

金沢工業大学 川村 国夫 本多 清忠
和興建設(株) 海野 正俊 堀 衛司

1. まえがき:

本報告では、のり面保護工“現場打のり枠工法”的効果を信頼性設計の立場、すなわち安全性と経済性の面から評価を試みようというものである。その解析の概略は、無防備な斜面においてのり面侵食の発生を原因として生ずるであろう斜面崩壊の可能性と、のり面に現場打のり枠工を施工した際の斜面崩壊の可能性とを比較して“現場打のり枠工法”的効果を考えようとするものである。

2. のり面侵食: 一般にのり面侵食を定量化することは大変むずかしい。現在では、いわば実験的研究から、実験式によって侵食を定量化しているのが主流である。ここでは、便宜上、のり面侵食は非常に浅いすべりと考え、斜面安定の手法からのり面侵食を定量化する。なぜなら、風化や降雨の浸透によって、風化層の強度は劣化、低下し、一方で地下水や降雨によって風化層の単位体積重量が増加することによって、誘起されるとするのり面侵食は、まさに斜面安定とまったく同じ考え方となるからである。したがって、のり面侵食の可能性は次式で評価する。のり面侵食の発生確率 P_{Fe} , $P_{Fe} = P_{rob} (F_{se} \leq 1) - (1)$, F_{se} は図1のように考

$$F_{se} = r_i^2 (C \cdot l_i + w_i \cdot \cos\theta_i \cdot \tan\phi) / \sum_i w_i r_i \sin\theta_i = \frac{\Sigma}{i}$$

$$(C_l_i + w_i \cdot \cos\theta_i \cdot \tan\phi) / \sum_i w_i \sin\theta_i - (2)$$

なお、図に示すように、 F_{se} : 侵食に対する安全率, r : 円弧すべりの半径(m), l_i : 各分割片の円弧(m), w_i : 各分割片の土塊重量(t), θ_i : 円弧面と水平との傾き($^\circ$), C : 土の粘着力, ϕ : 土の内部摩擦角($^\circ$)、ところで、強度定数 C , ϕ は確率変数となるため F_{se} も確率変数となる。従来、式(1)はほとんどモンテカルロシミュレーションを実施して、算定されてきたが、ここでは確率変数で示される変数が複数個で構成される関数型の確率計算に対して、Rosenbluethの方法を適用した。すなわち、いま C , ϕ の平均及び分散をそれぞれ、 $E(C) = M_C$, $Var(C) = \delta_C^2$, $E(\phi) = M_\phi$, $Var(\phi) = \delta_\phi^2$ とする。のり面侵食は、 $F_{se} = f(M_C - \delta_C, M_\phi - \delta_\phi, M_C + \delta_C, M_\phi + \delta_\phi) - (3)$ となり、4通り、 $F_{si} = (M_C - \delta_C, M_\phi - \delta_\phi)$, $F_{s2} = (M_C - \delta_C, M_\phi + \delta_\phi)$, $F_{s3} = (M_C + \delta_C, M_\phi - \delta_\phi)$, $F_{s4} = (M_C + \delta_C, M_\phi + \delta_\phi) - (4)$ の安全率を求めれば、 F_{se} の平均値、及び分散は、 $E(F_{se}) = (F_{s1} + F_{s2} + F_{s3} + F_{s4}) / 4$; $Var(F_{se}) = E(F_{se}^2) - (E(F_{se}))^2 - (5)$ で示され、式(1)の; のり面侵食の発生確率 P_{Fe} は、図2のように簡単に求まる。

3. のり面侵食の発生下における斜面崩壊の可能性:

次に、斜面崩壊はのり面侵食の発生が大きな原因となることを考慮して、次式のような斜面崩壊の破壊確率 P_F を考える。すなわち、のり面侵食が発生すれば、いずれ斜面土の強度や単位体積重量はのり面侵食時と同程度になると予想される。のり面侵食が進行し、降雨、地下水位の上昇、積雪などの作用が相まって、風化層全体がのり面侵食発生時の風化土の状態と同程度、もしくはそれ以上の悪条件になると考えられる。したがって、斜面崩壊の破壊確率 P_F はのり面侵食が、発生したという情報のもとで、次式で示される。 $P_F = Prob(F_{se} \leq 1) - (6)$ 。ここで F_{se} は斜面全体のすべりに関する安全率で式(2)と同じかたちで、 $F_{se} = \sum_i (C_l_i + w_i \cos\theta_i \cdot \tan\phi) / \sum_i w_i \sin\theta_i$ で示される。なお、ここで C'_j , ϕ'_j はのり面侵食が発生したという情報下で修正された粘着力、及び内部摩擦角である。その修正は、ベイズの定理より次式で求めた。 $P(C'_j | A) = P_{Fe} (A | C_j, \phi_j) \cdot P(C_j, \phi_j) /$

