

(60) 土砂トンネルの切羽安定に関する研究

千葉県真間川改修事務所	印東 亮
千葉県真間川改修事務所	青木高臣
清水建設株式会社	正会員 竹林亜夫
清水建設株式会社	正会員 ○石井三郎

Study upon Tunnel Face Stability through Loose Sand Layers

Makoto INDOU,	Mama River Improvement Office, Chiba Pref.
Takaomi AOKI,	Mama River Improvement Office, Chiba Pref.
Tuguo TAKEBAYASHI,	Shimizu Corporation
Saburou ISHII,	Shimizu Corporation

ABSTRACT

Face stability is an important factor which could be considered in tunneling through loose sand layers for the safe and economical design. However, due to the complicated ground conditions near the tunnel face, its mechanism still has not been well understood. The purpose of this study is to examine the mechanism of the face instability based upon the in-situ test results and observed data from the Kokubu River Tunnel Project, in which the face instability problem was observed.

From the result of this study, it has been found that the strength of the ground decreases near the tunnel face due to the effect of excavation, and this reduction could cause the face instability problem.

1. はじめに

都市域の未固結地山にNATMを適用する場合、トンネルの掘削に伴う周辺地盤の変状や地表の沈下を防止する技術とともに、切羽をいかに安定させるかが重要な技術課題となる。しかしながら、トンネルの掘削に伴う切羽安定のメカニズムについては未だ解明されていない点が多く、崩落性の予測についても手法が確立されているとは言い難い。なお、この機構の解明を難しくしている要因には、

- ①トンネルの掘削によって地中応力の再配分が行われるが、切羽の安定性を論ずるのに関連の深い切羽周辺部では特に複雑な応力状態が発生していると考えられる。
- ②地中応力の変化や地中ひずみの増加に伴って地山の強度が変化するが、計画時のデータからのみでは、この変化を的確に把握し難いと考えられる。
- ③補助工法等の施工条件の相違が切羽の自立性に与える影響を評価する方法が確立されていない。

等が考えられる。そこで、本文では研究の第一段階として、未固結砂層の成田層を対象として施工された国分川分水路トンネルにおいて、原位置の力学試験を用いて調査した切羽近傍の地山の力学的性質の変化について報告する。

2. 国分川分水路トンネルの概要

国分川分水路トンネルは千葉県松戸市の南部に位置し、洪積台地下を延長2555mで通過する分水路トンネ

ルである。このうち、今回の調査・試験を行った中間立坑上流工区¹⁾は、松戸市二十世紀ヶ丘に設置された中間立坑より上流側に336m下流側に48mの延長をもつ工区である。

2. 1 地形と地質

中間立坑上流工区の地形は、二十世紀ヶ丘地区の丘陵部と大橋地区の谷地に抜ける斜面部に区分され、土被りは丘陵部で約16mとなる。地質は洪積世成田層群の最上部の細砂層(D_{s1}層)である。(図-1地質縦断面図参照)このD_{s1}層は、丘陵部でN値が20~50と締まった状態であるが斜面部ではN値が20~5と緩い状態となっている。

事前のボーリング調査から明らかとなっているD_{s1}層の地山の物性を表-1に示す。同表では、土木学会による流動化の指標²⁾を合わせて示したが、D_{s1}層は流動化しやすい未固結含水細砂地山であるので地下水位の低下が必要となるが、低下後も不飽和状態となった細砂地山の粘着力が乏しく切羽の自立が得難い地層である¹⁾。

2. 2 トンネルの施工法

トンネルの標準断面を図-2に示す。掘削断面積は丘陵部区間で60.6㎡、斜面部区間で63.4㎡の分水路トンネル(計画流量100 ㎡/s)である。また、トンネルの掘削工法はショートベンチカットで、上半掘削は自由断面掘削機を使用したリングカット方式とした。(これらトンネルの施工法は本工区の施工に先立って実施された試験工区(延長282m)³⁾で確立されている。)なお、地下水対策としては、地表からのディープウェルおよび坑内からのウェルポイントによる水位低下工法を実施した¹⁾。また、切羽の自立対策として、一般(丘陵部)の区間は鉄矢木、切羽モルタルボルト、及びリング部分割掘削等の補助工法が採用された。(図-3補助工法参照)

