

斜面的 解析 (事例問題 1)

SLOPE STABILITY ANALYSIS (CASE 1)

李在暎*, 全慶植**, 尹相默***

(株)三安建設技術公社

* 專務理事/土質 및 基礎技術士

** 土質部 次長

*** 土質部 代理

要 旨

建設完了 直前に 破壊된 英國의 CARSINGTON DAM에 대하여 주어진 設計強度定數 및 實驗結果值를 適用하여 'PC-SLOPE' 과 'PCSTABL5M'에 의해서 斜面을 解析하고 그 結果를 本稿에 收錄하였다. 解析過程은 設計斷面의 解析과 破壞後의 調査過程에서 나타난 特性을 考慮한 解析으로 나누었다.

解析結果 設計斷面은 주어진 間隙水壓係數를 適用할때 安全係數가 1.2以上으로 適切한 設計가 이루어진 것으로 나타났으며, 暴雨에 의한 急激한 地下水位上昇과 黃色粘土層의 影響으로 設計時 適用한 間隙水壓以上の 過剩間隙水壓이 作用하게 되어 DAM上流 斜面의 破壞는 不可避하였던 것으로 分析된다.

A B S T R A C T

For the Carsington Earth Dam in England, slope stability analyses using computer programs both 'PC-SLOPE' and 'PCSTABL5M' were conducted on the given geometric and geotechnical informations those obtained through an additional investigation after dam failure.

Without the yellow clay layer, the designed section was stable with factor of safety 1.2, but the section was unstable under the higher excess pore pressure caused by the heavy rainfall and by considering the weak clay layer.

The failure may be initiated by not only the sudden increase of pore pressure but also decrease of shear strength of the clay layer.

1. 序 論

英國 ENGLAND 中部의 DERBYSHIRE에 位置한 CARSINGTON EARTH DAM은 計劃高-1m程度까지 盛土된 狀態에서 暴雨에 의한 滑動破壞가 始作되어 사흘후 破壞延長이 500m程度, 最大水平變位 15m가 發生되었다.

本稿는 破壞된 DAM上流斜面에 대한 事例分析研究로서 解析過程을 두가지로 나누어 첫째는 設計時의 強度定數를 利用한 斜面滑動破壞 發生前의 豫想破壞面 및 이 때의 安全係數를 豫測하고 둘째로 破壞發生後 地盤調查過程에서 提示된 破壞地盤의 強度定數들을 利用하여 DAM上流斜面에서 滑動破壞가 일어난 狀況을 分析評價하였다.

安定解析時 使用된 斜面解析 電算PROGRAM은 當社에서 使用中인 'PC-SLOPE'과 'PCSTABL5M'으로서, 'PC-SLOPE'은 CANADA의 GEO-SLOPE INTERNATIONAL LTD.에서 開發되었으며 'PCSTABL5M'은 美國의 PURDUE UNIVERSITY에서 開發한 'STABL'의 가장 最新 VERSION이다.

2. 解析斜面

- 構造物名 : CARSINGTON DAM
- 形 式 : 土沙 DAM
- 位 置 : 英國 ENGLAND 中部의 DERBYSHIRE
- 諸 元 : 길이 1200m, 높이 37m, 上流斜面傾斜 1:3
- 滑動破壞狀況 : 1984年6月1日 (計劃高-1)m까지 盛土狀態에서 暴雨.
1984年6월4일 上流斜面에서 190m程度 滑動破壞始作.
1984年6월7일 破壞延長 500m, 最大水平變位 15m.

3. 斜面解析用 電算 PROGRAM

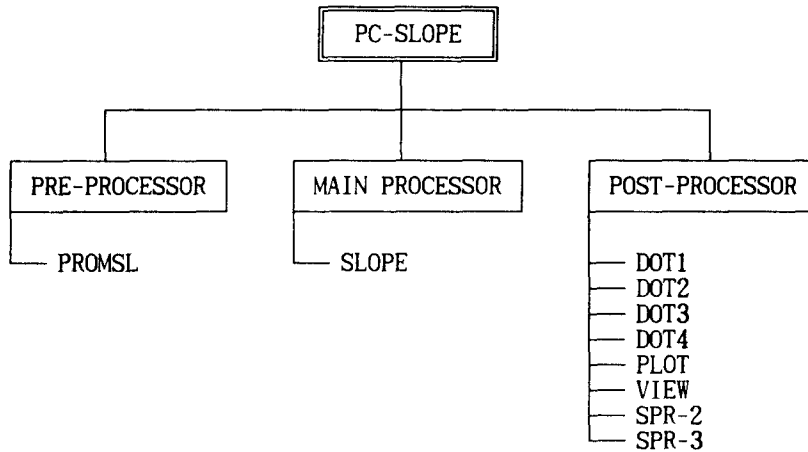
3-1. 'PC-SLOPE'에 대하여

3-1-1. 'PC-SLOPE'의 概要

'PC-SLOPE'은 自然斜面이나 人工斜面(掘鑿 혹은 盛土)에 대한 安全係數를 구할 수 있는 SOFTWARE PACKAGE이다. 安全係數는 限界平衡(LIMIT EQUILIBRIUM)에 의하여 計算하며, 여러 解析法(BISHOP, JANBU, SPENCER등)을 同時에 使用할 수 있다. 滑動面(SLIP SURFACE)의 形狀은 3가지(CIRCLUAR, LINEAR, COMPOSITE)를 指定하여 解析할 수 있

으며, 解析에 필요한 入力値는 地層의 座標, 剪斷強度定數, 間隙水壓등이다.

入力 데이터 作成 및 檢討를 위한 前處理(PRE-PROCESSING) 및 結果整理를 위한 後處理(POST-PROCESSING)技能이 使用者爲主(USER-FRIENDLY), 對話式(INTERACTIVE)으로 되어 있어 便利하다(그림3-1참조). 主處理(MAIN PROCESSING)는 對話모드(INTERACTIVE MODE), 혹은 自動實行모드(BATCH MODE)로 使用者가 選擇하여 實行 시킬 수 있다.



(그림3-1) PC-SLOPE의 構成圖

3-1-2. 'PC-SLOPE'의 特徵

'PC-SLOPE'에 의해 計算 가능한 斜面解析法은 다음과 같다.

