

動的貫入機構を備えた静的コーン貫入試験による宅地地盤の支持力評価法

利藤 房男・伊藤 義行・菅原 紀明

Method for estimating bearing capacity of housing land using the static cone penetrometer combined with dynamic penetration

Fusao Rito, Yoshiyuki Itoh and Noriaki Sugawara

Abstract

Recently, the weight sounding test (WST) is often used in many sites for estimating bearing capacity of housing land in Japan. In the worldwide, it is considered that there are few countries such as Japan to use WST in so many sites. However WST may not always give so good estimation for bearing capacity of housing land. In stead of WST, the new type static cone penetrometer called "the combination cone (CCPT)" was developed to get more precise estimation of it. This apparatus, which consisted of a mechanical cone with double tube and a dynamic penetration device enhancing penetration capacity of cone, can practice the static cone penetration test at set depths using together with dynamic penetration.

To establish reliability of estimating bearing capacity from CCPT, many field studies compared to the plate loading test and WST were carried out in Kanto district and Kansai district in Japan. From the field studies, good correlation between cone resistance, q_c , and yield load determined from the plate loading test curve, q_y , was obtained. The equation for estimating bearing capacity of housing land was proposed from the result of CCPT. While poor correlation between the number of half turn of WST, N_{sw} , and q_c was shown. And also, some issues in case of estimating the bearing capacity from WST can be pointed out ; (1) in a range of the soft ground with zero half turn of WST, the estimation of bearing capacity is not reliable ;(2)effect of its rod skin friction on N_{sw} is not negligible, then increasing N_{sw} with increasing depth of penetration. CCPT can get solution for the issues mentioned above.

Key words: bearing capacity of housing land, static cone penetration test, weight sounding test, plate loading test

(要 旨)

最近、宅地地盤の支持力を評価するために、スウェーデン式サウンディングが日本国内で数多く使用されている。国際的に見ると、これほど多くの現場でスウェーデン式サウンディングが使用されている国は、日本以外にはないと考えられる。しかしながら、スウェーデン式サウンディングでは、宅地地盤の支持力評価が必ずしも適切に行われているとはいえない。宅地地盤支持力のより適切な評価のために、スウェーデン式サウンディングに代わる新しいタイプの静的コーン貫入試験機(コンビネーションコーン貫入試験機)を開発した。本試験機は、コーン貫入力を増すための動的貫入機構を有する二重管の機械式コーンで、動的貫入を行いながら所定の深度ごとに静的コーン貫入試験を実施することが可能である。

コンビネーションコーン貫入試験結果から信頼性の高い支持力評価法を確立するために、関東および関西地区の数多くの現場において、平板載荷試験やスウェーデン式サウンディングとの現地比較実験を実施した。これらの実験結果より、平板載荷試験の降伏圧力 q_y とコーン貫入抵抗 q_c に良好な相関関係が得られた。これらの結果を基に、コンビネーションコーン貫入試験より地盤支持力を求める算定式を提案した。一方、スウェーデン式サウンディングの半回転数 N_{sw} と q_c 値は良好な相関が得られず、スウェーデン式サウンディングから地盤の支持力を算定する際の幾つかの問題点を確認した。まず、スウェーデン式サウンディングの半回転数 $N_{sw}=0$ の範囲(おもりによる自沈)の軟弱地盤では、スウェーデン式サウンディングからの支持力評価の信頼性は乏しい。また、半回転数 N_{sw} に対するロッド周面摩擦の影響を無視できないため、貫入深度が増すにつれ N_{sw} は大きくなることもある。コンビネーションコーン貫入試験では、このような問題はすべて解決できている。

キーワード: 宅地地盤の支持力, 静的コーン貫入試験, スウェーデン式サウンディング, 平板載荷試験

1. まえがき

最近、日本国内においては、宅地地盤の支持力を把握するために、スウェーデン式サウンディングが数多く実施されている。スウェーデン式サウンディングは、最近では自動化が進むなど簡便で効率的な試験方法である。しかしながら、試験結果を圧密沈下量や液状化の判定にまで用いるといった、試験からは本来得られない情報まで拡大して利用している状況が見受けられる¹⁾。また、粘性土地盤でロッド周面摩擦を無視できない地盤やおもりによる自沈を生じるような軟弱地盤では、スウェーデン式サウンディング試験結果の精度自体に問題を含んでいる場合がある²⁾。これに対して、三成分コーン貫入試験は、試験の精度が高く、国内外で実績が積み重ねられている信頼性の高い調査方法である³⁾。しかしながら、貫入能力や間隙水圧測定などの試験方法の煩雑さの面で、宅地地盤の支持力調査方法としては適した方法であるとはいえない。

このような背景のもとで、効率的で精度の高い宅地地盤の支持力調査を目的とする、動的コーン貫入機構を組込むことで貫入能力を向上させた静的コーン貫入試験機（以下、「コンビネーションコーン貫入試験機」と称する）を開発した。本試験機の用途は、主に不飽和状態の宅地盛土地盤を対象に、地盤の支持力をコーン貫入抵抗値 q_c で評価することとし、間隙水圧測定機能は付けずに作業の効率化をはかった。開発した試験機の宅地地盤支持力調査法としての有効性を確認するために、スウェーデン式サウンディング、三成分コーン貫入試験および平板載荷試験との比較実験を行った。

機」と称する)を開発した。本試験機の用途は、主に不飽和状態の宅地盛土地盤を対象に、地盤の支持力をコーン貫入抵抗値 q_c で評価することとし、間隙水圧測定機能は付けずに作業の効率化をはかった。開発した試験機の宅地地盤支持力調査法としての有効性を確認するために、スウェーデン式サウンディング、三成分コーン貫入試験および平板載荷試験との比較実験を行った。

2. コンビネーションコーン貫入試験機の開発経緯と特徴

1991年度に宅地地盤の支持力評価法の精度向上を目的として、図-1に示すコンビネーションコーンを開発した⁴⁾。この試験機の貫入機構は、二重管式になっているロッドの外管を図-1の⑨に示すハンマー（荷重100N、落下高さ0.2m）により貫入を進めつつ、所定の深度ごと（深度0.1mごと）に③の圧入ハンドルで内管を押すことで静的コーンを貫入させ、④のブルーピングリングでコーン貫入抵抗を測定するものである。試験時の静的コーン貫入と動的貫入の具体的な手

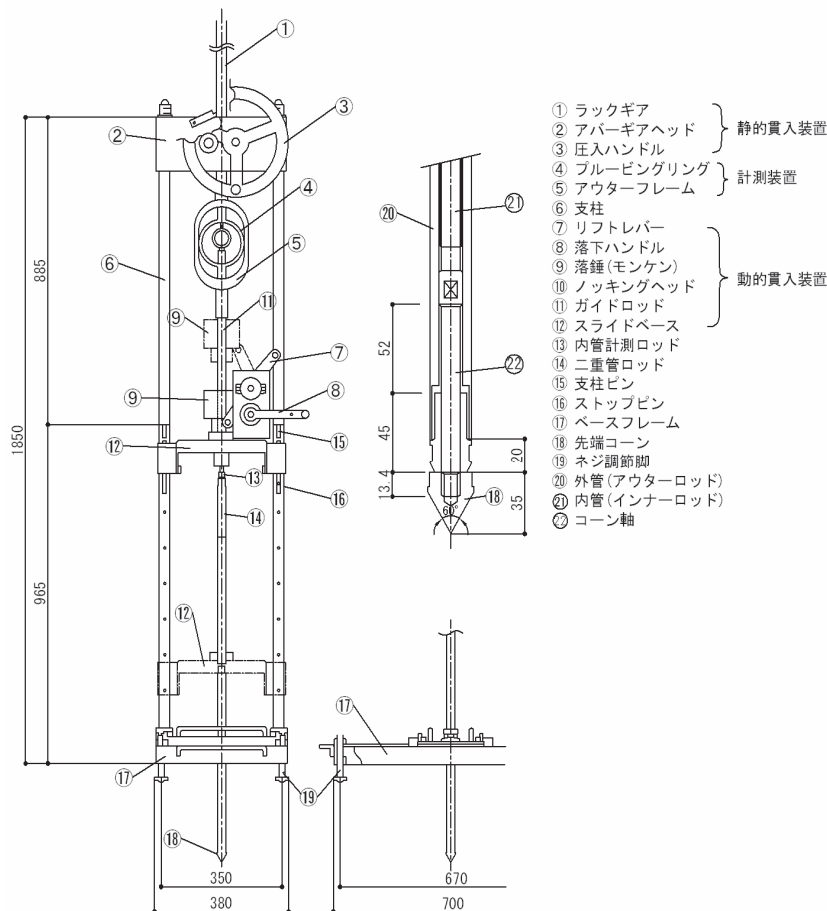


図-1 新コンビネーションコーンの構造 (1991年度開発) : 単位 mm

Fig. 1 Structure of the new combination cone penetration test equipment (developed in 1991). (unit : mm)