3. 切羽の崩落の状況

鉄矢木やリング部分割掘削等を主な補助工法とした区間では、地下水位低下後の地山の含水比が10%前後と低く、細粒分含有率も5%以下と低いことから地山の粘着力(見掛けの粘着力⁴⁾)が小さく、トンネルの切羽の安定を確保することが困難であった。(この区間では合計で16回の小崩落が発生したが、幸いなことに迅速で的確な対応等のため、大きな問題とはならなかった。)従来の研究では、この地域の成田層の細砂地山では、地下水位低下後の切羽自立性の判断の指標として、含水比と細粒分含有率の二つの指標が実用的で優れていると結論している⁵⁾。そこで、小崩落が頻発した区間の地山の含水比と細粒分含有率の関係を整理して示すと図

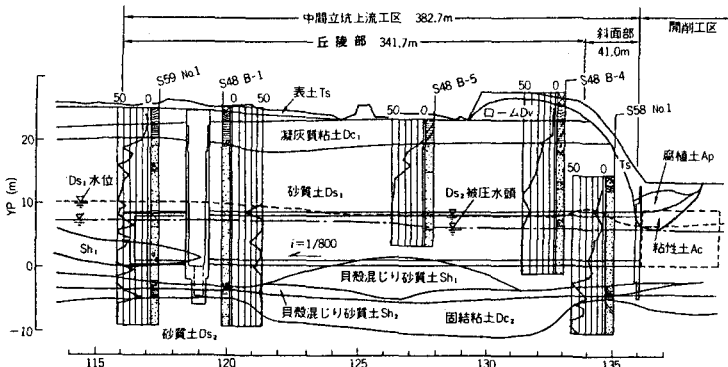


図-1 地質縦断面図

表-1 D_{s1}層の物性

	単位	ボーリング調査	地山の流動化の指標
均等係数	U c	1.54~14.32 平均3.48	U c ≤ 5
細粒分含有率	%	2.2~25.2 平均7.8	≤ 10 %
湿潤密度	r ...	g/m ³	1.74~1.98
土粒子比重	G s	2.67~2.71 平均2.69	
粘着力	C d	kgf/cm ²	0.0~0.092
内部摩擦角	φ d	度	40.1~42.0
貝殻層厚	m	D c ₂ s層上 0.4~6.5	
透水性係数	k	cm/s	D s ₁ 層 8.85×10 ³ 貝殻層 2.02×10 ²

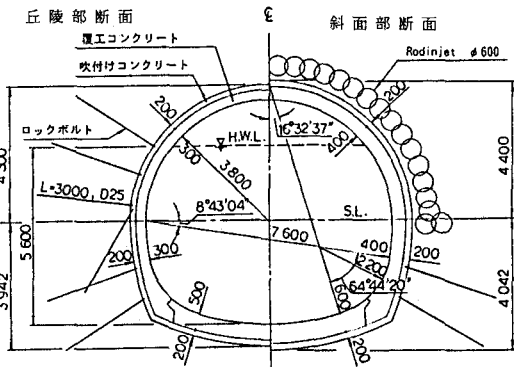


図-2 標準断面図

-4 になる。図中 $w = -2f + 30$ は試験工区の施工実績から提案された切羽の安定性の判断基準⁵⁾であるが、①当区間では、ほとんどのデータが不安定領域に分布していること、②この区間の小崩落は、含水比が 10.5% 以下で細粒分含有率が 3.5% 以下の特に

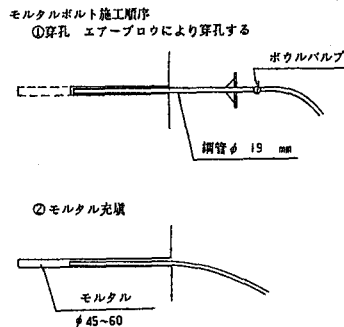
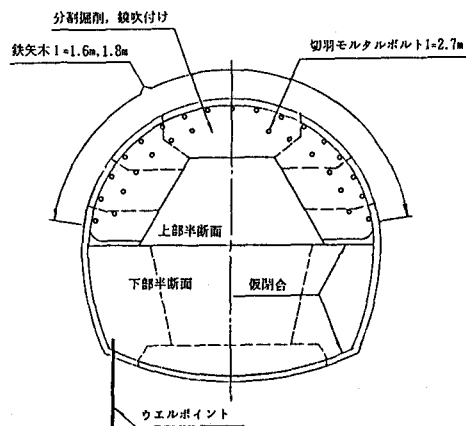