- ① FELLENIUS or ORDINARY METHOD
- ② BISHOP SIMPLIFIED METHOD
- ③ JANBU'S SIMPLIFIED METHOD(NO F_o FACTOR APPLIED)
- ④ SPENCER METHOD
- ⑤ GENERAL LIMIT EQUILIBRIUM(GLE) METHOD
- ⑥ MORGENSTERN-PRICE METHOD
- ⑦ LOWE-KARAFIATH METHOD
- ⑧ CORPS OF ENGINEERS METHOD
- ⑨ OTHER METHODS SUCH AS NONVELLIER AND SARMA METHOD

3가지의 破壞條件(CIRCLUAR, COMPOSITE, AND SPECIFIED SLIP SURFACES)에 대해서 위의 解析 方法을 사용하여 滑動面을 指定할 수 있다. 圓弧破壞面(CIRCLUAR PLANE)과 複合破壞面(COMPOSITE PLANE)을 滑動面으로 假定하는 경우는 滑動圓의 中心을 格子網을 이용해 範圍를 정한다. 복잡한 地形 및 不連續 地層등에 대해서도 解析이 容易하다. 斜面의 부분적 浸水나 地盤에 TENSION CRACK이 있는 경우에 解析이 可能하며 地震荷重도 고려할 수 있다.

解析斷面에 外部荷重이 가해지는 경우 그 荷重을 單位幅當의 等價荷重(EQUIVALENT LOAD PER UNIT WIDTH OF SLOPE)으로 換算하여 入力할 수 있다. BERM이나 SURCHARGE가

있는 경우는 이를 別途의 地層으로 追加하여 MODELLING할 수 있다.

一般的으로 使用되어온 MOHR-COULOMB型的 剪斷強度 破壞包絡線이외에도 BILINEAR SHEAR STRENGTH FAILURE ENVELOPES를 使用할 수 있다. 또한 不飽和土에 대하여 EXTENDED MOHR-COULOMB 破壞包絡線의 使用이 可能하다.

間隙水壓은 다음과 같은 方法으로 入力하여 解析이 可能하다.

- ① A PORE-PRESSURE COEFFICIENTS, ru'
- ② A SERIES OF PIEZOMETRIC LINES
- ③ A SERIES OF CONSTANT PRESSURE CONTOURS
- ④ A GRID OF PORE-WATER PRESSURES
- ⑤ A GRID OF PORE-WATER HEADS
- ⑥ A GRID OF PORE-PRESSURE COEFFICIENTS

3-2. 'PCSTABL5M'에 대하여

'PCSTABL5M'은 國內에서도 널리 使用中인 'STABL' 시리즈의 最新 VERSION으로, 2次元 限界平衡理論에 의해 JANBU簡便法, BISHOP簡便法 및 SPENCER의 切片法을 이용하여 安全係數를 구한다.

'STABL'은 보다 더 臨界的인 面(CRITICAL SURFACE)과 그 面에서의 安全係數를 決定하기 위하여 破壞可能面에 대해서 세가지의 獨特한 無作爲 發生技法을 導入하고 있다. 즉, 圓弧形狀의 破壞面, 滑動BLOCK 特性을 갖는 假想破壞面, 그리고 不規則 形狀의 任意破壞面을 發生시킬 수 있다. 또한 破壞面 指定解析 技能도 갖고 있다.

複雜한 土層, 非等方性 土質特性, 剪斷으로 인한 過剩間隙水壓, 地下水位 및 地表水, 假想的 靜的 地震荷重 및 載荷荷重, EARTH-ANCHOR 補強效果등을 考慮한 解析이 可能하다. 데이터 入力は FREE-FORMAT으로 하며, 入力值의 誤謬檢索技能과 地形 및 破壞面의 PLOTTER出力技能도 包含되어 있다.

4. 解析過程 및 結果

4-1. 設計斷面의 解析

4-1-1. 設計斷面 및 強度定數

DAM設計時의 設計強度定數에 의하여 上流斜面의 安定을 檢討하였다. 解析에 使用된 強度定數는 (표4-1)과 같다. CARSINGTON DAM 上流斜面의 斷面은 (그림 4-1)과 같다.

(표4-1) 設計時的 強度定數

MATERIAL	UNIT WT. (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ'	PORE PRE. RATIO
CORE	18.5	0.0	22	0.4
ZONE I AND II	21.0	0.0	25	0.0
BOOT	18.5	0.0	22	0.5
SLOPE PROTECTION	18.5	0.0	35	0.0
WEATHERED MUDSTONE	18.0	100.0	30	0.0

4-1-2. 解析結果

(그림4-1)의 斷面에 대하여 (표4-1)의 設計強度定數를 適用한 解析結果는 다음과 같다. 'PC-SLOPE'에 의한 設計斷面의 解析結果는 (그림4-1)과 같으며 BISHOP'S SIMPLIFIED METHOD로 解析時 安全係數는 1.343으로 安全側으로 나타났다(표4-2참조).

(표4-2) 設計斷面의 安全係數

	解 析 方 法		
	FELLENIOUS	BISHOP	JANBU
安全係數	1.193	1.343	1.242

4-2. 破壞後의 解析

4-2-1. 解析方法 및 斷面

上流斜面 滑動破壞後의 調査에서 黄色粘土層(YELLOW CLAY)이 發見되었고 廣範圍한 實驗結果 CORE와 黄色粘土의 強度定數는 (표4-3)와 같은 結果를 얻었다. 間隙水壓比는 (표4-4)와 같다. CARSINGTON DAM 上流斜面의 解析 斷面은 (그림4-2)와 같다.

