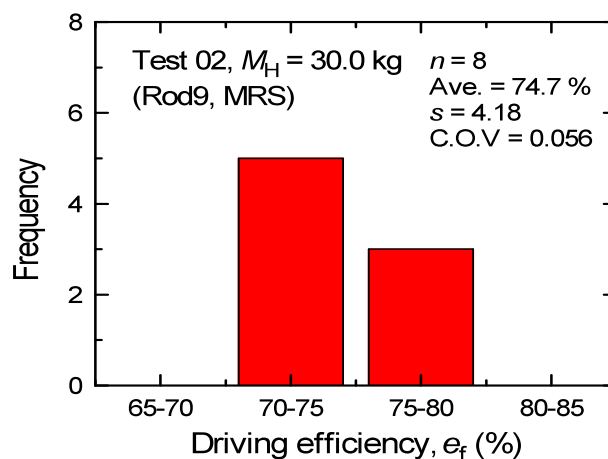
図-3. 4. 4 Test 1 (Ramda)の測定結果



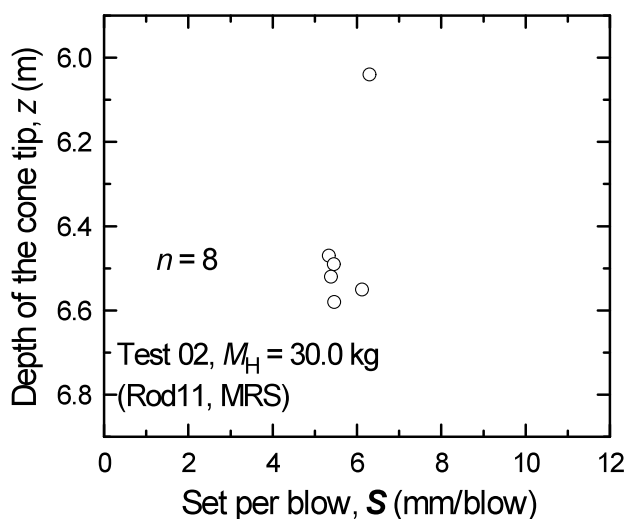
写真-3. 4. 4 Test 2 (MRS)の計測風景



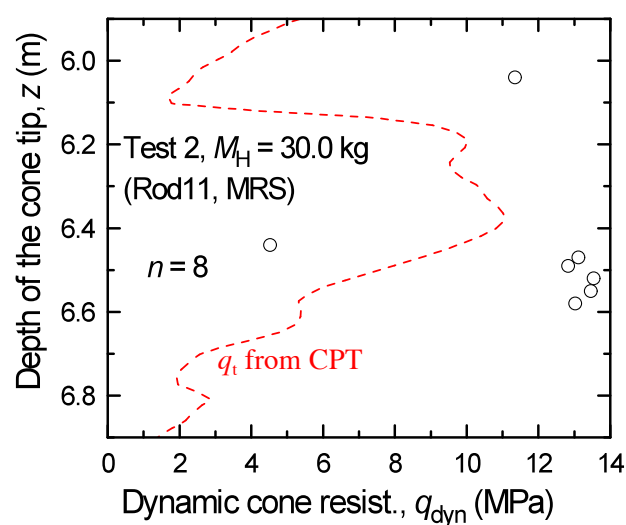
(a) 深さ z と打撃効率 e_f の関係



(b) 打撃効率 e_f の頻度分布



(c) 深さ z と一打撃当りの貫入量 S の関係



(d) 深さ z と動的コーン貫入抵抗 q_{dyn} および CPT によるコーン値 q_t の関係

図-3. 4. 5 Test 2 (MRS)の測定結果



写真-3. 4. 5 Test 3 (SRS-Y1a)の計測風景

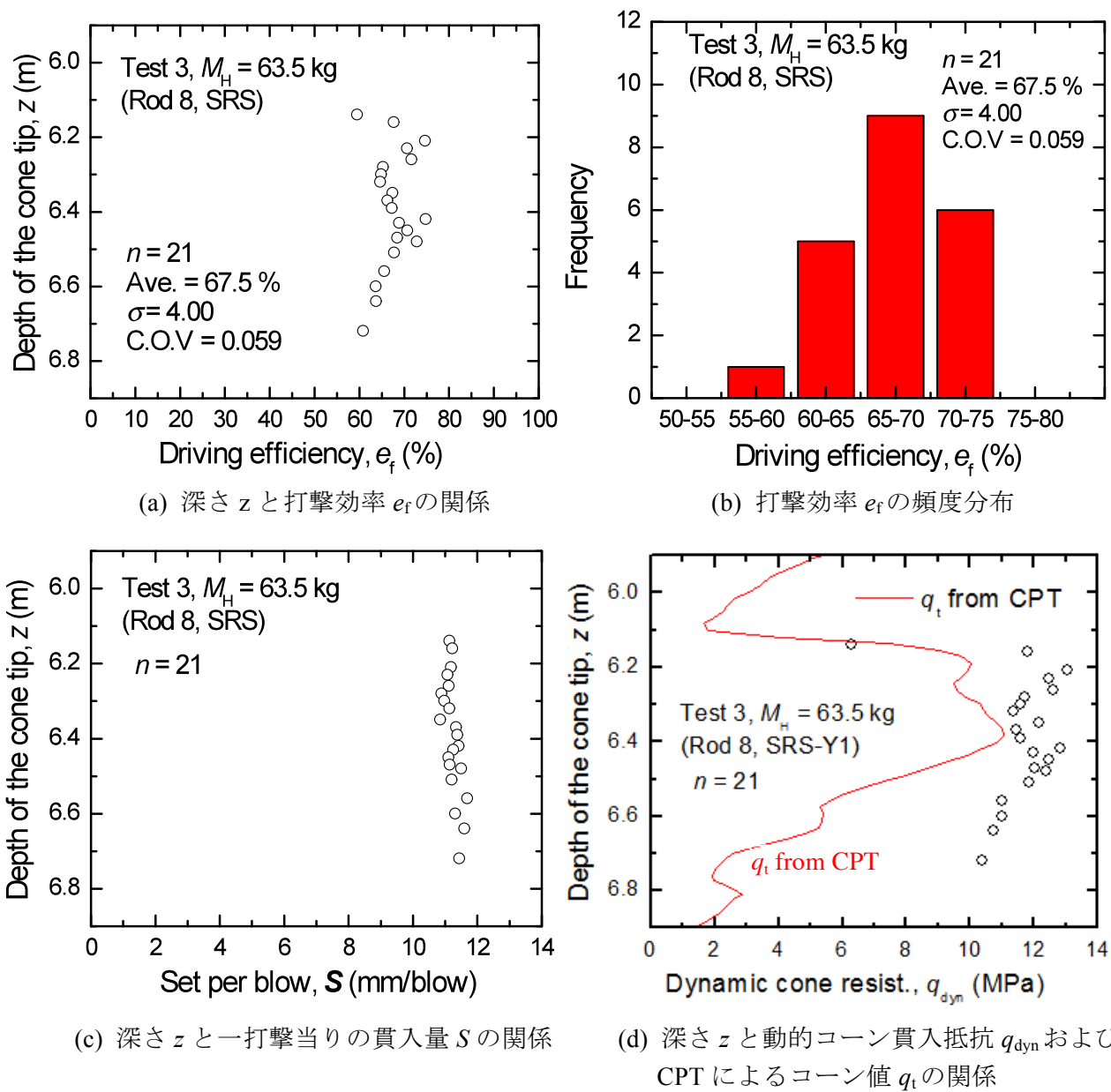
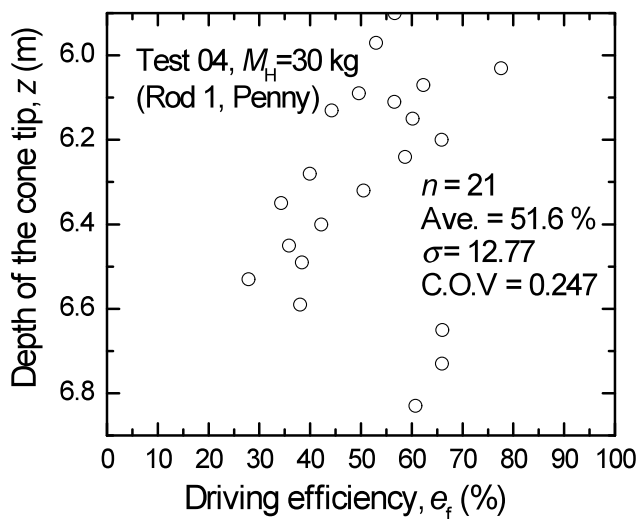
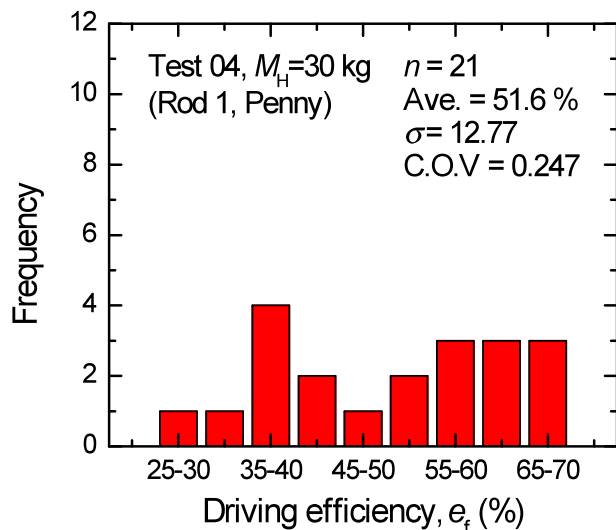