図-3 補助工法

限られた範囲(仮に「危険領域」と呼ぶ)で発生していること、また、③危険領域にあっても崩落を発生しない切羽がある、等が明らかとなった。なお②の崩落の発生する範囲が縮小された理由については、中間立坑上流工区で今回新しく採用した切羽モルタルボルトやリング部分割掘削の補助工法の効果が挙げられるが、③の結果については、切羽の崩落機構の研究において地山の物理的特性の把握に加えて力学的特性の調査が必要であることを示唆するものと考えられた。そこで、トンネル切羽で実施する原位置の力学試験を実施することとした。

4. 調査・試験の方法

未固結砂層のトンネル切羽での地山の特性(物理的・力学的特性)を把握するため、表-2に示す原位置試験、室内試験を実施した。切羽における原位置試験、室内試験の試料採取位置は図-5に示す。

表-2 試験項目

分類	試験項目	規格	備考
土の物理的性質試験	○土粒子の比重試験	JIS A 1202	・土質工学会
	○含水量試験	JIS A 1203	
	○単位体積重量試験	ノギス法	
	○粒度試験	JIS A 1204	
現位置の力学的性質試験	○ロッド貫入試験		・φ10mmの平頭ロッドの1cm貫入時の抵抗値を測定する。 ・φ10mm、 $\ell=20$ mmの小型ベーンのせん断抵抗を測定する。 ・刃形付円板(外径40mm、内径20mm)を押しつけながら回転させ、その時のせん断抵抗を調べる。
	○ポケットペーン試験		
	○携帯原位置せん断試験		
	(○山中式土壌硬度計)		
室内の力学的性質試験	○三軸圧縮試験(CD)	・土質工学会	・拘束圧 $\sigma_v = 1.0, 2.0, 4.0, 6.0 \text{ kgf/cm}^2$

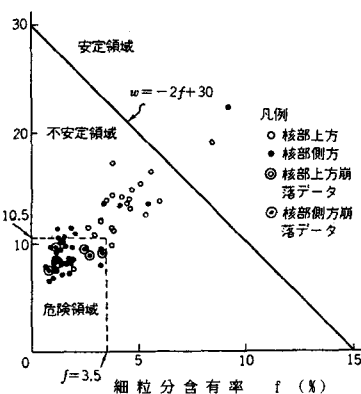


図-4 含水比と細粒分含有率

三軸試験(ブロック・凍結サンプル), 単位体積重量試験

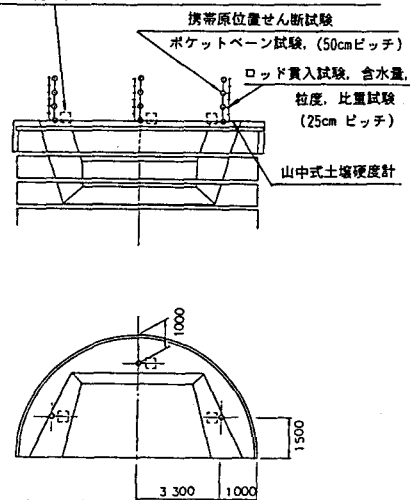


図-5 試験位置

5. 試験結果

今回の調査・試験を実施した区間 (No. 130+8.3m~No. 134+18.2m) では、切羽の小崩落が発生しなかったため切羽の安定性判断に原位置の力学試験結果を用いた基準を提案することはできないが、未固結の地山において切羽周辺で発生する地山の力学特性の変化を明らかにすることができた。以下、その結果を述べる。

5. 1 ロッド貫入試験の結果

コーンペネトロメーターを利用して作成したロッド貫入試験機による試験結果を図-6に示す。ロッド貫入抵抗は、切羽表面近くで低く切羽から離れるに従って大きく増加し、1mより奥でほぼ一定の範囲で分布するようになる。ロッド貫入抵抗は、地山強度と地中応力の両方により左右されると考えられるので、貫入抵抗から一概にそれらの切羽周辺部での分布を判定することはできないが、トンネル掘削に伴う地山強度の低下範囲は、概ね切羽から前方1mの範囲であるように考えられる。