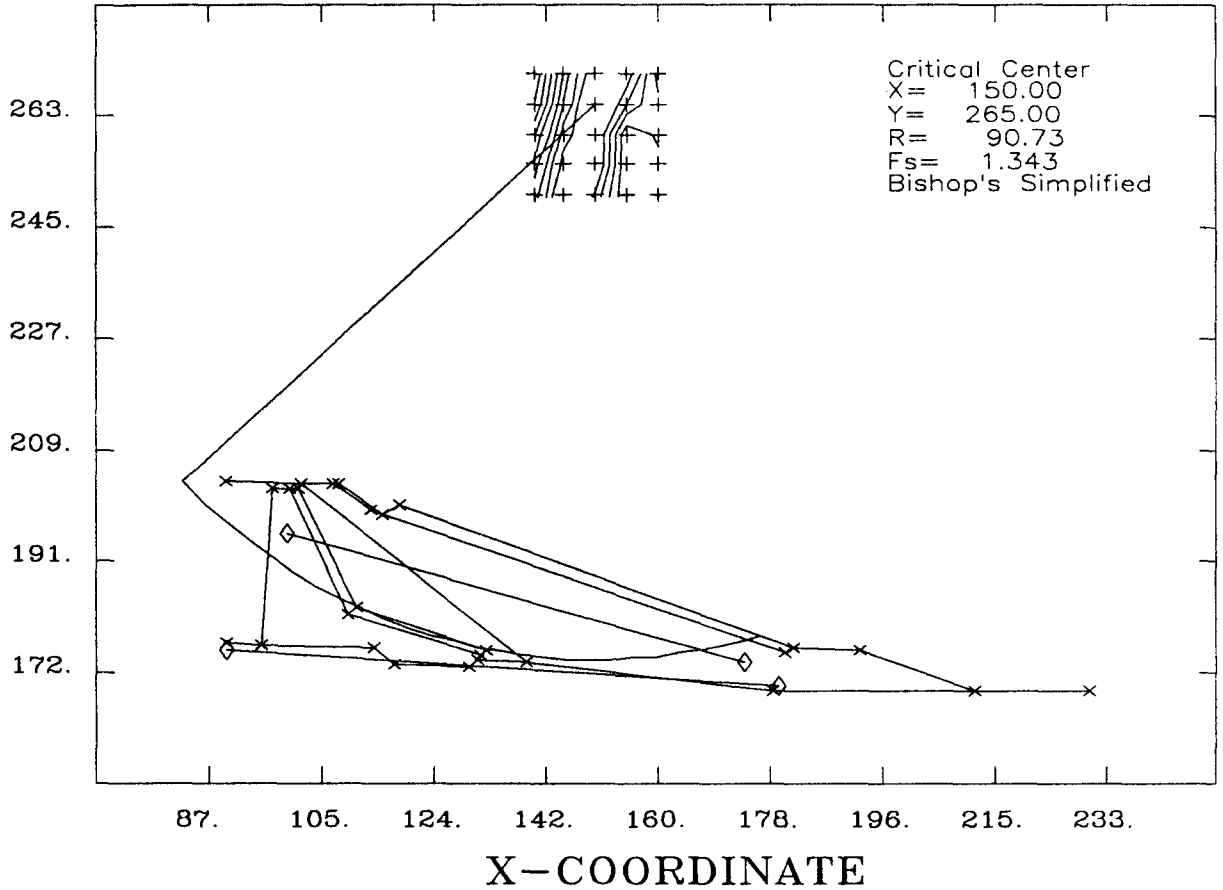
(표4-3) CORE와 黄色粘土의 強度定數

CONDITION	CORE		黄色粘土	
	c' (kPa)	ϕ'	c' (kPa)	ϕ'
(A) PEAK, INTACT	15.0	21.0	10.0	20.0
(B) PEAK, WITH PRE-EXISTING SHEARS	6.0	20.0	5.0	17.0
(C) CRITICAL STATE	0.0	20.0	0.0	18.0
(D) RESIDUAL	0.0	13.0	0.0	12.0

CROSS-SECTION OF GEOMETRY

CARSINGTON DAM SLOPE STABILITY ANALYSIS
 NO.1 1991.9.30
 CARSINGTON DAM UPSTREAM SLOPE

Y-COORDINATE



UNIT WEIGHT	COHESION	PHI	DESCRIPTION
18.50	.00	35.00	SLOPE PROTECTION
21.00	.00	25.00	ZONE2
21.00	.00	25.00	ZONE1
18.50	.00	22.00	BOOT
18.50	.00	22.00	CORE
18.00	100.00	30.00	WEATHERED MUDSTONE

File name : cdam10-4.SET

(그림 4-1) 설계단면 및 원호활동 해석

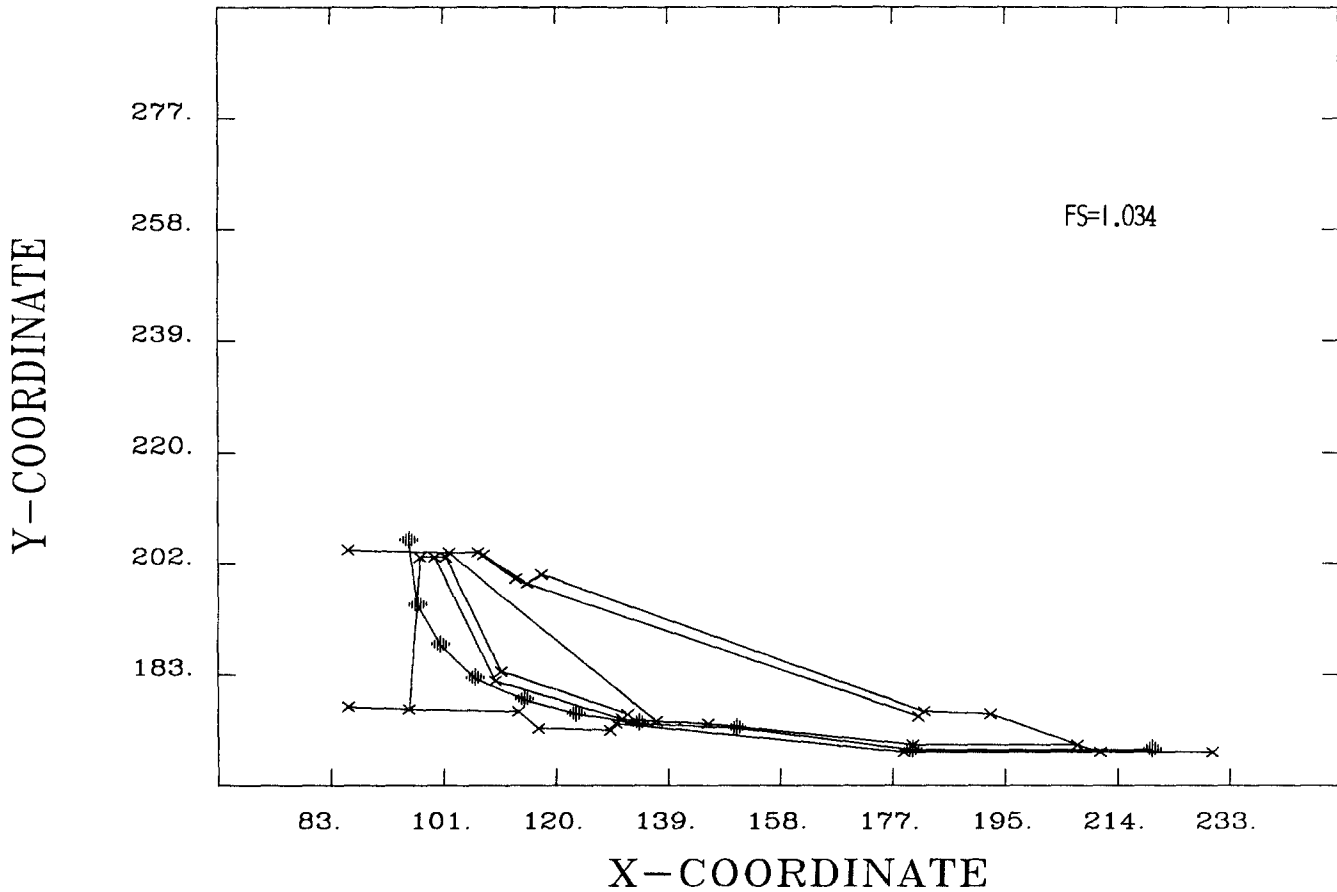
CROSS-SECTION OF GEOMETRY

CARSINGTON DAM SLOPE STABILITY ANALYSIS

NO.1

1991.9.30

CARSINGTON DAM UPSTREAM SLOPE



UNIT WEIGHT	COHESION	PHI	DESCRIPTION
18.50	.00	35.00	SLOPE PROTECTION
21.00	.00	25.00	ZONE2
21.00	.00	25.00	ZONE1
18.50	.00	22.00	BOOT
18.50	.00	20.00	CORE
18.50	.00	18.00	YELLOW CLAY
18.00	100.00	30.00	WEATHERED MUDSTONE

