

標準貫入試験の N 値とコーン貫入試験の q_c との相関性

Correlation between N-value and Cone Index

山田清臣 (やまだ きよおみ)

日本大学教授 理工学部土木工学科

吉野広司 (よしの ひろし)

(株)フジタ技術研究所

鎌尾彰司 (かまお しょうじ)

日本大学助手 理工学部土木工学科

増田幸政 (ますだ ゆきまさ)

千葉県企業庁 京葉建設事務所工務第一課

1. はじめに

標準貫入試験 (SPT) の N 値と静的コーン貫入試験 (CPT) の q_c との相関性に関する研究は, Meyerhof (マイヤホフ)¹⁾ の経験式 $q_c = 4N$ (t/ft²) に端を発しており, これは静的な貫入抵抗と動的な貫入抵抗が 4 なる定数で結び付けられるという興味深い報告であった。それ以来, この種の相関性の研究が始まり Meyerhof の提案した経験式は, すべての土質に適合するのではなく, 細砂からシルト質砂に対する平均的關係であり, この定数は対象となる土の種類によって変化するとされている。

この様な背景の中, 様々なアプローチが行われているが, 現場条件下での比較や N 値および q_c の測定上の問題等が混在するために, その要因分析が不確かなように思われ, q_c/N の正当な解釈がなされていなかったように思われる。

筆者ら²⁾ は, SPT に及ぼす影響要因を明確にした実験装置を用いて, N 値と平均拘束圧 σ_m , 相対密度 D_r および平均粒径 D_{50} の關係式を導いた。そこで, SPT で用いた 4 種類の土に対して CPT を同一地盤条件により行ったところ, q_c/N と D_{50} の關係式を導くことができた。

すなわち本研究は, 明確な実験条件下において, 静的な貫入抵抗と動的な貫入抵抗との關係を検討し, q_c/N の基本的性質の解明を試みたものである。

2. q_c/N に関する既往の研究

CPT の q_c と SPT の N 値との比, いわゆる q_c/N の關係を最初にまとめたものには Meyerhof の $q_c = 4N$ がある。Meyerhof は, Terzaghi・Peck (テルツ

ァーギ・ペック) により示された N 値と相対密度 D_r および内部摩擦角 ϕ との關係と q_c との互換性ならびに杭の先端支持力 q_p と q_c はほぼ等しいことを発表した。その後, この定数 4 なる数値は対象とする土の種類によって変化するという報告が Meigh & Nixon (メイ & ニクソン)³⁾, Schmertmann (シュマートマン)⁴⁾ らによって出され, Thorburn (ソーバン) ら⁵⁾ はこれらをまとめる形で q_c/N と粒径との關係を片対数グラフ上で表し, 両者の間の直線關係を示した。室町・小林⁶⁾ は, 日本での N 値と q_c の実測例をもとに, 固結度の比較的低い砂および粘性土層に対しては q_c/N と平均粒径 D_{50} の間にはよい相関が見られることを示し, q_c と N 値の相互換算式を提案した。

Robertson (ロバートソン) ら⁷⁾ は, N 値の精度の大部分を支配するといわれる落下損失, すなわちハンマーの打撃エネルギーに着目し, N 値をアメリカの平均的な打撃効率と考えられる 55% に補正し, q_c/N と D_{50} の關係を再検討している。Jamiolkowski (ジャミオルコフスキー) ら⁸⁾ も Robertson らと同様にこの種の実験をイタリアで行っており, q_c/N の適用に際して, グラフ上に示した点はあくまで平均値であって, 同じ平均粒径であっても幅広い変化を示すことを指摘した。Seed (シード) ら⁹⁾ は, 主に室町および Jamiolkowski らのデータを再検討する形で q_c/N と D_{50} の關係を吟味し, その中で q_c の測定機械についてふれ, 電気式コーンで測定した q_c は機械式コーンで測定したものよりも 10~15% 高めの値を示すかもしれない, この様な違いが図中に明白ではないことを指摘した。

1988 年の第 1 回 International Symposium on

Penetration Testing (ISOPT-I) の際には、各地方の地盤で行った q_c/N の研究が発表され、Zervogiannis (ツェルフォギアニス) ら¹⁰⁾ は、 q_c/N と D_{50} の実験式を示した。