5. 2 携帯原位置せん断試験の結果

携帯原位置せん断試験は、地山に刃形付円板を押しつけながら回転させ土のせん断強さを調べるもので、異なる垂直応力のもとで試験ができるので現場で容易に強度定数を測定することができる。図-7には同試験による粘着力 c (kgf/cm^2) の測定値を示した。この測定値の変化には、つぎのような特徴がある。①切羽表面での粘着力 c は、1.5m地点のそれに比較して若干低下する。②切羽奥50cm地点では平均値が1.5m地点のものに比べ大きくなり、ばらつきも大きくなる。図-8にはせん断抵抗角 ϕ (度) の値を示した。原位置せん断試験によるせん断抵抗角は、つぎのような変化をする。①せん断抵抗角は、平均値で見ると、切羽表面に近づくにつれて緩く減ずる。②50cm地点では粘着力の測定値と同様に、ばらつきが大きくなっている。

5. 3 ポケットペーンせん断試験の結果

図-9には、ポケットペーンせん断試験結果のピークせん断抵抗値を示した。ピークせん断抵抗は切羽前方50cmから表面にかけて著しく低下する。また、50cm、1mの地点においては、平均値については1.5m地点の値とほぼ同様となっているが、ばらつきは若干大きくなっているように思われる。図-10にはポケットペーンせん断試験結果のうち回転角度が大きくなって残るようなせん断抵抗 (仮に「残留」と呼ぶ) を示す。せん断抵抗 (残留) は、切羽前方50cm、1mの両地点で値もばらつきも大きくなっている。

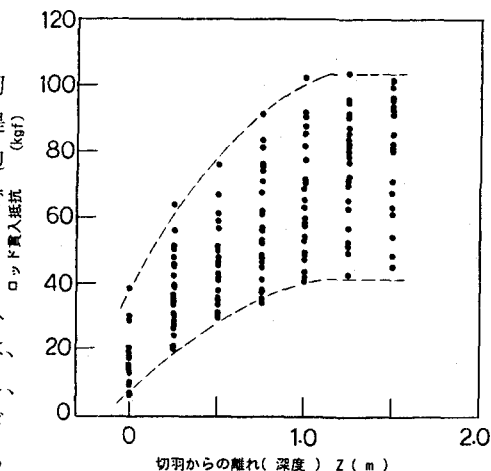


図-6 ロッド貫入試験結果

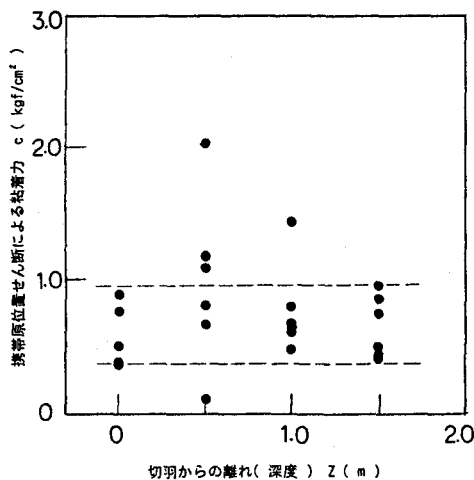


図-7 携帯原位置せん断試験 I

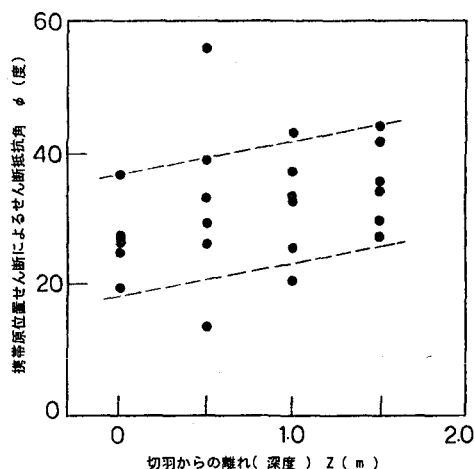


図-8 携帯原位置せん断試験 II

5. 4 室内試験結果

室内の三軸試験 (CD) の結果では、砂の粘着力は0.121 (kgf/cm²) であるのに対し、携帯原位置せん断試験では約6倍、ベーンせん断試験では約10倍 (ベーンにおいては、地中応力に起因したせん断抵抗角による抵抗も測定値に含まれると考えられる。) となっている。従来の切羽安定計算⁶⁾を実施すると、前者を用いた方が実現象を良く説明できるが、この点については今後の検討が必要と考えている。なお、砂のせん断抵抗角については、両試験の値はほぼ等しい結果となった。