File name : dd5.SET

(그림 4-2) 해석단면 및 파괴면 지정해석

(표4-4) 間隙水壓比

MATERIAL	間隙水壓比
CORE	0.42
BOOT	0.53
YELLOW CLAY	0.00

4-2-2. 解析結果

CARSINGTON DAM의 上流斜面 破壞後 地盤材料에 대하여 實驗한 結果는 (표4-3)와 같다. 解析에 사용된 入力値는 CRITICAL STATE 條件의 것을 사용하였다(THE MECHANICS OF SOILS, J.H. ATKINSON & P.L. BRANSBY).

破壞後 調査에서 나타난 YELLOW CLAY層을 考慮한 破壞面指定解析에서 安全係數 1.034를 보였다(그림4-2참조). CARSINGTON DAM의 破壞狀況을 보아 暴雨에 의한 影響으로 地下水位를 考慮하면 安全係數는 JANBU方法에 의하여 0.985로 計算되었다(그림4-3참조). 이러한 狀況에서 黃色粘土層은 剪斷變位가 進行되어 RESIDUAL STRENGTH狀態에 이른 것으로 생각된다. CORE를 CRITICAL STATE STRENGTH, YELLOW CLAY를 RESIDUAL STRENGTH로 보고 計算한 結果 0.803의 安全係數를 얻었다(그림4-4참조).

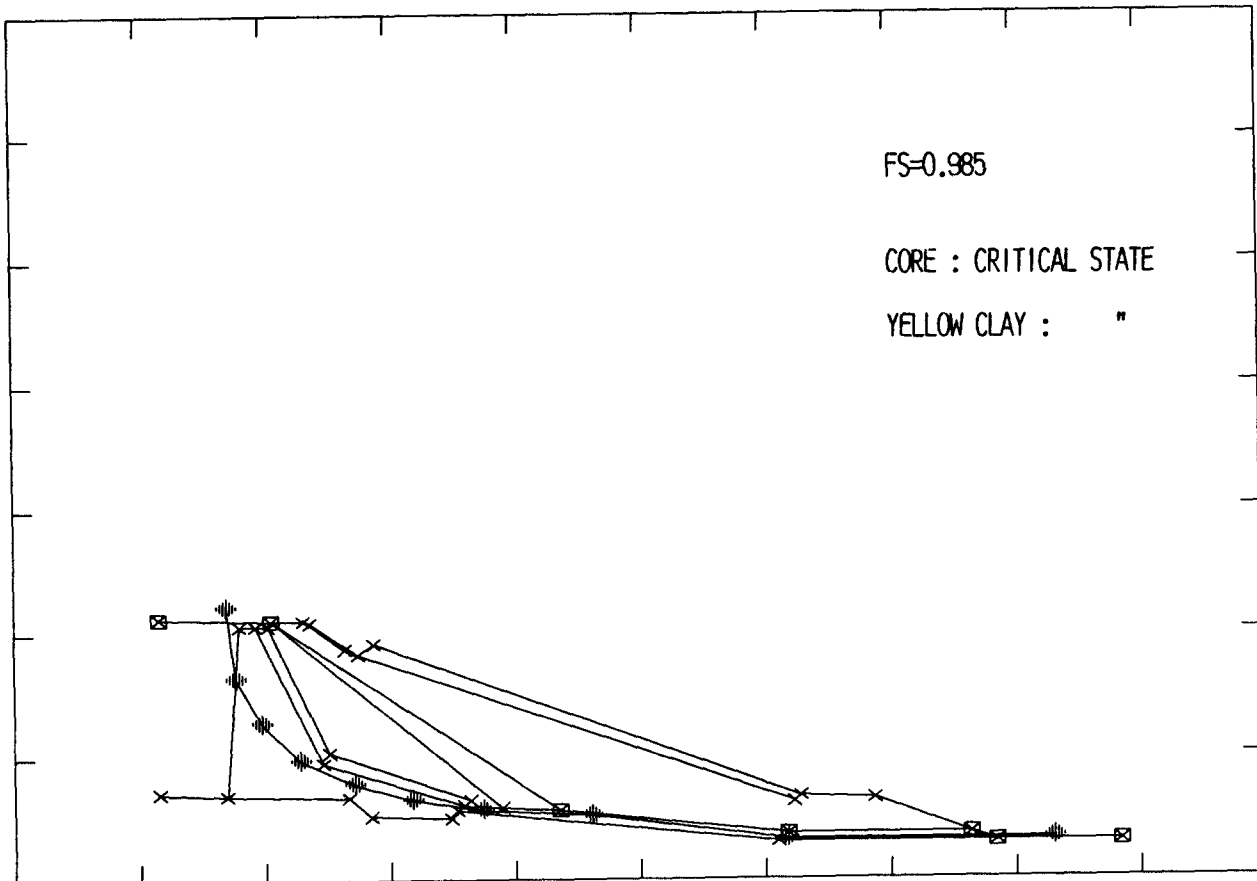
圓弧滑動解析에서도 비슷한 結果를 보이며, BISHOP의 方法에 의한 것(FS=0.966, 그림4-5)보다 JANBU方法에 의한 安全係數(FS=0.893, 그림4-6)가 낮게 計算되었다.

'PCSTABL5M'을 利用하여 단단한 地層上에 軟弱層(WEAK LAYER)가 存在할때 使用可能한 BLOCK解析을 하였다. 解析結果는 위에서와 같은 樣相을 볼 수 있으며(FS=0.984), 本社에서 開發한 STABL用 POST-PROCESSOR 'SLOP'으로 出力한 結果는 다음의 (그림4-7)과 같다.