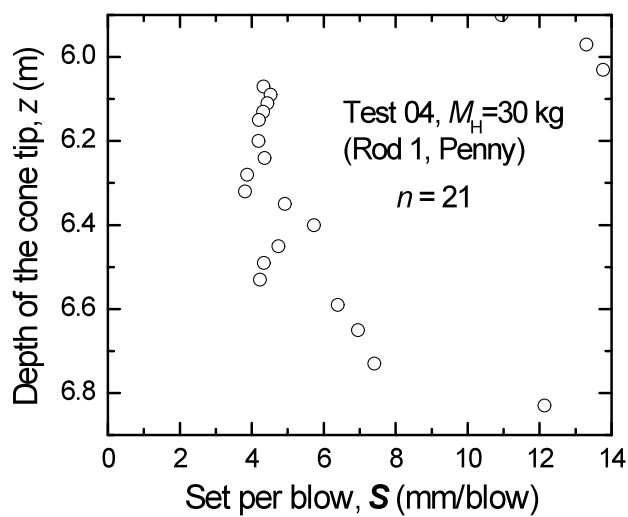
図-3. 4. 6 Test 3 (SRS-Y1a)の測定結果



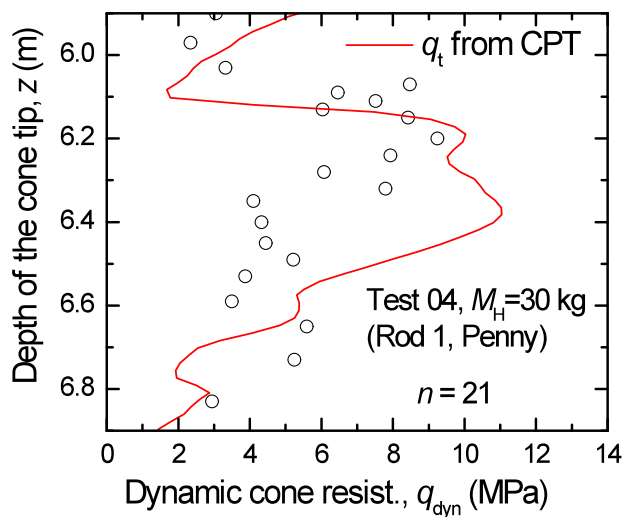
(a) 深さ z と打撃効率 e_f の関係



(b) 打撃効率 e_f の頻度分布

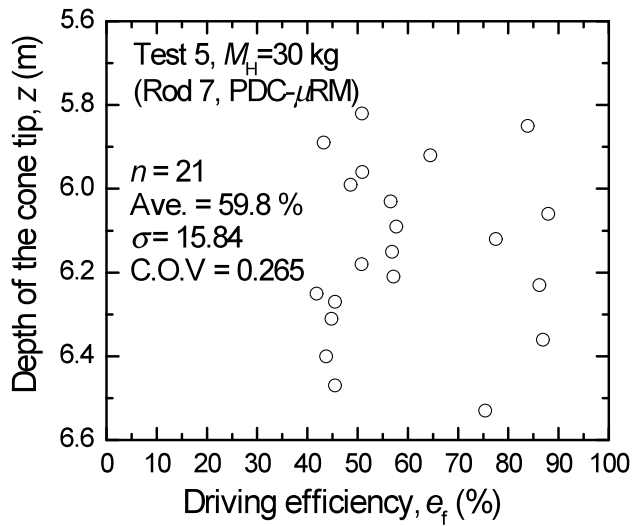


(c) 深さ z と一打撃当りの貫入量 S の関係

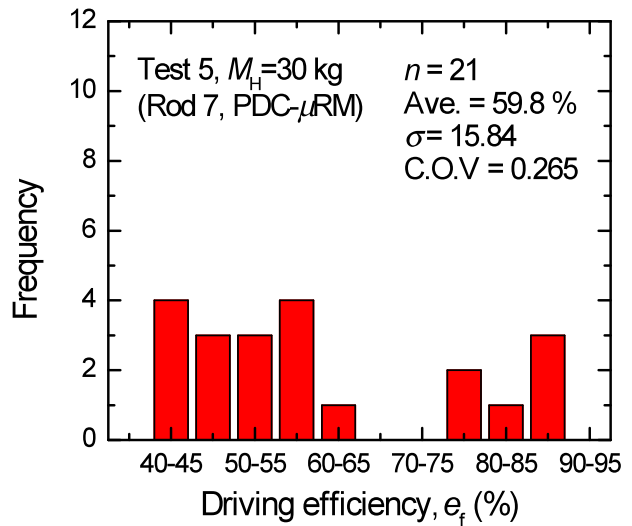


(d) 深さ z と動的コーン貫入抵抗 q_{dyn} および CPT によるコーン値 q_t の関係

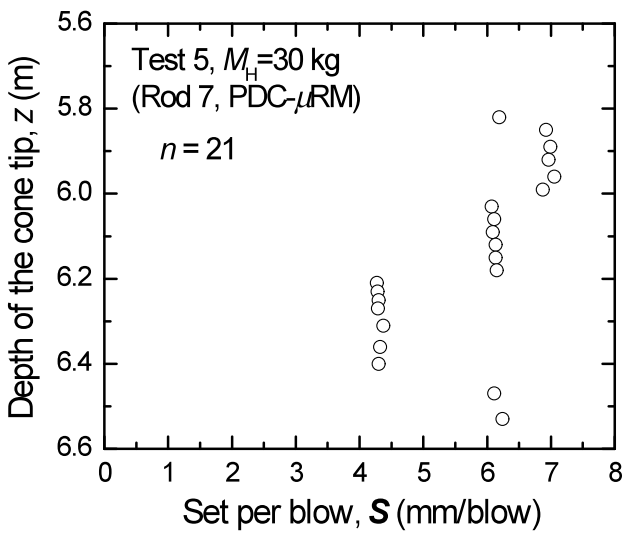
図-3.4.7 Test 4 (Penny)の測定結果



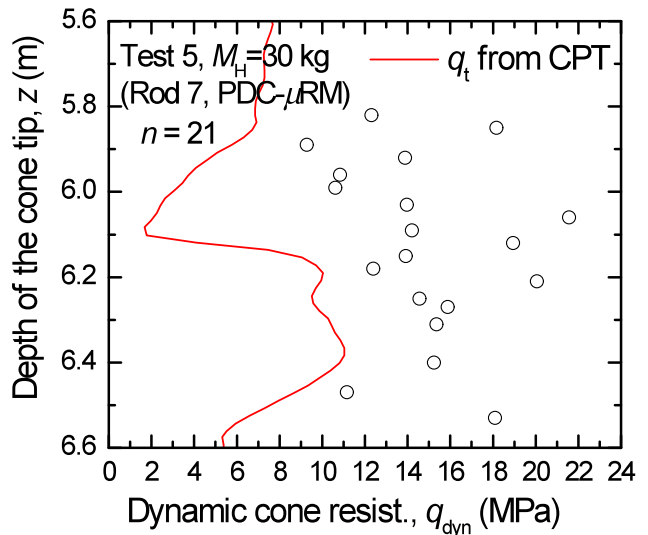
(a) 深さ z と打撃効率 e_f の関係



(b) 打撃効率 e_f の頻度分布

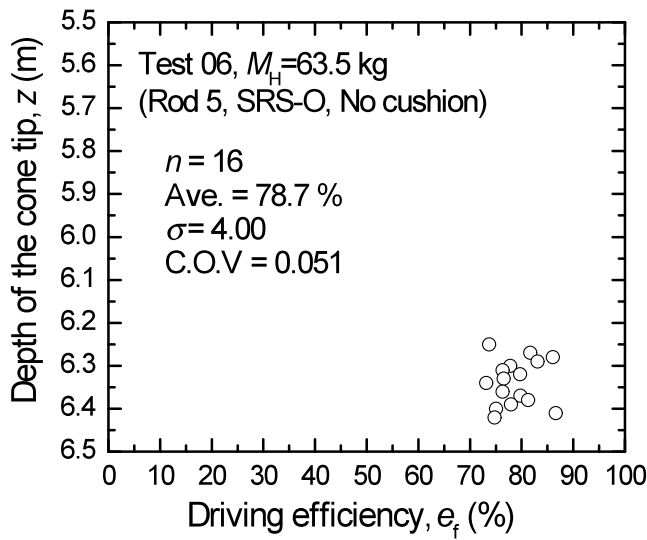


(c) 深さ z と一打撃当りの貫入量 S の関係

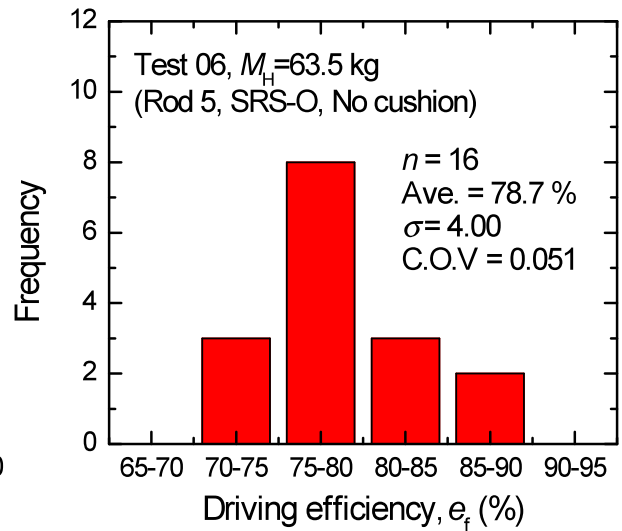


(d) 深さ z と動的コーン貫入抵抗 q_{dyn} および CPT によるコーン値 q_t の関係

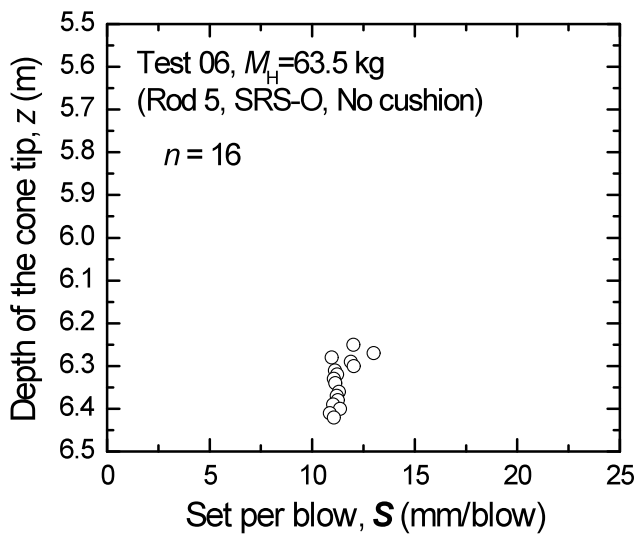
図-3.4.8 Test 5 (PDC- μ RM)の測定結果



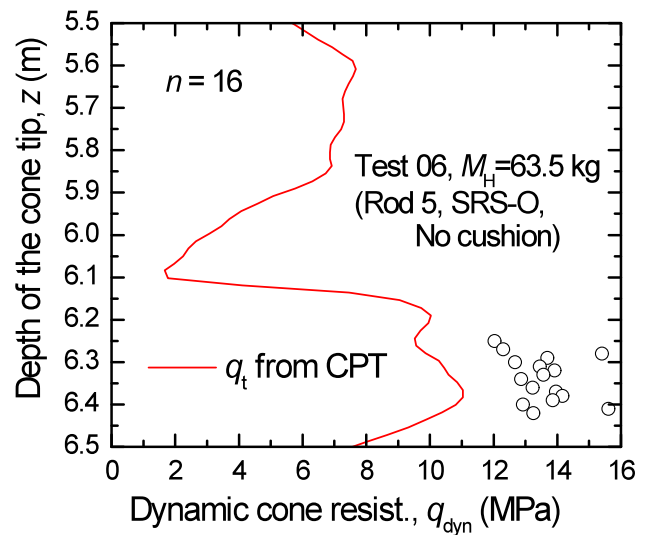
(a) 深さ z と打撃効率 e_f の関係



(b) 打撃効率 e_f の頻度分布

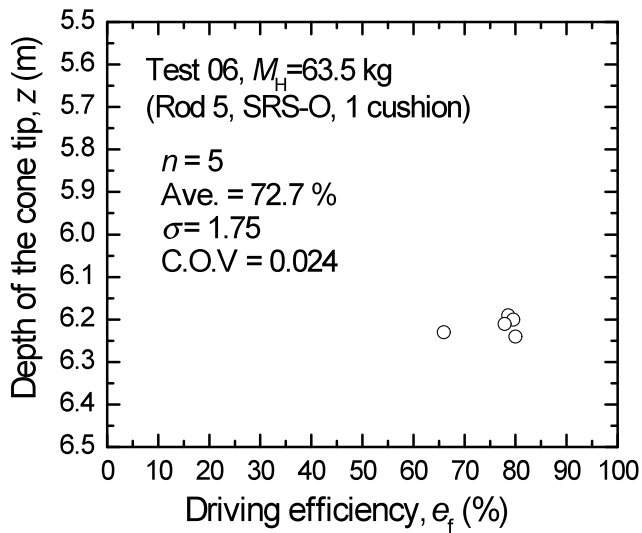


(c) 深さ z と一打撃当りの貫入量 S の関係

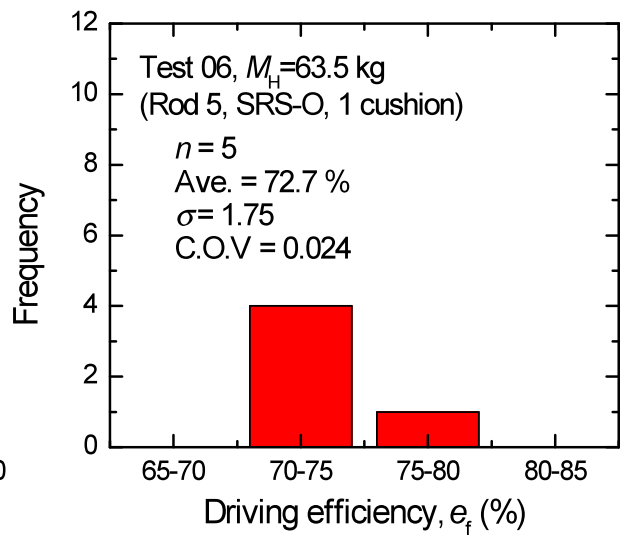


(d) 深さ z と動的コーン貫入抵抗 q_{dyn} および CPT によるコーン値 q_t の関係

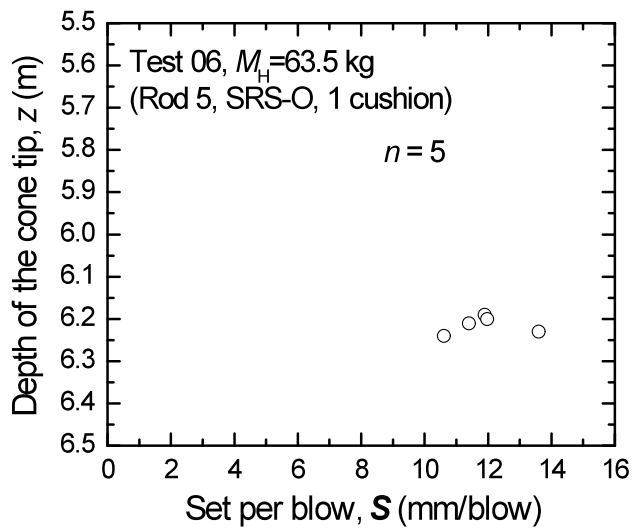
図-3. 4. 9 Test 6a (SRS-O, No cushion)の測定結果



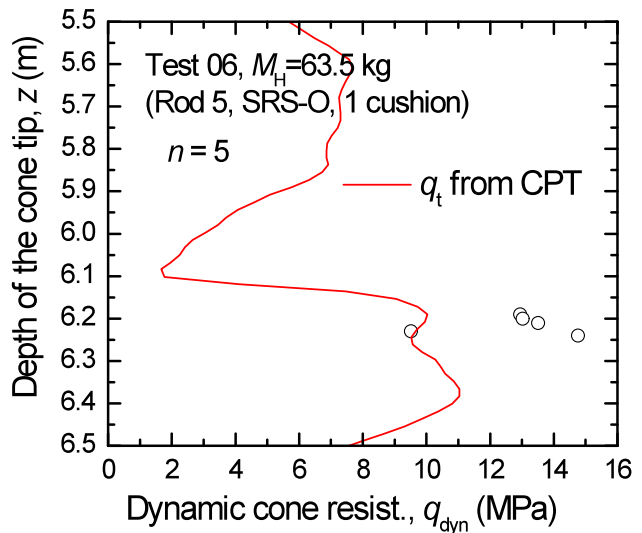
(a) 深さ z と打撃効率 e_f の関係



(b) 打撃効率 e_f の頻度分布

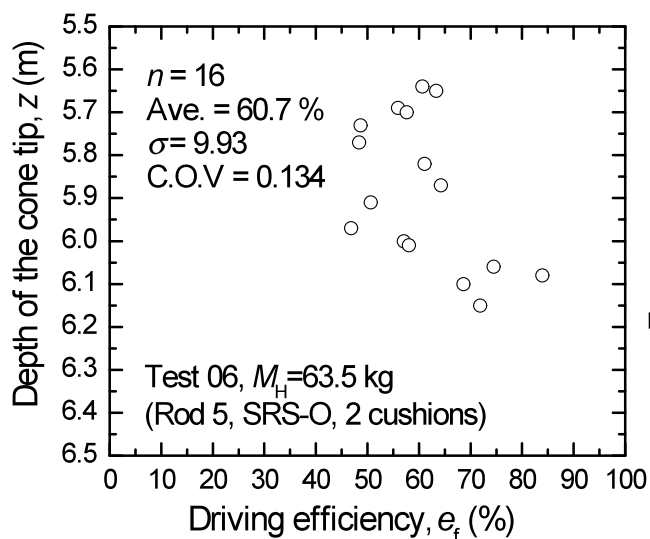


(c) 深さ z と一打撃当りの貫入量 S の関係

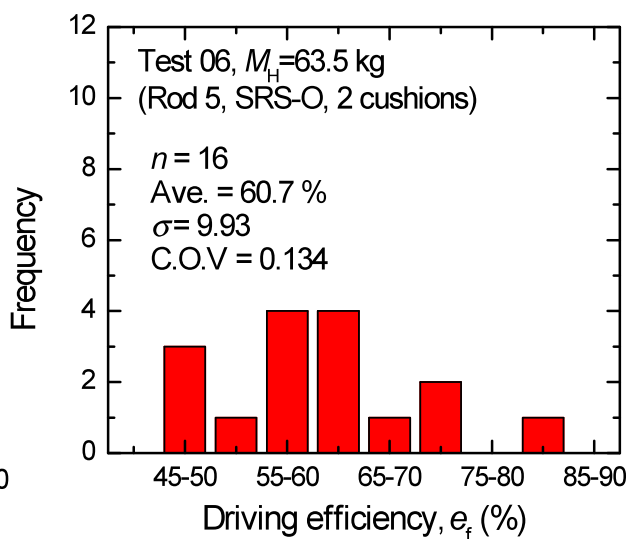


(d) 深さ z と動的コーン貫入抵抗 q_{dyn} および CPT によるコーン値 q_t の関係

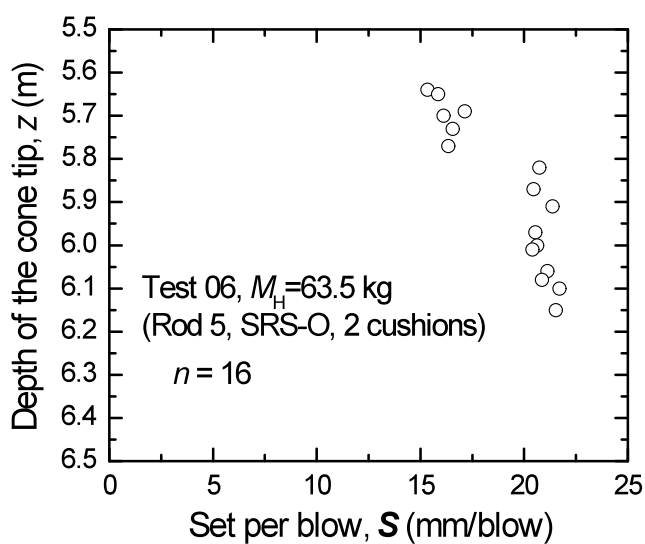
図-3. 4. 10 Test 6b (SRS-O, 1 cushion)の測定結果



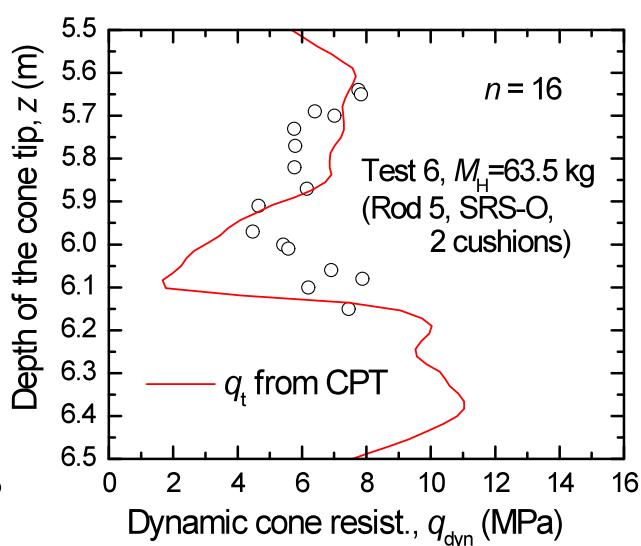
(a) 深さ z と打撃効率 e_f の関係



(b) 打撃効率 e_f の頻度分布

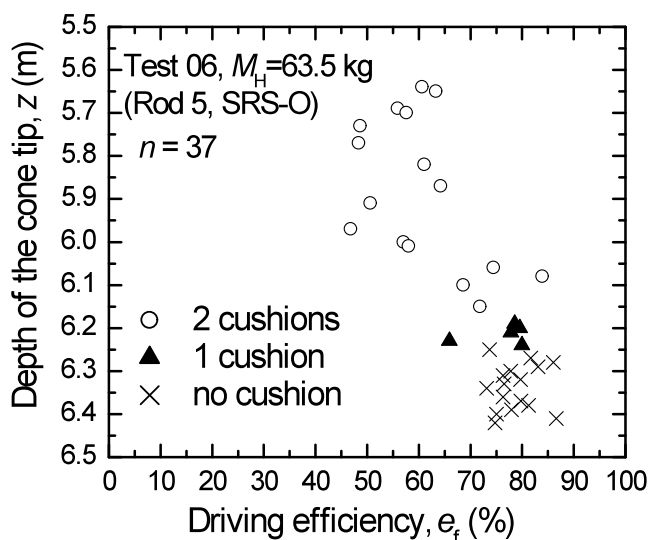


(c) 深さ z と一打撃当りの貫入量 S の関係

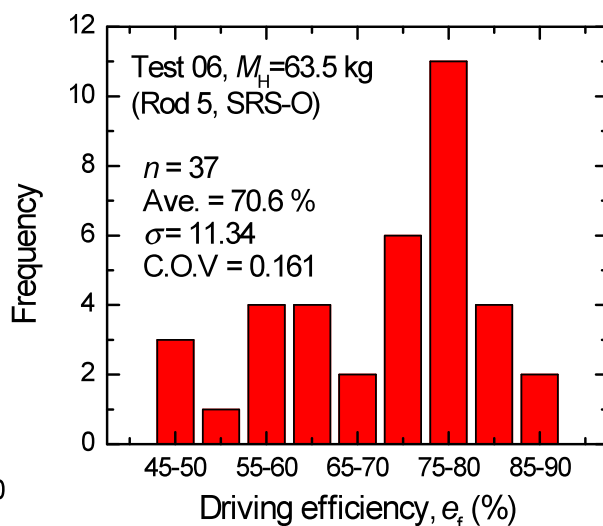


(d) 深さ z と動的コーン貫入抵抗 q_{dyn} および CPT によるコーン値 q_t の関係

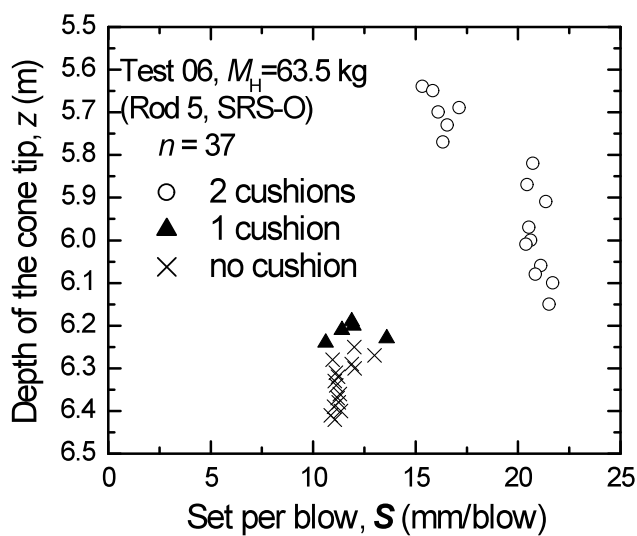
図-3. 4. 11 Test 6c (SRS-O, 2 cushions)の測定結果