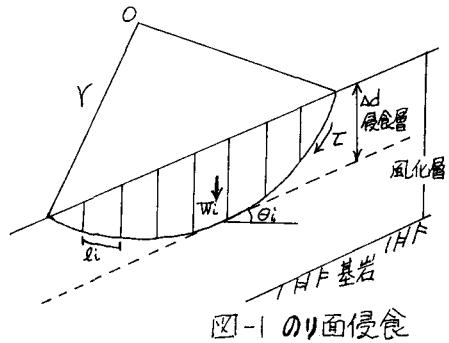


図-1 のり面侵食

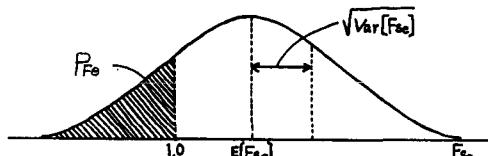


図-2 のり面侵食の発生確率

$\sum_{ij} P(A|c_i, \phi_j) \cdot P(c_i, \phi_j)$ —(8)。ここに、 $P(c_i, \phi_j)$:斜面土の粘着力 c_i 、および内部摩擦角 ϕ_j の同時確率、 $P_{\text{F}}(A|c_i, \phi_j)$: c_i, ϕ_j でのり面侵食 A が起る確率で実際には式(1)に対応、 $P(c'_i, \phi'_j|A)$: A が生じたことによって修正される c'_i, ϕ'_j の同時確率。さて、一般には斜面全体の破壊確率には、 c, ϕ のばらつきに関する重みが伴うことから、そのリスクを考慮した予測破壊確率 \tilde{P}_F を計算して、斜面崩壊に対する破壊確率を \tilde{P}_F とする。すなわち、 $\tilde{P}_F = \sum_{ij} \text{Prob}(F_s \leq 1 | c'_i, \phi'_j) \cdot P(c_i, \phi_j|A)$ —(9)

4、のり枠工法施工斜面の安全性：のり枠工を打設することによって、のり面侵食が防止できる。したがって、のり枠工の効果はのり面侵食が、斜面崩壊を誘起するのではなく、その他の要因（降雨、浸透、地下水位の上昇）によって発生する点に注目する。したがって、のり枠工打設斜面の破壊確率 P'_F は、 $P'_F = \text{Prob}(F'_s \leq 1.0)$ —(10)。ここに、 $F'_s = \sum_i (c_i + (W_i + W_{Ai}) \cdot \cos\theta_i \cdot \tan\phi_i) + 2 T_a \cdot v \sum_i (W_i + W_{Ai}) \cdot \sin\theta_i$ —(11)。ここで、 W_{Ai} : 分割域における縦ばり、横ばり、客土の重量、 T_a : のり枠のせん断抵抗力、 c, ϕ は粘着力、内部摩擦角で伴に確率変数。したがって、予測破壊確率 $\tilde{P}'_F = \sum_{ij} \text{Prob}(F'_s \leq 1.0 | c_i, \phi_j) \cdot P(c_i, \phi_j)$ —(12)。

5、現場打のり枠工法の効果に関する評価：のり枠工を打設することにより斜面崩壊の危険性は減少することが予測される。なぜなら、のり枠を打設しない斜面においては、のり面侵食によって斜面崩壊が誘起される確率 \tilde{P}_F は、のり枠工を打設した時の斜面全体の破壊確率 \tilde{P}'_F より大きくなるからである。したがって、のり枠工法の効果は経済面から評価すれば以下のようなになる。効果 ΔE は、 $\Delta E = \tilde{P}_F \cdot C_F - (C_c + \tilde{P}'_F \cdot C_F) = (\tilde{P}_F - \tilde{P}'_F) \cdot C_F - C_c$ (> 0 ならば効果あり)—(13)。ここに、 C_c : のり枠工に用いる建設費、 C_F : 斜面崩壊時に必要な破壊損失費である。以上、述べた計算方法について、表1に示す3つの土質条件をもつ現場を想定して、ケーススタディを行った。なお、のり枠工の規模については、表2に示す。この条件で計算を行った結果を表3に示した。表3は、 $C_F = 5 \cdot C_c$ のものであるが、この表から理解できることは、のり枠規模が大きくなれば、効果が大きくなり、土質条件が安定に向うにつれて、効果は減少することである。一方、のり枠規模別の効果では、 F_{300} と F_{150} 、 F_{200} とでは効果の大きさに差があり、一般に F_{300} が大きい。これは、 F_{300} がアンカーを併設していることによるものと思われる。なお、現場環境を考慮して、 $C_F = 3 \cdot C_c$ 、 $C_F = 4 \cdot C_c$ の現場に関しても解析を試みた結果、同様な傾向が得られたことを付記しておき、その詳細は当日発表したい。

表 1 現場条件

現場ケース	土 性	$M_c (\frac{t}{m^3})$	$\delta c (\frac{t}{m^3})$	$M_\phi (\text{°})$	$\delta \phi (\text{°})$	勾配	$T_a (\frac{t}{m^3})$	風化層厚(m)
ケース 1	シルト	1. 5	0. 45	2 0	2. 0	1割2分	1. 8	4
ケース 2	シルト	3. 0	0. 9	2 0	2. 0	1割2分	1. 8	4
ケース 3	シルト	3. 0	0. 9	3 0	3. 0	1割2分	1. 8	4

表 2 のり枠工規模

記 号	のり枠断面 (mm)	枠スパン長 (mm)	アンカー併設		
			F_{150}	F_{200}	F_{300}
F_{150}	150×150	1150×1150			なし
F_{200}	200×200	1200×1200			なし
F_{300}	300×300	1300×1300	5 t (プレストレス値)		4 m アンカー

表 3 のり枠工の効果 ($C_F = 5 \cdot C_c$)

現場条件	斜面の破壊確率 $\tilde{P}_F, \tilde{P}'_F$ (%)				のり枠の効果 ΔE ($\frac{\text{万t}}{m}$)		
	$\tilde{P}_F^{(\infty)}$	$\tilde{P}'_F (F_{150})$	$\tilde{P}'_F (F_{200})$	$\tilde{P}'_F (F_{300})$	F_{150}	F_{200}	F_{300}
ケース1	96. 9	25. 81	8. 24	0. 29	2. 378	2. 554	7. 355
ケース2	71. 30	6. 53	2. 92	0. 41	2. 084	2. 238	4. 885
ケース3	38. 66	2. 34	0. 83	0. 05	0. 759	0. 816	1. 711

(*) \tilde{P}_F : のり枠施工なしの斜面破壊確率

(**) $\tilde{P}'_F (F_{150})$: F_{150} のり枠施工斜面の破壊確率