これらはいずれも現場実験であるため、実験条件が明確でないことが評価が異なる原因となっていると考えられる。

本研究は、室内実験槽を用い、実験条件を明確にした上で q_c/N の特性を究明した検討を行い q_c/N の評価を試みようとするものである。

3. 実験に供した試料

乾燥シルト (以下シルトと略す)、豊浦標準砂¹¹⁾ (以下細砂と略す)、利根川粗砂 (以下粗砂と略す) および利根川礫 (以下礫と略す) の4種類を実験に供した。すなわち、SPT で使用した試料と同じで、すべて気乾状態 ($w \approx 0\%$) である。これらの土の粒径加積曲線を図-1 に、土性値を表-1 に示す。

土の状態は、相対密度 D_r で土の締まり具合を表した。また、各試料とも相対密度3種、平均拘束圧 σ_m は 0.5, 1.0, 2.0 および 3.0 kgf/cm² の4種とし、各3回ずつ試験を行った。すなわち、各試料とも実験条件も SPT と同じである²⁾。

4. 貫入試験

CPT と SPT は共に同じ加圧モデル土槽 ($h=70$ cm, $d=50$ cm) を使用した²⁾。SPT は JIS A 1219

表-1 各試料の土性値

	シルト	細砂	粗砂	礫
比重: G_s	2.56	2.64	2.70	2.68
均等係数: U_c	25.3	1.30	6.8	15.9
曲率係数: U_c'	1.75	1.16	0.84	1.93
最大間隙比: e_{max}	2.51	0.977	0.727	0.577
最小間隙比: e_{min}	1.06	0.605	0.387	0.297
平均粒径: D_{50}	0.03	0.2	1.1	5.7

に準じて行い、土槽上部から 15 cm の予備打ち、次いで 30 cm の本打ちである²⁾。一方、CPT 試験機は周面摩擦の影響を受けずに先端抵抗を測定できるオランダ式二重管コーンを採用した。断面積 10 cm²、先端角 60° および貫入速度 1 cm/s である。試験はまず土槽上部から約 15 cm 外管を貫入させた後、内管のみを押し 5 cm 貫入した時の値をロードセルによって読み取る。続いて、土槽上部から約 40 cm まで外管を貫入させ、前述と同様抵抗値を読み取る。そして、両値の平均値をもってコーン指数 q_c とした。

5. 試験結果

5.1 q_c と N_L の関係

本実験結果から横軸²⁾ に N_L 、縦軸に q_c をとりプロットしたのが図-2 である。ここで、 N_L は本実験結果で得た N 値である。図-2 中の各定数はハンマーが自由落下条件下で得られた値である。したがって、本実験結果の打撃効率を $(e_{12})_L$ とし、現場での SPT 試験結果の N 値と打撃効率をそれぞれ N_F および $(e_{12})_F$ とすると、現場条件下での比較におい