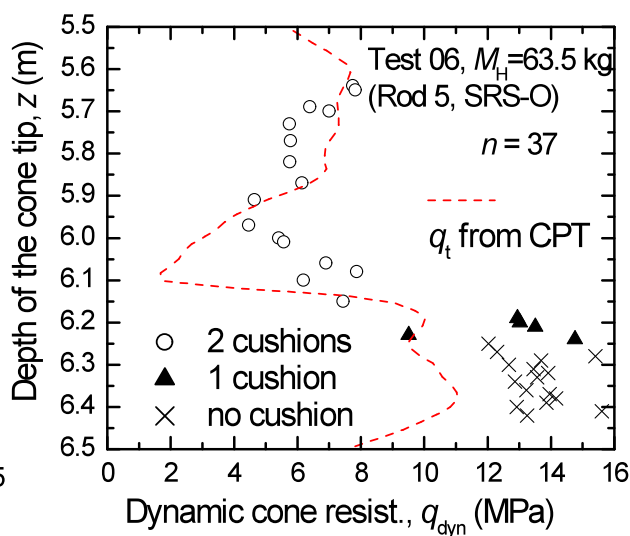
(a) 深さ z と打撃効率 e_f の関係



(b) 打撃効率 e_f の頻度分布

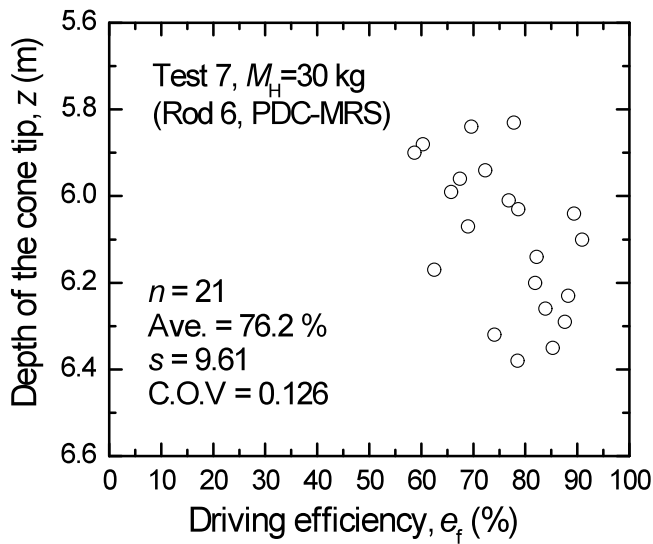


(c) 深さ z と一打撃当りの貫入量 S の関係

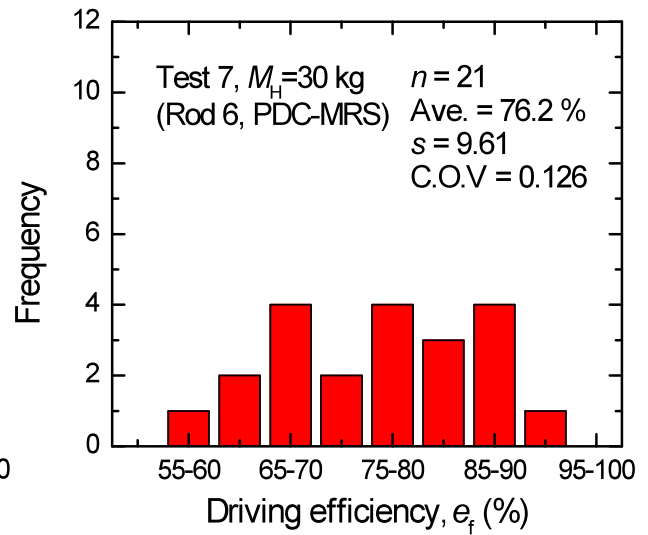


(d) 深さ z と動的コーン貫入抵抗 q_{dyn} および CPT によるコーン値 q_t の関係

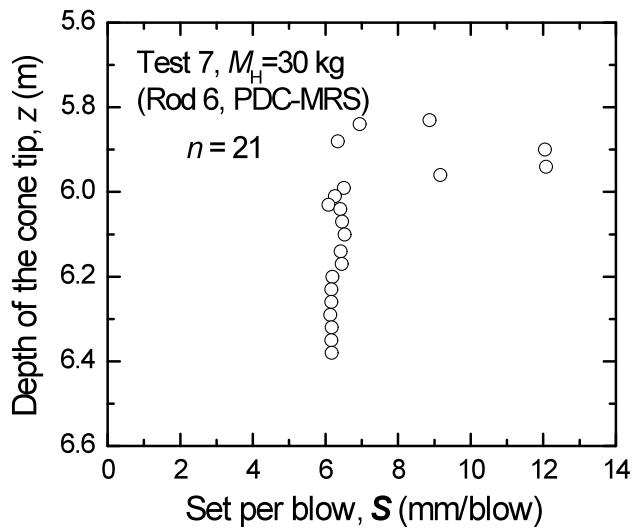
図-3. 4. 12 Test 6 (SRS-O, all tests)の測定結果