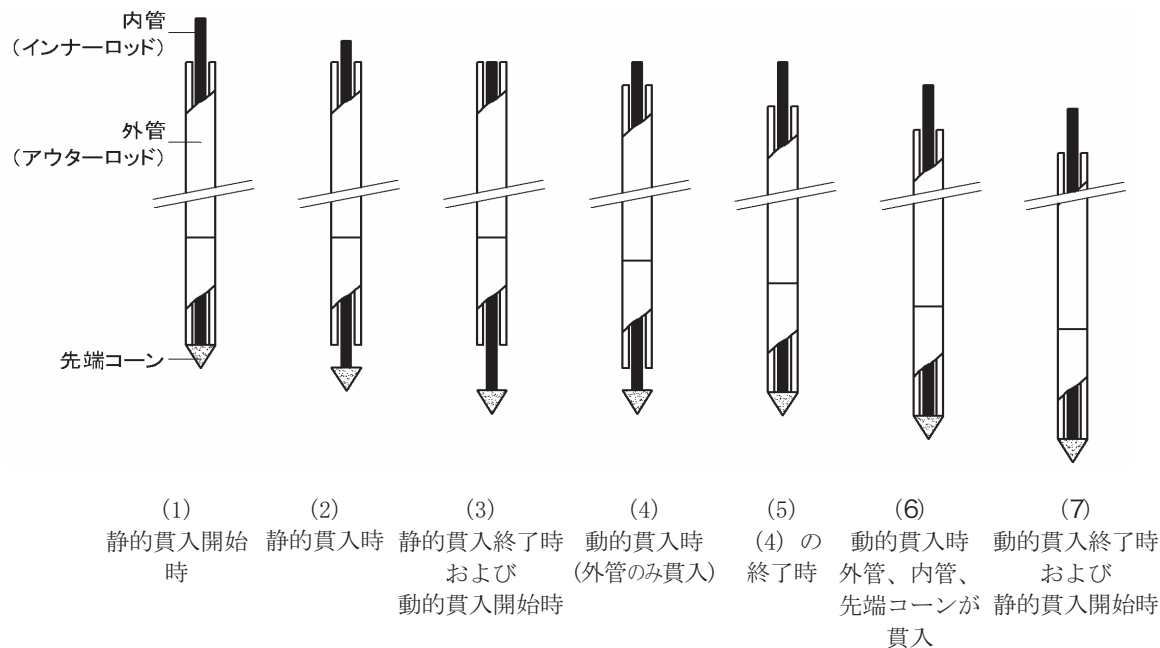


図-2 新コンビネーションコーンの貫入手順

Fig. 2 Penetrating procedure of the new combination cone penetration test equipment.

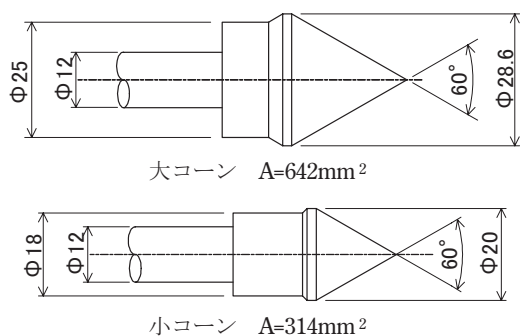


図-3 先端コーンの構造

Fig. 3 Structure of the end of the cone.

順は、図-2に示した。静的コーンは、コーン先端角60°、断面積は642mm²と314mm²の2種類とし、地盤の硬軟により使い分けることとした(図-3参照)。

2005年度には、コンビネーションコーンをより発展させ、静的のみの貫入、動的のみの貫入、静的と動的を組み合わせた3パターンの貫入が可能で、貫入作業およびデータ収録を自動化するとともに、地点間の移動を自走できる新コンビネーションコーンを開発した⁵⁾。新試験機の構造を図-4に、仕様を表-1に、試験実施時の外観を写真-1に示すが、動的貫入時のハンマー荷重を300N、落下高さ0.5mとすることで、旧コンビネーションコーンに比べて貫入エネルギーを格段に高くした。また、この試験機は、試験機の総荷重が5kN、全幅0.65m、運搬時には貫入部のマストを油圧操作により折りたたむことで高さが1.10mに収められるので、狭い場所あるいは上空制限のある場所での運搬性能に優れている。試験実施時にはマストを鉛直に



写真-1 試験実施状況

Photo. 1 View of conducting the combination cone penetrating test.

立上げ固定することで貫入作業を実施する。試験データの収録は、図-5に示す液晶タッチパネルからの操作で制御し、データはCFカードに記録させる。データはCSV形式で、エクセル等の汎用ソフトで読み込み、編集が可能である。

新コンビネーションコーンでは、まず対象とする地

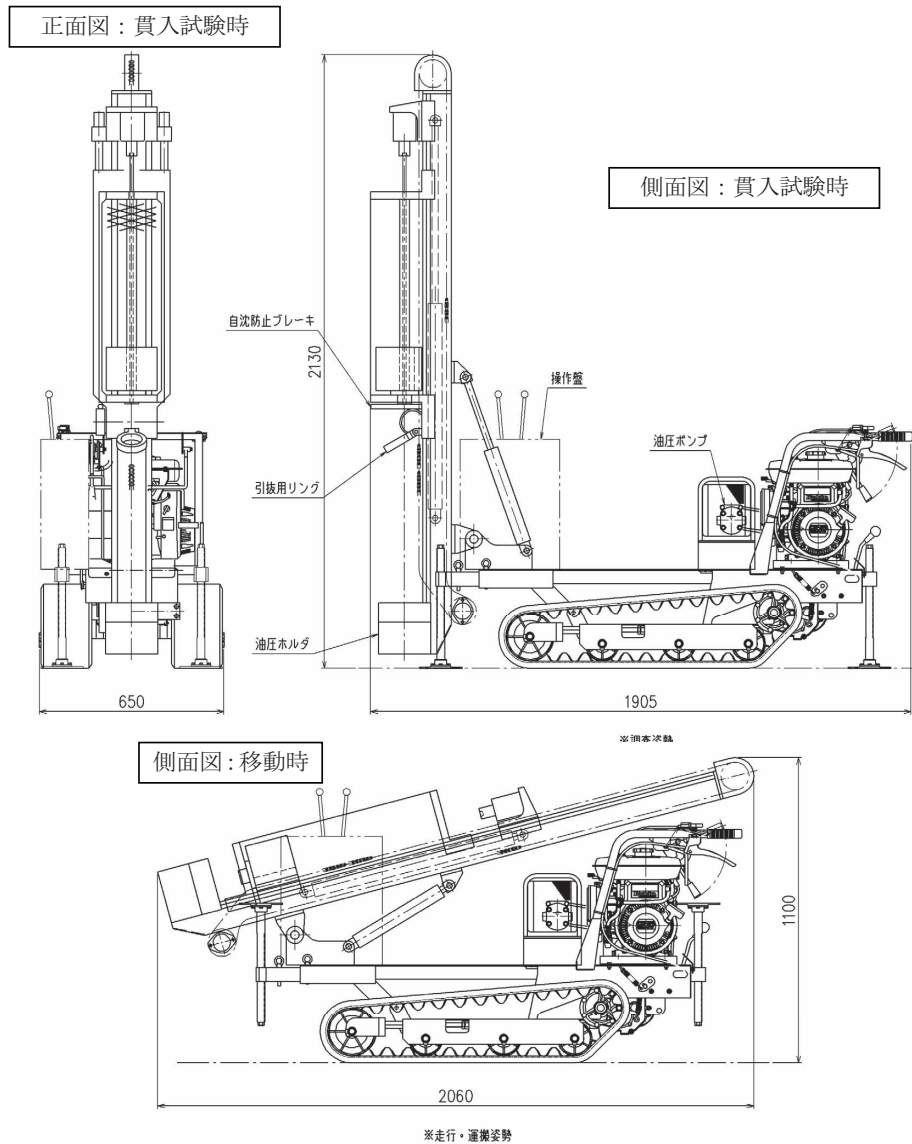


図-4 新コンビネーションコーンの構造 (2005年度開発 単位: mm)

Fig. 4 Structure of the new combination cone penetration test equipment (developed in 2005). (unit : mm)

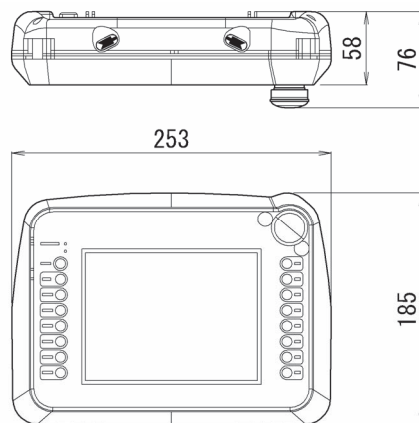


図-5 データ収録装置 (単位: mm)

Fig. 5 Data recording system. (unit : mm)

盤により貫入パターンを設定する。つまり、軟弱地盤に対しては静的コーンのみの連続貫入で計画し、軟弱層とやや締まった層が互層をなすと予想される場合には、動的コーンで貫入を進め所定の深度で静的コーン貫入試験を行うというコンビネーションコーンの機能を利用する。これらの試験では、地盤の支持力評価はコーン貫入抵抗値 q_c で行うこととなる。さらに、やや締まった地層が出ると予想される場合は、静的コーンの代わりに動的コーンの連続貫入試験に切り替える。本動的コーン貫入試験は、ISO 国際規格 (ISO 22476-2:2005) に示されている分類の内、貫入エネルギーが中程度である DPM (medium) に準拠した試験方法となっている⁶⁾。新コンビネーションコーンは、基本的には動的貫入機構を有する静的コーン貫入試験であるが、先端コーンとロッドを動的コーン用に取り替えることで、ISO 規格に合致した動的コーン貫入試験が1台の試験機で可能となっている。

表-1 新コンビネーションコーンの仕様 (2005年度開発)

Table.1 Specification of the new combination cone penetration test equipment (developed in 2005).

仕 様	
ハンマ落下装置	形式.....チェーン駆動式自動落下装置
	ハンマ荷重.....300N
	ハンマ落下高さ.....0.5m ※ISO国際規格(ISO22476-2)のDPM(medium)タイプに準拠
フィード	形式.....油圧シリンダフィード
	フィードスピード.....7.1m/min(上昇) 10.3m/min(下降)
	フィードストローク.....600mm
	押込み力.....10.2kN 引抜き力.....14.8kN
ベースマシン (クローラ)	形式.....PM246
	走行速度.....2.9km/h
	出力.....2.1kW/1,800min ⁻¹ (2.8PS/1,800min ⁻¹)
寸法・重量	寸法(運搬時).....2,060L×650W×1,100H
	寸法(作業時).....1,905L×650W×2,130H
	重量.....500kg

表-2 試験深度までの土質特性一覧

Table.2 Soil properties at each test sites.