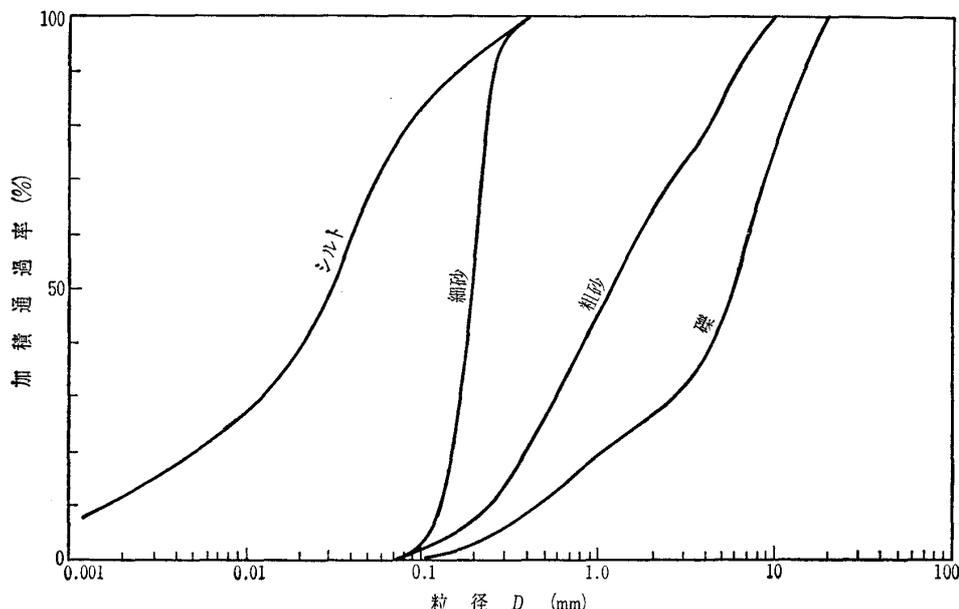


図-1 試料の粒径加積曲線

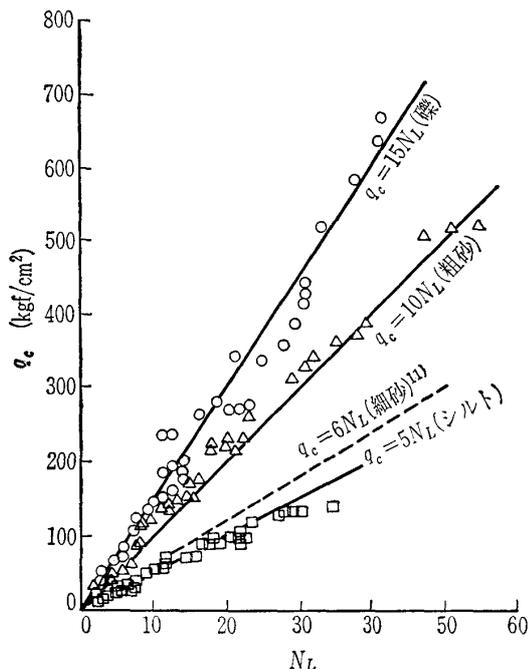


図-2 N_L と q_c の関係

て Kovacs (コバックス) ら¹²⁾ が提案した補正式によって補正をすると次式となる。

$$N_F = \frac{(e_{12})_L}{(e_{12})_F} N_L \dots\dots\dots(1)$$

一方、 N 値の比較を行う際にはリオデジャネイロでの第12回 ICSMFE の最終案では、自由落下によ

る運動エネルギー (474 J) の60%のエネルギーに補正することになった¹³⁾。よって、この打撃効率60%に補正をする必要がある。本実験の SPT のサンプラーの貫入に要する打撃エネルギーは平均 415 J である¹¹⁾。すなわち、

$$(e_{12})_L = \frac{415}{474} \times 100 = 0.876$$

$$N_F = \frac{0.876}{0.60} N_L = 1.46 N_L \dots\dots\dots(2)$$

となる。ここで、 N_F は打撃効率 60% への現場 N 値である。この様にして、図-2 に基づき q_c と N_F の関係を求めると次の様になる。

$$q_c = 3.4 N_F \text{ (シルト)} \dots\dots\dots(3)$$

$$q_c = 4.1 N_F \text{ (細砂)} \dots\dots\dots(4)$$

$$q_c = 6.8 N_F \text{ (粗砂)} \dots\dots\dots(5)$$

$$q_c = 10.3 N_F \text{ (礫)} \dots\dots\dots(6)$$

q_c/N は、粒度の中でも特に D_{50} と関係があると言われている。そこで、 q_c/N と D_{50} の関係を各研究者^{5)~8)} が示した値をそのままプロットし、示したのが図-3 である。図中□と■印が筆者らの実験値である。□は実験値そのままの値 N_L 、■は現場 N 値に補正した N_F である。本実験で得た関係には曲線関係が見られ、筆者らのデータのみを D_{50} をパラ