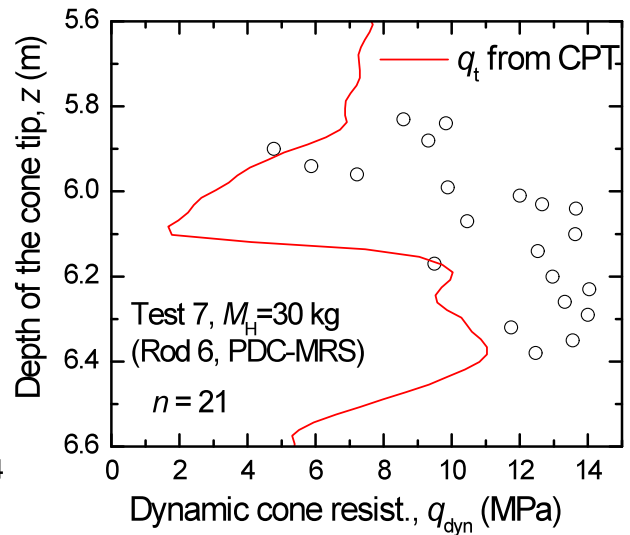
(a) 深さ z と打撃効率 e_f の関係



(b) 打撃効率 e_f の頻度分布

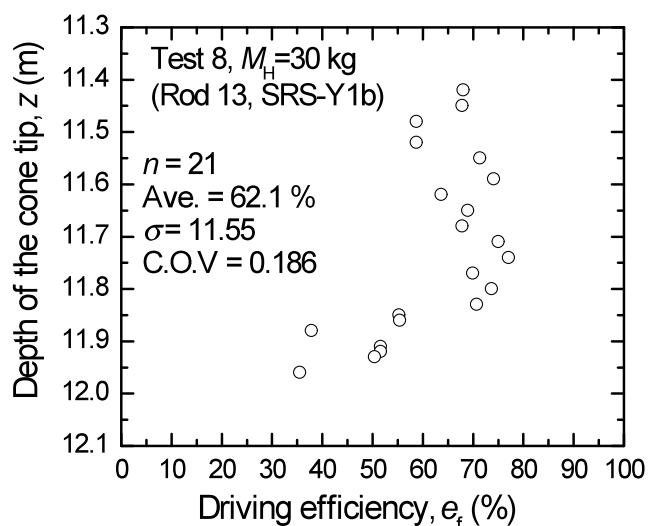


(c) 深さ z と一打撃当りの貫入量 S の関係

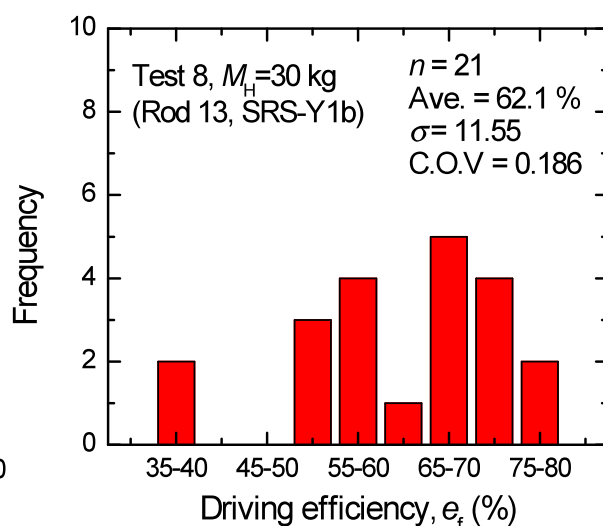


(d) 深さ z と動的コーン貫入抵抗 q_{dyn} および CPT によるコーン値 q_t の関係

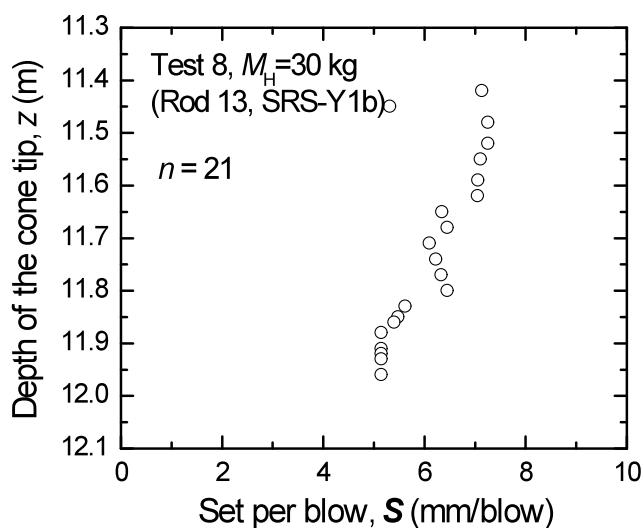
図-3.4.13 Test 7 (PDS-MRS)の測定結果



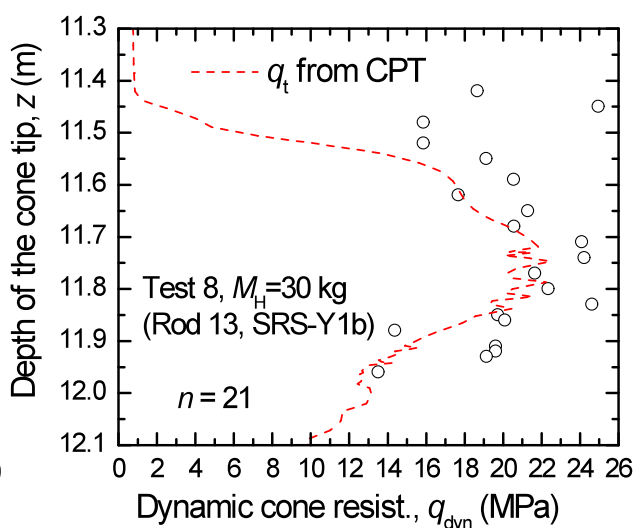
(a) 深さ z と打撃効率 e_f の関係



(b) 打撃効率 e_f の頻度分布



(c) 深さ z と一打撃当りの貫入量 S の関係

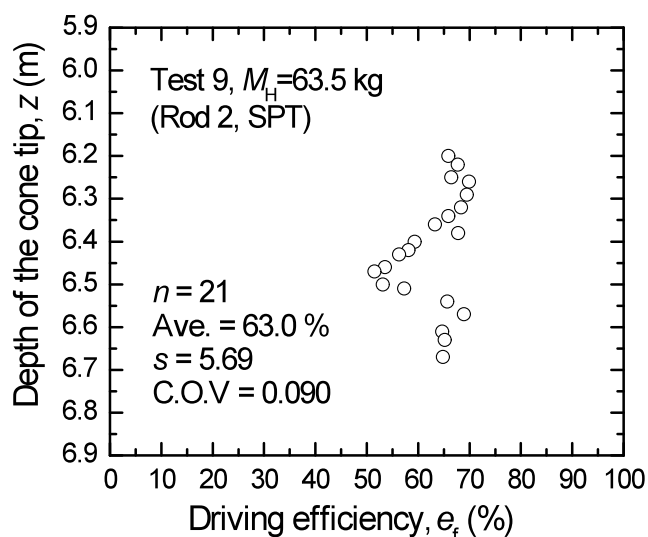


(d) 深さ z と動的コーン貫入抵抗 q_{dyn} および CPT によるコーン値 q_t の関係

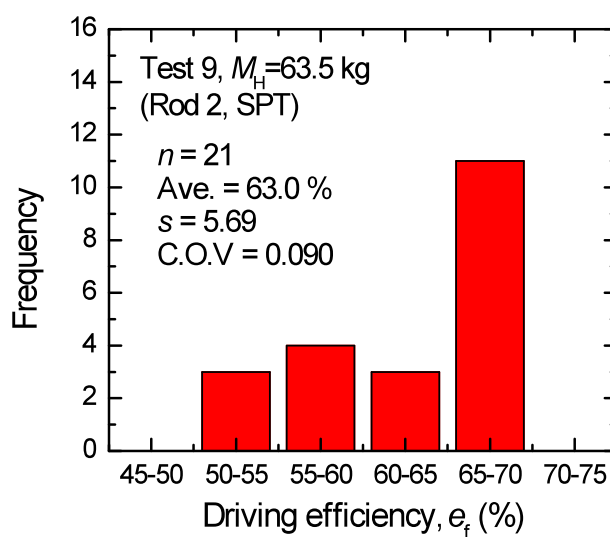
図-3. 4. 14 Test 8 (SRS-Y1b)の測定結果



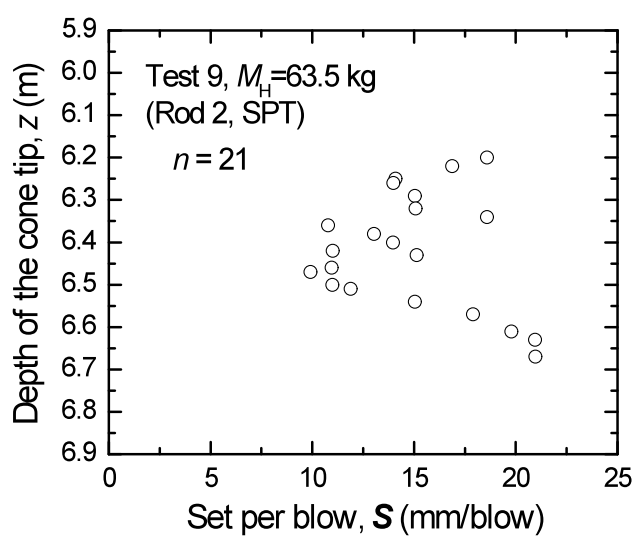
写真-3. 4. 6 Test 9 (SPT)の計測風景



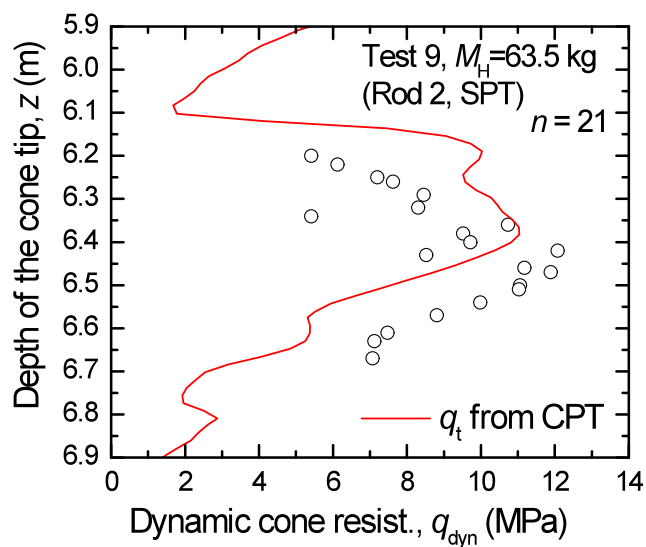
(a) 深さ z と打撃効率 e_f の関係



(b) 打撃効率 e_f の頻度分布

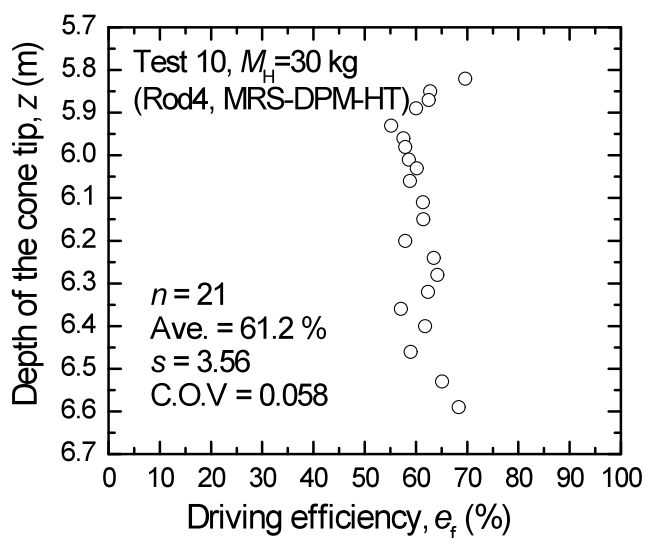


(c) 深さ z と一打撃当りの貫入量 S の関係

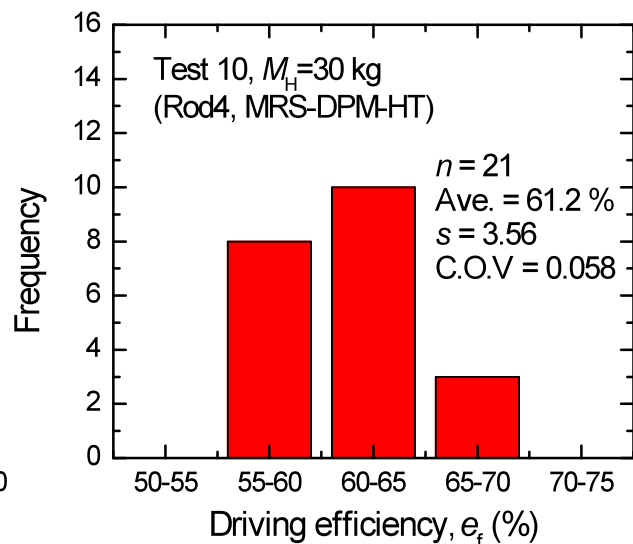


(d) 深さ z と動的コーン貫入抵抗 q_{dyn} および CPT によるコーン値 q_t の関係

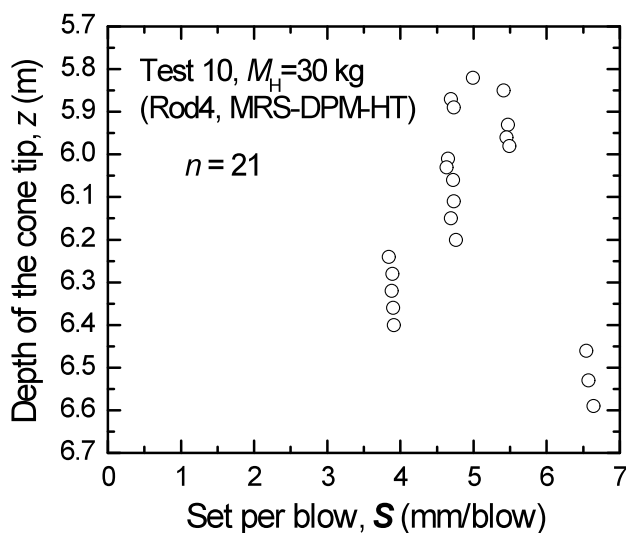
図-3. 4. 15 Test 9 (SPT)の測定結果



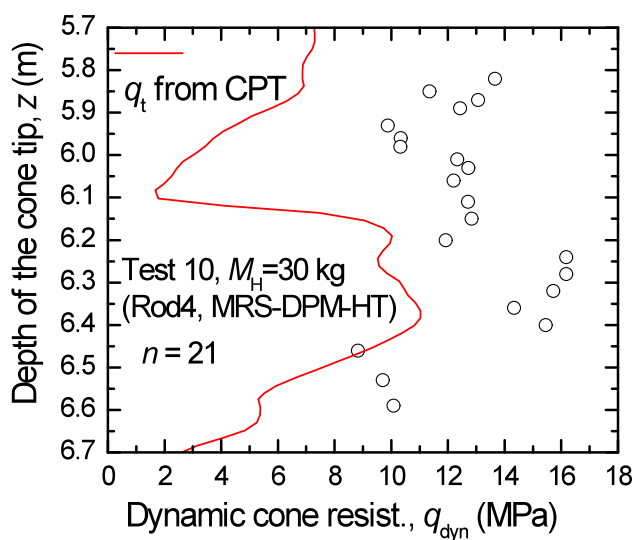
(a) 深さ z と打撃効率 e_f の関係



(b) 打撃効率 e_f の頻度分布



(c) 深さ z と一打撃当りの貫入量 S の関係



(d) 深さ z と動的コーン貫入抵抗 q_{dyn} および CPT によるコーン値 q_t の関係

図-3.4.16 Test 10 (DPT-HT)の測定結果

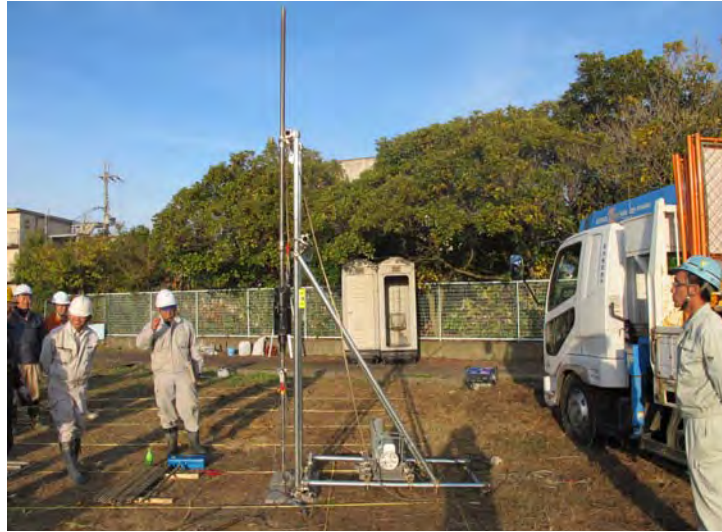
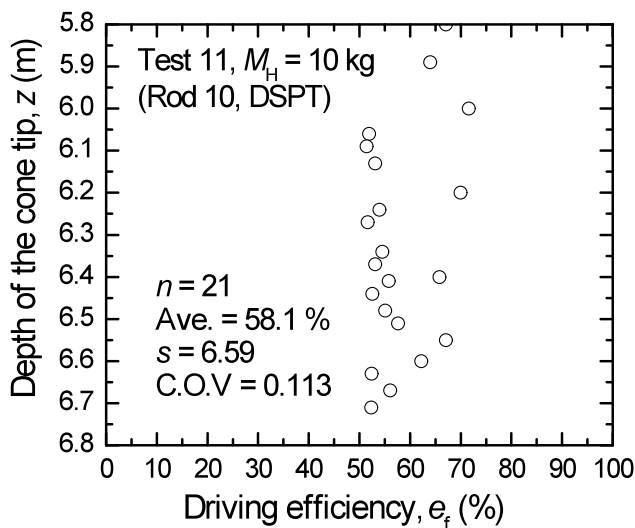
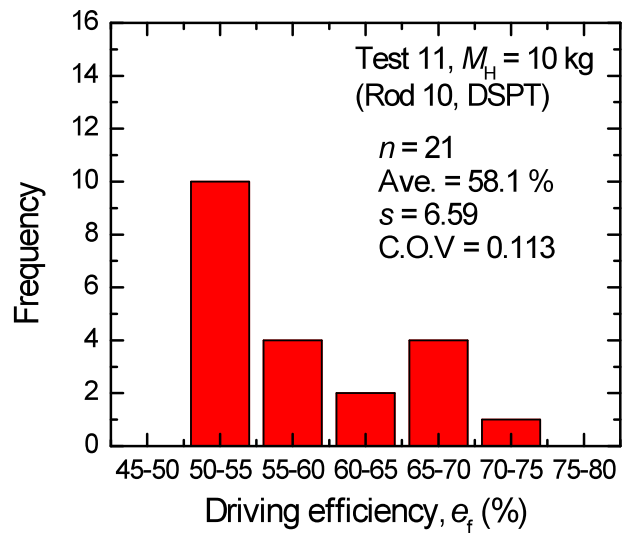


