

改良型簡易貫入試験機の開発

川満一史*

1. はじめに

斜面調査用として、土研式貫入試験機を小型軽量化した簡易貫入試験機¹⁾（従来型と称す）は、地表下5m程度以浅における地盤の構造を簡易的に把握するために優れた装置である。しかし、表層部における根系発達状況の把握等微妙な構造の把握や地表下5m程度に位置すると考えられる表層崩壊等すべり面については、その5kg重錘による貫入力の高さにより、十分に把握できない傾向にある。一方、根系発達深度等、地表付近の微妙な構造を把握することを目的として重錘2kgの長谷川式土壌貫入計（長谷川式と称す）が開発されているが、ロッドの周面摩擦等の影響や貫入力の不足により2m以深の測定が困難であるという問題が生じている。そこで、上記両試験機の欠点を補い、かつ両試験機の探查能力を備えた貫入試験機（改良型と称す）の開発を、ジオグリーンテック株式会社との共同で行った。また、これらの試験機を用いて現地測定を行い、改良型の特性を検討したので、ここに報告する。

2. 改良型簡易貫入試験機の構造

従来型と長谷川式の探查能力を備えたものとなるよう検討した結果、改良型の構造を以下のとおりとした。

- ①重錘を3kgと2kgに分割し、着脱可能な構造とした。3kg重錘による測定は、長谷川式と同等の

分解能・貫入力で、浅い深度における地下構造を詳細に把握できるものとし、さらに2kg重錘を追加することにより、従来型と同等の測定能力を確保し、基礎地盤深度等の推定を可能とした。

- ②従来型、長谷川式のロッド径はいずれもφ16mmだが、先端部のコーン径は従来型がφ25mm、長谷川式がφ20mmである。φ25mmのコーン径の方が周面摩擦の影響を受けにくく、深部まで測定可能であるため、改良型のコーン径をφ25mmとした。
- ③長谷川式同様、試験機本体と並行に目盛りの付いたガイドポールを取り付けた。これにより、一打撃毎の貫入量を読み取ることができ、より詳細な解析が可能となった。
- ④従来型に比べ、破損しにくい材質・構造とした。

2.1 着脱式重錘

開発した着脱式重錘（3kg重錘に2kg重錘を付加出来る機構）を写真2.1に示す。

この構造では、測定器を解体しなくても2kg重錘を測定途中で付加可能である。また装着部がテーパ構造になっているため装着後（右写真）は一体化して外れにくく、しかも取り外しはハンマーを用いれば簡単に出来る。

表2.1 各試験機の構造

	土研式貫入試験機	従来型 (簡易貫入試験機)	長谷川式	改良型
先端コーン径	φ 30mm	φ 25mm	φ 20mm	φ 25mm
貫入ロッド径	φ 25mm	φ 16mm	φ 16mm	φ 16mm
重錘	5kg	5kg	2kg	3kg+2kg(着脱式)
材質(重錘以外)	—	S45C SUS416	SUS304	SUS304
測定方法	—	10cm貫入毎の打撃回数(Nc値)を測定	一打撃毎の貫入量を測定	一打撃毎の貫入量を測定

* (財)砂防・地すべり技術センター 斜面保全部



写真2.1 着脱式重錘 (3kg→5kg)

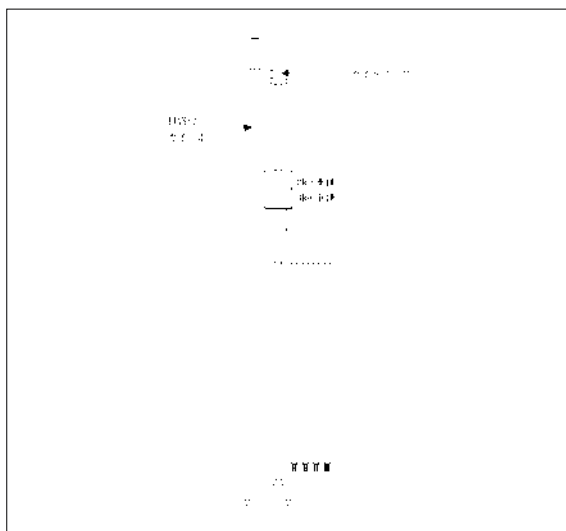


図2.1 改良型簡易貫入試験機の全体図

2.2 試験機の材質

従来型と長谷川式の材質を参考に、改良型では表2.1に示す材質とした。主な改良点は重錘以外の材質をステンレスSUS304にして強度を増したことであり、従来型に比べ、ネジの折損やネジ山の潰れが発生しにくい。

