

極端に厳しい地山条件における許容土被り高さの検討

山口大学大学院理工学研究科 学生会員 ○佐々木 亨
山口大学大学院理工学研究科 正会員 森本 真吾
山口大学大学院理工学研究科 正会員 進士 正人

1. はじめに

山岳工法でトンネルを施工する際、切羽の安定性の確保が工事の安全性や経済性にとって極めて重要な課題である。しかし、切羽の自立性が低い軟弱地盤では切羽安定性の予測は困難であり、経験者の判断にゆだねられているのが現状である。

そのため既往研究では、森本ら¹⁾は、地山特性の違いによる挙動の特徴を定量的に理解・把握する必要があると考え、これを3次元数値解析上で再現し、切羽付近の変位発生状況を再現した。また、櫻井ら²⁾は限界せん断ひずみによるトンネル安定性の評価を提案し、林ら³⁾は限界せん断ひずみによって切羽の安定性評価をおこなった。

本研究では数値解析を用いて土被りを変化させた切羽の安定性評価を行い、各物性値における土被りの高さの許容値を検討した。なお、評価手法としては限界せん断ひずみ²⁾を切羽安定性の指標に用いた。

2. 対象とした軟弱地山のモデル化と解析手順

2-1. 解析物性値の設定

既往研究¹⁾を参考に、地山等級DIIの物性値を基準としてcとφを低下させ、その組み合わせにより切羽の自立性が問題となるような軟弱地山を表現した。解析で用いた物性値を表-1に示す。また、与条件から算出される各ケースの限界せん断ひずみを表-2に示す。

2-2. 解析モデル

本研究で用いる解析モデルを図-1に示す。地山の構成則は等方弾塑性体とし、合成支保工およびインバートは等方弾性体とした。土被りは15m、40m、100mの3パターンを想定し、重力(100mの場合は上載荷重)を加え、静水圧状態とした。

境界条件は、土被り15mおよび40mは上方のみ開放し、100mの場合は全面拘束とした。また、トンネル断面の対称性を考慮し、モデルは半断面とした。

表-1 解析物性値

	単位 体積重量 γ (kgf/m ³)	弾性係数 E (MPa)	ポアソン比 μ	粘着力 c (MPa)	内部摩擦角 φ (°)
地山	2100	150	0.35	0.001~0.2	0~30
合成支保工	2509	8134	0.20		
インバート	2400	22000	0.20		

表-2 各ケースの限界せん断ひずみ

限界せん断ひずみ φ (°)	c(MPa)						
	0.2	0.1	0.075	0.05	0.025	0.01	0.001
30	5.671	7.323	8.144	9.458	12.214	17.128	40.060
25	5.880	7.594	8.445	9.808	12.666	17.762	41.542
20	6.089	7.864	8.745	10.156	13.116	18.392	43.016
15	6.298	8.134	9.045	10.505	13.566	19.024	44.494
10	6.510	8.407	9.348	10.857	14.021	19.662	45.987
5	6.725	8.684	9.657	11.216	14.484	20.311	47.505
0	6.945	8.969	9.973	11.583	14.959	20.977	49.062

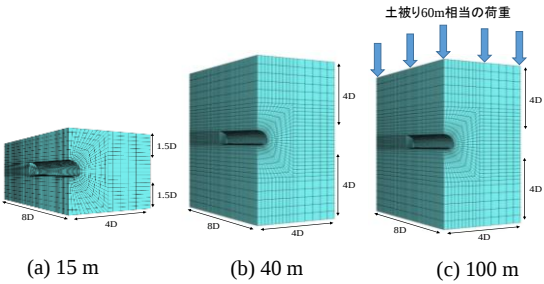


図-1 解析モデル

2-3. 解析手順

掘削手順は重力解析後、境界から中央までの4D間を一括掘削し、直後に切羽後方1mまでインバートを含めた支保工を設置し、解が収束するまで計算を行った。その後、切羽面の最大せん断ひずみの平均値が限界せん断ひずみの値を超えていれば不安定、超えていなければ安定として評価を行った。解が発散したケースについては切羽が極めて不安定であり崩壊したとみなした。

4. 解析結果と考察

土被りの違いによって切羽の安定性にどのような影響を与えるのか比較するため、表-3に土被りごとに各ケースの最大せん断ひずみの平均値と判定結果を示す。表中の赤字が不安定と判定できるケースを示し、解が発散し崩壊したとみなすものは×で示している。

表-3 より土被りが大きくなるにつれ、切羽が不安定化し、崩壊とみなすケースが増えていることがわかる。ここで $c=0.01\text{MPa}$, $\phi=30^\circ$ のケースに着目すると、 $c=0.025\text{MPa}$ に比べ急激に最大せん断ひずみの平均値が大きくなっているのがわかる。このケースの変位分布図を図-2に示す。この図を見ると粘着力 c が小さく内部摩擦角 ϕ が大きいケース(砂質系地山)では、切羽上方に切羽周辺変位が卓越するため、低土被りの場合、切羽の影響が地表面に達してしまうためと考えられる。

次に、土被りの変化による切羽の最大せん断ひずみの推移から各ケースの許容できる土被り高さを検討する。図-3に $\phi=30^\circ$ のときの最大せん断ひずみと土被りの関係を示す。図-3の赤線は限界せん断ひずみを基準とした安定領域と不安定領域の境界線であり、この線と交わる点を各ケースにおける土被りの許容値とした。 $\phi=10^\circ\sim 25^\circ$ のケースについても同様にして、全ケースの土被り高さの許容値を求めた。しかし、 0° および 5° のケースは安定したケースが少なく正確な値が得られないため、今回は対象外とした。