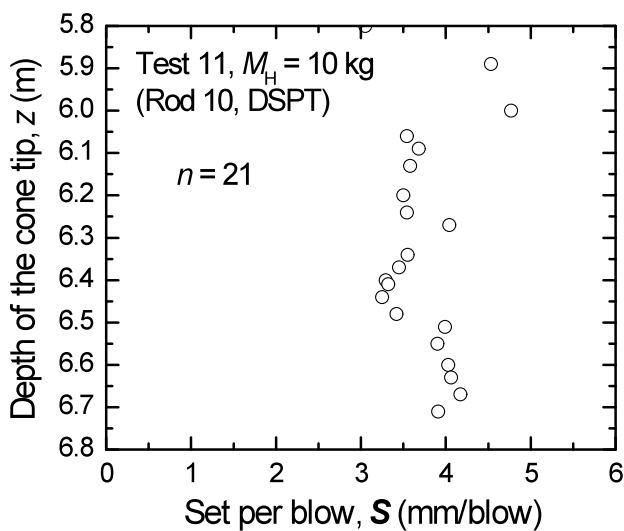
写真-3. 4. 6 Test 11 (DSPT)の計測風景



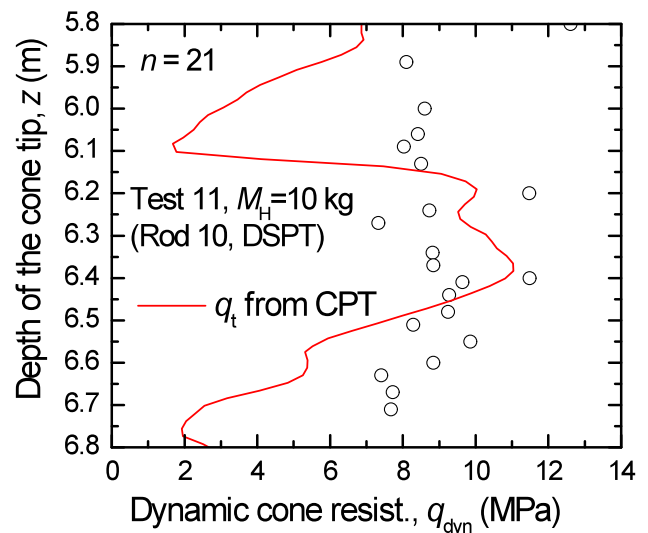
(a) 深さ z と打撃効率 e_f の関係



(b) 打撃効率 e_f の頻度分布



(c) 深さ z と一打撃当りの貫入量 S の関係

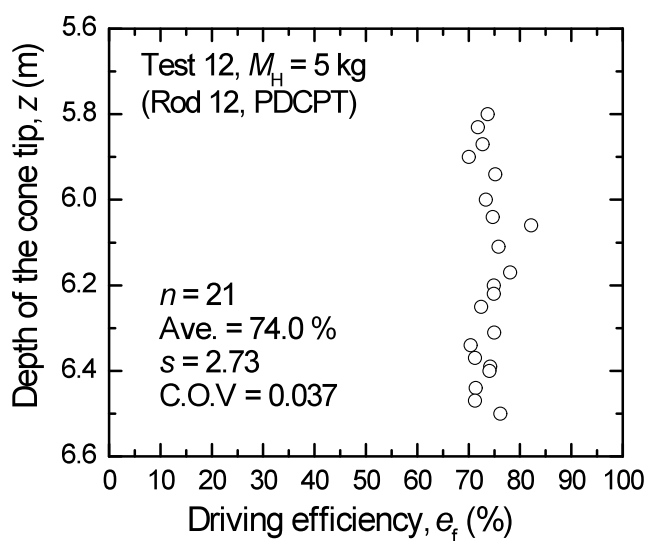


(d) 深さ z と動的コーン貫入抵抗 q_{dyn} および CPT によるコーン値 q_t の関係

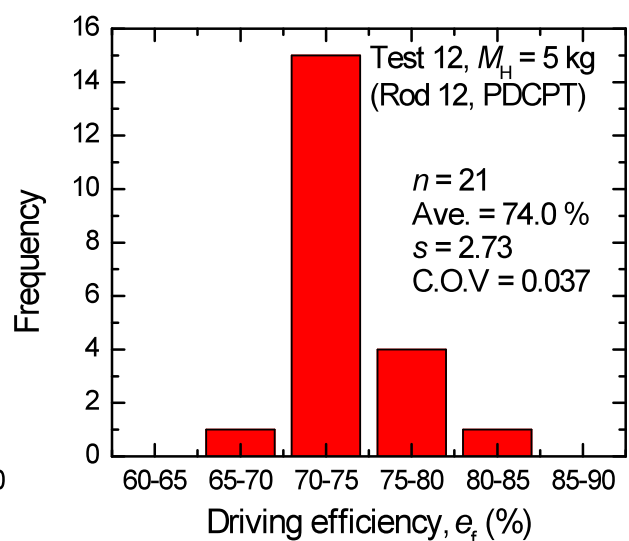
図-3. 4. 16 Test 11 (DSPT)の測定結果



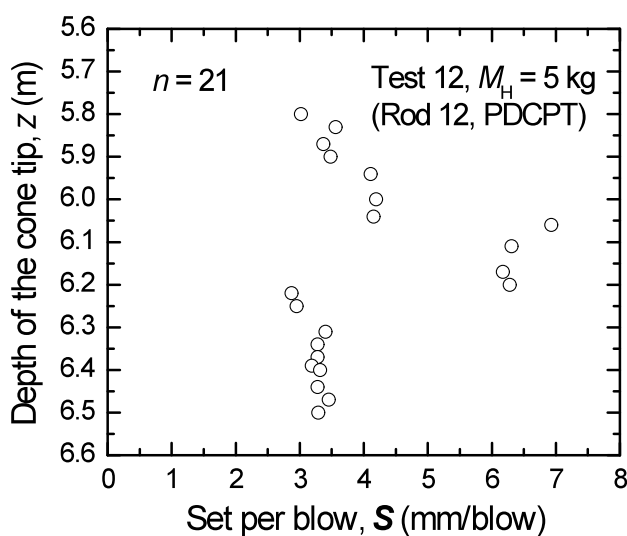
写真-3. 4. 6 Test 12 (PDCPT)の計測風景



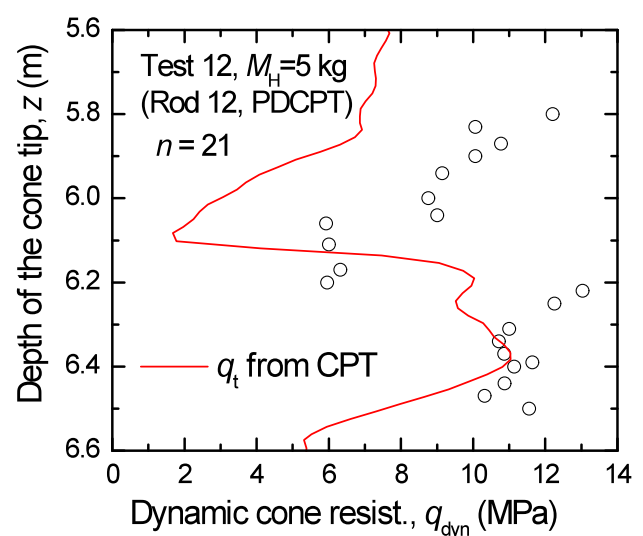
(a) 深さ z と打撃効率 e_f の関係



(b) 打撃効率 e_f の頻度分布

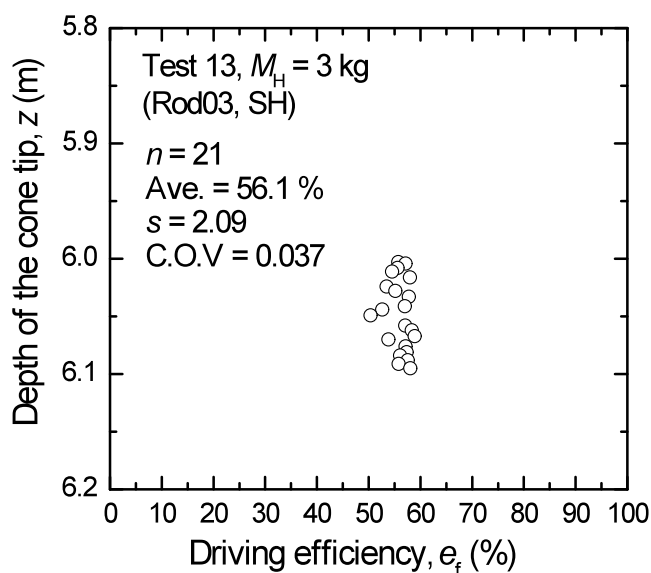


(c) 深さ z と一打撃当りの貫入量 S の関係

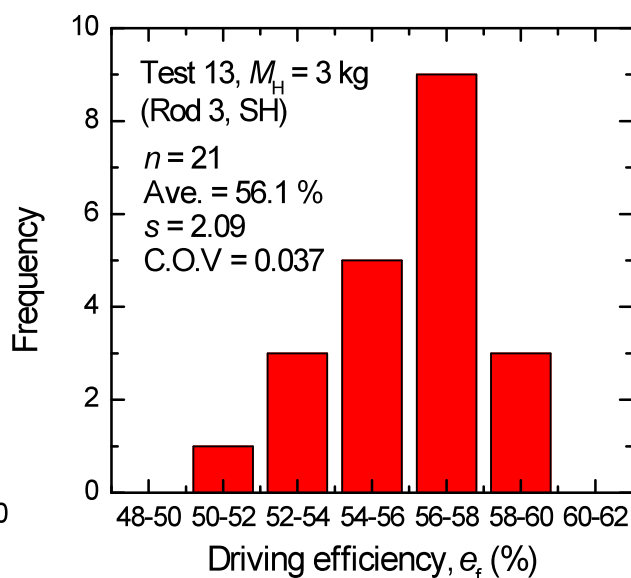


(d) 深さ z と動的コーン貫入抵抗 q_{dyn} および CPT によるコーン値 q_t の関係

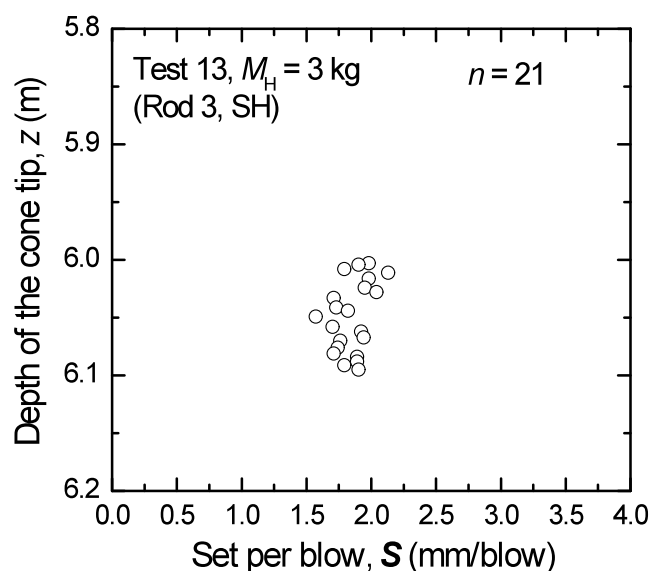
図-3. 4. 17 Test 12 (PDCPT)の測定結果



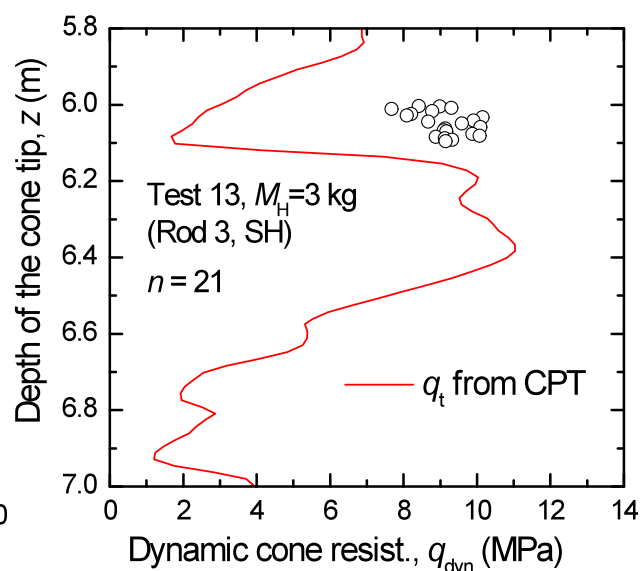
(a) 深さ z と打撃効率 e_f の関係



(b) 打撃効率 e_f の頻度分布

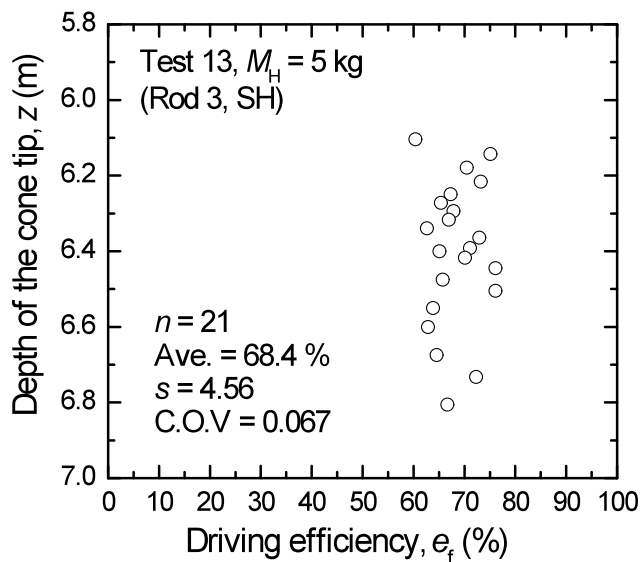


(c) 深さ z と一打撃当りの貫入量 S の関係

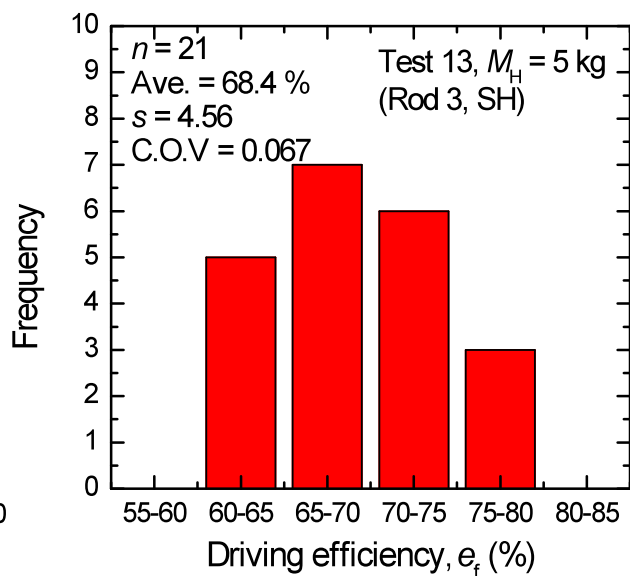


(d) 深さ z と動的コーン貫入抵抗 q_{dyn} および CPT によるコーン値 q_t の関係

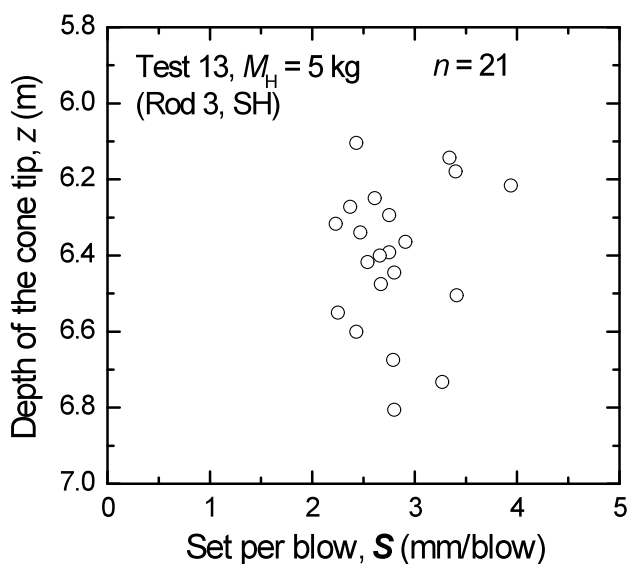
図-3. 4. 18 Test 13a (SH, m (M_H) = 3 kg) の測定結果



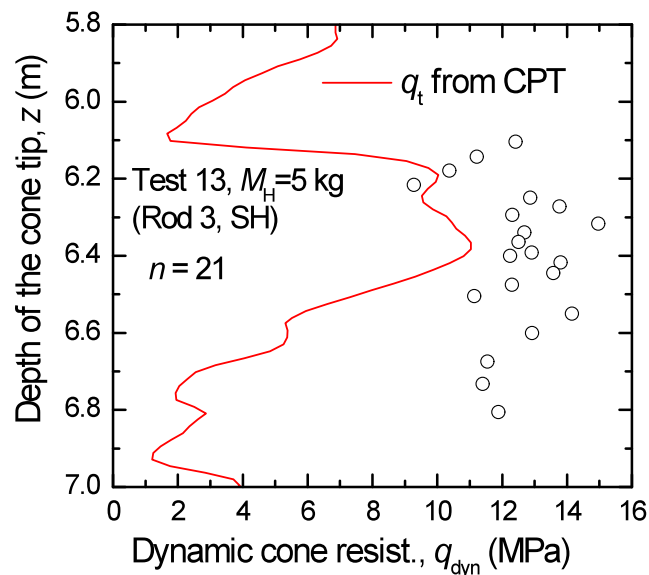
(a) 深さ z と打撃効率 e_f の関係



(b) 打撃効率 e_f の頻度分布



(c) 深さ z と一打撃当りの貫入量 S の関係



(d) 深さ z と動的コーン貫入抵抗 q_{dyn} および CPT によるコーン値 q_t の関係

図-3. 4. 19 Test 13b (SH, $m (M_H) = 5$ kg) の測定結果

参考文献

- 1) 大島昭彦：講座 室内試験・原位置試験結果の設計への反映 7. 宅地の基礎設計，地盤工学会誌，Vol. 61, No.9, pp.40-47, 2013.
- 2) 杉浦沙紀・Phan Ta Le,・松本樹典・小林俊一・下野慎也：乾燥砂地盤における静的・動的コーン貫入試験に関する基礎的実験（その 1：実験概要），第 48 回地盤工学研究発表会，No.173, pp.345-346, 2013.
- 3) Phan, T. L., Sugiura, S., Matsumoto, T., Kobayashi, S. and Shimono, S. : Fundamental experiments of static and dynamic CPT in model ground of dry sand (Part 2: Experimental results and discussion), *Proc. 48th Annual Meeting of Japanese Geotechnical Society*, Toyama, Paper No.174, pp.347-348, 2013.
- 4) 大島昭彦・山田卓・鈴木達也・峯翔太郎・久保田耕司・深井晴夫・山本浩司・濱田晃之：滋賀県守山市における地盤調査一斉試験（その 1：調査概要と SPT），第 48 回地盤工学研究発表会，No.86, pp.171～172, 2013.
- 5) 下野慎也・松本樹典・PHAN Ta Le・大島昭彦・西村真二：滋賀県守山市における地盤調査一斉試験（その 7：SPT および各種 DCPT の打撃効率の測定方法），第 48 回地盤工学研究発表会，No.92, pp.183-184, 2013.
- 6) 松本樹典，下野慎也，Le Ta PHAN，大島昭彦・西村真二：滋賀県守山市における地盤調査一斉試験（その 8：SPT および各種 DCPT の打撃効率の測定結果），第 48 回地盤工学研究発表会，No.93, pp.185-186, 2013.
- 7) Matsumoto, T., Sekiguchi, H., Yoshida, H., Kita, K. : Significance of two-point strain measurements in SPT, *Soil and Foundations*, JSSMFE, Vol.32, No.2, pp. 67-82, 1992.
- 8) Skempton, A.W. : Standard Penetration Test procedures and the Effects in Sands of Overburden Pressure, Relative Density, Particle Size, Aging and Overconsolidation, *Geotechnique* 36(3), pp. 425-447, 1986.

3.5 SRS、MRS 試験と他の試験との相関性の検討

3.5.1 SRS の N_d 値と SPT の N 値との相関性

(1) SRS の N_d 値と SPT の N 値の比較

図-3.5.1(1)～(12)にそれぞれ 12 地点における SRS の N_d 値と SPT の N 値の比較を柱状図とともに示す。なお、SRS は複数の試験を実施しているが、再現性がよいので、代表となる方を選んで比較している。また、図(1)～(4)の SRS は従来機(SRS-Y1)のみで、図(5)～(12)の SRS は従来機(SRS-Y1)と自重低減機(SRS-Y2、SRS-Y3)で比較している(守山、香取では Ramda、SRS-O も)。

図(1)の東中浜では、深度 2～10m まで N 値が未測定であるが、粘土層部では N 値=0 (自沈) と推定される。粘性土層では N_d 値の方が N 値より大きいと見なされる。

図(2)の神栖では、深度 4～8m までの粘性土部で SRS と SPT とともに自沈で、それ以外の砂質土層では N_d 値は N 値とほぼ一致している。

図(3)、(4)の浦安市運動公園、鉄鋼通りはほぼ同様の傾向で、砂質土層では N_d 値は N 値とほぼ一致している。

図(5)の守山市今浜では、粘土部での従来機と自重低減機の差が大きい。これは軟弱な粘土層では打撃装置自重が大きい従来機 (177.5kg) は自沈傾向が強まり、 N_d 値が過小に得られるためである。また、手動式の Ramda と自重低減機はほぼ一致している。粘土部で N 値が未測定であるが、おそらく N 値はかなり小さい(従来機よりも)と推定される。

図(6)の守山市水保は砂質土主体の地盤で、従来機と自重低減機及び SRS-O、Ramda の差は小さく、 N 値とほぼ一致しているが、粘性土部で自重低減機の N_d 値が若干大きい。

図(7)の大阪市鶴町では、深度 9m までは 3 者に大きな差はないが、深度 9m 以深の沖積粘土層では図(5)の守山市今浜と同様に、自重低減機の N_d 値は従来機よりも大きい。また、 N 値は従来機の N_d 値よりもさらに小さい。これは中空の SPT サンプラーでは単位面積当たりの自重応力が大きいためと考えられる(詳細は後述する)。

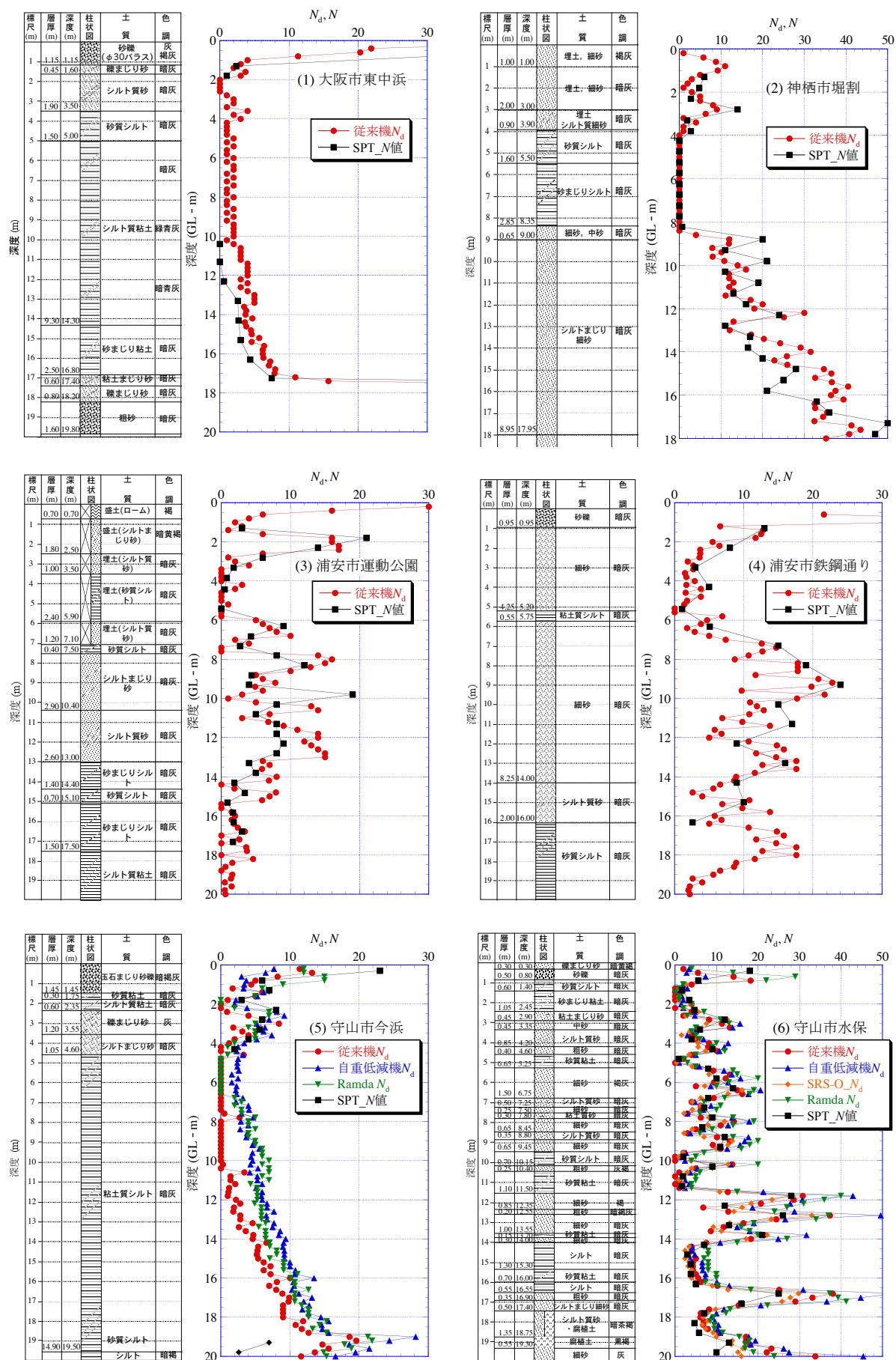
図(8)の浦安市港では、深度 2～4.5m の粘性土(浚渫粘土)では 3 者ともに自沈、深度 5.5～16.0m の砂層では自重低減機の N_d 値の方が少し大きい、大差はない。しかし、深度 16m 以深の沖積粘土層ではやはり自重低減機の方が大きい。 N 値が砂層部で全体に小さい傾向が見られるのは調査地点の違い(5～6m 離れ)と考えられる。図には SPT サンプラーのシュウを中実のソリッドコーン(外径 51mm、先端角 90°、写真-3.5.1 参照)に変えた試験も行ったが、エネルギー補正をした N'_{sc} は N_d 値とほぼ整合している(詳細は後述する)。

