

名古屋大学 正会員 松尾 純
名古屋大学 正会員 川村 国夫

1. まえがき; 掘削工事の事前設計では, 施工開始前 α 度で最善が尽き, 与えらるに力学的, 経済的条件の下で最適解を求めなければならない。しかし, 周知 α 度, 設計・施工のプロセスには多く α 不確実性が存在するので, たとえ最適解であつたとしても施工中, まれは施工後での破壊のリスクはゼロにあることは不可能である。仮に, 何らかの原因により, 現場が破壊したならば, 工事工程や事前設計に大幅な変更を余儀なくし, 直ちに工費の大損害を招くことになる。したがって, 掘削施工は施工中の観測を導入した定量的な施工管理により, トラブルを未然に察知し, 必要な対策を講じながら施工を進めていくことが重要となる。換言すれば, 施工に力がかつて初めて得らるる情報を利用し, 事前設計を合理的に変更しながら施工を進めればよい。本報告は掘削施工中に危険の兆候が予知されたとき, 事前設計で決めらるる切ばり本数やその設置箇所を設計変更の対象とし, そのうちの最適案を求めることを目的としている。

2. 施工中の設計変更; 施工中に危険が予知されたとき, 講じらるる切ばり配置の最適化はベイズリスク最小の評価基準を用いて決定される。さて, 山留め壁に作用する土圧状態の確率分布(パラメータ θ)について考察する。施工の始まる前に, 土質調査と過去の施工経験 θ とを利用して, θ の確からしさの確率密度関数 $g(\theta)$ を与えらる。掘削を開始した直後に山留め壁天端直ぐに一段切ばり s_0 を設置し, その後掘削を進めていく。いま, 図1に示すように, 掘削深度が $(a_1 \sim a_1 + \Delta a)$ に達したとき, 危険な兆候が見らるるとする。この時, 直ちに施工を中止し, 本報告で以下検討する対策を実施することになる。ここに, Δa は観測誤差である。危険な兆候が見受けらるることは, 真の安全率 $\phi \neq 1.0$ を意味する。このような条件下では, 施工開始前に与えらるる事前分布 $g(\theta)$ はベイズの定理を使って次のように修正される。すなわち,

$$g(\theta | a_1, s_0) = \frac{\{P_F(\theta, a_1 + \Delta a | s_0) - P_F(\theta, a_1 | s_0)\} g(\theta)}{\int_{\theta} \text{numerator } d\theta} \quad \text{----- ①}$$

ここに, 左辺 $g(\theta | a_1, s_0)$ は切ばり s_0 が既に設置されたのち, 掘削現場の危険が深さ $(a_1 \sim a_1 + \Delta a)$ に観測された条件によって, $g(\theta)$ が修正されることを示している。また, $P_F(\theta, a_1 | s_0)$ は切ばり s_0 の設置下で, 掘削深さ a_1 , 土圧状態 θ のときの現場破壊確率である。実際には, 破壊の発生は能計許さないで, 危険な兆候の起る前に適切な深さに切ばり s_1 を迅速に施工する。以下には, この切ばりの最適設置箇所を求めようとしていくのである。いま, s_1 を設置する前後で山留め壁に作用する土圧分布が変化しないものとする。

$$g(\theta | a_1, s_1) = g(\theta | a_1, s_0) \quad \text{----- ②}$$

以上の方法で施工を繰返せば, 式②より式①は一般形として,

$$g(\theta | a^j, s^j) = \frac{\{P_F(\theta, a^j + \Delta a | s^j) - P_F(\theta, a^j | s^j)\} g(\theta | a^{j-1}, s^{j-1})}{\int_{\theta} \text{numerator } d\theta} \quad \text{----- ③}$$

ここに, 上つき添字は, $a^j = \{a_1, a_2, \dots, a_j\}$, $s^j = \{s_0, s_1, \dots, s_{j-1}\}$ なる観測値と切ばり施工の履歴を表わしている。さて, 本報告の目的は, 観測値の系列 a^j および施工履歴 s^{j-1} が与えらるることで最適設置箇所を切ばり s_j^* と決定することにある。これを,

$$s_j^* = s_j^*(a^j, s^{j-1}), \quad j \geq 1 \quad \text{----- ④}$$

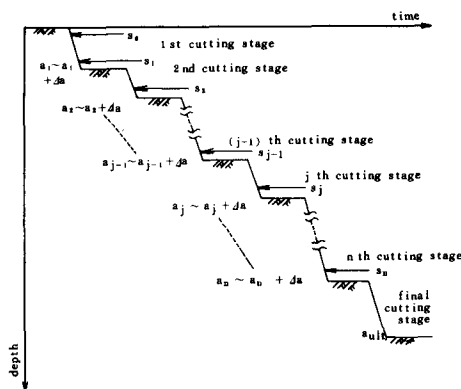


図 1 掘削施工の概略図

と表わす。すなわち、 S_i^* が a^i , s^{i-1} の関数であることを示している。あて a について最適化が行われれば、

$$S_1^* = S_1^*(a_1, s_0) = S_1^*(a^1, s^0), S_2^* = S_2^*(a_2, a_1, S_1^*, s_0) = S_2^*(a^2, S_1^*), \dots, S_n^* = S_n^*(a^n, S^{n-1}) \dots \text{⑤}$$