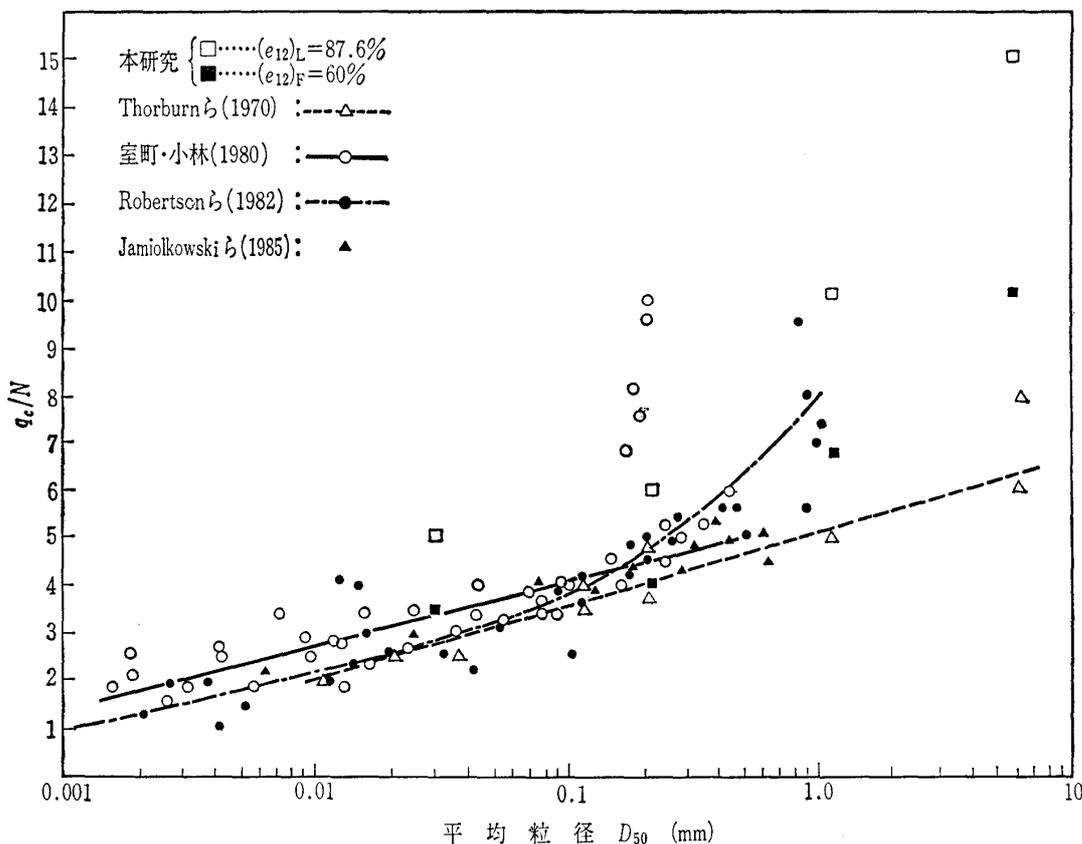


図-3 D_{50} と q_c/N の関係

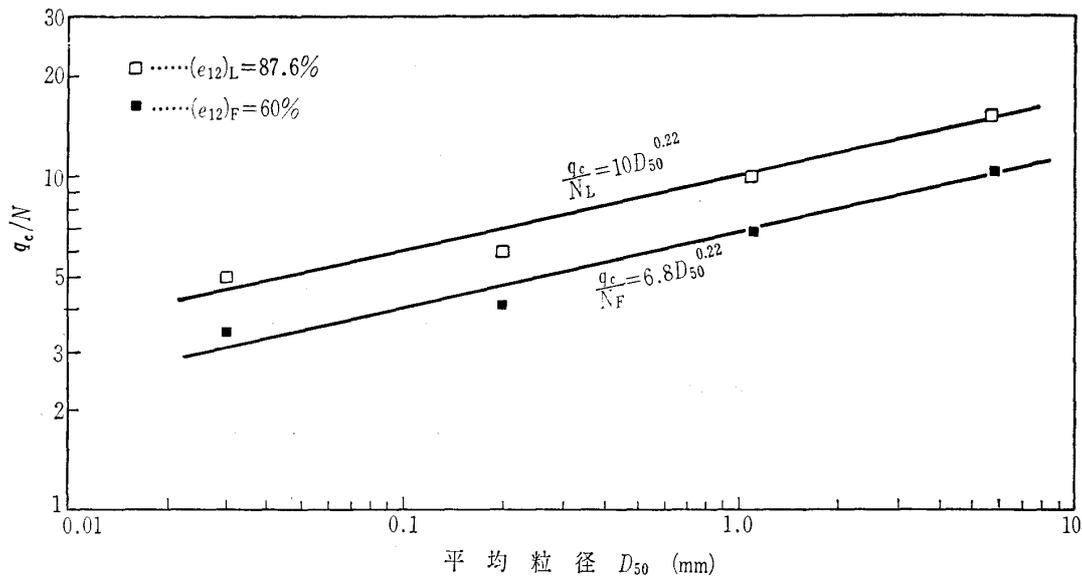


図-4 本研究における D_{50} と q_c/N の関係 (両対数表示)