図(9)の唐津市原では、全体に砂質土地盤であるが、3 者の N_d 値及び N 値はよく一致している。

図(10)の唐津市岸山では、3 者の N_d 値及び N 値に大きな違いはない。ただし、この地点は砂質粘土による盛土地盤なので、調査地点による違いが大きかった(深度 7m 以深は固結した地盤であった)。

図(11)の香取市地点 1 も全体に砂質土地盤であり、従来機と自重低減機及び Ramda の N_d 値はほぼ一致しているが、深度 14m 以深では自重低減機の N_d 値の方が少し大きい。なお、本地点では SPT は未実施である。

図(12)の香取市地点 2 も全体に砂質土地盤であり、従来機と自重低減機及び SRS-O、Ramda の差は小さく、 N 値ともほぼ一致しているが、やや自重低減機の N_d 値が大きいこと、深度 13m 以深で Ramda がかなり大きい。これは本地点の調査範囲が広いため、地盤の不均一性の影響が現れたとも考えられる。



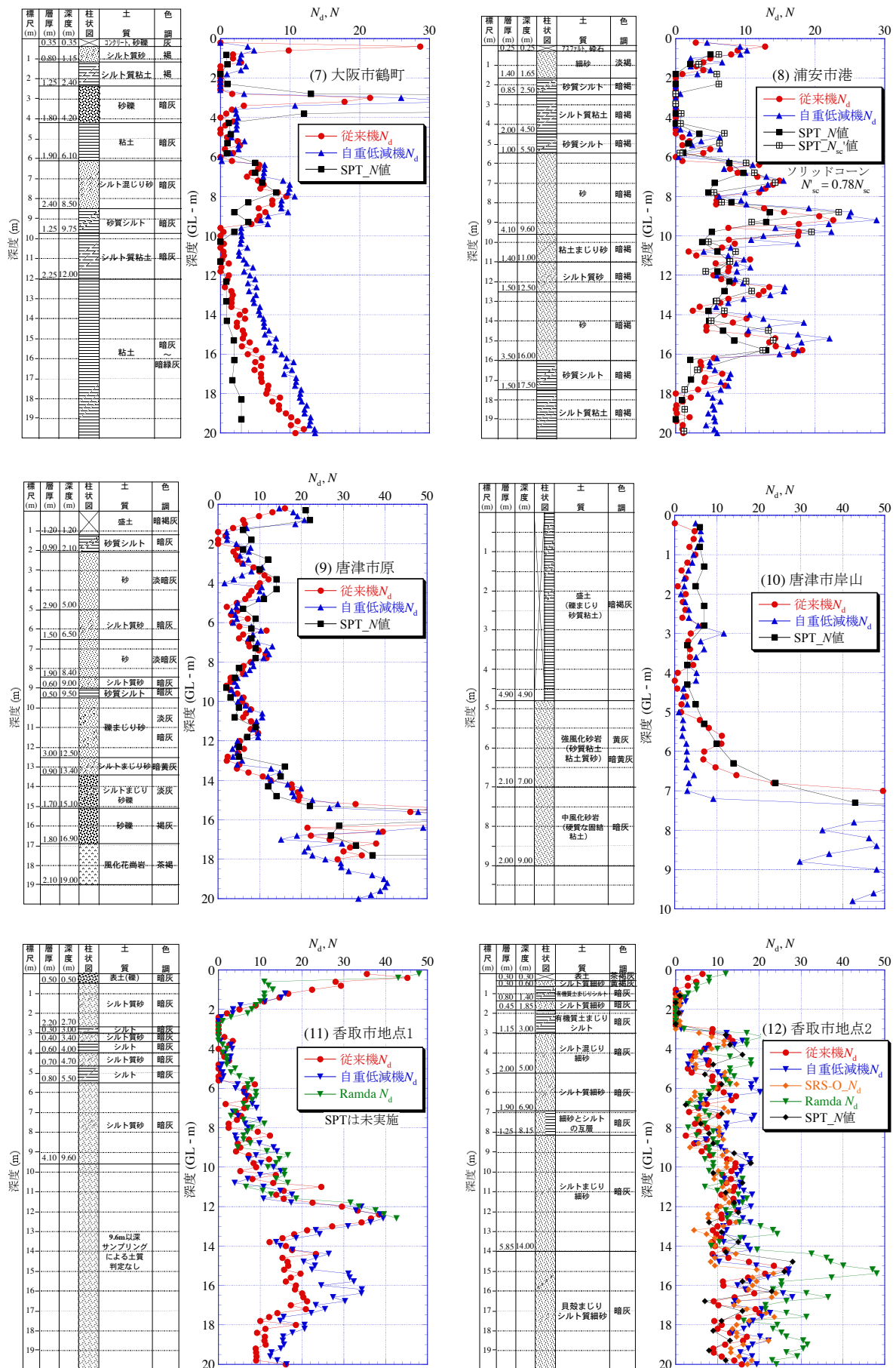


図-3.5.1 SRS の N_d 値と SPT の N 値の比較 (つづき)

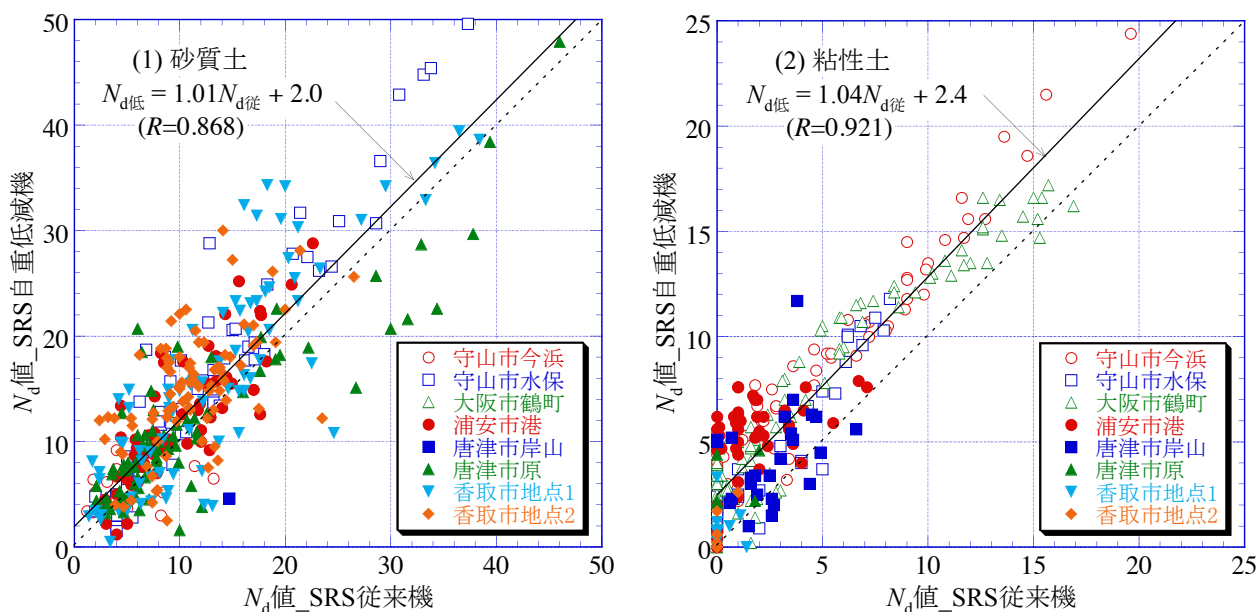


図-3.5.2 土質別の SRS 従来機と自重低減機の N_d 値の関係

(2) SRS 従来機と自重低減機の N_d 値の関係

図-3.5.2(1)、(2)に8地点のそれぞれ砂質土、粘性土ごとの SRS 従来機と自重低減機の N_d 値の関係を示す。従来機の N_d 値は過小で、砂質土、粘性土ともに従来機に対して自重低減機の N_d 値は全体に2~3 回程度大きくなる。しかし、砂質土に比べて粘性土の N_d 値は小さいので、相対的に自重低減による N_d 値増加の割合は粘性土の方が大きいと言える。特に従来機の $N_d=0$ (自沈) 付近で自重低減機の N_d 値が大きくなることがわかる。これは先に述べたように、軟弱な沖積粘土層では打撃装置自重が大きい従来機は自沈傾向が強まり、 N_d 値が過小に得られるためである。

以上より、SRS における打撃装置自重の影響は砂質土地盤では小さいが、粘性土地盤で大きく、特に軟弱な沖積粘土層に対する従来機による調査では地盤強度を過小評価する可能性が高いと言える。既に地盤工学会の動的コーン貫入試験の新規基準では、大型の打撃装置の最大総質量を 115kg と規定しているので、今後は自重低減機が標準的な試験機となる予定にある。

(3) SRS の N_d 値と SPT の N 値の相関性

図-3.5.3(1)、(2)にそれぞれ砂質土と粘性土ごとの 17 地点 (過去の調査データも含む) の従来機 N_d 値と N 値の関係を示す。図は N 値が測定されたほぼ同深度の N_d 値を読み取って作成している。図中には回帰式も示したが、砂質土では $N_d \approx N$ となるが、粘性土では $N_d > N$ (約2.5倍) となる。

図-3.5.4(1)、(2)にそれぞれ砂質土と粘性土ごとの7地点の自重低減機 N_d 値と N 値の関係を示す。砂質土では自重低減の影響は小さいので、やはり $N_d \approx N$ となる。粘性土では自重低減の影響が大きく $N_d > N$ となるが、ややばらつきが大きく回帰式の精度は悪い (今後のデータの蓄積が必要)。

ここで、土質によって N_d 値と N 値の関係が異なる理由を考察する。中実コーンである SRS と中空サンプラーである SPT では貫入メカニズムが異なることを考える必要がある。表-3.5.1 に SRS と SPT の打撃仕様をまとめた (付録の表-A1.1 から抜粋)。SPT は軟らかい粘性土では非閉塞で、密な砂礫質土では閉塞状態で貫入する (砂質土ではその中間) と想定できる。表-3.5.1 に示した SPT で非閉塞、閉塞とした場合の単位面積・単位貫入量当たりの SRS 基準の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、軟らかい粘性土では $N_d > N$ に、密な砂礫

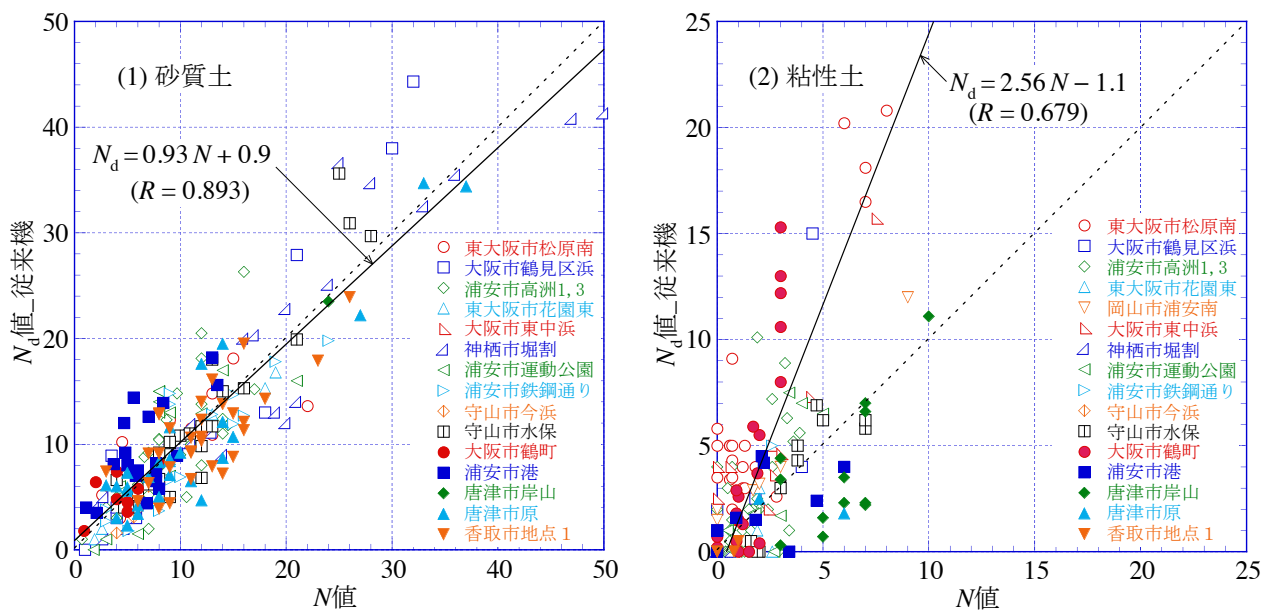


図-3.5.3 17地点の従来機 N_d 値と N 値の関係

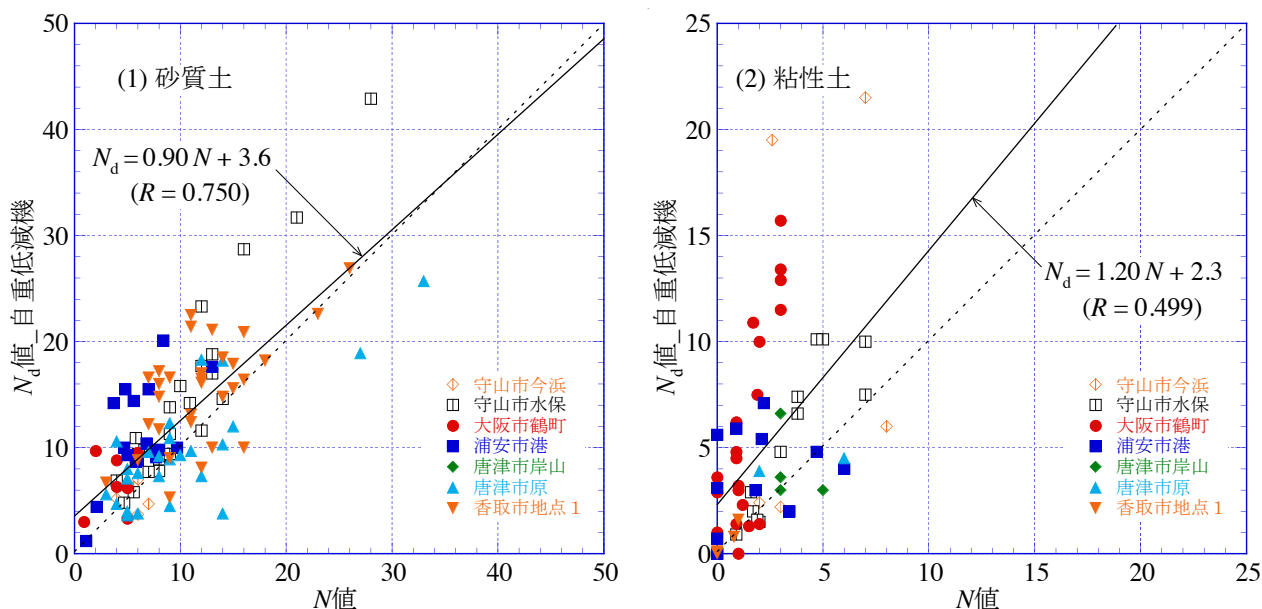


図-3.5.4 7地点の自重低減機 N_d 値と N 値の関係

表-3.5.1 SRS と SPT の打撃仕様の比較

試験名	SRS	SPT	
ハンマー質量 m (kg)	63.5	63.5	
落下高 H (mm)	500	750	
コーン先端角 (°)	90	非閉塞*1	閉塞*2
コーン直径 D_c (mm)	45	外径 51-内径 35	外径 51
コーン断面積 A ($\times 10^{-4} \text{ m}^2$)	15.9	10.8	20.4
ロッド直径 D_r (mm)	32	40.5	
トルクによる周面摩擦補正係数 β	0.040	-	
打撃回数測定 of 貫入量 P (m)	0.20	0.30	0.30
単位面積・単位貫入量当たりのエネルギー $E = mgH/A/P$ (kJ/m ² /m)	979.2	1442.0	763.4
SRS 基準 of エネルギー補正係数 α	1.00	1.47	0.78