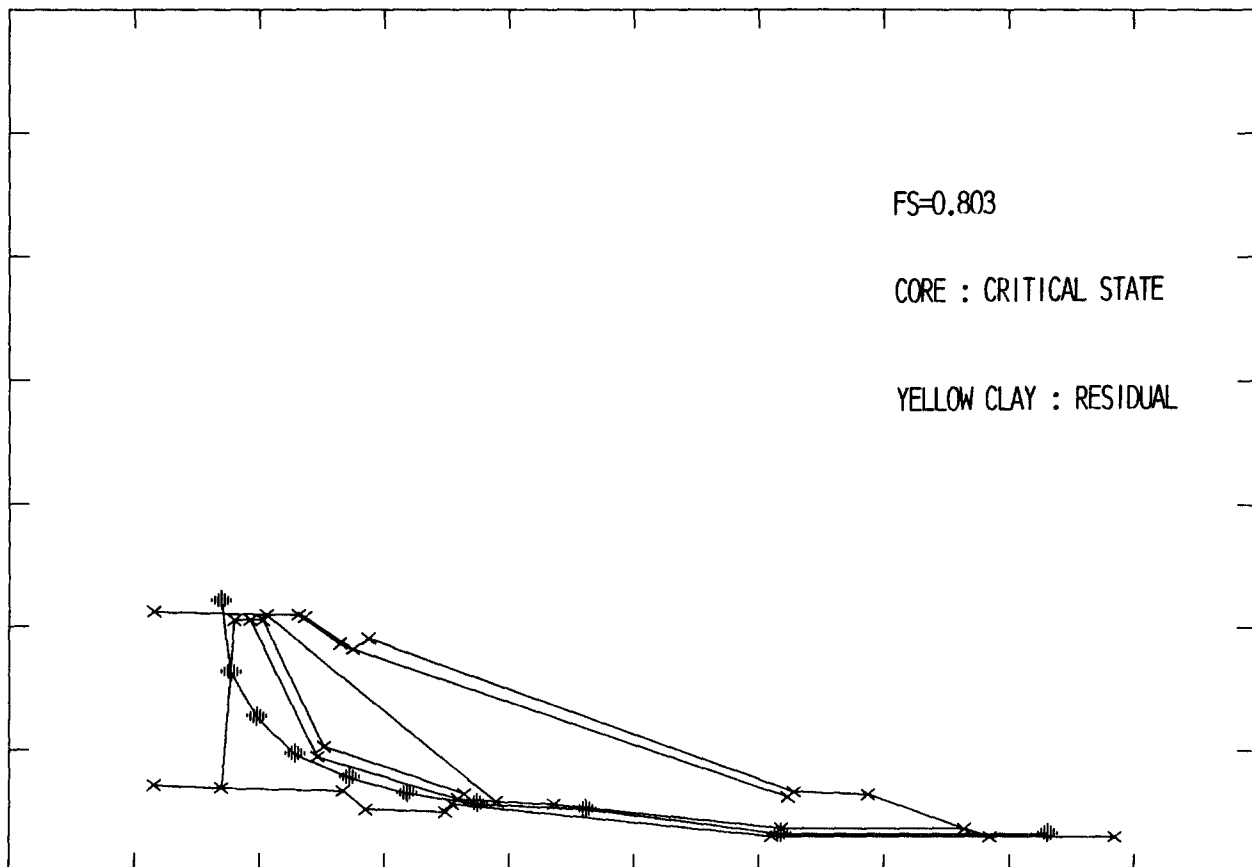
以上の 結果를 整理하면 (표4-5, 표4-6)과 같다.

(표4-5) 'PC-SLOPE'에 의한 安全係數(JANBU'S SIMPLIFIED METHOD이용)

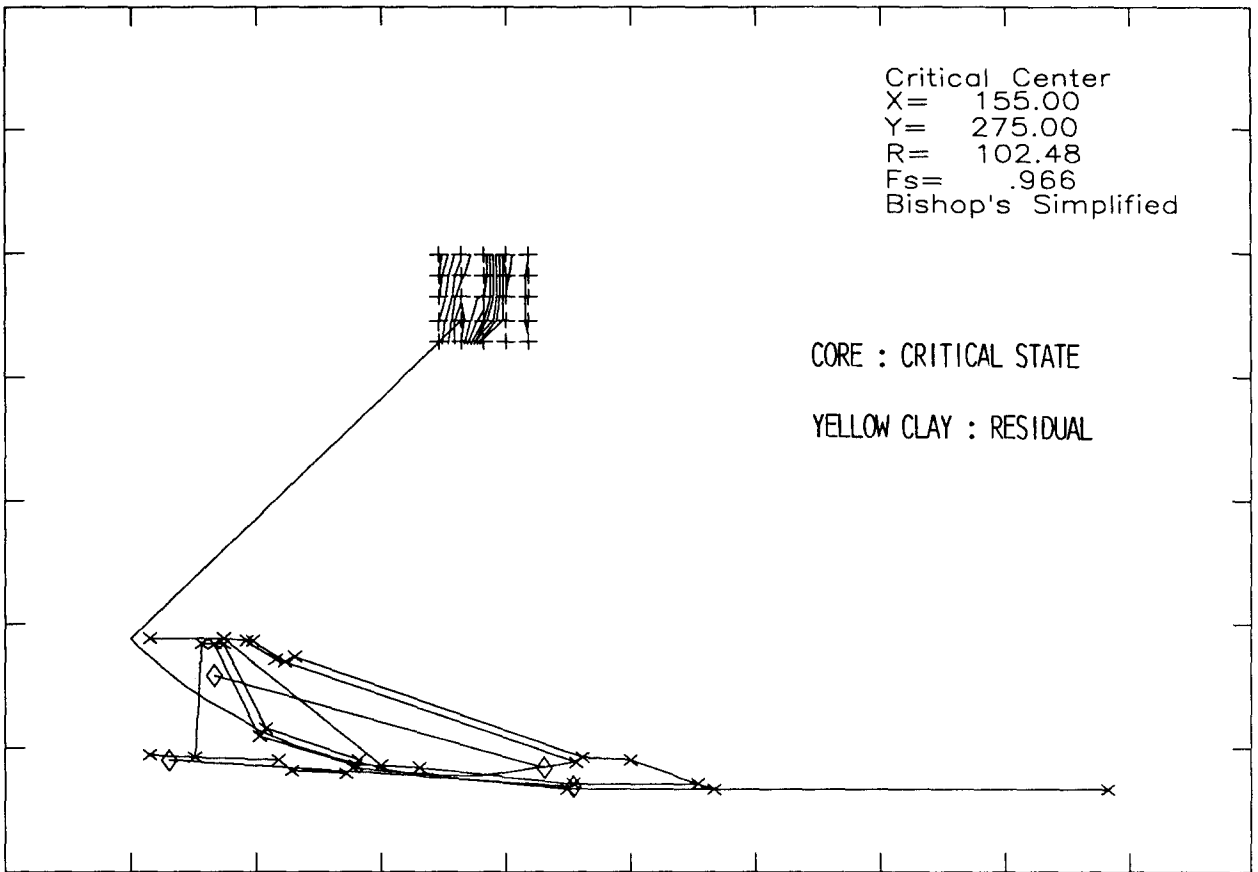
強度定數의 選擇		安全係數	
CORE	YELLOW CLAY	破壞面 指定解析	圓弧滑動解析
CRITICAL STATE	CRITICAL STATE	1.034	1.029
CRITICAL STATE	RESIDUAL STATE	0.803	0.893