3. 各試験機の貫入力比較

各試験機によるN10値測定結果から、従来型、長谷川式の貫入力をそれぞれ1とした時の改良型の貫入力比を土質別に表3.1に示す。比較に用いたN₁₀値とは先端コーンが10cm貫入するのに要する打撃回数であり、従来型によるN₁₀値はN_c値と同意である。また、表中の計算値とは動的貫入試験機の貫入力の比較によく用いられるもので、「重錘 (kg) × 落下距離 (m) / コーンの面積 (cm²)」により求められる。

改良型 (3kg重錘) の貫入力は、計算値によれば長谷川式とほぼ同等 (長谷川式: 改良型 = 1 : 0.96) である。実際の試験結果でも、それに近い貫入力 (1 : 1.04) が得られた。すなわち、改良型は長谷川式同様に軟らかい土層での分解能が高く、根系発達深度等を把握可能と考えられる。

また、従来型に対する貫入力比は、計算値では従来型: 改良型 = 1 : 0.60で、現地測定の結果では、約半分の貫入力 (従来型: 改良型 = 1 : 0.51) となった。この結果は、大久保ら²⁾の報告 (重りを変えた時の換算) とほぼ一致する結果となった。

表2.2 改良型簡易貫入試験機の材質

部 位	材 質	熱 処 理	表面処理	従来型の材質
先端コーン	SUS304	高周波焼入れHRC55~60	未処理	S45C
ノッキングヘッド	SUS304	熱処理なし	未処理	S45C
ロッド	SUS304	熱処理なし	未処理	SUS416
ガイドロッド	SUS304	熱処理なし	未処理	SUS416
重錘	S45C	熱処理なし	電気亜鉛メッキ	S45C

これより、改良型（3kg重錘）のN₁₀値は次式を用いて、従来型のN_c値に換算できる。

$$N_c \text{値(従来型)} = 0.5 \times N_{10} \text{値(改良型3kg)} \quad r=0.75$$

表3.1 従来型、長谷川式に対する改良型（3kg重錘）の貫入力比

	従来型=1	長谷川式=1
計算値*	0.60	0.96
マサ土	0.65	1.15
関東ローム層	0.44	1.00
第四紀砂層	0.54	1.05
粘性土	0.44	0.97
全体	0.51	1.04

*計算値(kg・m/cm²)=重錘(kg)×落下距離(m)/コーンの面積(cm²)

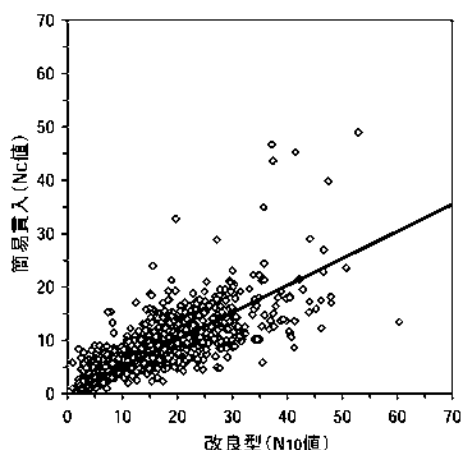


図3.1 N_c値（従来型）とN₁₀値（改良型3kg）の関係（全土質）

4. 現地適用性の検討

4.1 貫入抵抗値の一打撃毎表示による解析力

従来型では、N_c値と称して10cm貫入毎の打撃回数で土層構造を解析してきたのに対し、改良型では一打撃毎の貫入抵抗値（N₁₀値）で解析できるようにした。その解析力の差異について一例を挙げる。