*1: SPT サンプラー先端シュウが閉塞せずに土が内部に入る状態

*2: SPT サンプラー先端シュウが完全に閉塞した状態

質土層では $N_d < N$ 、砂質土では $N_d \doteq N$ となると考えられ、先の傾向が説明できる。図-3.5.1(8)の浦安港でのソリッドコーン（写真-3.5.1 参照）の N'_{sc} は閉塞となる $\alpha=0.78$ でエネルギー補正したもので、 N_d 値と整合することから、上記の内容が証明される。なお、単位面積・単位貫入量当たりのエネルギーの補正の詳細は付録 A1 を参照されたい。

以上より、SRS の N_d 値と SPT の N 値の関係は土質（砂質土と粘性土）で変わると考えられ、砂質土では $N_d \doteq N$ の関係が成立するが、粘性土では $N_d > N$ となると言える。



写真-3.4.1 ソリッドコーン

3.5.2 SRS の N_d 値と一軸圧縮強さ q_u 値との相関性

(1) SRS の N_d 値と q_u 値の比較

図-3.5.5(1)～(5)にそれぞれ粘性土主体の5地点における SRS の N_d 値と一軸圧縮強さ q_u 値の比較を柱状図とともに示す。なお、SRS は複数の試験を実施しているが、再現性がよいので、代表となる方を選んで比較している。また、図(1)～(2)の SRS は従来機（SRS-Y1）のみで、図(3)～(5)の SRS は従来機（SRS-Y1）と自重低減機（SRS-Y2、SRS-Y3）で比較している。

図(1)の東中浜では、深度 3.5m 以深が沖積粘土層であるが、 q_u 値は深度方向に単調に増加しているが、従来機の N_d 値は深度 4～10m まではほぼ一定（1～2）で、10m 以深で増加傾向が見られる。これは打撃装置自重が大きい従来機（177.5kg）は自沈傾向が強まり、 N_d 値が過小に得られるためと考えられる。

図(2)の鉄鋼通りでは、深度 16m 以深が沖積粘土層で、40m まで SRS 従来機を実施した。 N_d 値、 q_u 値ともに深度方向に単調に増加しているが、深度 30m 以上は SRS の適用深度を超えていると考えられる。

図(3)、(4)の守山市今浜、大阪市鶴町の傾向は同じで、沖積粘土層で自重低減機の N_d 値と q_u 値は深度方向に相似的に増加している。従来機では N_d 値=0（自沈）も示し、 q_u 値の傾向と異なる。これは打撃装置の自重が大きい試験機の影響である。

図(5)の浦安市港では、深度 16m 以深が沖積粘土層で、深度 16～24m の範囲では自重低減機の N_d 値と q_u 値は深度方向の変化は小さい。

(2) SRS の N_d 値と q_u 値の相関性

図-3.5.6 に 12 地点の従来機 N_d 値と q_u 値の関係を示す。図は q_u 値が測定されたほぼ同深度の N_d 値を読み取って作成している。ややバラツキがあるが、両者に相関性が認められる。ただし、回帰式の切片は $N_d=0$ 、すなわち自沈するときの q_u であり、打撃装置自重が大きい従来機では大きくなることが想定される。

図-3.5.7 に 3 地点の自重低減機 N_d 値と q_u 値の関係を示す。図-3.5.6 の従来機に比べて全体に N_d 値が大きくなるので、同じ N_d 値に対する q_u 値は小さい。やはり回帰式の切片は従来機よりも小さい。回帰式を用いて N_d 値から q_u （あるいは非排水せん断強さ $s_u=q_u/2$ ）を推定することが可能である。ただし、まだ 3 地点の結果であり、今後のデータの蓄積が必要である。

以上より、粘性土では N_d 値と q_u 値の相関性が高く、 N_d 値から非排水せん断強さを推定することが可能と考えられる。

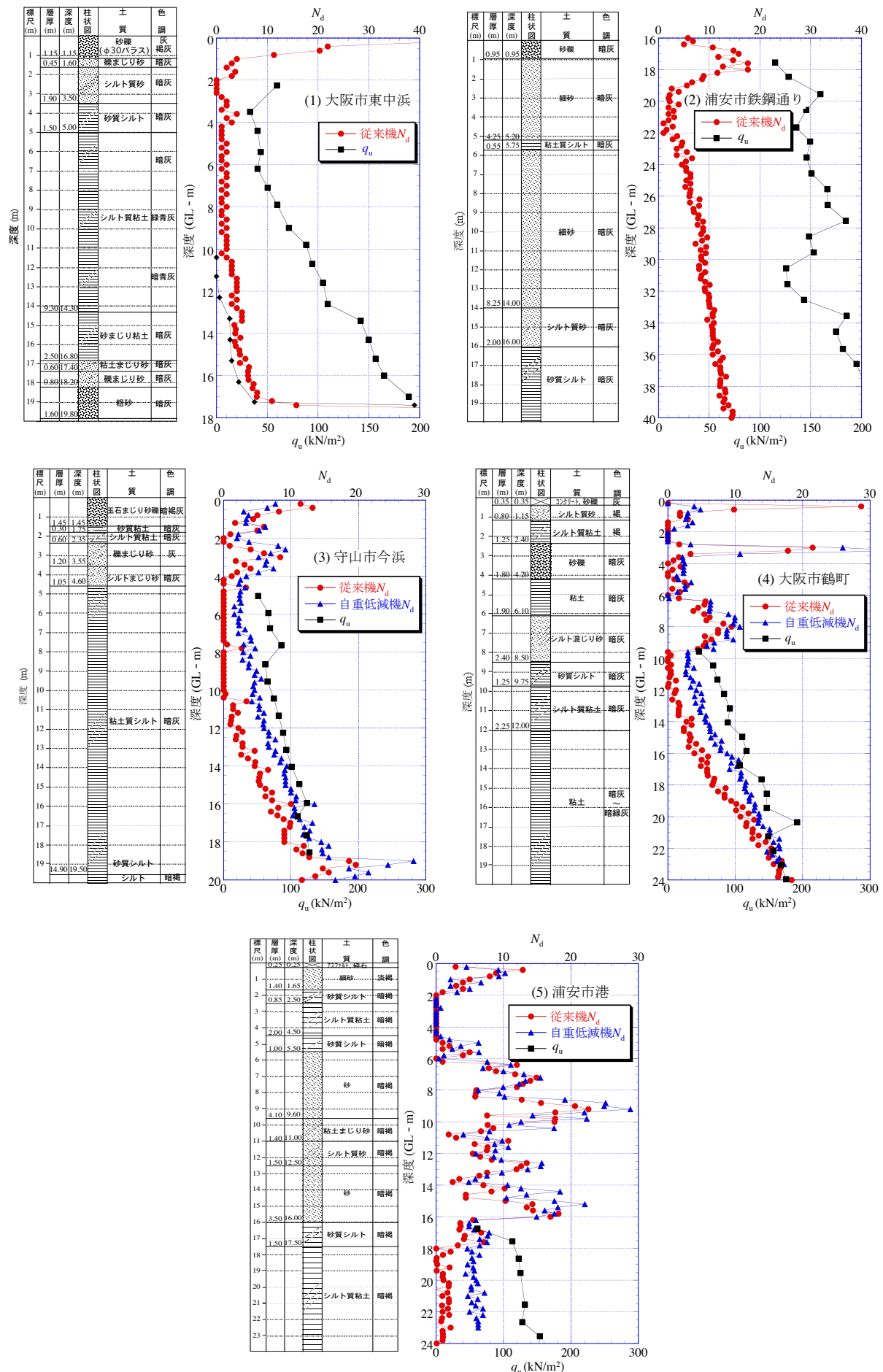


図-3.5.5 SRS の N_d 値と q_u 値の比較

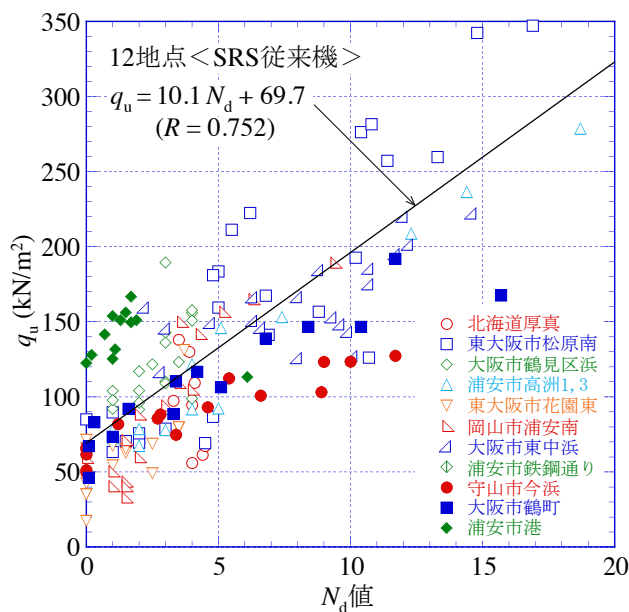


図-3.5.6 12地点の従来機 N_d 値と q_u 値の関係

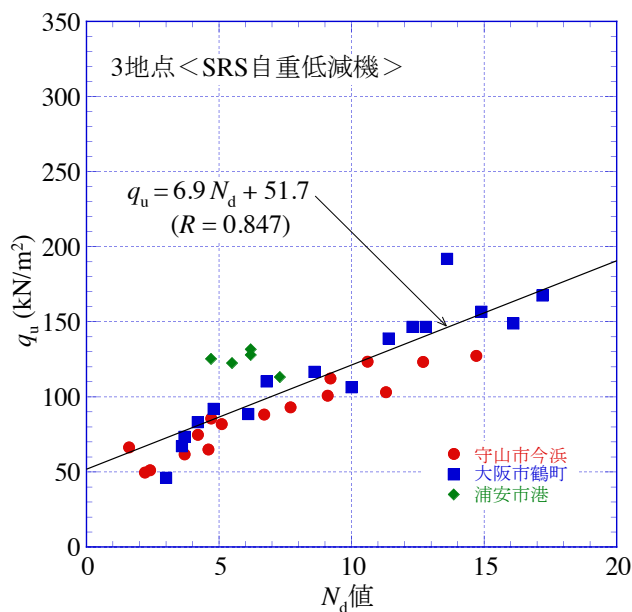


図-3.5.7 3地点の自重低減機 N_d 値と q_u 値の関係

3.5.3 MRS と SRS の比較

(1) MRS と SRS の N_d 値の比較

図-3.5.8(1)～(12)にそれぞれ10地点におけるMRSとSRSの N_d 値の比較を柱状図とともに示す。MRSは式(3.3.1)の新補正と式(3.3.2)の従来補正による N_d' 値を示し、SRSは図(1)～(4)では従来機(SRS-Y1)のみで、図(5)～(10)のSRSは従来機(SRS-Y1)と自重低減機(SRS-Y2、SRS-Y3)で比較している。なお、3.4.1(2)で述べたようにSRS従来機の N_d 値は自重低減機よりも小さめの値(特に粘性土)となることがわかっている。さらに比較のため、標準貫入試験(SPT)による N 値も示す(ただし、図(9)の香取市地点1ではSPTを実施していない)。なお、MRSとSRSは複数の試験を実施しているが、再現性がよいので、代表となる方を選んで比較している。

図(1)の粘性土主体の大阪市東中浜では、SRS従来機の N_d 値や N 値に比べて全体に新補正 N_d' 値が大きい、従来補正は特に10m以深で過小となっている。これは3.3.2(1)で述べたようにトルクによる補正が過大のためと考えられる。

図(2)の神栖市堀割では、粘土層、砂層ともに4者の結果はほぼ一致しており、MRSの新補正と従来補正の違いは小さい(トルクが小さいためである)が、ただし、深度4～8mの粘土部では従来補正の N_d 値が負値となるケースがあった。

図(3)、(4)の浦安市運動公園、鉄鋼通りでも、4者の結果はほぼ一致しているが、14、16m以深の粘土層で新補正が従来補正よりも大きい。

図(5)の粘性土主体の守山市今浜では、MRSの従来補正 N_d' 値はSRS従来機の N_d 値よりも小さく、深度4～12mでは N_d 値の半数以上が負値となり、式(3.3.1)による周面摩擦の補正は過大と考えられる。一方、新補正 N_d' 値はSRS自重低減機の N_d 値とほぼ一致し、深度方向に単調増加している。

図(6)の砂質土主体の守山市今浜では、5者の結果はほぼ一致しているが、深度11m、15m、18m前後の粘性土部では従来補正 N_d' 値は小さく、新補正 N_d' 値はSRS自重低減機の N_d 値に近い。

図(7)の粘性土主体の大阪市鶴町では、深度8.5mまでは大差ないが、8.5m以深の粘土層部でやはり従来補正 N_d' 値は小さく(SRS従来機の N_d 値に一致)、新補正 N_d' 値はSRS自重低減機の N_d 値にほぼ一致し、深度方向に単調増加している。

図(8)の浦安市港では、深度 5.5～16m の砂層部では 5 者はほぼ一致しているが、16m 以深の粘土層部では新補正が従来補正よりも大きい。

図(9)の砂質土主体の香取市地点 1 では、深度 12m までは 5 者はほぼ一致しているが、12m 以深では新補正がやや大きい。

図(10)の砂質土主体の香取市地点 2 では、深度 14m までは従来補正がやや小さいものの 5 者はほぼ一致しているが、14m 以深では新補正がやや大きい。

(2) MRS と SRS の N_d 値の相関性

図-3.5.9(1)、(2)に 13 地点（過去の調査データも含む）のそれぞれ MRS 従来補正、新補正と SRS 従来機の N_d 値の相関を示す。若干のばらつきはあるが、従来補正の N_d 値は SRS 従来機と整合し、新補正ではやや大きめの N_d 値を与えている。したがって、菅原^りによる SRS に合うように決められた補正方法の妥当性がうかがえる（ただし、この補正方法は必ずしも打撃装置自重が大きい試験機を用いて求められたわけではない）。

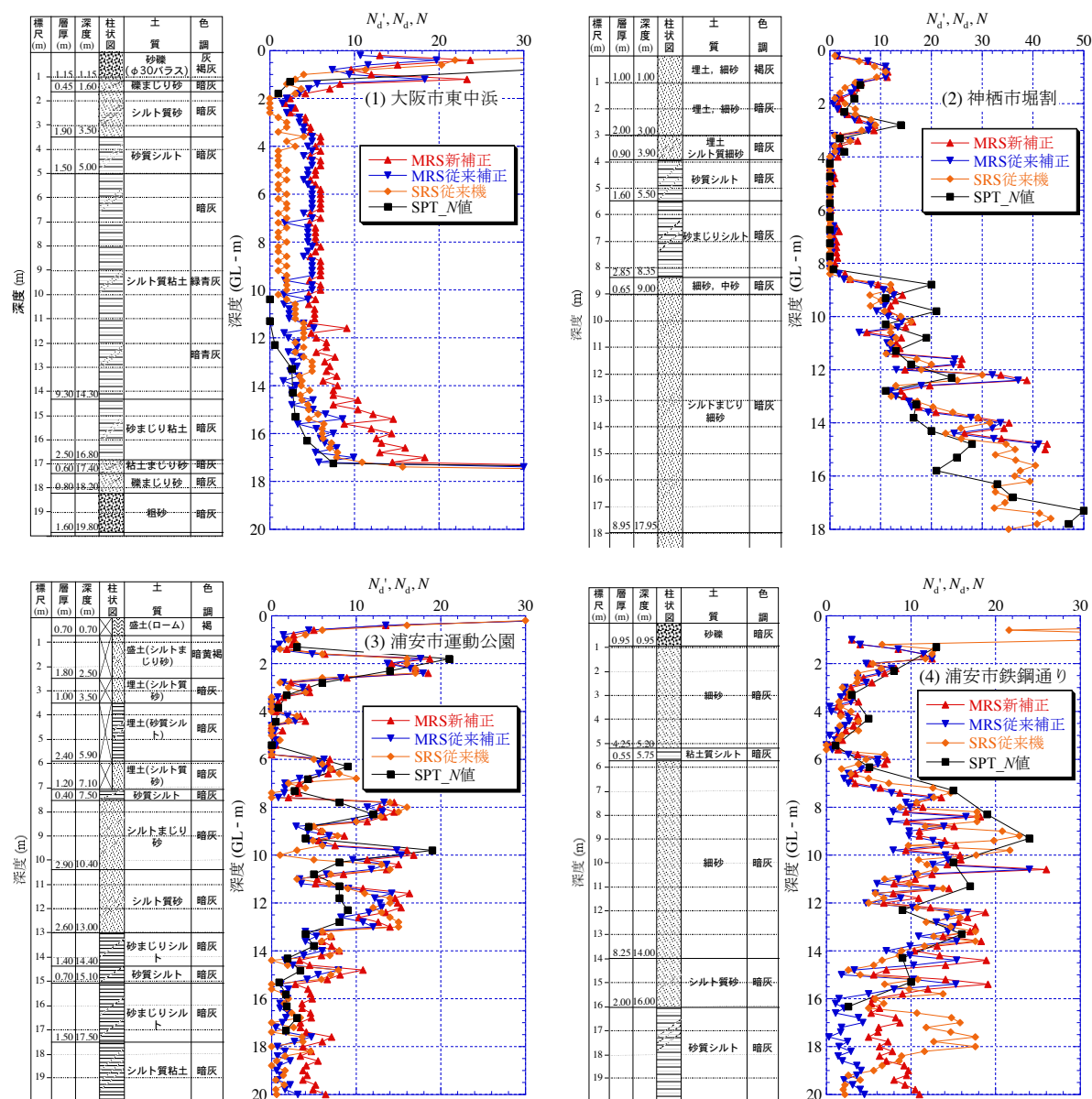


図-3.5.8 MRS と SRS の N_d 値の比較 (つづく)