この境界線により得られた各ケースの許容土被りを表-4に示す。ここで得られた各ケースの値は表-3に示す数値解析を行った際の切羽安定性評価の結果とほぼ一致している。しかし、 $c=0.01\text{MPa}$, $\phi=30^\circ$ のような砂質系地山では必ずしも一致しない。これは、図-2に示す変位分布により、低土被りでは地表面にまで変位が生じるためであり、このような場合は土被りの値に関係なく補助工法を適用することが妥当といえる。

5. 結論

今回の結果から軟弱地山の土被りの許容値をおおよそ把握することができた。これにより、実際の現場において物性値や土被りが切羽の安定性を事前に判断する一つの指標になると考える。

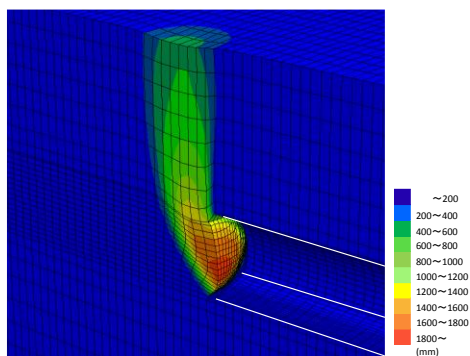


図-2 変位分布図

表-3 最大せん断ひずみと判定結果

(a) 土被り 15m

	ϕ ($^\circ$)	c(MPa)						
		0.2	0.1	0.075	0.05	0.025	0.01	0.001
	30	0.21	0.22	0.24	0.30	0.48	28.34	×
	25	0.21	0.24	0.28	0.36	0.63	95.54	×
	20	0.21	0.27	0.32	0.45	1.02	×	×
	15	0.22	0.31	0.39	0.59	2.50	×	×
	10	0.23	0.36	0.50	0.92	×	×	×
	5	0.25	0.47	0.75	1.99	×	×	×
	0	0.28	0.71	1.56	8.84	×	×	×

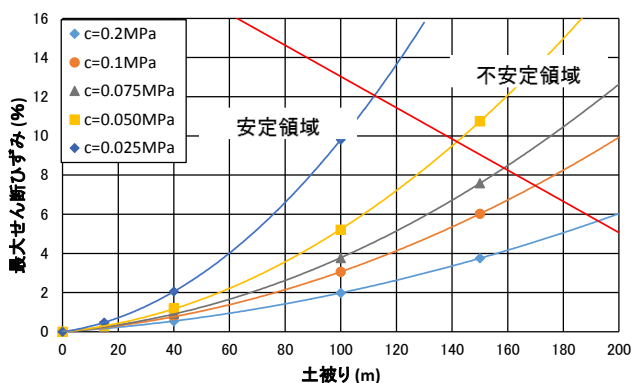
(b) 土被り 40m

	ϕ ($^\circ$)	c (MPa)						
		0.2	0.1	0.075	0.05	0.025	0.01	0.001
	30	0.53	0.77	0.93	1.19	2.06	67.33	×
	25	0.60	0.94	1.15	1.60	3.37	88.36	×
	20	0.68	1.16	1.54	2.38	6.80	×	×
	15	0.79	1.61	2.32	4.35	27.17	×	×
	10	0.96	2.58	4.53	12.20	×	×	×
	5	1.31	6.02	15.56	265.68	×	×	×
	0	2.14	34.03	×	×	×	×	×

(c) 土被り 100m

	ϕ ($^\circ$)	c(MPa)						
		0.2	0.1	0.075	0.05	0.025	0.01	0.001
	30	1.98	3.06	3.76	5.21	9.81	109.50	×
	25	2.42	4.26	5.55	8.12	16.98	×	×
	20	3.11	6.50	9.05	15.15	41.70	×	×
	15	4.53	12.30	20.20	40.52	×	×	×
	10	7.88	37.00	75.78	235.00	×	×	×
	5	21.96	254.00	690.00	1758.00	×	×	×
	0	159.89	2103.00	3429.00	×	×	×	×

図-3 土被りと最大せん断ひずみの関係



	ϕ ($^\circ$)	c(MPa)						
		0.2	0.1	0.075	0.05	0.025	0.01	0.001
	30	190	165	155	140	110	45	×
	25	170	135	125	110	85	10	×
	20	145	110	95	80	55	×	×
	15	115	80	65	60	25	×	×
	10	90	70	55	35	×	×	×

表-4 各ケースにおける土被りの許容値

参考文献

- 1) 森本真吾, 進士正人, 中川浩二: 地山と特性の違いによるトンネル切羽挙動の把握, 第58回土木学会年次学術講演会, III-037, pp. 73-74, 2003.3.9
- 2) 櫻井春輔, 川嶋幾夫, 大谷達彦, 松村真一郎: トンネルの安定性評価のための限界せん断ひずみ, 土木学会論文集, No493/III-27, pp. 185-188, 1994
- 3) 林久資, 青木一男, 吉岡尚也: 核残しを併用したときの押し出し性地山におけるトンネル周辺挙動, 土木学会論文集 F1 特集号, No.1, pp.17~27, 2010