メーターとして両対数目盛り上で示したのが図-4である。両者の関係は直線関係にあり、次式で表すことができた

$$q_c = 10 \cdot N_L \cdot D_{50}^{0.22} \dots\dots\dots(7)$$

$$= 6.8 \cdot N_F \cdot D_{50}^{0.22} \dots\dots\dots(8)$$

5.2 σ_m , D_r および q_c の関係

q_c と σ_m との関係を D_r をパラメーターとして両対数目盛り上にプロットしたのが図-5(a)~(c)である。各試験結果とも各 D_r ごとに直線関係になっており、その傾きは N_L とほぼ同じ傾向を示した²⁾。よって q_c も N_L と同型式の式(9)によって示すことが可能である。

$$q_c = A' \cdot (\sigma_m/1.0)^{B'} \dots\dots\dots(9)$$

ここで A' および B' は実験定数である。この各定数は D_r をパラメーターとすると適合性がよい。

$$A' = a' \cdot e^{\alpha' D_r}, \quad B' = 1.0 - \beta' D_r$$

よって、式(9)は式(10)の様に書き改めることができる。

$$q_c = a' \cdot e^{\alpha' D_r} (\sigma_m/1.0)^{1-\beta' D_r} \dots\dots\dots(10)$$

定数 a' , α' および β' の算定にあたっては、文献2)でも示したように、CPTのみでなくSPTの結果も考慮するのが合理的であると判断し、両試験での結果を総合的に評価し、各定数を算定した。