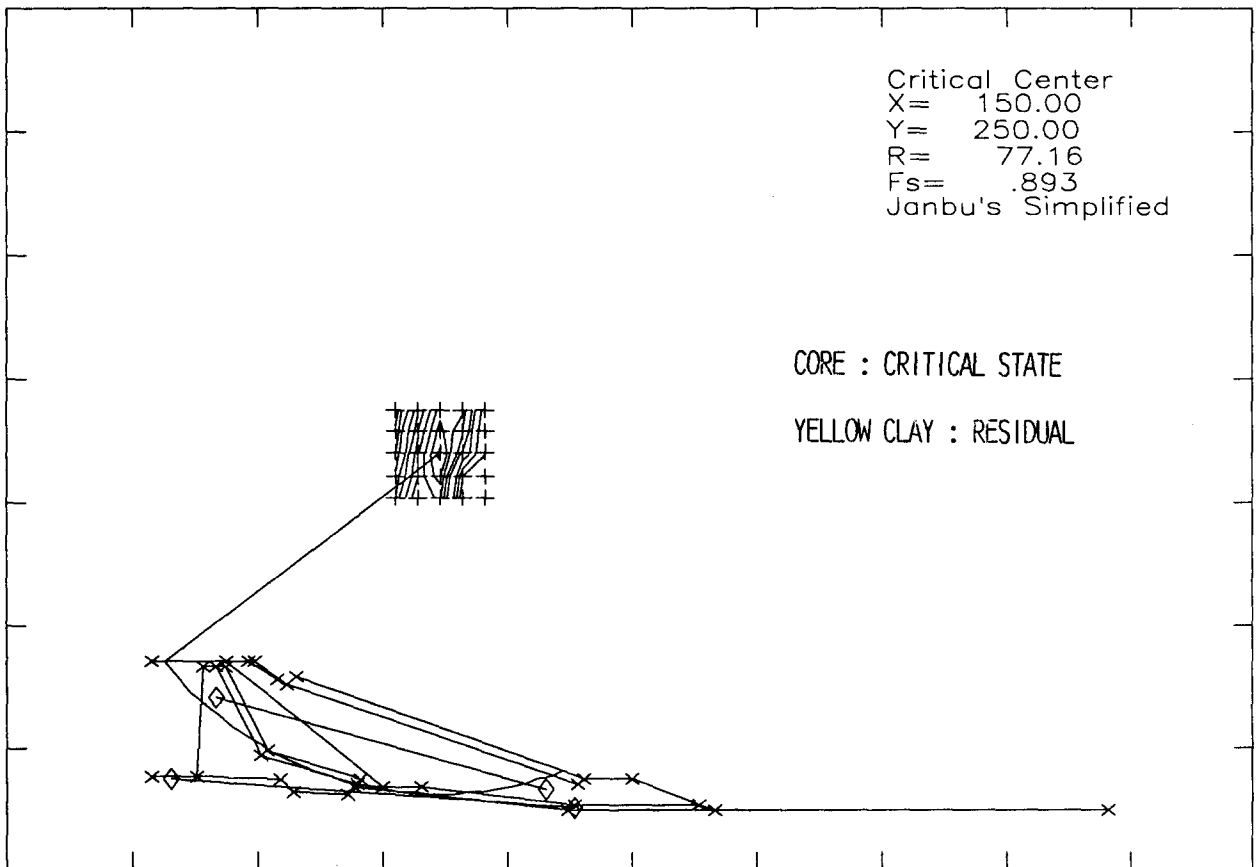
(그림 4-3) 파괴면 지정해석 (PIEZOMETRIC LINE 고력)



(그림 4-4) 파괴면 지정 해석 (간극수압계수 고력)



(그림 4-5) 원호활동해석 (BISHOP)



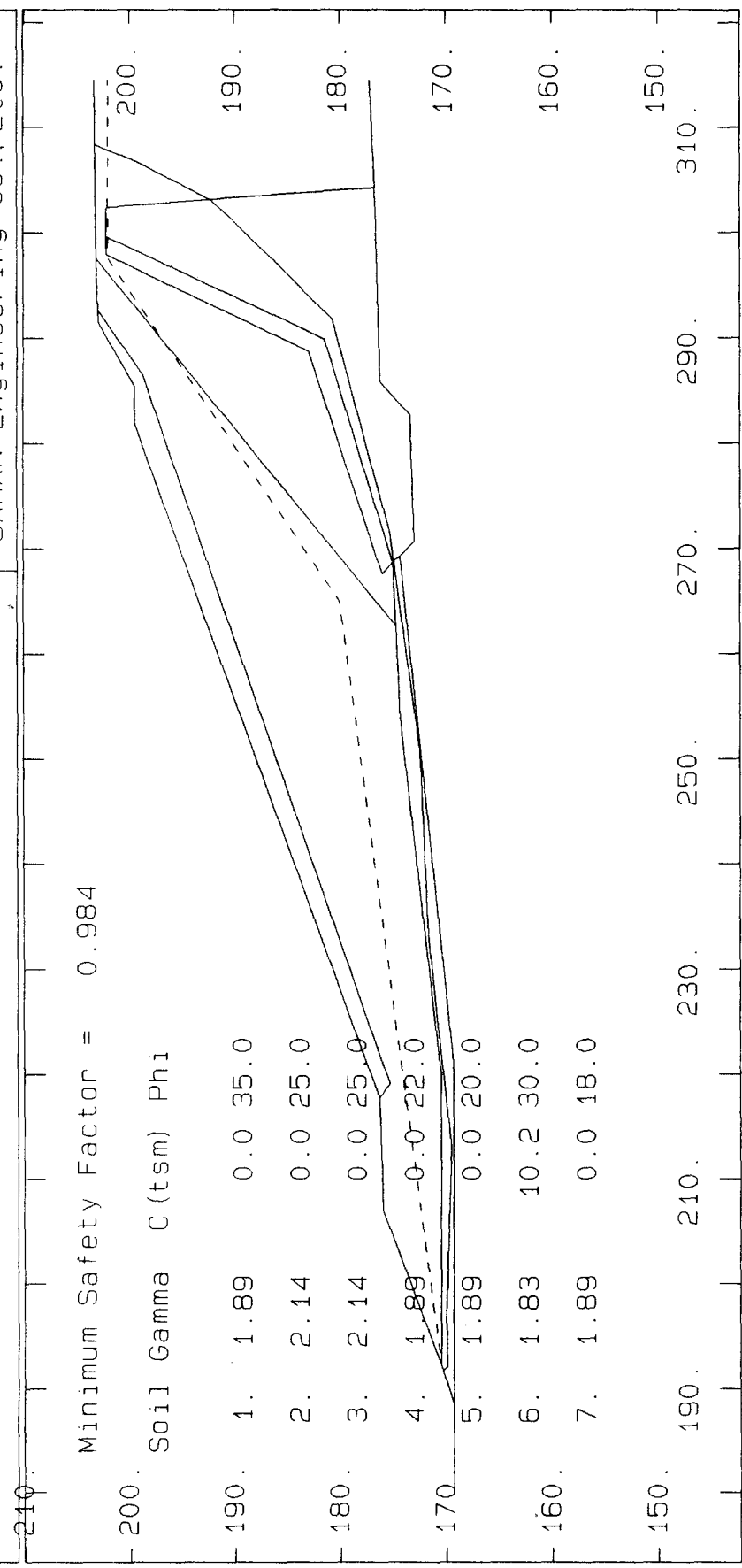
(그림 4-6) 원호활동해석 (JANBU)