地 区		八王子地区		多摩地区	坂戸地区		
地区 No.		1~3	4	5~9	10~19		
土質名		ローム		ローム	礫混り粘土	有機質土	粘土質ローム
粒度 (%)	礫、砂分	40~60	10~35	20~35 (礫分÷0)	20~50	10~45	40~55
	シルト、粘土分	40~60	60~90	65~80	50~80	55~90	45~60
自然含水比 (%)		25~35	40~100	30~50	50~80	35~80	30~50

3. コンビネーションコーン貫入試験, スウェーデン式サウンディングおよび三成分コーン貫入試験の現地比較実験^{7),8)}

開発したコンビネーションコーンの宅地地盤の支持力調査法としての信頼性や効率性を確認する目的で、同一地点において、スウェーデン式サウンディングおよび三成分コーンとの現地比較実験を実施した。コンビネーションコーンおよびスウェーデン式サウンディングの比較実験は、東京都八王子地区の宅地造成現場で4地点、多摩地区で5地点、埼玉県坂戸地区で10地点、合計19地点で実施した。八王子地区では、さらに三成分コーンを加えた比較実験を実施した。

3.1 実験地の土質特性

現地比較実験で対象とした地盤は、八王子地区および多摩地区はロームの盛土、坂戸地区は礫混り粘土・有機質土・粘土質ロームなどからなる盛土であり、各地区の土質特性は表-2に示すとおりである。

八王子地区のロームは、礫・砂分とシルト・粘土分がほぼ同程度の粒度を示すが、No. 4地点だけはシルト・粘土分が優勢となっている。多摩地区のロームは、礫分をほとんど含まず、砂分を20~35%含むシルト・粘土分が

優勢な盛土である。自然含水比は、八王子地区が25~35%に対し、多摩地区は30~50%と相対的にやや高い。

坂戸地区は、八王子地区および多摩地区に比べ、深度方向にかなり不均質な盛土である。礫混り粘土・有機質土の部分は、シルト・粘土分を概ね50~90%と多く含んでおり、自然含水比は35~80%とかなりばらつきが大きい。粘土質ロームの部分は、礫・砂分とシルト・粘土分がほぼ同程度の粒度を示し、自然含水比は30~50%である。

3.2 コンビネーションコーン貫入試験と三成分コーン貫入試験の比較実験結果

前述したように、コンビネーションコーンは、主に不飽和な宅地盛土地盤を対象に地盤の支持力をコーン貫入抵抗値 q_c で評価することとし、間隙水圧測定機能は付けずに作業の効率化をはかっている。その得られる結果の妥当性を検証するために、八王子地区のロームの盛土において、三成分コーンとの比較実験を実施した。

三成分コーン貫入試験結果の一例を図-6に示すが、 q_c 値が約1,000~2,000kN/m²に対して、間隙水圧の測定結果はゼロか若干の負圧(約-10~-30kN/m²)を示しており、 q_t 値と q_c 値はほとんど一致する結果となった。

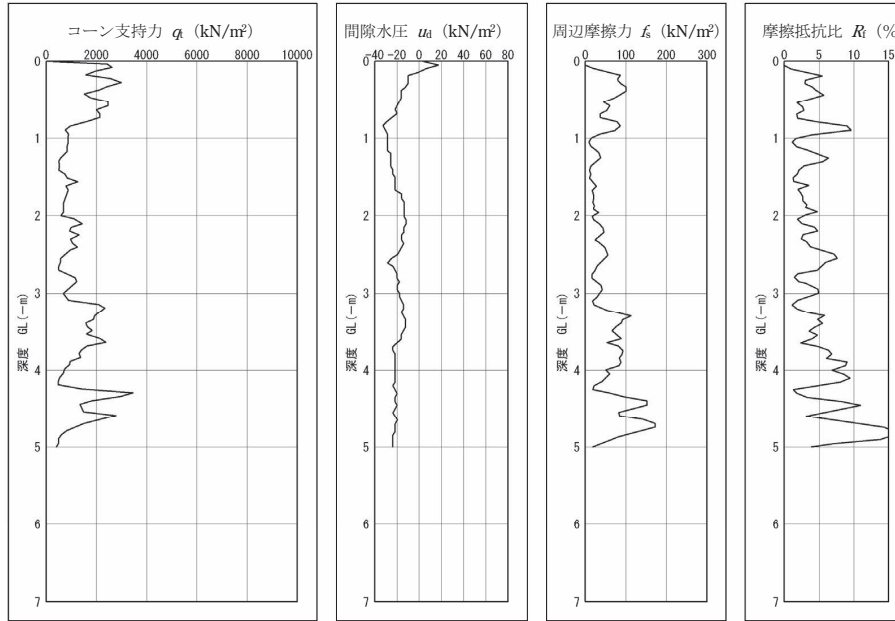


図-6 三成分コーン貫入試験結果の一例

Fig. 6 Typical result obtained by the three component cone penetration test.

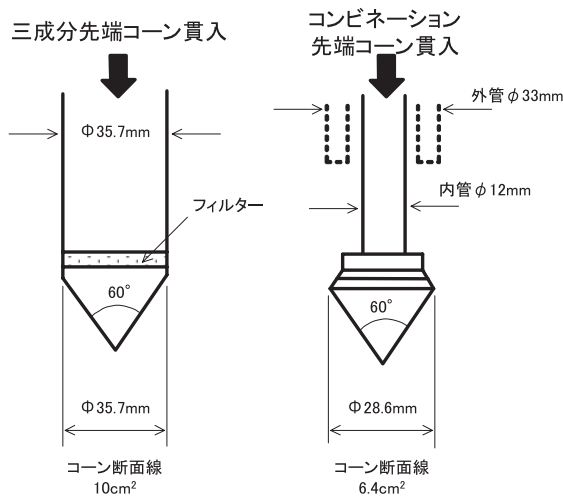


図-7 三成分コーンとコンビネーションコーンの先端コーン形状の違い

Fig. 7 Difference of the shape of the cone between the three component cone penetration test equipment and the combination cone penetration test equipment.

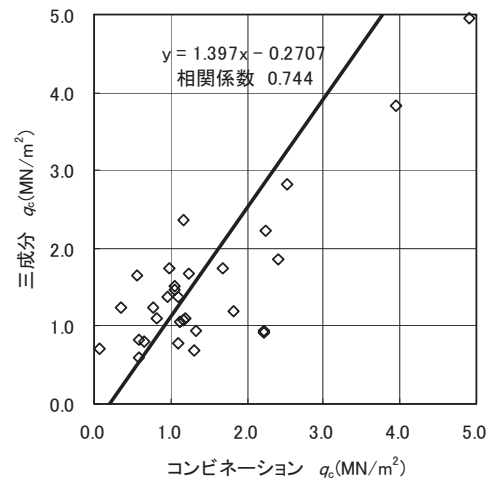


図-8 三成分コーンとコンビネーションコーンの q_c 値の比較 (データ数 31)

Fig. 8 Difference of q_c value obtained by the three component cone penetration test and the combination cone penetration test. (Number of the data is 31.)

今回使用した三成分コーンとコンビネーションコーンのコーン形状の違いを図-7に示すが、両者はコーン断面積やロッドの構造等が異なっている。この違いが試験結果に及ぼす影響をみるために、両者の q_c 値の比較を行い、これを図-8にまとめた。この結果によると、同一の地盤においては、三成分コーンに比べ、コンビネーションコーンの結果がやや小さめの値を与えていることがわかる。なお、図-8のデータにはややばらつきが認められるが、これは盛土地盤の不均質さに起因しているものと考えられる。

3.3 コンビネーションコーン貫入試験とスウェーデン式サウンディングの比較実験結果

コンビネーションコーンとスウェーデン式サウンディングを同一地点で実施した結果を比較して (q_c 値と1mあたりの半回転数 N_{sw} の比較)、図-9~14に示す。コンビネーションコーンとスウェーデン式サウンディング試験結果を比較すると、各地区で次のような傾向の違いがみられる。