図-5より土の種類別に各定数 a' , α' および β' を求めると表-2の様であった。また、細砂に関し

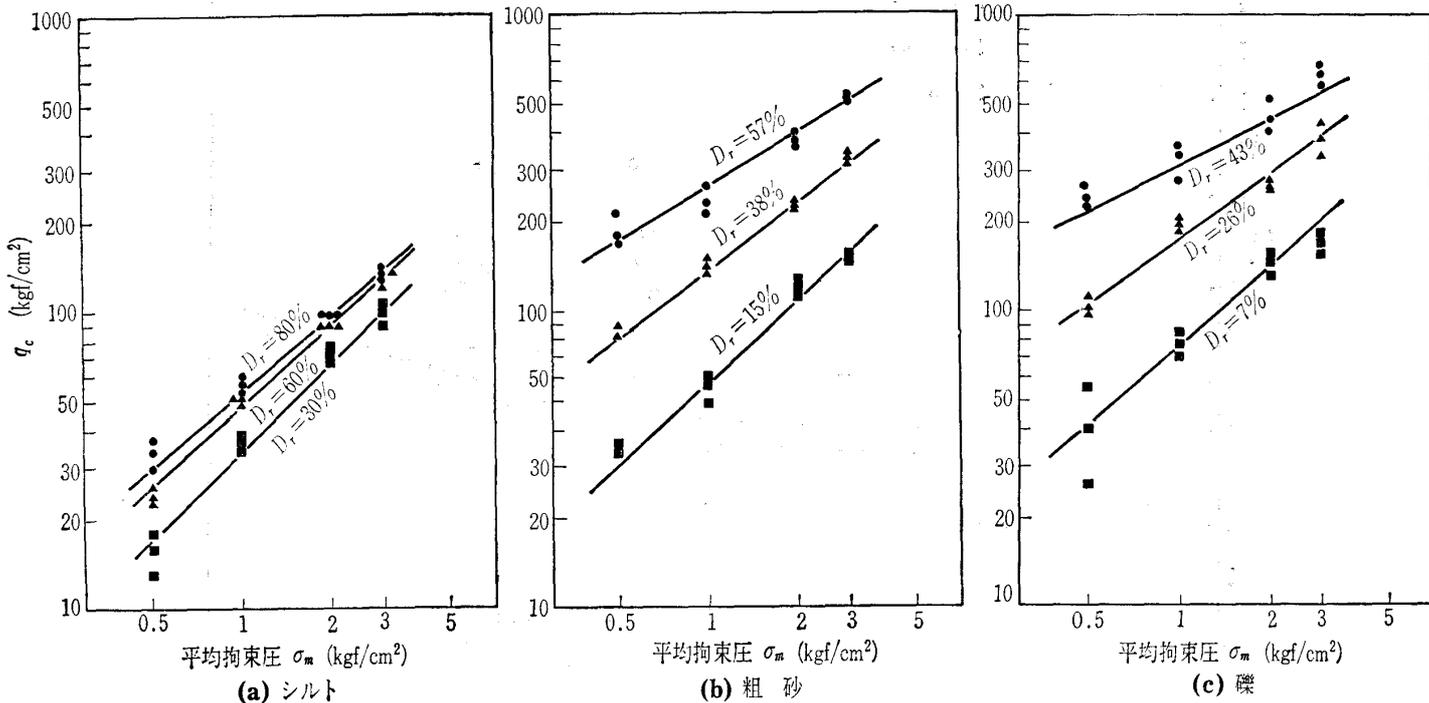


図-5 σ_m と q_c の関係

表—2 定数 a' , α' および β'

	a'	α'	β'
シルト	22	0.011	0.0018
細砂	19	0.023	0.005
粗砂	38	0.034	0.0071
礫	57	0.041	0.012

a' は kgf/cm^2

ては、山田¹¹⁾が同じ試料を用いて行った杭の先端支持力 q_p に関する研究で得た実験式を、 q_p は q_c とほぼ等しいことに着目し¹⁾、 q_p を q_c に置き換えて本研究の解析に用いた。

5.3 σ_m , D_r , q_c および D_{50} の相互関係

定数 a' , α' および β' と D_{50} の関係を 図—6 および 図—7 に示した。 a' と D_{50} の関係を求めると

$$a' = 38 D_{50}^{0.22} \dots\dots\dots (1)$$

となった。 α' および β' と D_{50} の関係は、次の様であった。

$$\alpha' = 0.030 D_{50}^{0.22} \dots\dots\dots (2)$$

$$\beta' = 0.0063 D_{50}^{0.38} \dots\dots\dots (3)$$

したがって、これら各定数と q_c , σ_m および D_r との関係を考察すると、

$$D_r = \frac{\ln(q_c/\sigma_m) - 3.6 + 0.22 \ln D_{50}}{0.030 D_{50}^{0.22} - 0.0063 D_{50}^{0.38} \ln \sigma_m} \dots\dots\dots (4)$$

となった。なお、 α' および β' の値は SPT において得た α および β の値と全く同じとなった²⁾。

5.4 q_c/N に関する考察

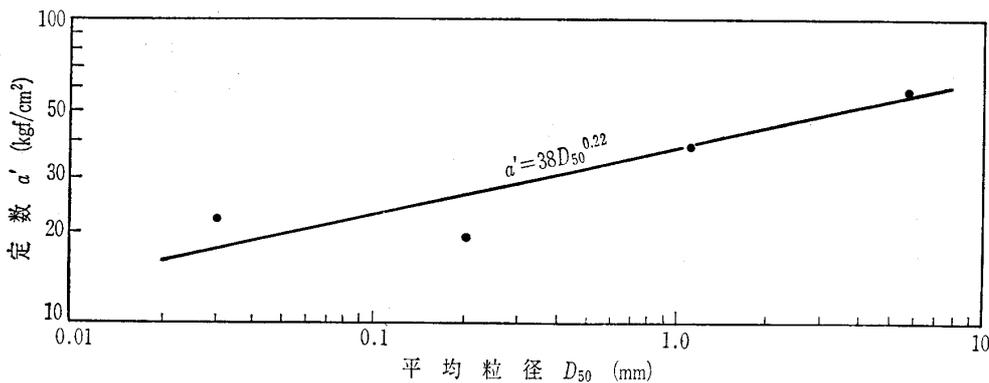
筆者らは、室内実験の結果に基づいて N 値および q_c を以下の形式によって示した。

$$N_L = a \cdot e^{\alpha D_r} (\sigma_m/1.0)^{1-\beta D_r} \dots\dots\dots (5)$$