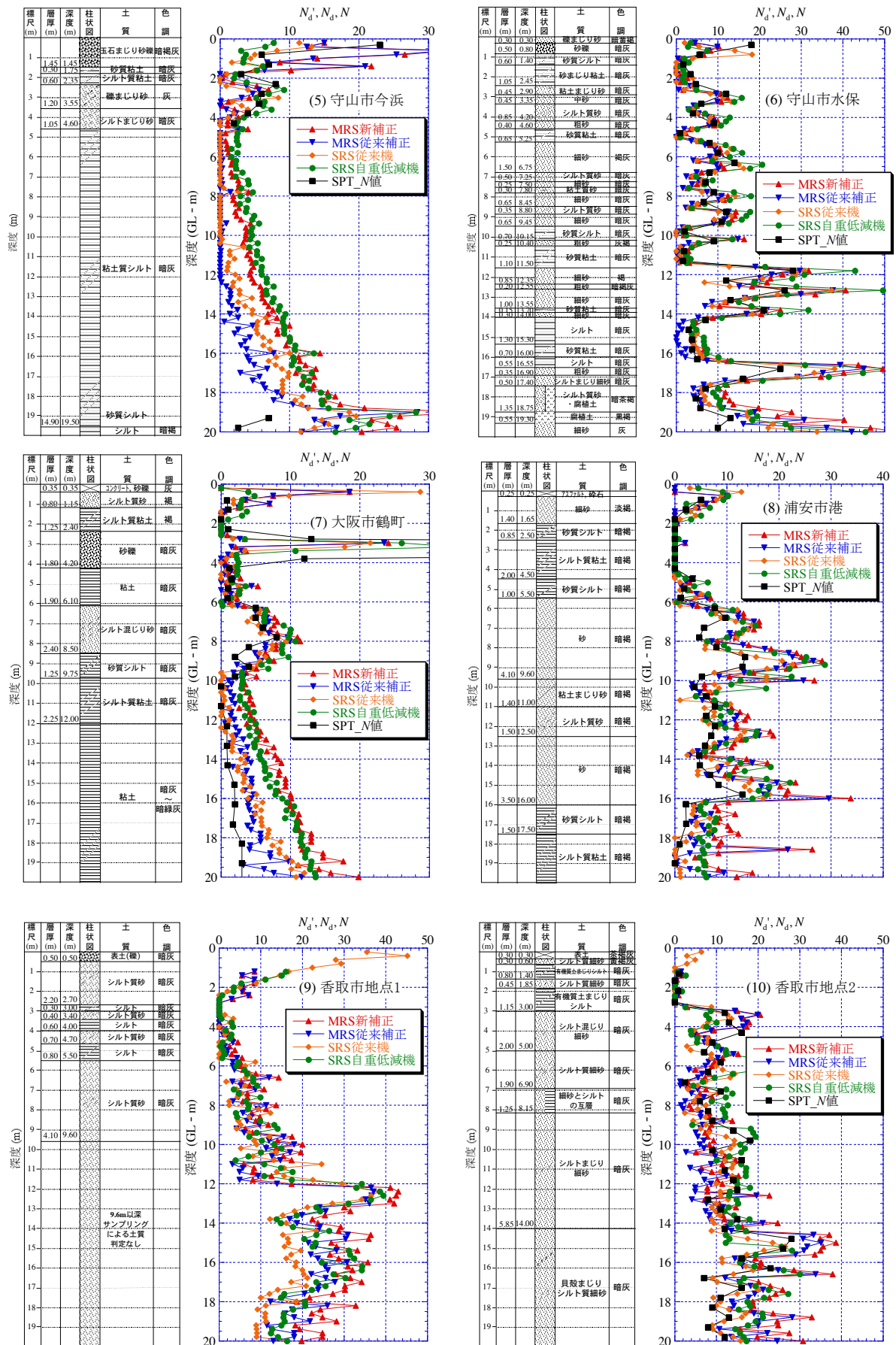


図-3.5.8 MRS と SRS の N_d 値の比較 (つづき)

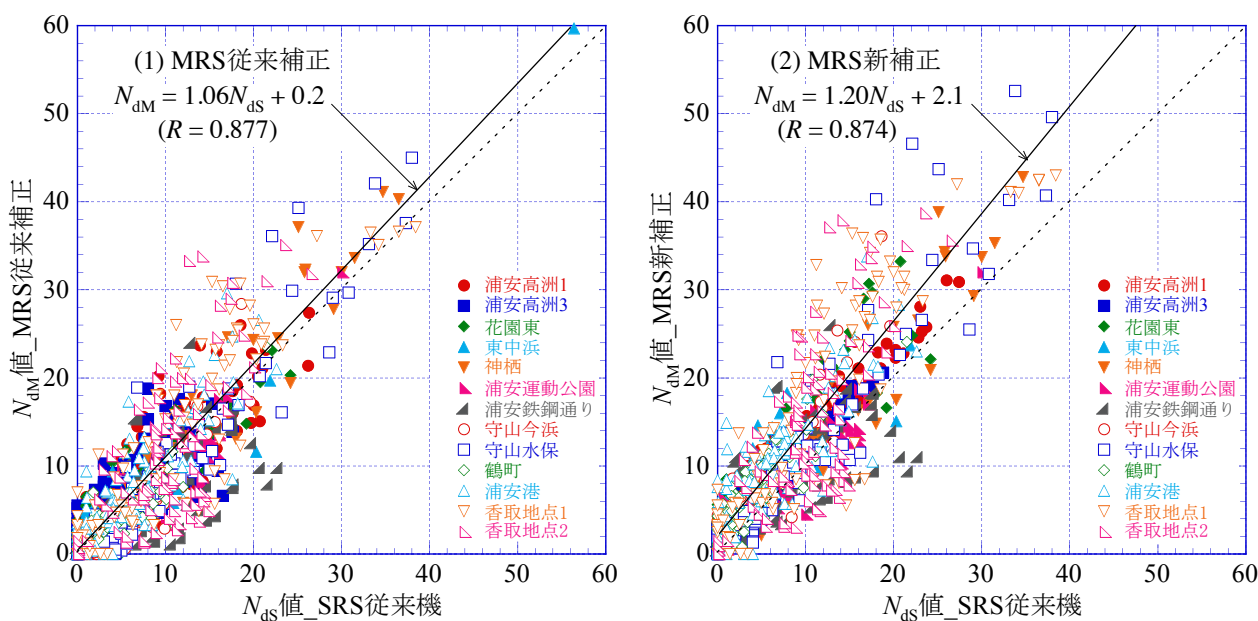


図-3.5.9 13 地点の MRS (従来補正と新補正) と SRS 従来機の N_d 値の相関

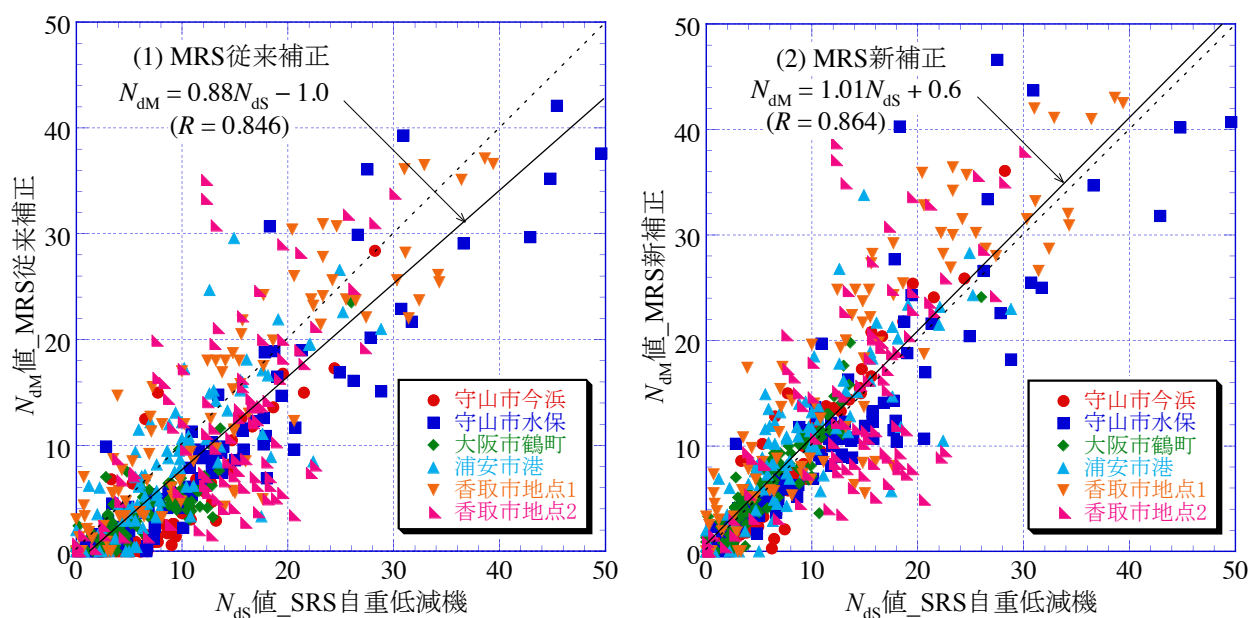


図-3.5.10 6 地点の MRS (従来補正と新補正) と SRS 自重低減機の N_d 値の相関

次に、図-3.5.10(1)、(2)に6地点のそれぞれ MRS 従来補正、新補正と SRS 自重低減機の N_d 値の相関を示す。図-3.5.9 とは逆に、新補正の N_d 値は SRS 自重低減機と整合し、従来補正ではやや小さめの N_d 値を与えている。自重低減機との比較からは、やはり式(3.3.1)の従来補正による周面摩擦の補正量は過大と言える。

以上より、MRS に対する従来補正、新補正は SRS の従来機と自重低減機で対応関係が逆となった。しかし今後、SRS は自重低減機が標準的な試験機となるので、MRS の補正方法は式(3.3.2)によるのが妥当であると言える。

参考文献

- 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.

3.6 まとめ

第3章では、液状化判定可能な動的コーン貫入試験の開発のために、9地点・12箇所で行った現場実験を行い、地盤強度の高精度化と土質判定手法を検討した。その結果は以下のようにまとめられる。

- 1) 大型動的コーン貫入試験（SRS）は、全自動型の従来機、自重低減機及び半自動型、手動型の試験機による調査を行った。各地点でそれぞれ複数試験を行ったが、いずれもほぼ同じ結果となり、再現性が高いことが確認された。また、従来機は打撃装置自重が過大であるため、自重低減機に比べて N_d 値が過小となり、特に粘性土地盤ではその影響が顕著である。
- 2) 中型動的コーン貫入試験（MRS）は、各地点でそれぞれ複数試験を行ったが、いずれもほぼ同じ結果となり、再現性が高いことが確認された。また、測定打撃回数から周面摩擦とエネルギーの補正を行った補正打撃回数 N_d' を求めるが、その補正方法として従来補正と新補正を比較した。その結果、砂地盤では両者で大差ないが、粘性土地盤では従来補正は周面摩擦の補正量が大きく、 N_d' が過小となることが、新補正では N_d' が単調に増加し、粘土層の強度と整合した。
- 3) ピエゾドライブコーン試験（PDC）を4地点で実施した結果、貫入抵抗 N_d 値は、深度10m付近までは N 値と良く一致した。10m以深はトルクの増加に伴い N 値よりも大きくなるが、 N_d 値の凹凸は N 値に調和的であることから、適宜 N 値とキャリブレーションすることで精度を向上させることは可能と考えられる。トルク補正係数については、理論値よりも経験値を用いた方が N 値に近い値を示した。PDCの細粒分含有率 F_c は、粒度試験と概ね一致したが、砂分を多く混入する砂質シルトでは、 F_c が粒度試験よりも小さめに評価される場合があった。
- 4) その他の動的コーン貫入試験として、小型の Penny、DSPT、DPM 改、PDCPT、SH を実施した。異なる打撃仕様の動的コーン貫入試験でも単位面積・単位貫入量当たりのエネルギーによる補正（付録 A1 の式(A1.10)による）が有効であり、小型動的コーン貫入試験は深度10m程度までの調査に十分適用できる。
- 5) SRS、MRS 試験実施後の試験孔を利用して、通電型水位計によって地下水位を測定し、ボーリングでの孔内水位と比較した結果、測定精度は問題ないと判断できた。ただし、表層付近に不均質な盛土（砂礫材）が厚く存在する場合や自然水位が深い場合には、孔内が閉塞され測定不能となる可能性はあるので、その場合には中空ロッドを挿入し、ロッド内水位を計測するなどの対策が必要と考えられた。
- 6) 土試料の簡易サンプラーとして、SRS 試験用の開閉式の従来型 SP と新型 SP を用いて SPT 試料の細粒分含有率 F_c と比較した。その結果、従来型 SP の機構上の欠点を改良した新型 SP は液状化判定のための土質判定として、精度よく F_c 値を把握できる。一方、MRS 試験用として別孔で削孔する手動式バイブロサンプラーを用いて SPT 試料の F_c と比較した。その結果、深度10m程度までの連続サンプリングが可能であること、液状化判定のための土質判定として、砂質土層に絞りながら粒度試験を実施すればよいことが考えられた。
- 7) SRS 試験でのトルク測定時のコーン周面と地盤の摩擦音を測定してそのスペクトル形状から土質判定（粒度特性）を行うことを試みた。その結果、摩擦音のスペクトル形状（スペクトル幅）から F_c および細粒分の塑性の有無を推定できる可能性を見出した。また、非塑性の土は摩擦音の帯域が狭いが、ピーク周波数は粒径の影響を受けると考えられた。
- 8) 各種動的コーン貫入試験（DCPT）では器具の寸法や質量が異なるため、打撃効率（ハンマーの打撃エネルギーとアンビル直下のロッドの伝達される打撃エネルギーの比率）も異なる可能性が指摘されている。そこで、滋賀県守山市水保の砂質土地盤において、標準貫入試験（SPT）

を含めた各種 DCPT において、ロッドの伝達される打撃エネルギーを測定し、打撃効率を求めた。その結果、SPT と DCPT の打撃効率の平均値は、Penny と SH ($m=3\text{kg}$) を除けば、およそ 60 %を超えること、ハンマーとアンビルの間に挟むクッション（緩衝材）が厚くなると、打撃効率は 20%程度減少すること、測定した打撃エネルギーと一打撃当たりの貫入量を用いて、エネルギー式から算定した動的コーン貫入抵抗は、静的コーン貫入試験コーン貫入抵抗と比較的良好一致を示すこと、したがって動的測定を伴う動的コーン貫入試験は、地盤構成を比較的高い精度で測定できる可能性があること、などが明らかになった。

- 9) 8 地点で SRS 従来機と自重低減機の N_d 値を比較した結果、打撃装置自重の影響は砂質土地盤では小さいが、粘性土地盤で大きく、特に軟弱な沖積粘土層に対する従来機による調査では地盤強度を過小評価する可能性が高いと言える。
- 10) 17 地点（過去の調査データも含む）の従来機 N_d 値と N 値を比較した結果、砂質土では $N_d \approx N$ となるが、粘性土では $N_d > N$ （約 2.5 倍）となった。一方、7 地点の自重低減機 N_d 値と N 値を比較した結果、砂質土ではやはり $N_d \approx N$ となる。粘性土では自重低減の影響が大きく $N_d > N$ となった。土質によって N_d 値と N 値の関係が異なる理由は、中実コーンである SRS と中空サンプラーである SPT の貫入メカニズムの相違から説明することができた。
- 11) 粘性土地盤を対象に 12 地点の従来機 N_d 値と q_u 値を比較した結果、両者に相関性が認められた。ただし、回帰式の切片は $N_d=0$ 、すなわち自沈するときの q_u であり、打撃装置自重が大きい従来機では大きくなることが想定された。一方、3 地点の自重低減機 N_d 値と q_u 値を比較した結果、両者の相関性は高く、やはり回帰式の切片は従来機よりも小さくなった。この回帰式を用いれば、 N_d 値から q_u 値あるいは非排水せん断強さ $s_u=q_u/2$ を推定することが可能と考えられた。
- 12) 13 地点（過去の調査データも含む）の MRS 従来補正、新補正と SRS 従来機の N_d 値を比較した結果、従来補正の N_d 値は SRS 従来機と整合し、新補正ではやや大きめの N_d 値を与えた。一方、6 地点の MRS 従来補正、新補正と SRS 自重低減機の N_d 値を比較した結果、新補正の N_d 値は SRS 自重低減機と整合し、従来補正ではやや小さめの N_d 値を与えた。今後、SRS は自重低減機が標準的な試験機となるので、MRS の補正方法は新補正によるのが妥当と言える。