6. 切羽周辺における地山強度の変化について

緩い砂地山のトンネル切羽において、各種の原位置試験を実施して掘削に伴う地山強度特性の変化を測定した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ①地山の強度が大きく変化するのは、トンネル切羽表面から約1mの範囲である。
- ②この範囲における変化の特徴は強度の低下と、ある地点におけるばらつきの増加である。

ここで、強度の低下はトンネル掘削に伴う地中せん断ひずみの増加によると考えられ、また、ばらつきの増加については、地山内のある地点において強度の増加が発生していることを示唆しているようにも考えられる。なお、強度の増加の要因としては、この地点における地中応力状態の極端な相違 (応力の集中) 等を挙げることができる。ところで、図-10にはポケットベーンせん断抵抗 (残留) を示したが、一般に、せん断ひずみが大きくなった状態では粘着力やダイレイタンスに起因するせん断抵抗が減じ、土粒子間の摩擦や干渉がせん断抵抗の主要因になると考えられることから、ポケットベーンせん断抵抗 (残留) の変化は地中応力の分布を反映していると思われる。今後の検討を要するが、同図における50cmから1m地点におけるせん断抵抗 (残留) の増加を地中応力の集中と見れば前述のこと (この地点における地中応力状態の相違) の理解の助けとなる。

7. おわりに

トンネル切羽周辺における地山強度特性の変化について原位置試験により調査した。その結果、切羽周辺では地山強度の低下やばらつきの増加が発生していることが明らかとなった。今後さらに、土質条件の違いや施工条件 (補助工法等) の違いがこれらに与える影響等を検討することも重要と考えている。

最後に、本研究を進めるうえで御指導、御協力を頂いた関係各位、特に「国分川分水路トンネル工法検討委員会 (委員長 福岡正巳 東京理科大学教授)」、また原位置試験に御協力を頂いた「(株)東京ソイルリサーチ」に対し深く感謝する次第である。

参考文献 1) 木嶋康雄, 青木高臣, 竹林亜夫, 西地文夫: 市街地の成田砂層をNATMで掘る。国分川分水路トンネル・中間立坑上流工区, トンネルと地下, Vol. 20, No. 7, 1989. 2) 土木学会: トンネル標準示法書 (山岳編)・同解説, pp. 23~24, 1986. 3) 藤森富雄, 内山千代長, 門倉邦雄: 都市部の帯水砂層をNATMで挑む。千代田区国分川分水路トンネル, トンネルと地下, Vol. 15, No. 12, 1984. 4) 河田孝志, 国見宏, 河野伊一郎, 西垣誠: 滞水砂地山におけるトンネル切羽の安定性について, 不飽和土の工学的性質研究の現況シンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp. 365~370, 1987. 5) 蔵田忠廣, 宮本武司: 未固結砂層におけるトンネル切羽自立性の判定基準の提案, 土木学会論文集, 382号/Ⅲ-7, 1987, 6.

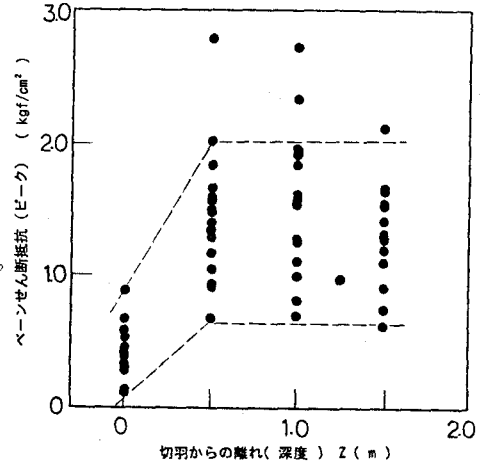


図-9 ベーンせん断試験結果 I

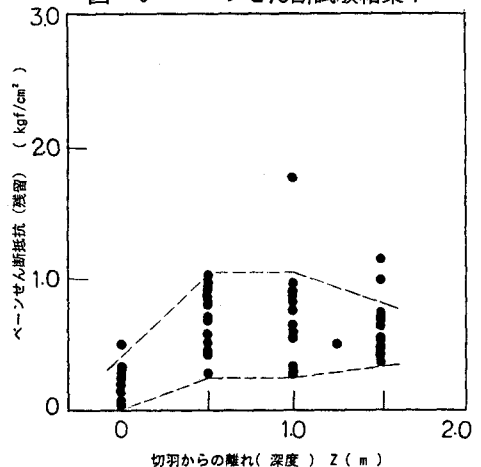


図-10 ベーンせん断試験結果 II