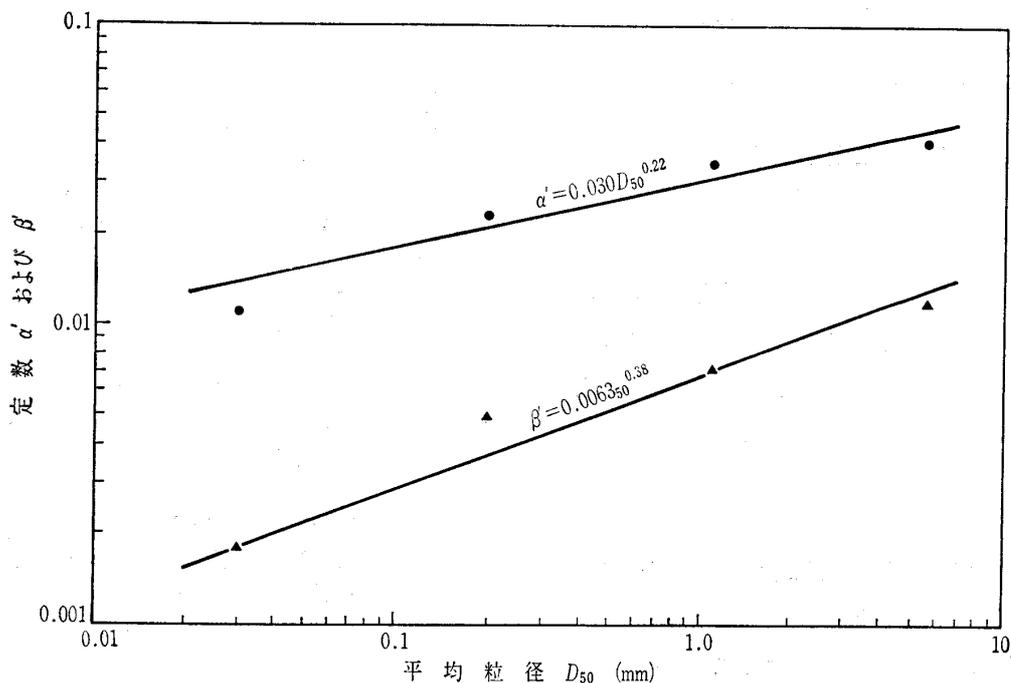
$$q_c = a' \cdot e^{\alpha' D_r} (\sigma_m/1.0)^{1-\beta' D_r} \dots\dots\dots (6)$$

この実験式から q_c/N_L を求めるには式(6)を式(5)で除すればよい。すなわち、以下の様になる。

$$\frac{q_c}{N_L} = \frac{a' \cdot e^{\alpha' D_r} (\sigma_m/1.0)^{1-\beta' D_r}}{a \cdot e^{\alpha D_r} (\sigma_m/1.0)^{1-\beta D_r}}$$



図—6 D_{50} と定数 a' の関係



図—7 D_{50} と定数 α' および β' の関係

報文-2211

そこで、5.3において指摘したように $\alpha = \alpha'$ 、 $\beta = \beta'$ となったので q_c/N_L は

$$\frac{q_c}{N_L} = \frac{a'}{a} \dots \dots \dots (7)$$

となる。SPTにおける定数 a は3.8なる一定値であることは既述した²⁾。定数 a' を式(7)に代入すると、

$$q_c = 10 \cdot N_L \cdot D_{50}^{0.22}$$

となり式(7)と等しくなる。

本研究より、 q_c と N 値それぞれの式を q_c/N という比の形にすると、 σ_m および D_r には無関係となり D_{50} との関係のみになることが明らかになった。また定数 a' 、換言すれば静的な貫入抵抗が q_c/N に最も影響を及ぼしていると考えられる。