図4.1に礫含有土層における貫入試験結果（改良型3kg）を示す。

福永ら³⁾は、礫の混入によりN_c値は著しく変化し、植物の生育との関わりをもつ土層の判断が難しくなると報告し、礫含有土層のN_c値の問題について指摘している。N_c値のように10cm貫入毎の打撃回数で表示した場合、礫にぶつかった瞬間の貫入抵抗値とマトリックス（土）の貫入抵抗値は平均化され、図4.1左図のように全体的に高めめの値となる。

同じ測定結果を一打撃毎のN₁₀値で表すと図4.1右

図のようになる。貫入抵抗値が著しく高くなるのは貫入コーンが礫にぶつかったためと推測され、その度にN₁₀値50以上の貫入抵抗値を示す傾向が見られるが、礫にぶつかっていない時の貫入抵抗値は低い値を示している。

植物の根系はこのような礫と礫の間の軟らかい部分を縫うようにして伸長する。実際に、この礫含有土層にもスギ根系の発達が認められた。

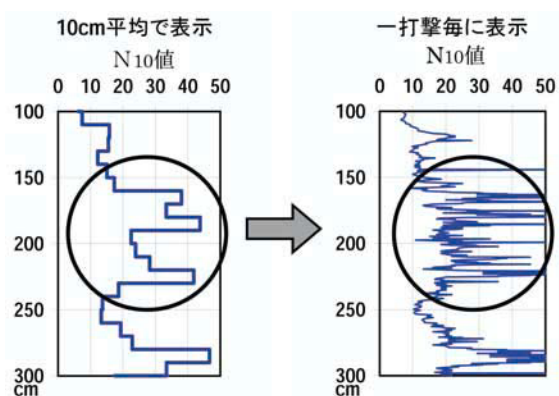


図4.1 礫含有土層での調査事例（改良型3kg）

このように、改良型は一打撃毎の貫入抵抗値を記録可能な構造としたため、こうした礫を含有する土層においても礫による貫入抵抗値とマトリックス（土）本来の貫入抵抗値を分離することが出来る。その結果、表層崩壊面の推定において重要な要素となる樹木の根系発達深度も的確に把握出来るものといえる。

4.2 基礎地盤深度の推定

構造物等の支持基盤強度の目安は、一般に標準貫入試験によるN値により、砂質土では30<、粘性土では20<とされている⁴⁾。

N値とN_c値の関係については、大久保ら¹⁾や稲田²⁾により、N_c=(1~4)Nという関係が得られているので、N値による支持基盤強度を30<とすれば、N_c値に換算しても30<となる。

この判断値を改良型に適用した場合、前項3で示した関係式N_c値（簡易貫入）=0.5×N₁₀値（改良型3kg）より、改良型N₁₀値60<という判断値になるが、この値は、3kg重錘による測定限界N₁₀値50を上回り（一打撃の貫入深2mm以下）、測定不能域である。

そこで、着脱式の2kg重錘を追加し、5kg重錘として測定する。すなわち、構造上は従来型と同じ能力になり、改良型（5kg重錘）による支持基盤強度も、

従来型と同じ N_{10} 値= N_c 値30<で評価することができる。

このようにして基礎地盤深度を推定した例を図4.2に示す。

図から見て取れるように、3kg重錘では基礎地盤深度に達する前に測定不能となったが、途中で2kgの重錘を追加すると、従来型と同じ貫入力となって、より深層にある基礎地盤深度の推定が可能となった。