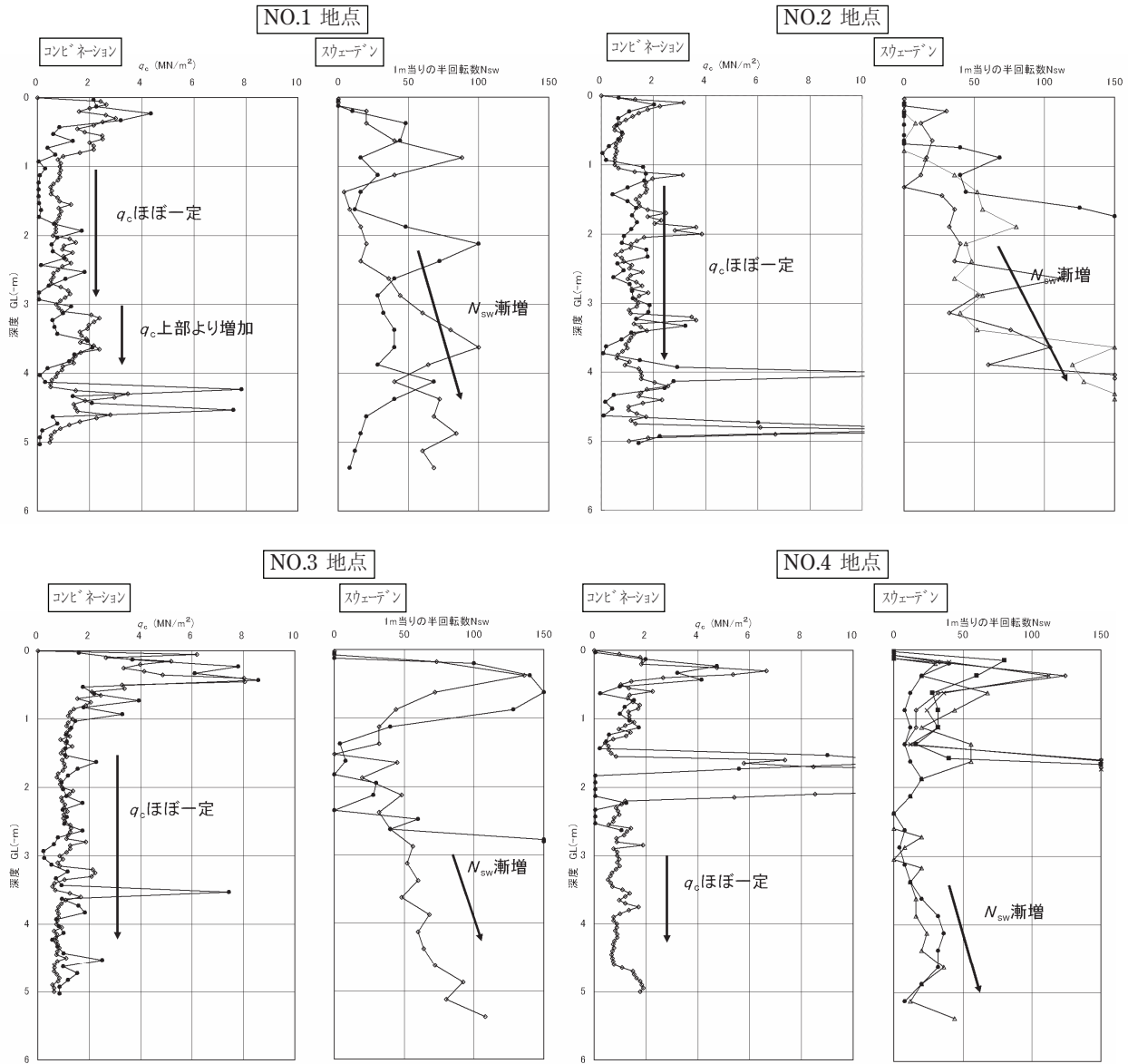


図-9 q_c 値と N_{sw} の深度分布比較図 (八王子地区)

Fig. 9 Comparisons of q_c value and N_{sw} value at each set depth. (at Hachioji area)

(1) 八王子地区

図-9によると、 q_c 値は深度方向にほぼ一定である。これに対し、 N_{sw} は深度方向に漸増する傾向がある。また、図-10に示すように、 q_c 値と N_{sw} との関係はばらつきが大きく、同一の q_c 値でも N_{sw} はかなり異なる。相関係数は0.413と小さく、相関はほとんどない。

$$N_{sw} = 10.353q_c + 28.907 \text{ (一次回帰式)}$$

相関係数 0.413

これは、スウェーデン式サウンディングのロッド周囲摩擦が、深くなるにつれて大きくなっていることが原因と考えられる。この傾向は、NO.4地点のシルト・粘土が卓越する地点よりも、NO.1～NO.3地点の細粒分と粗粒分がほぼ等しい中間土的な地盤の方でより顕著である。

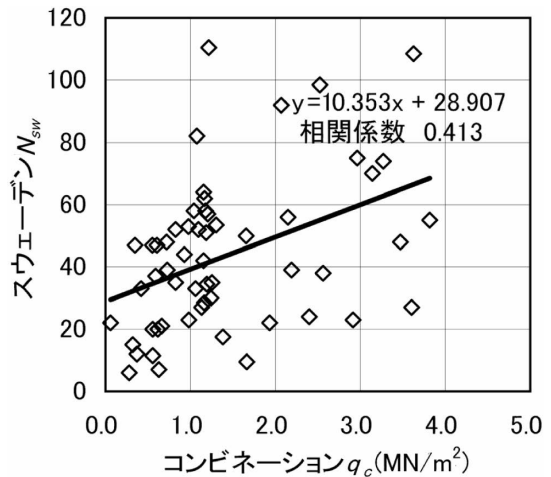


図-10 q_c 値と N_{sw} の相関図 (八王子地区：データ数 56)

Fig. 10 Correlation between q_c value and N_{sw} value. (at Hachioji area. Number of the data is 56.)

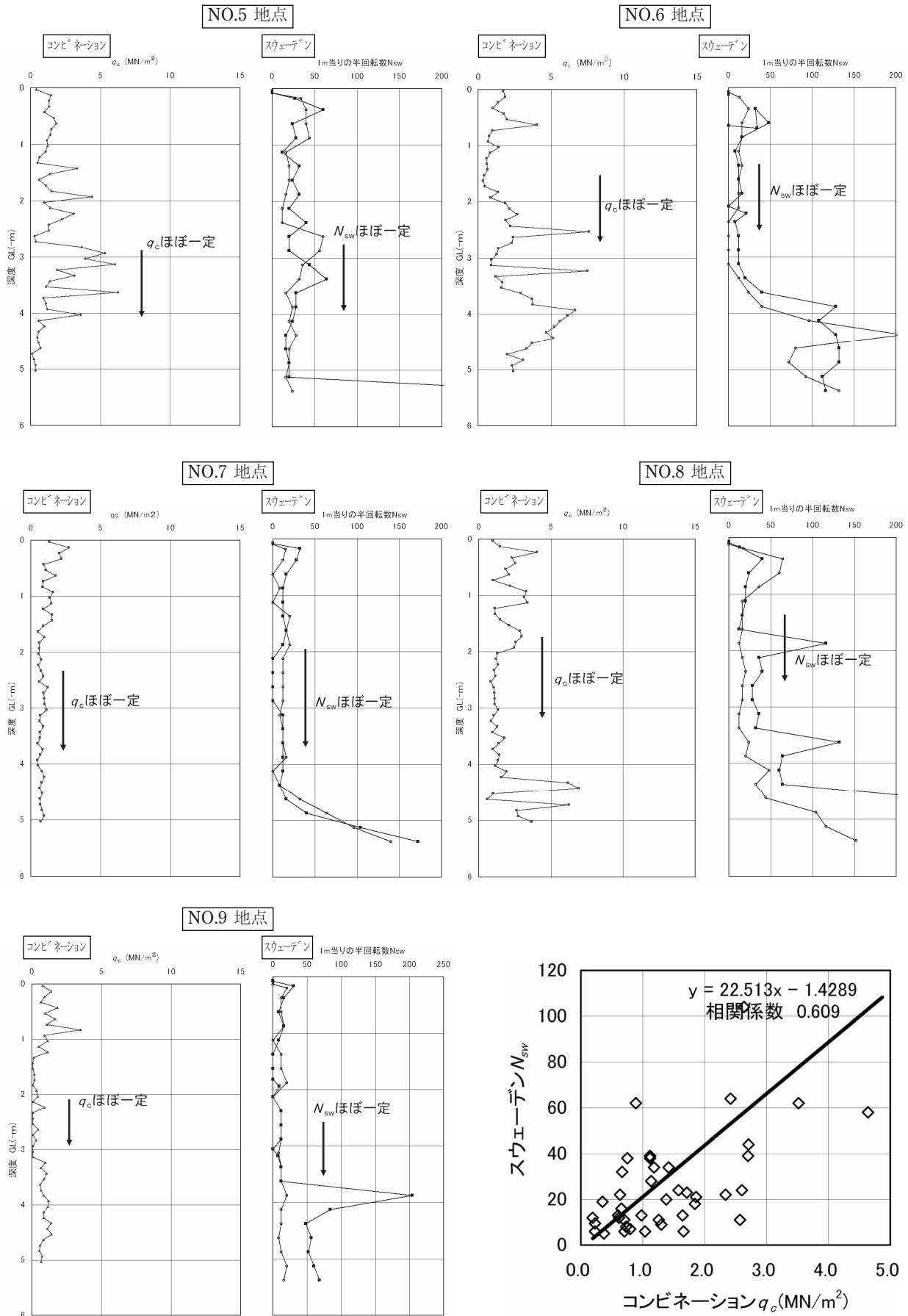


図-11 q_c 値と N_{sw} の深度分布比較図 (多摩地区)

Fig. 11 Comparisons of q_c value and N_{sw} value at each set depth. (at Tama area)

図-12 q_c 値と N_{sw} の相関図 (多摩地区：データ数 43)

Fig. 12 Correlation between q_c value and N_{sw} value. (at Tama area. Number of the data is 43.)