6. 結 論

本研究により次の結論を得た。

- ① 4種の土について q_c も N 値同様、

$$q_c = a' \cdot e^{\alpha'} \cdot D_r (\sigma_m / 1.0)^{1-\beta'} \cdot D_r$$

なる関係で表すことができた。

- ② 本研究で考察したCPTより、モデル地盤による q_c と N_L の関係は、

$$q_c = 10 \cdot N_L \cdot D_{50}^{0.22}$$

となり、打撃効率60%における関係は、

$$q_c = 6.8 \cdot N_F \cdot D_{50}^{0.22}$$

となった。

- ③ 両対数目盛り上で σ_m と N_L および q_c は同じ傾向を示し、 N_L の代わりに q_c を用いると、

$$D_r = \frac{\ln(q_c/\sigma_m) - 3.6 + 0.22 \ln D_{50}}{0.030 D_{50}^{0.22} - 0.0063 D_{50}^{0.38} \ln \sigma_m}$$

で表すことが可能であることがわかった。

- ④ 実験定数 α' および β' は、SPTにおける定数 α および β と同じである。

- ⑤ q_c/N は、 σ_m および D_r には無関係となり、平均粒径 D_{50} のみの関係となることが明らかになった。また、定数 a' いわゆる静的な貫入抵抗によってその変化は顕著に現れるものと考えられる。

7. あとがき

実験条件を明確にした本研究により、 q_c と N 値との関係、または σ_m 、 D_r との関係などを D_{50} なる粒度定数を考慮して統一的に評価することができた。また、室内実験値と実際の現場の値との関連につい

ても言及した。これらの結果より今後は、SPTにおける粒度試験結果について検討を加え、合理的な N 値の利用方法について提案していきたい。

参 考 文 献

- 1) Meyerhof, G.G.: Penetration Tests and Bearing Capacity of Cohesionless Soils, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Div., ASCE, Vol. 82, No. 1, p. 866, 1956.
- 2) 山田清臣・鎌尾彰司・吉野広司・増田幸政: N 値への影響因子に関する研究, 土と基礎 Vol. 40, No. 4, pp. 23~28, 1992.
- 3) Meigh, A.C. and Nixon, L.K.: Comparison of in Situ Tests for Granular Soils, Proc. 5th ICSMFE, Vol. 1, pp. 499~507, 1961.
- 4) Schmertmann, J.H.: Static Cone to Compute Static Settlement Over Sand, Journal of Geotechnical Engineering Div., ASCE, Vol. 96, No. 3, pp. 1011~1043, 1970.
- 5) Thorburn, S., Rodin, S., Corbett, B.O. and Sherwood, D.E.: Penetration Testing in United Kingdom, State-of-the-art-report, Proc. ESOPT, Vol. 1, pp. 139~146, 1974.
- 6) 室町彦彦・小林精二: q_c/N 値の粒度による変化の実測例について, サウンディングシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp. 151~154, 1980.
- 7) Robertson, P.K., Campanella, R.G. and Wightman, A.: SPT-CPT Correlations, Journal of Geotechnical Engineering Div., ASCE, Vol. 109, pp. 1449~1459, 1983.
- 8) Jamiolkowski, M., Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna V. and Pasqualini, E.: Penetration resistance and liquefaction of sands, Proc. 11th ICSMFE, Vol. 4, pp. 1891~1896, 1985.
- 9) Seed, H.B. and De Alba, P.: Use of SPT and CPT tests for evaluating the liquefaction resistance of sands, Proc. In Situ '86, ASCE, pp. 281~302, 1986.
- 10) Zervogiannis, C.S. and Kalteziotis, N.A.: Experiences and relationships from penetration testing in Greece, Proc. 1st ISOPT, pp. 1063~1071, 1988.
- 11) 山田清臣: 砂地盤におけるクイの先端支持力に関する実験的研究, 第12回土質工学研究発表会講演集, pp. 717~720, 1977.
- 12) Kovacs, W.D., Salomone, L.A. and Yokel, F.Y.: Comparison of Energy Measurements in the Standard Penetration Test Using the Cathead and Rope Method, GEGSD, Center of Building Technology, NEL, National Bureau Standards, 1983.
- 13) Swedish Geotechnical Society: Report of the ISSMFE Technical Committee on Penetration Testing of Soils, Proc. 12th ICSMF-ETC16 with Reference Test Procedures, APPENDIX B(SPT), pp. 17~19, 1989.

(原稿受理 1991.10.11)