CARSINGTON DAM

Minimum Safety Factor = 0.984

Soil Gamma C (t/m) Phi

1.	1.89	0.0	35.0
2.	2.14	0.0	25.0
3.	2.14	0.0	25.0
4.	1.89	-0.0	22.0
5.	1.89	0.0	20.0
6.	1.83	10.2	30.0
7.	1.89	0.0	18.0



(그림 4-7) PCSTABLE5M 에 의한 BLOCK 해석

(표4-6) PIEZOMETER LINE을 考慮한 斜面 安全係數

強度定數의 選擇		使用된 프로그램別 安全係數		
CORE	YELLOW CLAY	'PC-SLOPE'		'PCSTABL5M'
		破壞面指定	圓弧滑動	BLOCK滑動
CRITICAL STATE	CRITICAL STATE	0.985	0.852	0.984

5. 討論事項

5-1. 프로그램의 能力에 대하여

5-1-1. 破壞斷面의 豫測能力

破壞斷面의 解析方法을 크게 ①'PC-SLOPE'에 의한 破壞面 指定解析 ②'PC-SLOPE'에 의한 圓弧滑動解析 ③'PCSTABL5M'에 의한 BLOCK解析으로 나누어 試圖하였는데 ①의 경우는 解析面을 미리 指定하여 解析하므로 破壞面을 豫測할 수 없다.

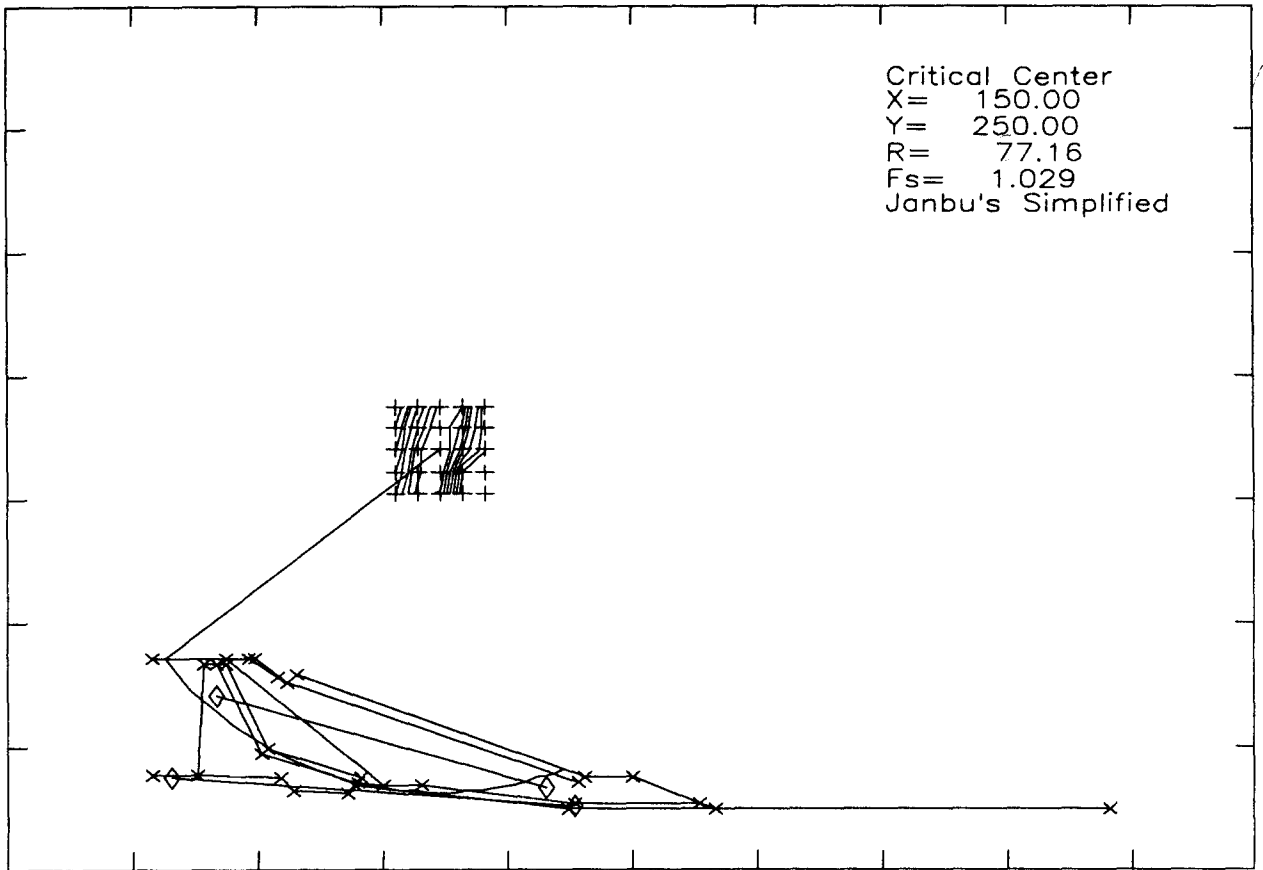
③의 경우에는 實驗結果 나타난 WEAK LAYER(YELLOW CLAY層 및 CORE)의 指定으로 實際 破壞面과 거의 類似한 滑動面을 얻을 수 있었다. 따라서 材料特性의 差異가 큰 地層의 解析時 適合한 方法이라 생각된다. ②의 경우 圓弧滑動面은 댐의 頂上에서 始作하여 黃色粘土層까지는 實際破壞面과 類似하다. 그러나 斜面의 保護工(BERM)部分에는 破壞가 일어나지 않는것으로 나타나는데 破壞斜面의 變位벡터를 보면 黃色粘土層과 平行的 方向性을 보이므로 댐斜面의 圓弧滑動에 의한 水平力에 의하여 黃色粘土層의 CREEP破壞가 일어난 것으로 볼 수 있다.