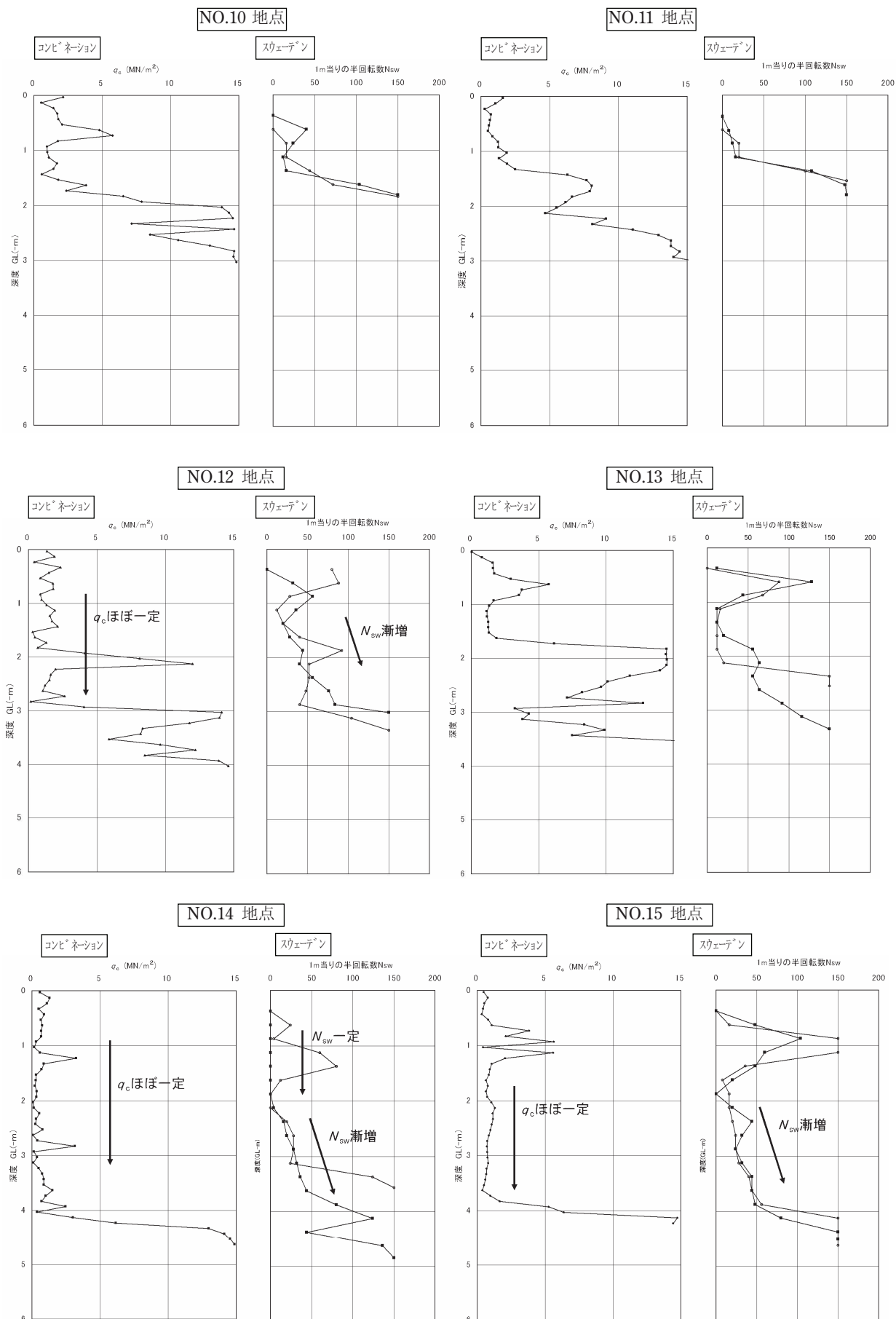


図 - 13(1) q_c 値と N_{sw} の深度分布比較図 (坂戸地区)

Fig. 13(1) Comparisons of q_c value and N_{sw} value at each set depth. (at Sakado area)

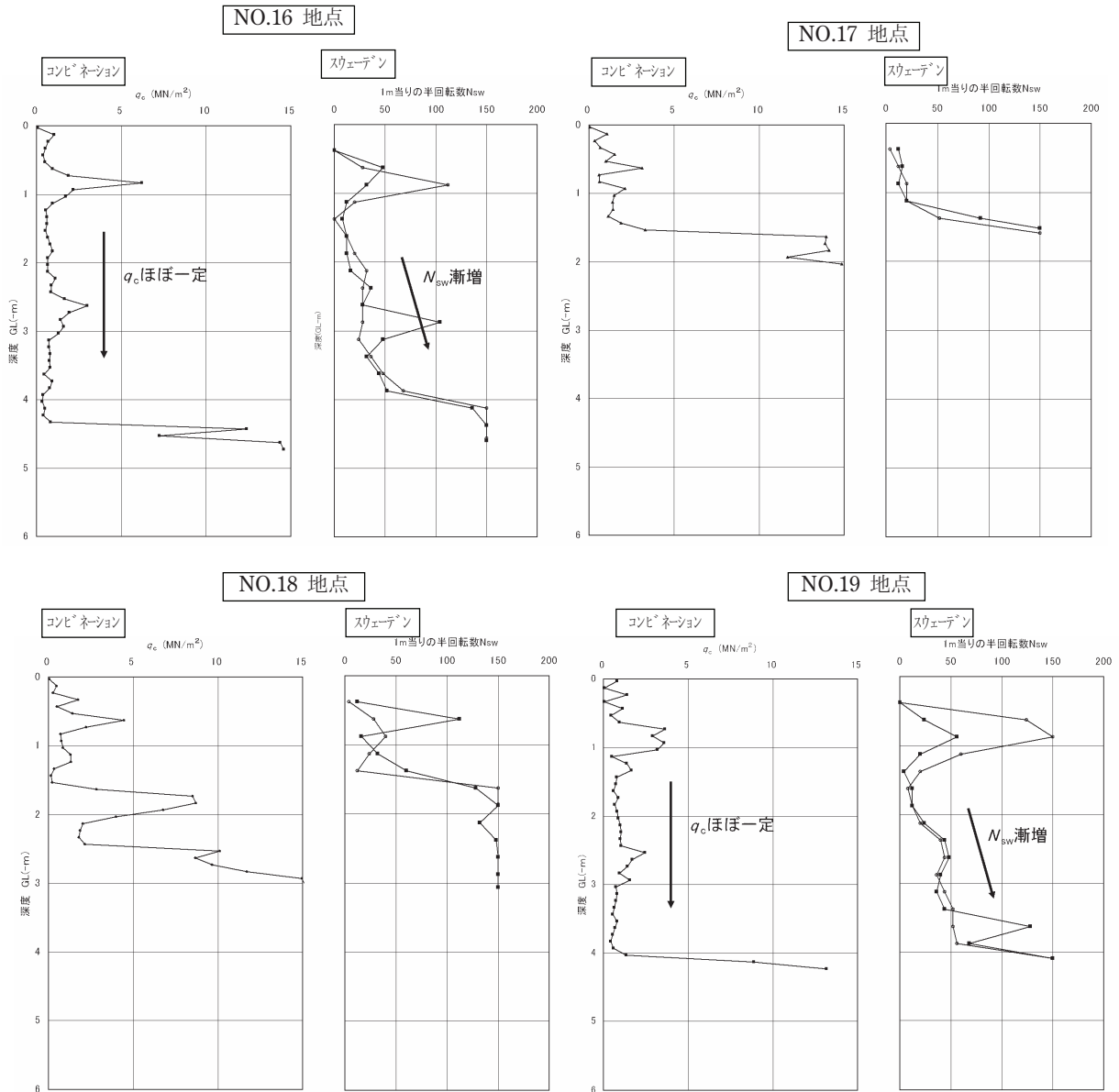


図 - 13 (2) q_c 値と N_{sw} の深度分布比較図 (坂戸地区)

Fig. 13 (2) Comparisons of q_c value and N_{sw} value at each set depth. (at Sakado area)

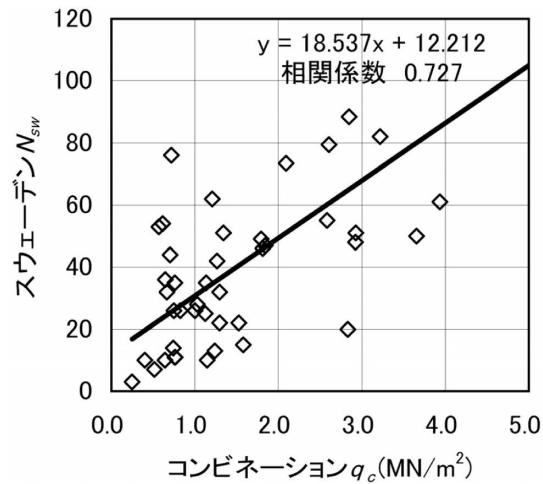


図 - 14 q_c 値と N_{sw} の相関図 (坂戸地区 : データ数 44)

Fig. 14 Correlation between q_c value and N_{sw} value. (at Sakado area. Number of the data is 44.)

(2) 多摩地区

図-11によると、 q_c 値と N_{sw} は深度方向にほぼ一定で、全体的な傾向は比較的似ている。本地区のスウェーデン式サウンディング結果には、ロッド周面摩擦の影響はほとんど含まれていないと考えられる。図-12に示すように、 q_c 値と N_{sw} の相関は八王子地区より高い。

$$N_{sw} = 22.513q_c - 1.429 \text{ (一次回帰式)}$$

相関係数 0.609

(3) 坂戸地区

図-13によると、 q_c 値は深度方向にほぼ一定である。これに対し、 N_{sw} は八王子地区と同様に深度方向に漸増する傾向がある。 q_c 値と N_{sw} との関係は、図-14に示すように相関係数が0.727と3地区の中でもっとも大きい。この理由は、深度2~3mの浅部で貫入不能になる地点が多く、ロッド周面摩擦の影響の少ないデータが多く含まれているために、見かけ上相関が高くなっているものと考えられる。

$$N_{sw} = 18.537q_c + 12.212 \text{ (一次回帰式)}$$

相関係数 0.727

3.4 コンビネーションコーン貫入試験とスウェーデン式サウンディングの試験効率の比較

今回実施したコンビネーションコーン全地点の作業内容ごと（移動およびマシンセット、本試験、抜管・検尺および撤去）に要した時間を、表-3にまとめた。

実験結果によると、調査深度5mのコンビネーションコーンは、1日あたりの実働を7時間として、4箇所/日の実施が可能であることが確認された。この

表-3 コンビネーションコーンの作業時間一覧表 (単位: 分)

Table. 3 Survey time for conducting the combination cone penetrating test at each test sites. (unit : minutes)

地区	地点 No.	移動及びマシンセット	本試験	抜管、検尺、撤去	合計
八王子	1	40	70	20	130
	2	25	49	20	94
	3	10	79	25	114
	4	55	77	40	172
多摩	5	55	56	20	131
	6	15	50	25	90
	7	55	60	20	135
	8	5	40	20	65
	9	35	70	10	115
坂戸	10	53	55	42	150
	11	31	46	25	102
	12	21	56	33	110
	13	10	46	26	82
	14	16	43	34	93
	15	20	70	25	115
	16	14	62	27	103
	17	33	33	37	103
	18	21	40	29	90
	19	4	54	21	79

施工効率は、自動式のスウェーデン式サウンディングには及ばないものの、手動式のスウェーデン式サウンディングとほぼ同程度と考えられる。作業時間の中では、本試験に要する時間をもっとも長いですが、本試験以外の移動、マシンセット、抜管などの作業が、本試験の半分程度の時間を要していることが分かる。なお、今回の実験は、試験機を操作するオペレータにとって初めての現地での調査であったため、今後オペレータが作業に慣れてくるとさらに効率は良くなるものと考えられる。

貫入能力に関しては、坂戸地区のデータ（図-13参照）にあらわれているように、スウェーデン式サウンディングが貫入不能になっても、コンビネーションコーンではさらに深い位置まで貫入できており、貫入能力で見ると限りではコンビネーションコーンのほうが優れている。