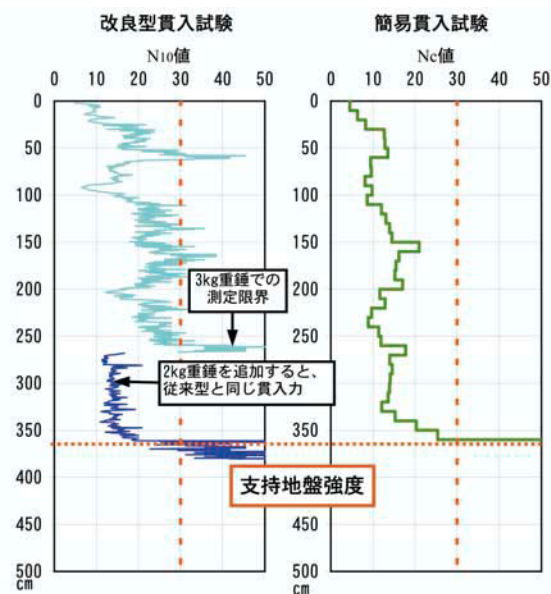


図4.2 基礎地盤深度推定の検証

4.3 表層崩壊面の予測

表層崩壊に関するこれまでの調査事例^{(4), (6), (7), (8)}をまとめると、概ね N_c 値10~15を崩壊すべり面の境界としている例が多い。しかし、水文学的基盤が N_c 値20に相当すること⁽⁹⁾や、良好な根系発達基盤が N_c 値5以下であること⁽¹⁰⁾との関係なども考慮すると、どの数値で崩壊面の境界を引くかについて、現状では統一的な見解は得られていない。勿論、崩壊面が土層の硬さだけで決まる訳でなく、地質（土質）や植生等の違いが大きく影響するからであろうが、試験そのものの検出限界、精度も原因の一つになっているのではないかと考えられる。

従来の簡易貫入試験機は、軟らかい土層での分解能が低い。すなわち、貫入力が強すぎるために、根系が発達する N_c 値5~10程度の軟らかい土層では硬さの違いが現れにくい。また、硬さを10cm毎に平均化した N_c 値で表示するので、礫や根系の影響を

受けて全体的に高めの N_c 値となり土層本来の硬さを評価し難い。

このような視点で、改良型による表層崩壊面の予測可能性について検討した。

仮に、崩壊すべり面の境界を N_c 値10だとすれば、前項3で示した関係式「 N_c 値= $0.5 \times N_{10}$ 値（改良型3kg）」より、改良型（3kg重錘）では N_{10} 値20となる。

改良型 N_{10} 値20という数値は、次項4.4で述べる根系発達との関係において、樹木根系の侵入が困難となる硬さに相当する。すなわち、崩壊に対して根系による杭効果・緊縛効果がなくなる土層の硬さに相当しており、崩壊すべり面の境界値として妥当と考えられる。

実際に、崩壊跡地において従来型と改良型で測定した結果を図4.3に示す。崩壊は、深さ350~400cm間にある灰色土の上部あたりで起こっているが、この土層の境界で改良型（重錘3kg）による N_{10} 値は急激に変化し、測定不能となった。これに対し簡易貫入試験機では崩壊面前後において N_c 値が漸増しているものの、改良型のような顕著な変化は見られなかった。

