

前田建設工業株式会社技術研究所

○ 鷲沢 栄紀

同 上

久慈 雅栄

同 上

神藤 健一

1. まえがき

弱層（すべり面）を含む斜面の安定に関して、弱層を弾性係数の低い固体要素で表現した有限要素法、および、Goodman のジョイント要素で表現した有限要素法を適用して解析するとともに、この結果と極限平衡法とを比較検討した結果を報告する。

2. 解析方法および解析条件

解析方法については、弱層を弾性係数の低い固体要素で表現する方法（以後、弾性解析と称する。）では、線形弾性解析によって行なった。また、弱層をジョイント要素で表現する方法（以後、ジョイント要素による解析と称する。）では、Goodman の提案した現実の不連続面（引張りに対して開口して、せん断に対して滑動し、圧縮に対して力を伝達するような特性）を理想化した4節点のジョイント要素、および、降伏を考慮した構成関係を用いて行なった。ジョイント要素の入力物性は、 q_u ：ジョイント表面の一軸圧縮強度、 T_o/q_u ：岩の壁面の圧縮強度に対する引張強度の比、 K_s ：せん断剛性率、 B ：せん断残留強度のせん断ピーク強度に対する比、 V_{mc} ：最大可能閉塞量、 ξ ：基準荷重、 ϕ_u ：内部摩擦角、および、 i ：ダイレイタンシー角である。なお、これらの詳細に関しては参考文献を参照されたい。解析は、図-1に示すような3種類の断面（A断面：弱層が斜面より下方に存在、B断面：A断面をより拡大したもの、C断面：弱層が斜面内に存在）を用い、解析手順は、最初に掘削部分（図-1の斜線部分）を含む断面で初期応力計算をした後、掘削部分の要素を取り去り、掘削自由面上の節点に掘削相当外力を作用させた。境界条件は、3種類（a：底面の両端を固定し、他はローラー支持、b：底面のすべてを固定し、側面はローラー支持、c：底面、側面ともにばね支持）の拘束条件を用いた。物性の区分、および、物性値は、図-1に示すように弱層より上方をⅠ（ $\gamma=1.8\text{ t/m}^3$ 、 $E=1.0\times 10^3\text{ t/m}^2$ 、 $\nu=0.30$ ）、下方をⅡ（ $\gamma=2.2\text{ t/m}^3$ 、 $E=2.0\times 10^3\text{ t/m}^2$ 、 $\nu=0.15$ ）、弱層をⅢ（固体要素の場合： $\gamma=1.8\text{ t/m}^3$ 、 $E=0.5\times 10^3\text{ t/m}^2$ 、 $\nu=0.45$ ）として、表-1にジョイント要素の物性値を示した。また解析ケースは、表-2に示す12ケースとした。

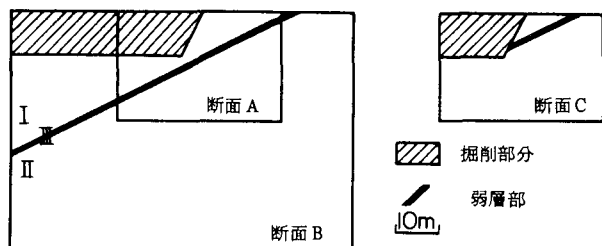


図-1 解析断面

表-1 ジョイント要素の物性値一覧表

物性番号	q_u (t/m^2)	τ_o/q_u (-)	K_s (t/m^2)	B (-)	V_{mc} (m)	ξ (t)	ϕ_u ($^\circ$)	i ($^\circ$)
Ⅲ j-1	-200	0.1	50000	0.6	0.001	-0.1	30	15
Ⅲ j-2	"	"	5000	"	0.005	"	"	"
Ⅲ j-3	"	"	500	"	"	"	"	"

表-2 解析ケース一覧表

ケースNo	解析断面	境界条件	ジョイント物性
1	A	a	—
2	A	b	—
3	B	a	—
4	B	b	—
5	A	c	—
6	C	a	—
J-1	A	a	Ⅲ j-1
J-2	A	a	Ⅲ j-2
J-3	A	a	Ⅲ j-3
J-4	C	a	Ⅲ j-1
J-5	C	a	Ⅲ j-2
J-6	C	a	Ⅲ j-3

