

簡易動的コーン貫入試験の動的貫入挙動の把握を目的とした室内試験

(公財) 鉄道総合技術研究所 正○藤原将真 正 高柳剛 正 深野雄三

1. はじめに

簡易動的コーン貫入試験は斜面等の地盤調査に広く用いられているものの、試験値と土質の関係や動的貫入挙動については未解明な部分も多い。この貫入挙動を理解するパラメータの一つとして打撃効率 e (= ロッドに伝達されて貫入に消費される貫入エネルギー/ハンマーの打撃エネルギー) があり、貫入試験より得られた試験値 N_d を異なる貫入試験の試験値に換算する場合などにおいて重要となる。既往の研究として、標準貫入試験 (以下、SPT) では地盤条件が打撃効率に与える影響などの知見が報告されている^(例えば1)。その一方で、簡易動的コーン貫入試験についての知見は多くない。そこで本研究では地盤条件の違いが簡易動的コーン貫入試験の打撃効率に与える影響を把握することを目的として、せん断強度の異なる複数の供試体に対して室内貫入試験を実施した。さらに打撃時に観察された貫入挙動の違いから、地盤強度が貫入量に与える影響のメカニズムについて考察した。

2. 試験概要

本試験機の概要を図1に示す。簡易動的コーン貫入試験機の全長は2.1m、先端コーン (φ25mm) から高さ0.7mの位置にロードセル、0.5mの位置にレーザー変位計の反射板を設置している。ロードセルからアンビルの上端 (打撃端) までの距離は約0.3mである。試験ではロッドに対してハンマー(5kg)を自由落下($h=0.5m$)で打撃し、直径300mm、高さ300mmのモールド内地盤に貫入した。地盤条件を表1に示す。地盤材料はセメント固化した珪砂3号である。主な測定項目はロッドの荷重と変位 (貫入量) で、サンプリング周期は10μsecとした。また供試体の強度把握のため、同条件で作製した供試体 (100×100×100mm) にて、定圧一面せん断試験を実施し、粘着力 c' および内部摩擦角 ϕ_d を求めた。貫入エネルギー E は式 (1)²⁾ にて算定した。

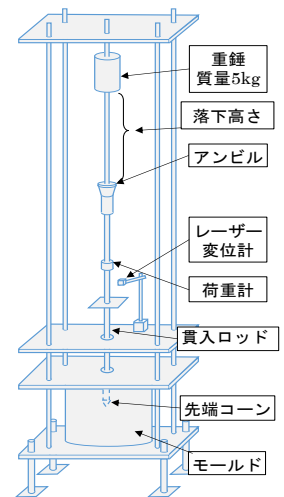


図1 貫入試験機

表1 モールド地盤 (供試体) 条件

土質 (D_{50} ρ_{dmax})	配合比 土:セメント (質量比)	養生 期間 (日)	含水比 w (%)	乾燥密度 ρ_d (g/cm^3)	粘着力 c' (kN/m^2)	内部摩擦角 ϕ_d (°)
珪砂3号	40:1	3	2.4	1.42	1.5	33.4
(1.25mm 1.58 g/cm^3)	40:1	3	2.4	1.54	28.9	38.7
	30:1	3	3.2	1.53	80.6	46.1

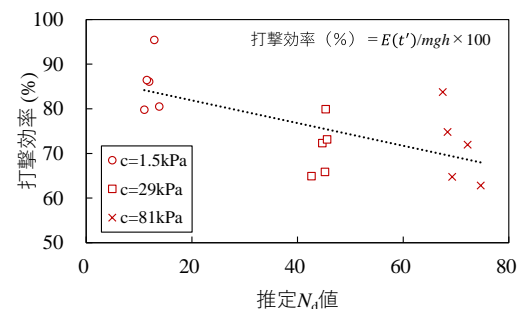
$$E(t') = \int_0^{t'} F(t)V(t)dt \quad (1)$$

F は打撃時のロッドに生じる力、 V はロッドの貫入速度であり、 V は変位より算出した。

3. 実験結果

せん断強度の異なる地盤の推定 N_d 値と打撃効率 e の関係を図2に示す。なお推定 N_d 値 (以下、 N_d') とはロッドを100mm貫入するのに必要な打撃回数を1回の貫入量から換算した値である。一打撃毎のバラツキは±20%程度生じている。また打撃効率は地盤の N_d' の増加に伴い減少する傾向を示した。既往の研究で国内のSPTの打撃効率は80~100%程度²⁾と報告されており、簡易動的コーン貫入試験もほぼ同様である。ただし概ね $N_d' > 40$ 以上の領域では、簡易動的コーン貫入試験の打撃効率は低下する。

図3に $N_d' = 12$ および $N_d' = 70$ の供試体におけるロッドの荷重および変位の時刻歴データの例を示す。荷重については正が圧縮、負が引張りの荷重を示す。 $N_d' = 12$ の供試体においては、圧縮と引張りの荷重を交互に生じながら徐々に減衰した。一方で $N_d' = 70$ の供試体では、第一波の荷重のピーク値は $N_d' = 12$ と同等であるものの、第二波以降に周期の長い圧縮荷重が顕著に発生し、