が求めねばならない解の形式である。この解は次の方法で求めることができる。掘削完了時までに用いる切ばり本数と s_0 を除いて n 本と仮定しよう。このとき、最後の切ばり S_n が施工したときから最終掘削深 a_{ult} まで掘削するのめは次の損失関数が成立する。

$$L(\theta, S^n) = C_c \{1 - P_F(\theta, a_{ult} | S^n)\} + C_F P_F(\theta, a_{ult} | S^n) \dots \text{⑥}$$

ここに、 C_c , C_F は初期建設費および破壊損失費である。さて、施工段階を一段ずつ上げて危険が深さ a^{n-1} まで観測した、これに基づいて切ばりが S^{n-1} まで施工したと仮定する。このとき a_n は観測したと仮定する。このとき期待する損失関数 V_n は、 $\text{Prob}(a_n < a < a_n + \Delta a | \theta)$ と土圧状態 θ と掘削深度 $(a_n \sim a_n + \Delta a)$ の間で危険の兆候を見いだす確率であるとする、次の式で与えられる。

$$V_n = \int_{\theta \in A_n} \sum \text{Prob}(a_n < a < a_n + \Delta a) \cdot L(\theta, S^n) f(\theta | a^n, S^{n-1}) d\theta \dots \text{⑦}$$

$$\text{Prob}(a_n < a < a_n + \Delta a) = P_F(\theta, a_n + \Delta a | S^{n-1}) - P_F(\theta, a_n | S^{n-1}) \dots \text{⑧}$$

式⑧を式⑦に代入し、式③を用いると、

$$V_n \propto \sum_{A_n} \int_{\theta} f(\theta | a^n, S^{n-1}) L(\theta, S^n) d\theta \dots \text{⑨}$$

を得る。これから、 V_n を最小にする S_n^* は a_n の関数として、

$$\min_{S_n} V_n \propto \sum_{A_n} \min_{S_n} \int_{\theta} f(\theta | a^n, S^{n-1}) L(\theta, S^n) d\theta \dots \text{⑩}$$

から求まる。同様に式⑩の演算を一段ずつ上げて、第一段階掘削まで順に行なうとすれば、期待損失 V_j ($j=1, 2, \dots, n$)を最小にする切ばり S_j^* の系列が式⑤の後から $(n, n-1, \dots, 1)$ 順で得られる。これから、この解の系列に実際の観測値 Q_j ($j=1, 2, \dots, n$)を代入し、 $j=1 \rightarrow j=n$ にわたってやれば、最適解の系列が求まる。

3.数値計算例；切ばりの最適配置と施工中の危険と観測したときと決定したのでは異なる。これから、実際には、施工開始前に数々のケースを想定して、それらに対する最適解を求めておく方が合理的である。ある条件のもとで計算した最適解の一例を表1に示す。表1の計算に使われる諸条件は以下 α とされており、現場周辺の粘性土壌に用いる C_u の平均値は地表面付近で 1 kg/cm^2 で、深さに比例して増加するとし、その深さ平均を 3.5 kg/cm^2 とし、 α の平均値は深さにわかかわらず一定とし、 1.6 kg/cm^2 とする。また、それらの変動係数をそれぞれ 0.2 , 0.05 と設定した。その他の条件は表中に示している。表1からわかることは、いくつかのケースに用いる最適解にも、危険を予知した掘削深よりも $0.5 \text{ m} \sim 1.0 \text{ m}$ 高いところの切ばりを設置しなければならないことを示している。これらの結果が、多くの経験と実績に基づいて実際の現場施工例と一致していることは興味深い。その他のケースに用いる最適解については当別詳しく発表する予定である。

表 1 事後設計 ($a_{ult}=10\text{m}$, $SP=IV$, ストラット 6本)

a_1 (m)	s_1^* (m)	a_2 (m)	s_2^* (m)	a_3 (m)	s_3^* (m)	a_4 (m)	s_4^* (m)	a_5 (m)	s_5^* (m)
6	5.5	8	7.5	9	8.5				
		7	6.0	8	7.0	9	8.5		
		8	7.5	9	8.5				
5	4.5	7	6.5	8	7.0	9	8.5		
		8	7.5	9	8.5				
		6		8	7.0	9	8.5		
				9	8.5				
		6.0		8	7.0	9	8.5		
4	3.5	7	6.5	8	7.0	9	8.5		
		8	7.5	9	8.5				
		6	5.0	7	6.0	8	7.0	9	8.5
				9	8.5				
				8	7.0	9	8.5		
				7	6.0	8	7.0	9	8.5
				9	8.5				
				8	7.0	9	8.5		
				6	5.0	7	6.0	8	7.5
3	2.5	8	7.5	9	8.5				
		7	6.5	8	7.0	9	8.5		
				9	8.5				
		6*	5.5	7.0	8.5				
				9	8.5				
		7	6.0	8	7.0	9	8.5		
				9	8.5				
				8	7.0	9	8.5		
				7	6.0	8	7.0	9	8.5
				9	8.5				
				8	7.0	9	8.5		
				7	6.0	8	7.0	9	8.5
				9	8.5				
				8	7.0	9	8.5		
				6	5.0	7	6.0	8	7.5
2	2.0			9	8.5				
				8	7.0	9	8.5		
				7	6.0	8	7.0	9	8.5
				9	8.5				
				8	7.0	9	8.5		
				6	5.0	7	6.0	8	7.5
				9	8.5				
				8	7.0	9	8.5		
				7	6.0	8	7.0	9	8.5
				9	8.5				
				8	7.0	9	8.5		
				6	5.0	7	6.0	8	7.5