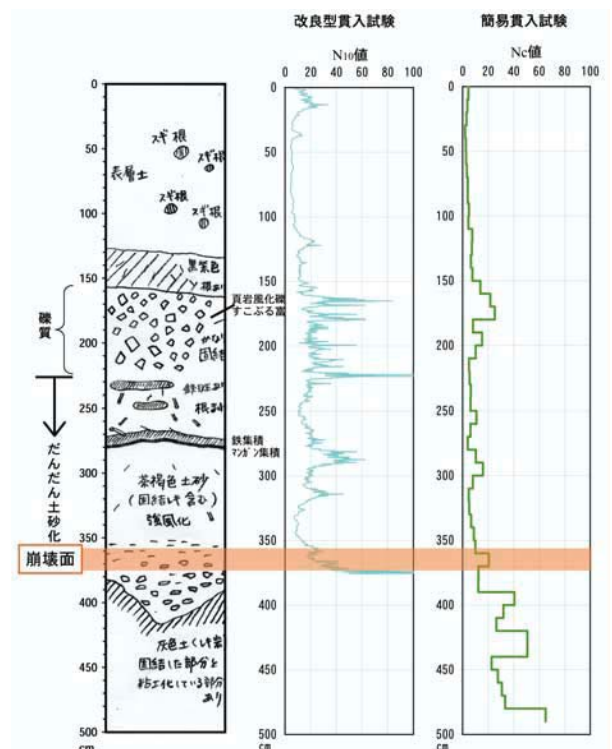


図4.3 崩壊跡地での貫入試験例

表4.1 各試験機のN₁₀値と根系発達深度の関係

調査地	樹種	根の最大到達深		根の最大到達深における各試験機のN ₁₀ 値		
		深さ cm	層位	簡易貫入	長谷川式	改良型 (3kg重錘)
滋賀県田上山 (マサ土)	アカマツ	155	C層	25以上	測定限界	測定限界
	コナラ	150	2C2層	5	15	15
	アカマツ	190	2C3層	5	30以上	20以上
農大厚木 (関東ローム)	コナラ	220	C層	10以上	20以上	20以上
	イヌシデ	200	BC層	10以上	20以上	20以上
農工大波丘地 (第四紀砂層)	コナラ	155	C層	15以上	20以上	20以上
	クヌギ	220≦	2C3層	20以上	測定限界	測定限界

4.4 樹木の根系分布と貫入抵抗値の関係

表4.1に、根系調査結果より読み取った根系が完全なくなる最大到達深と、それに対応する各試験機のN₁₀値の関係をまとめた。

既往の試験・研究では

- Nc値5~6で根系直径合計割合5%以下¹¹⁾
- 長谷川式によるS値0.7以下(=N₁₀値15)で多くの根が侵入困難¹²⁾

となっており、本調査結果はこれらの基準値に近似、またはやや高めを示す傾向がある。

こうした既往の基準値をふまえて、今回の調査結果をまとめると、根系発達土層の硬さは次の通りとなる。

- ①従来型：N₁₀値5~10以下とするが、バラツキが大きく不明瞭
- ②長谷川式：N₁₀値15~20以下(20以下とする方が妥当)
- ③改良型：N₁₀値15~20以下(20以下とする方が妥当、長谷川式とほぼ同等)