図2 推定 N_d 値と打撃効率の関係

キーワード 貫入試験, 打撃エネルギー, 地盤災害

連絡先 〒185-0034 東京都国分寺市光町2-8-38 (公財) 鉄道総合技術研究所 地盤防災 TEL 042-573-7263

荷重波形は早くに減衰した。この荷重は試験機内を往復して伝播する応力波(=荷重/ロッド断面積)を捉えている。既往の研究¹⁾により、SPTの応力波は試験機ロッド先端での反射時に地盤の影響を受けると知られ¹⁾、 N 値の小さい緩い地盤内でのロッド先端、またロッド上端では応力波が反射する際には、圧縮が引張に、引張は圧縮に反転する。また緩い地盤では、 N 値が小さいほど地盤に透過する応力波の割合が小さくなる。 $N_d=12$ の供試体では応力波が圧縮と引張に交互に変化し緩やかに減衰しながらロッドが貫入している。一方で N 値が大きい固い地盤内ではロッド先端において応力波は同符号(圧縮)で反射し、アンビル部でハンマーの再上昇運動等の貫入挙動以外の運動に消費される。このような影響もあり、 $N_d=70$ の供試体では早期に応力波が減衰したと考えられる。SPTでは、 N 値が30程度を境に、上記のようにロッド先端の反射条件が変化すると報告されている¹⁾。岡田らの式³⁾から、推定 N_d 値を N 値に換算すると、 $N_d=70$ は $N=21$ に相当する。

変位(貫入量)に着目すると、圧縮荷重の発生に応じて累積的に変位が進行する傾向を確認した。特に $N_d=12$ の供試体では上記傾向は顕著であり、複数回の応力波の往復伝播に応じて、段階的に貫入が進行している(図3上)。また、図4に各圧縮波の発生時における、荷重の最大値と変位の増分の関係を示す。ここで、強度の大きく異なる2種の供試体において、1波目の圧縮荷重により生じる変位量は同程度となっている。図4の $N_d=12$ の事例に着目すると、荷重が概ね6kN以上の条件では圧縮荷重と変位の増分はほぼ比例関係にあるが、荷重が6kNを下回ると荷重作用で生じる変位が著しく低下する。この関係は $N_d=70$ のケースでは異なり、荷重8kN程度で全く変位が進行しなくなり、この荷重-変位関係は特に低い荷重条件では地盤条件によって大きく異なると分かる。

以上を総合すると、簡易動的コーン貫入試験の貫入量はロッドに伝達する応力の大きさと往復回数により規定されることを基本として、荷重波形の1波目(高い応力条件)では地盤条件が及ぼす貫入量への影響は限定的であるが、2波目以降の低い荷重領域の荷重-変位関係は地盤条件に影響を受け、さらに2波目以降は地盤条件により荷重波形の減衰に違いが生じ、両者の影響が複合して最終的な N_d 値の違いとなって表れると理解できる。

図5にロッドの変位速度と貫入エネルギーの時刻歴を示す。変位速度は、前述の変位挙動より2波目の圧縮波以降、 $N_d=70$ の供試体では相対的に速度が低下する。貫入エネルギーは、前述の荷重挙動、速度挙動の違いから、2波目の圧縮波以降、 $N_d=12$ の供試体では貫入エネルギーの積算が継続するに対し、地盤のせん断強度が大きい供試体では応力波が早期に減衰するため、 $N_d=70$ の供試体においてエネルギー効率は低下したと考える。

4. まとめ

簡易動的コーン貫入試験の打撃効率は概ねSPTと同レベルであるものの、高い N_d 値の固い地盤では若干低下する場合がある。簡易動的コーン貫入試験の N_d 値を規定する貫入量は、地盤状態により異なる「地盤内ロッド先端の応力波形の反射条件」および「作用応力と地盤貫入量の関係」が複合して決定されると想定される。今後、貫入試験の動的挙動のデータを分析することで地盤性状をより詳細に分析する手段など検討を進めていきたい。

参考文献 1)西沢芳章, 冬木衛, 宇都一馬: SPTに関する原位置実験とその効率について. サウンディングシンポジウム, 土質工学会, pp83-92,1980.11. 2)地盤工学会: 新規制定地盤工学会基準・同解説 動的コーン貫入試験方法(JGSI437-2014), pp.31-34,2016 3) 岡田勝也・杉山友康・野口達雄・村石尚: 盛土表層部の土質強度に関する異種のサウンディング試験結果の相関性, 土と基礎, Vol.40, No.411, pp.11~16, 1992

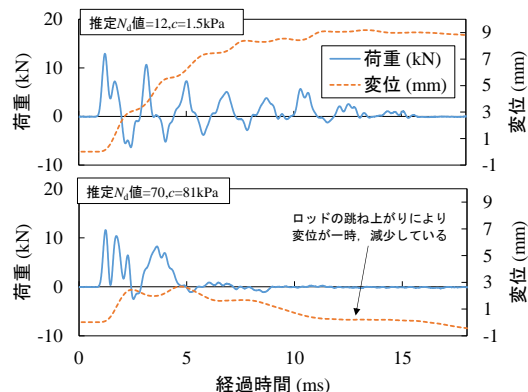


図3 荷重, 変位の時刻歴

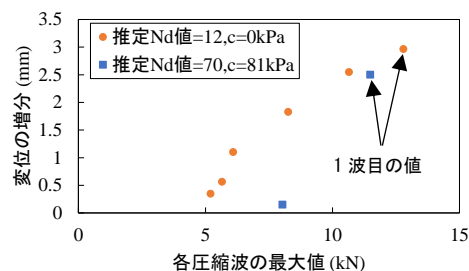


図4 圧縮波における最大荷重と変位の関係

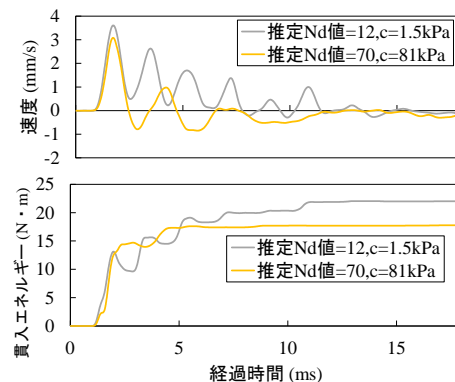


図5 速度, 貫入エネルギーの時刻歴