3.5 比較実験結果の考察

八王子地区のロームの盛土地盤においては、三成分コーン貫入中に間隙水圧がほとんど発生していない。したがって、本実験地盤においては間隙水圧測定機能がないコンビネーションコーンタイプの試験機の q_c 値により地盤強度を把握することが可能であることが確認できた。また、コンビネーションコーンと三成分コーンによる q_c 値を比べると、三成分コーンに比べ、コンビネーションコーンの結果がやや小さめの結果が得られたが、両者には直線的な相関が得られた。両者の q_c 値の相関係数は0.744であるが、地盤が盛土のために不均質であることを考慮に入れると十分に高い相関関係が得られている。したがって、三成分コーンとコンビネーションコーンでは、コーン断面積やロッドの構造等が異なっているものの、試験結果として得られる q_c 値に関しては、同程度の精度の結果が得られていると考えられる。

スウェーデン式サウンディング結果の N_{sw} は、多摩地区においては、コンビネーションコーンの q_c 値とほぼ同じ傾向を示したが、八王子地区および坂戸地区においては、ロッド周面摩擦の影響により地盤強度を過大に評価しているものと考えられる。八王子地区と多摩地区で異なる試験結果となった理由は、同じロームでも粒度などの土質特性の違いが考えられる。八王子地区は粘性土と砂質土の中間土の粒度であるのに対し、多摩地区は粘性土分が卓越している。坂戸地区は、ロームとは異なる有機質土や通常の粘性土である。このように、地盤の状況によっては、スウェーデン式サウンディングは、無視できないロッド周面摩擦の影響が試験結果に含まれることが明らかになった。したがって、現在国内で数多く実施されているスウェーデン式サウンディングは、地盤状況によっては過大な支持力を与える可能性があり、宅地地盤の支持

力調査法として必ずしも優れた方法とはいえない。

4. コンビネーションコーン貫入試験結果による宅地地盤の支持力算定方法⁴⁾

4.1 スウェーデン式サウンディング結果から宅地地盤の支持力を算定する上での問題点

スウェーデン式サウンディング結果から宅地地盤の支持力を算定する場合、3章に示したように、地盤の種類によってはスウェーデン式サウンディングのロッド周面摩擦が大きく作用し、試験結果が過大に出る場合がある。さらに、スウェーデン式サウンディングは、おもりによる自沈を生じるような軟弱地盤の支持力算定上の問題がある。

国土交通省告示 1113 号(平成 13 年 7 月 2 日)では、宅地地盤の支持力算定方法が以下のように示されている。

長期に生ずる力に対する地盤の許容応力度 q_a を定める方法
 $q_a = 30 + 0.6N_{sw}$
 基礎の底部から下方 2m 以内の距離にある地盤にスウェーデン式サウンディングの荷重が 1kN 以下で自沈する層が存在する場合若しくは基礎の底部から下方 2m を超え 5m 以内の距離にある地盤にスウェーデン式サウンディングの荷重が 500N 以下で自沈する層が存在する場合にあっては、建築物の自重による沈下その他の地盤の変形等を考慮して建築物又は建築物の部分に有害な損傷、変形及び沈下が生じないことを確かめなければならない。

また、建設省告示第 1347 号(平成 12 年 5 月 23 日)では、以下のように示されている。

地盤の長期に生ずる力に対する許容応力度が 1m²につき 20kN 未満の場合にあっては基礎ぐいを用いた構造と、1m²につき 20kN 以上 30kN 未満の場合にあっては基礎ぐいを用いた構造又はべた基礎と、1m²につき 30kN 以上の場合にあっては基礎ぐいを用いた構造、べた基礎又は布基礎としなければならない。

このように、一般の住宅の基礎形式を選定する場合には、長期許容支持力が 20～30kN/m²付近に相当する試験精度が非常に重要になる。これに対して、スウェーデン式サウンディングでは、20～30kN/m²の支持力が、ちょうどおもりによる自沈の領域に相当し、試験の精度がかなり悪くなる。人力型のスウェーデン式サウンディングは、試験を行う人の操作の丁寧さにより結果が変わる可能性があること、最近開発された自動荷重型の機械では自沈時にロッドの回転を拘束す

る機種があること⁹⁾、最低載荷荷重が 500N のものや(荷重 50, 150, 250N は載荷されない)、実際におもりを載荷せずに機械制御で自沈を規制しているものなど、使用する機械により結果がかなり変わってくる可能性がある¹⁰⁾。このため、基礎形式選定で重要な 20～30kN/m²の宅地地盤の支持力をスウェーデン式サウンディングから求めることは、試験結果の精度の面で問題がある。

これに対して、コンビネーションコーンは、ロッドが二重管構造であるので周面摩擦の問題はなく、自沈を生じるような軟弱地盤でも正確な q_c 値を求めることが可能である。

4.2 コンビネーションコーン貫入試験と平板載荷試験の比較実験結果

コンビネーションコーンの結果から宅地地盤の支持力算定方法を確立する目的で、コンビネーションコーンと平板載荷試験の比較実験を、関東地区で 24 地点、関西地区で 4 地点、計 28 地点で実施した。関東地区はロームが主体の盛土、関西地区は大阪層群の粘性土主体の盛土である。これらの実験結果の一覧表を表-4 に示すとともに、平板載荷試験の降伏圧 q_y とコーン貫入抵抗 q_c の相関を図-15 に示す。

平板載荷試験から求められる q_y 値とコーン貫入抵抗 q_c 値には、平均的には以下に示す関係式が得られた。

$$q_y = 0.15q_c \quad (1)$$

しかしながら、盛土が不均質とはいえ、データにかなりのばらつきがみられる。このデータばらつきの原因を検討するために、 q_y と q_c の比 (q_y/q_c) と物理特性(自然含水比、湿潤密度、飽和度)との関係を整理し、それぞれ図-16～18 にまとめた。

q_y/q_c と自然含水比の関係でみると、自然含水比が 60～100% の範囲では、 q_y/q_c のばらつきが小さく、ほぼ $q_y = 0.15q_c$ の関係が成り立っている。これに対して、自然含水比が 20～50% と低い結果では、 q_y/q_c のばらつきが大きい。 q_y/q_c と湿潤密度の関係は、湿潤密度が 1.4～1.6t/m³ と小さい時にはばらつきが小さく、1.7～2.0t/m³ と大きくなるとばらつきが大きくなる。 q_y/q_c と飽和度を見ると、一見飽和度に無関係にばらついているように見受けられる。ただし、自然含水比が 50% 以下の結果を基に q_y/q_c と飽和度の相関式を求めると、図-18 に示した相関式： $q_y/q_c = 0.0032S_r - 0.102$ が得られる。すなわち、自然含水比が 50% 以下のデータでは、飽和度が 80% 前後の時に $q_y = 0.15q_c$ に近い結果となり、飽和度が大きくなるにつれ、 $q_y > 0.15q_c$ となっていく傾向がある。

以上のことをまとめると、 $q_y = 0.15q_c$ の関係式は、自然含水比が 60～80% と高い粘性土および自然含水

表-4 コンビネーションコーン貫入試験と平板荷重試験の比較実験結果

Table. 4 Comparison of the result between the combination cone penetrating test and the plate loading test.

地区	No	対象地盤					コンビネーションコーン貫入抵抗 q_c (kN/m ²)	平板荷重試験結果 降伏圧 q_y (kN/m ²)	q_y/q_c
		地質	含水比 (%)	湿潤密度 (t/m ³)	飽和度 (%)	塑性指数 I_p			
関東 A	①	ローム主体	21.4	2.02	89.8	—	1100	200	0.182
	②	"	28.1	1.89	92.2	—	1250	250	0.200
	③	"	41.6	1.73	92.4	—	1250	250	0.200
	④	"	37.5	1.80	96.2	—	1000	110	0.110
関東 B	⑤	ローム主体	30.3	1.85	89.5	—	1450	125	0.086
	⑥	"	24.9	1.75	71.1	—	1750	220	0.126
	⑦	"	31.6	1.76	81.3	—	1400	220	0.157
	⑧	"	19.6	1.79	65.8	—	1100	75	0.068
関東 C	⑨	ローム主体	50.9	1.68	96.5	47.7	650	160	0.246
	⑩	"	23.7	1.86	81.1	23.1	1250	210	0.168
	⑪	"	86.8	1.48	98.0	52.5	1750	240	0.137
	⑫	"	81.4	1.46	91.9	70.8	700	90	0.128
	⑬	"	40.4	1.69	90.3	35.5	950	210	0.221
	⑭	"	32.0	1.79	86.9	27.8	1350	210	0.156
	⑮	"	80.6	1.50	96.3	42.2	1200	210	0.175
	⑯	"	89.9	1.51	100.0	50.0	700	115	0.164
関東 D	⑰	ローム主体	92.1	1.47	97.1	51.3	650	100	0.154
	⑱	"	34.0	1.87	99.0	31.3	1500	250	0.167
	⑲	"	75.9	1.56	98.8	59.7	1600	250	0.156
	⑳	"	56.8	1.72	104.7	48.7	700	110	0.157
	㉑	"	32.5	1.87	98.1	40.2	1150	260	0.226
	㉒	"	17.5	1.99	79.5	—	1500	400	0.266
関東 E	㉓	粘性土	—	—	—	—	1130	132	0.117
関東 F	㉔	ローム	107.3	1.28	90.9	48.4	1480	95	0.064
関西 G	㉕	粘性土	30.0	1.91	97.1	33.1	1220	260	0.213
関西 H	㉖	粘性土	—	—	—	—	6150 <	390	0.063 >
関西 I	㉗	粘性土	28.7	1.94	98.3	31.9	690	205	0.295
関西 J	㉘	粘土質砂	21.9	1.89	81.4	—	3140	500	0.159

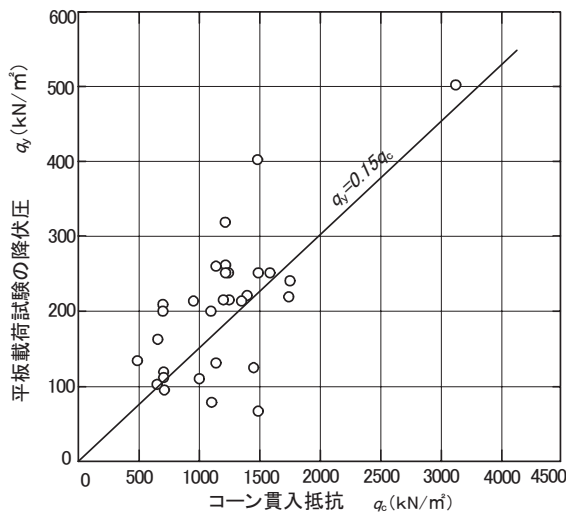


図-15 降伏圧 q_y とコーン貫入抵抗 q_c の関係
Fig. 15 Relationship between yield load q_y and cone resistance q_c .