樹木根系分布とN₁₀値の関係の代表的な例を図4.4に示す。

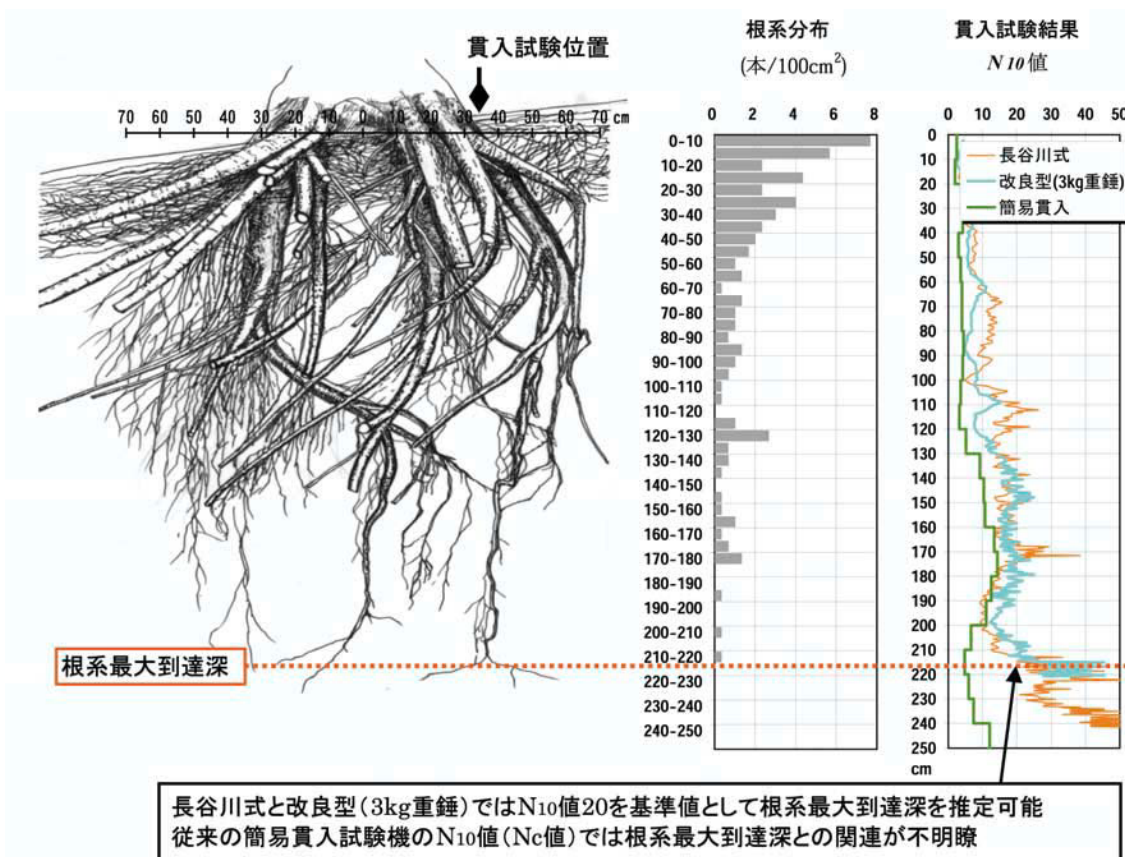


図4.4 貫入試験による根系発達状況の把握例 (東京農業大学厚木キャンパス コナラ)



5. 今後の課題

本報では、従来型貫入試験機と同じ能力を持つ改良型簡易貫入試験機を開発したことを報告したが、今後対応すべき課題として以下の事項が挙げられる。

- ①改良型と従来型試験機との相関を確認するため、さらに測定データを蓄積し、その精度を高める。
- ②表層崩壊面の予測については、現段階では検証例がほとんど無いため、今後より多くの事例、特に崩壊跡地での調査数を増やし、貫入試験による崩壊面の推定精度を高める。
- ③根系分布と貫入抵抗値との関係において、貫入抵抗値の高い土層まで根系が発達する樹種が見られた（アカマツ、クヌギ）。これらの樹種の根は一般的に深根性かつ耐堅密性であるとされるが、その実態については既往の研究事例がないため不明である。今後こうした根系の樹種特性を把握し、崩壊との関連性について解明していく。
- ④作業の効率化のため、一打撃毎の貫入量を自動的に測定する装置を開発予定である。

6. 謝辞

本研究を行うにあたり調査地の提供等ご協力いただいた、東京農業大学厚木キャンパス、東京農工大学FSセンターFM多摩丘陵、東京大学愛知演習林赤津研究林の関係者の皆様に、厚く御礼を申し上げます。

引用文献

- 1) 大久保駿・上坂利幸（1971）：簡易貫入試験機による地盤調査，土木技術資料，13（2），83-87
- 2) 大久保駿・上坂利幸・船崎昌継（1971）：簡易貫入試験機による地盤調査（2）－試験機の性能－，土木技術資料，13（8），403-409
- 3) 福永健司・山寺喜成（1988）：土研式貫入計を用いた生育基盤厚の測定値に及ぼす土層中の礫の影響について，第19回日本緑化工学会研究発表会研究発表要旨集，32-35
- 4) 建設省河川局砂防部監修（1998）：新・斜面崩壊防止工事の設計と実例，（社）全国治水砂防協会
- 5) 稲田倍穂（1960）：スウェーデン式サウンディング試験結果の使用について，土と基礎，8（1），

13-18

- 6) 瀬尾克美・宮田衛（1969）：六甲山系における航空写真による流出土砂量算定と崩壊予想について，直轄技術研究会
- 7) 日浦啓全・大手桂二・日置象一郎・村上公久（1978）：山地における土砂生産に関する研究（I），京都府立大学農学部演習林報告，22，36-53
- 8) 水山高久・小菅尉多（1993）：表層崩壊予測のための土層調査例，新砂防，46（1），38-40
- 9) 太田猛彦（1988）：森林山地斜面における雨水の流出について，水文・水資源学会誌，1（1），75-82
- 10) 山寺喜成・塚本良則・太田猛彦・福永健司（1986）：切取法面跡地等裸地の植生復元に関する研究（Ⅲ）：道路緑化保全協会，145-146
- 11) 福永健司・山寺喜成（1992）：樹木の地上部生育に関わる有効土層厚の推定方法と根系伸長の実態，第23回日本緑化工学会研究発表会研究発表要旨集，90-93
- 12) 建設省土木研究所（1995）：植栽基盤造成技術に関する共同研究報告書