3. 解析結果および考察

ジョイント要素による解析の一例として、ケースJ-5の弱層付近の変位状況は図-2に示すとおりであり、斜面と弱層が交わる部分において、弱層を境にしてはつきりしたくい違いが見られる。次に各ケースの節点変位について、斜面における計測値との対比に応用する目的で、鉛直軸における傾斜変位として結果を整理した。対象とした鉛直軸、および、整理結果は図-3に示すとおりで、変位の大きさ(角度)は60倍に拡大して図示した。図-3によれば、大きい解析領域(ケース3, 4)では、小さい領域(ケース1, 2)より大きい変位を示し、ケース5の変位がケース1, 2とケース3, 4の変位の間に位置することから、解析領域が小さい場合、境界条件をばね支持によることによって、解析領域が大きいものに近似することができる。ここで、弱層上方における平均傾斜変位は、図中に示すとおりであり、一般に傾斜変位計の精度が1.5分程度であるので計測値と比較する実用面で考えれば、境界条件の違いによる影響よりも領域の大きさによる影響の方が大きい。同様に解析方法について比較すると、ケースJ-1~3の変位は、ケース1の2~3倍程度の大きさを示し、これは、2で示したようにジョイント要素の降伏によるためと考えられる。

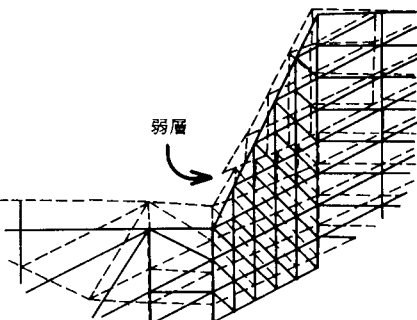


図-2 変位図(ケースJ-5)

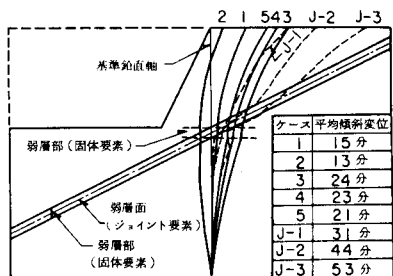


図-3 鉛直軸における傾斜変位

極限平衡法と比較するために、有限要素法に計算された応力値から点安全率 F_p を算出した。点安全率が $F_p \leq 1$ になる領域の代表的な例は図-4に示すとおりであり、この領域は、弾性解析よりもジョイント要素による解析の方が広い。また、極限平衡法における臨界円も示した。次に、要素の点安全率から極限平衡法の臨界円に沿った安全率を算出すると表-3のとおりとなる。弾性解析の安全率は、極限平衡法の安全率と比較して、A・C断面とも2倍程度の値を示している。この原因は、地表近くの土かぶりの小さい部分では発生する応力が小さいために、計算上、大きな安全率になることと考えられる。また、ジョイント要素による解析の安全率は、極限平衡法の安全率と比較して、A断面では、ほとんど同じ値を示し、C断面では、3~4割増し程度の値をとる。これは、ジョイント要素が降伏することによって、その周辺の固体要素の応力状態が、弾性解析に比較して、主応力が若干増加し、かつ、主応力方向がすべり面の方向に傾くことの2つの要因によるためと考えられ、この現象は、図-3の変位状況、および、図-4の点安全率 F_p が $F_p \leq 1$ になる領域からも裏付けられると考える。

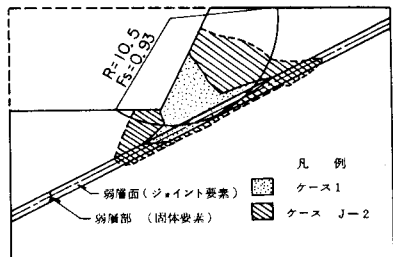


図-4 点安全率 $F_p < 1.0$ の領域

表-3 安全率一覧表

解析方法(ケース)		安全率 F_p	断面	解析方法(ケース)		安全率	断面
極限平衡法		0.93	A	極限平衡法		0.72	C
有限要素法解析	1	1.74		有限要素法解析	6	1.68	
	J-1	0.91			J-4	0.99	
	J-2	0.96			J-5	1.02	
	J-3	0.90			J-6	1.01	

4. まとめ

今回、ジョイント要素による解析で得られた安全率は、弾性解析で得られた安全率に比べ、極限平衡法で得られた安全率に比較的良く整合する値が得られたが、今後、問題点を考察していく予定である。