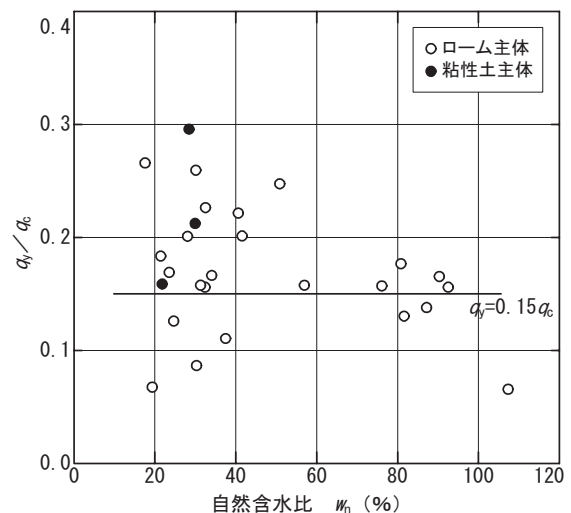


図-16 q_y/q_c と自然含水比 w_n の関係
Fig. 16 Relationship between q_y/q_c and natural water content w_n .

比が50%と低い場合は飽和度が80%程度と低い場合に良好な関係式となっている。しかしながら、自然含水比が50%と低く飽和度が100%に近い粘性土に関しては、関係式の誤差が大きくなっている。

4.3 比較実験結果に基づく宅地地盤の支持力の算定方法の提案

コンビネーションコーンと平板荷重試験の比較実

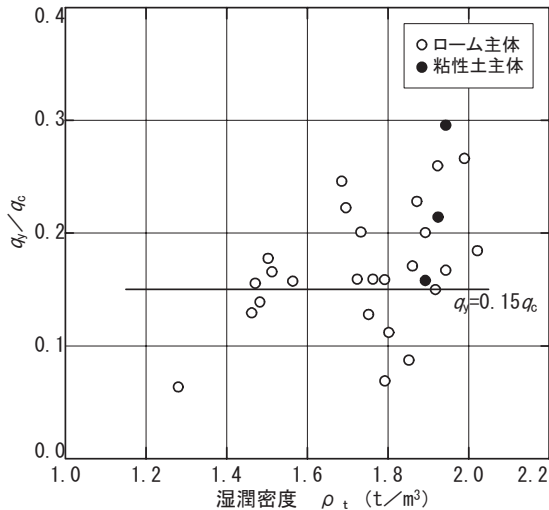


図-17 q_y / q_c と湿潤密度 ρ_t の関係
Fig. 17 Relationship between q_y / q_c and wet density ρ_t .

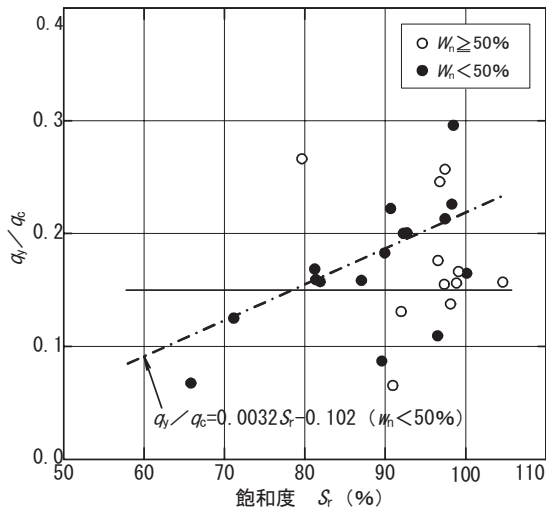


図-18 q_y / q_c と飽和度 S_r の関係
Fig. 18 Relationship between q_y / q_c and degree of saturation S_r .

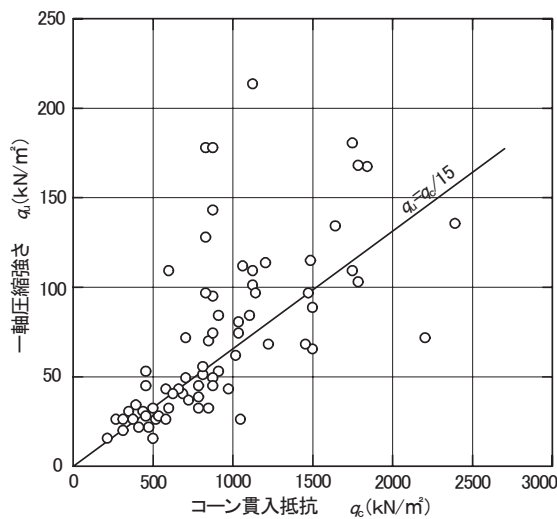


図-19 一軸圧縮強さ q_u とコーン貫入抵抗 q_c の関係 (データ数 71)
Fig. 19 Relationship between unconfined compression strength q_u and cone resistance q_c . (Number of the data is 71.)

験では、一軸圧縮強さ q_u に関するデータも取得した。その結果を基に、 q_u とコーン貫入抵抗 q_c の相関をまとめると図-19が得られた。試験結果にばらつきはあるものの、以下の相関式が適用できる。

$$q_u = q_c / 15 \quad (2)$$

前述の(1)式より、独立基礎に対する地盤の長期許容支持力 q_a は、安全側に基礎の根入れ効果を無視すれば、

$$q_a = q_y / 2 = 0.15q_c / 2 = 0.075q_c \quad (3)$$

によって求めることができる。ここで、基礎形式を連続基礎と考えれば、基礎の形状係数 a (独立基礎 $a = 1.3$, 連続基礎 $a = 1.0$) を介し、(3)式は次のように書き改められる。

$$q_a = 0.075q_c / 1.3 = 0.058q_c \quad (4)$$

式(2)のコーン貫入試験と一軸圧縮試験の比較実験の結果より、粘着力 c_u は、内部摩擦角を $\phi = 0^\circ$ とすれば、

$$c_u = q_u / 2 = q_c / 30 \quad (5)$$

となる。地盤の長期許容支持力 q_a は、基礎の根入れ効果を無視すれば連続基礎に対して、 $q_a = 1/3 \cdot a \cdot c_u \cdot N_c$ で求められるから (N_c : 支持力係数で、 $\phi = 0^\circ$ の場合 $N_c = 5.3$)、したがって、

$$q_a = 1/3 \cdot 1.0 \cdot (q_c / 30) \cdot 5.3 = 0.059q_c \quad (6)$$

となり、これは(4)式とほぼ一致するので、(1)式および(2)式の相関式は、互いに整合的であるといえる。

地盤の平板載荷試験の q_y 値と q_c 値の関係は、前述のようにばらつきがあり、支持力算定式はこのばらつき(約30%)を考慮して、安全側に考えて以下の式を提案する。

$$q_a = (0.058 / 1.3) q_c = 0.045q_c \quad (7)$$

ただし、 q_c 値で宅地地盤の支持力を求める場合には、砂・礫などが含まれる地盤では、部分的に極端に大きい q_c 値が得られる場合がある。地盤の支持力算定時には、このような異常値を取り除いておく必要がある。

5. コンビネーションコーン貫入試験と表面波探査を組合せた宅地地盤調査法^{11), 12)}

今回開発したコンビネーションコーンは、得られる結果の妥当性や施工効率を考えた場合、スウェーデン式サウンディングにとって変わることが可能な宅地地盤の支持力調査法と考えられる。

しかしながら、コンビネーションコーンにおいても、得られる結果は点としての情報だけである。宅地地盤の盛土層は不均質であること、宅地開発では対象とする構造物が建築物だけでなく擁壁等の線状構造物があることを考えると、断面的な地盤情報の取得が可能となれば、盛土地盤の弱点をより詳しく調べることで、局所的な沈下や支持力不足を事前に防止すること

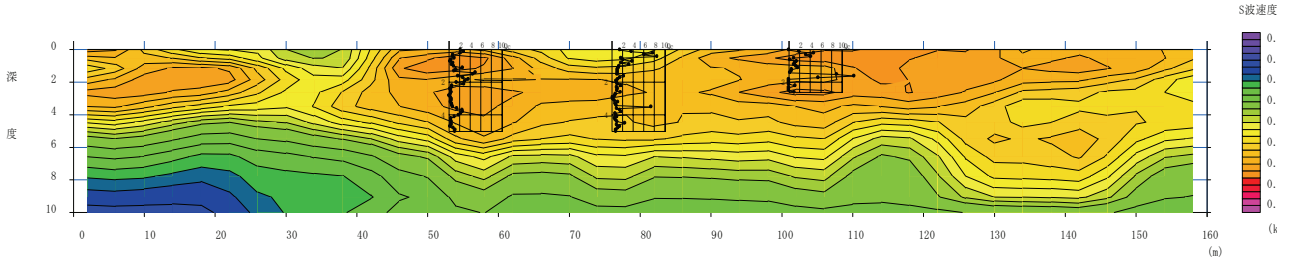


図-20 表面波探査結果断面図 (A測線: 測線長160m)

Fig. 20 S wave velocity obtained by surface-wave method. (A line : 160m length.)

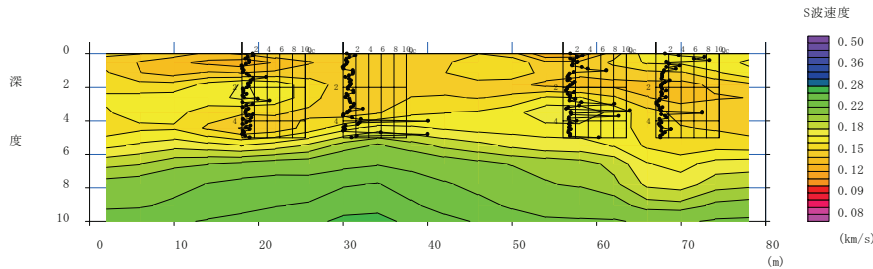


図-21 表面波探査結果断面図 (B測線: 測線長80m)

Fig. 21 S wave velocity obtained by surface-wave method. (B line : 80m length.)

が可能と考えられる。このような目的のもとで、コンビネーションコーンと表面波探査を組み合わせた調査を検討し、八王子地区で調査の有効性を確認した。

表面波探査は、表面波(レーリー波)を用いて、地盤のS波速度分布を簡便に求める方法である。表面波は弾性波(地震波)のうち地表付近を伝播する波であり、その伝播速度はおおよそ波長に相当する深度までの地盤のS波を主に反映する。このため、表面波を測定・解析することで、地盤のS波速度分布を求めることができる。地盤のS波速度は V_s 値と相関性があるため、今回実施したコンビネーションコーンの結果(q_c 値)との相関もあると考えられる。

実験は、八王子地区でコンビネーションコーンを実施した地点を結ぶ2測線(A測線:測線長160m, B測線:測線長80m)設定して実施した。実験結果を基に、各測線のS波速度分布断面図を作成し、図-20~21に示した。なお、断面図中には、コンビネーションコーンの結果も合わせて表示した。

試験結果によると、深度5~8m以浅の盛土に関して、S波速度は均一ではなく $V_s=100\sim 180\text{m/s}$ の範囲ではらついていることが分かる。コンビネーションコーンの結果だけでは、点の情報としての強度のばらつきしか分からないが、表面波探査を行うことにより、面的なばらつきが把握できている。なお、深度5~8m以深のS波の大きい部分に関しては、旧地形図から想定した地山のラインとほぼ一致しており、コンビネーションコーンで調査できていない、切盛り境に関しても適切な情報が得られている。

コンビネーションコーンの結果と、表面波探査の結果を基に、 q_c 値とS波速度の相関図を作成し、図-

22に示した。この結果を一次回帰すると以下の相関が得られる。

$$V_s = 11.26q_c + 122 \quad (8)$$

$$V_s: \text{m/s}, q_c: \text{MN/m}^2$$

コンビネーションコーンの q_c 値と地盤の長期許容支持力(連続基礎) q_a との間には、(4)式の関係式が既に得られている。(8)式と(4)式を組み合わせることで(9)式が得られ、表面波探査結果の V_s から地盤の長期許容支持力断面への変換ができる。

$$q_a = 0.0052V_s - 0.639 \quad (9)$$

(ただし、 $V_s=122\text{m/s}$ の場合に適用)

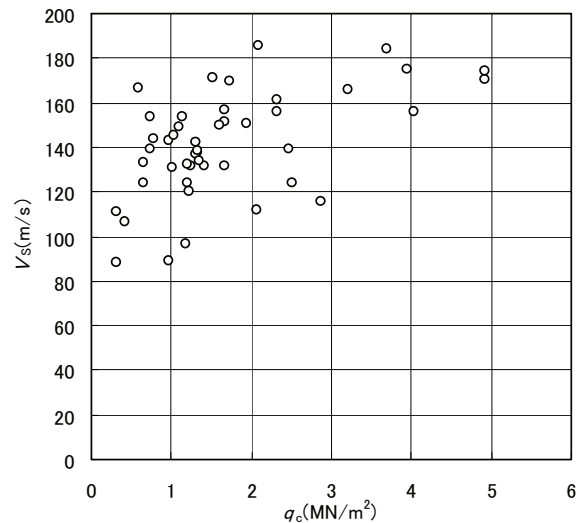


図-22 S波速度(V_s)と q_c の関係

Fig. 22 Relationship between S wave velocity V_s and cone resistance q_c .

ただし、宅地地盤の基礎形式選定上問題となる支持力 $20\sim 30\text{kN/m}^2$ 程度の支持力を、表面波探査の分解能で適切に把握できるかどうか、さらに検討が必要である。

6. 結論

本論文の結論を以下にまとめる。

- 1) 宅地地盤の支持力調査法の精度向上を目的として、動的コーン貫入機構を有する静的コーン貫入試験機(コンビネーションコーン)を開発した。本試験機は、静的のみの貫入試験、動的のみの貫入試験、動的コーン貫入機構を利用した静的コーン貫入試験が1台の試験機で実施可能である。また、貫入作業やデータ収録が自動化されており、地点間の移動は自走が可能である。
- 2) コンビネーションコーンは、適用地盤を主に不飽和な宅地盛土地盤とすることで、間隙水圧測定機能は付けないこととし試験の効率化をはかった。ロームの盛土地盤で三成分コーンとの比較実験を行った結果、間隙水圧の発生がほとんどなく地盤支持力は q_c 値で評価できること、三成分コーンとコンビネーションコーンの q_c 値には良好な相関関係が得られたことより、宅地地盤の調査法として三成分コーンと同程度の試験精度が確認できた。
- 3) これに対し、スウェーデン式サウンディングから地盤の支持力を評価する場合には、地盤の種類によってはロッド周面摩擦の影響により地盤強度を過大評価する可能性があること、おもりによる自沈を生じるような軟弱地盤では支持力算定上問題があることが明らかとなった。このため、日本国内において数多く実施されているスウェーデン式サウンディングは、宅地地盤の支持力調査法としては必ずしも優れた調査方法とはいえない。
- 4) コンビネーションコーンの作業時間を測定した結果、深度5mの調査で一日あたり4箇所、あるいはそれ以上の調査が可能であることが分かった。作業効率は、手動のスウェーデン式サウンディングとほぼ同程度である。また、貫入能力は、スウェーデン式サウンディングより優れている。
- 5) コンビネーションコーンと平板載荷試験の比較実験を行い、地盤の長期許容支持力 q_a とコンビネーションコーンの q_c 値の間に、 $q_a=0.058q_c$ なる関係式が得られた。試験結果のばらつきを約30%考慮して、コンビネーションコーンの結果から地盤の長期許容支持力の算定式として、 $q_a=(0.058/1.3)q_c=0.045q_c$ を提案する。
- 6) 点の調査法であるコンビネーションコーンと、面的な調査法である表面波探査を組合わせた調査

法の有効性を確認した。表面波探査から得られるS波速度とコンビネーションコーンの q_c 値には、 $V_s=11.26q_c+122$ ($V_s:\text{m/s}$, $q_c:\text{MN/m}^2$)の関係が得られた。表面波探査とコンビネーションコーンの結果を検討することで、面的な長期許容支持力断面が作成できる可能性がある。

謝辞

コンビネーションコーンに係る各種比較実験のための実験場所を提供していただきました都市再生機構の皆様方に対し、厚く御礼を申し上げます。特に、西村真二様、人見孝様、好田繁様には、コンビネーションコーン開発に際して貴重なご意見を数多くいただきました。ここに記して、深謝いたします。

参考文献

- 1) 田村昌仁, 枝広茂樹, 人見孝, 秦樹一郎 (2003): “スウェーデン式サウンディングによる宅地の性能評価技術の開発 (その4 沈下検討方法)” 第38回地盤工学研究発表会講演集, pp.99-100.
- 2) 豊岡義則, 立川日出男, 田村昌仁, 酒井運雄 (2003): “スウェーデン式サウンディング法における自沈荷重等に関する検討” 第38回地盤工学研究発表会講演集, pp.89-90.
- 3) T.Lunne, P.K.Robertson, and J.J.M.Powell (1997): Cone penetration Testing.
- 4) 宅地造成地における地震等の災害時の対策に関する調査研究報告書 (1991): “宅地地盤の支持力評価法について” 住宅・都市整備公団, pp.1-42.
- 5) 利藤房男, 伊藤義行, 人見孝, 松尾秀行 (2005): “動的静的コーンの開発” 第40回地盤工学研究発表会講演集, pp.47-48.
- 6) ISO 22476-2(2005): Geotechnical investigation and testing-Field testing- Part2 Dynamic probing.
- 7) 利藤房男, 米森博喜, 加賀靖男, 西村真二 (2006): “動的静的コーン貫入試験とスウェーデン式サウンディング試験結果の比較” 第41回地盤工学研究発表会講演集, pp.169-170.
- 8) 利藤房男 (2006): “安心な宅地地耐力評価のための動的静的コーンの開発と現地への適用” 地盤災害・地盤環境問題論文集, 第6巻, pp.135-140.
- 9) 田村昌仁, 川村政史, 阿部秋男 (2003): “スウェーデン式サウンディングによる宅地の性能評価技術の開発 (その5 性能評価と性能表示)” 第

- 38 回地盤工学研究発表会講演集, pp.101-102.
- 10) 田村昌仁, 人見孝, 枝広茂樹, 川村政史 (2003): “スウェーデン式サウンディングによる宅地の性能評価技術の開発 (その 1 研究目的と全体概要)” 第 38 回地盤工学研究発表会講演集, pp.93-94.
 - 11) 利藤房男, 西村真二, 好田繁 (2007): “動的静的コーンと表面波探査による宅盤調査方法” 第 42 回地盤工学研究発表会講演集, pp.107-110.
 - 12) 利藤房男 (2007): “安心な宅地地耐力評価のための動的静的コーンの開発と現地への適用 (2)” 地盤災害・地盤環境問題論文集, 第 7 巻, pp.107-110.