5-1-2. 間隙水壓의 適用

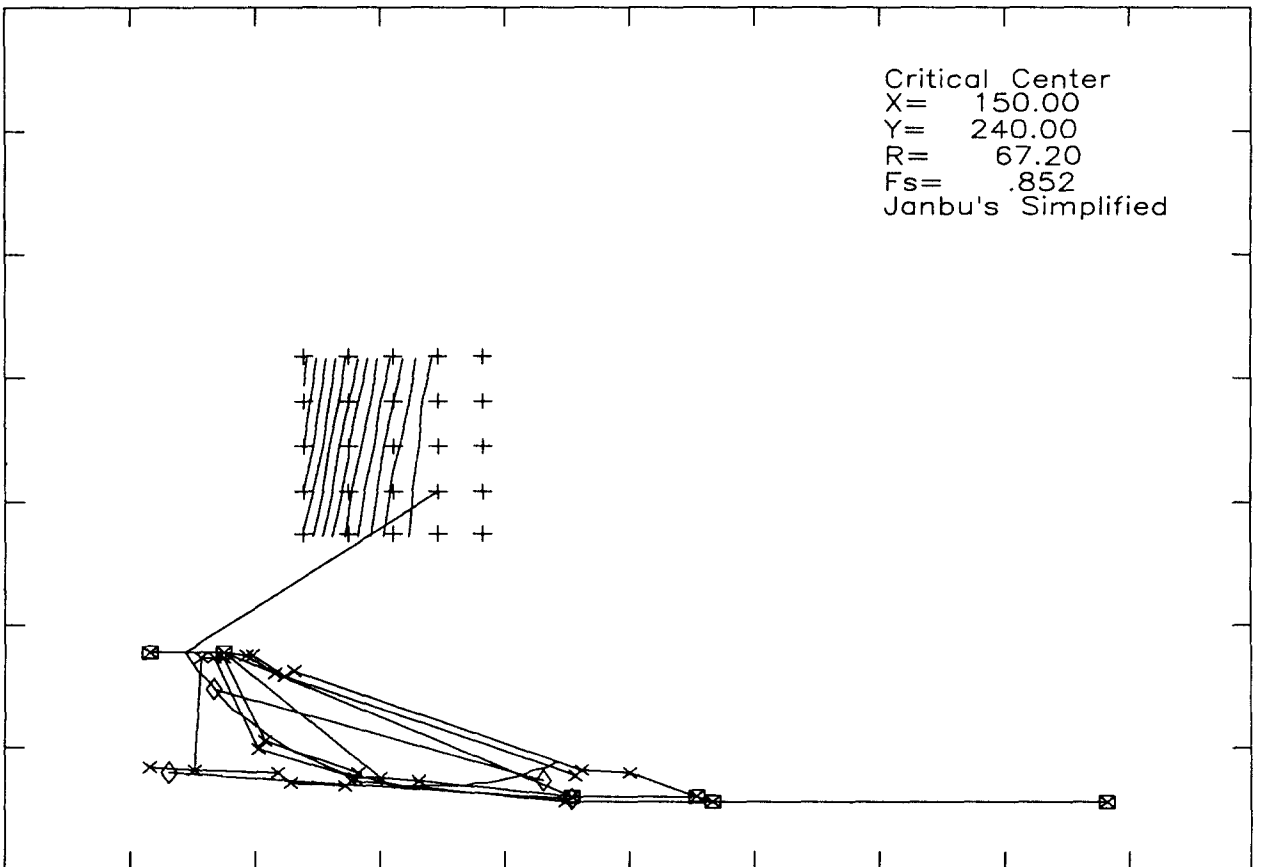
地盤內 間隙水壓은 一般的으로 PIEZOMETRIC LINE과 PORE-PRESSURE RATIO(間隙水壓係數)의 2가지 方法을 利用하여 量的解析이 可能하며, 本 內容에서 使用된 電算프로그램에서도 이를 利用하고 있다.

주어진 間隙水壓係數(r_u)와 強度定數를 適用하면 安全係數는 1.029정도로 計算된다(그림4-8참조). 이때 RANDOM ZONE I, II의 間隙水壓係數는 0.0으로 보았으나 이 狀態로라면 滑動破壞를 適切히 說明하기란 어렵다.

CARSINGTON DAM 上流斜面의 경우 暴雨가 내린 후 斜面이 滑動을 일으키기 始作하였으므로 透水性 RANDOM ZONE의 地下水位를 어느정도 考慮해야 한다. 따라서 PIEZOMETRIC LINE을 考慮하여 解析하면 安全係數가 1.0이하로 斜面破壞의 發生原因을



(그림 4-8) 원호활동해석 (간극수압계수고려)



(그림 4-9) 원호활동해석 (PIEZOMETRIC LINE 고려)

說明할 수 있다(표4-6참조).

5-1-3. 切片의 垂直面에 作用하는 土壓의 影響

切片의 垂直面에 作用하는 NORMAL FORCE와 SHEAR FORCE를 考慮한 解析이 可能하다. SHEAR FORCE는 切片의 바닥에 作用하는 힘을 計算하는데 利用되며 切片 垂直面에 作用하는 NORMAL FORCE의 函數로 주어진다(MORGENSTERN AND PRICE, 1965).

破壞斷面 (그림4-4)의 예를 보면 각 切片 垂直面에 대한 NORMAL FORCE와 SHEAR FORCE의 크기는 (그림4-10)과 같다.

5-2. 些少한 地質事項(MINOR GEOLOGIC DETAIL)이 갖는 工學的 重要性

및 地盤工學分野에서의 豫測과 實際

- YELLOW CLAY層의 影響
- 자세한 地盤調査의 必要性
- 降雨의 影響 등

5-3. 結果의 解析

設計定數에 의한 斷面の 解析에서는 安全係數가 1.2이상으로 計算되어 斷面形狀 및 斜面勾配는 適切하였던 것으로 생각된다.

破壞斷面の 解析에서 CORE 및 YELLOW CLAY層의 強度定數를 CRITICAL STATE STRENGTH로 보고 解析한 結果는 安全係數가 1.0에 가까와 滑動力과 抵抗力이 거의 비슷한 값을 보였다.

DAM完工直前の 暴雨에 의해 地下水位가 增加되어 斜面內 單位重量의 增加와 有效應力の 減少등의 理由로 YELLOW CLAY層에서 부터 破壞가 시작되어 破壞된 面을 따라 進行하는 破壞形態가 일어난 것으로 解析된다.

또한 같은 理由로 斜面上部에서 圓弧滑動을 일으키면서 同時に 水平力이 作用해 相對的으로 剪斷強度가 낮은 YELLOW CLAY層을 따라 破壞가 일어난 것으로도 解析할 수 있다.

INTER-SLICE NORMAL & SHEAR FORCE

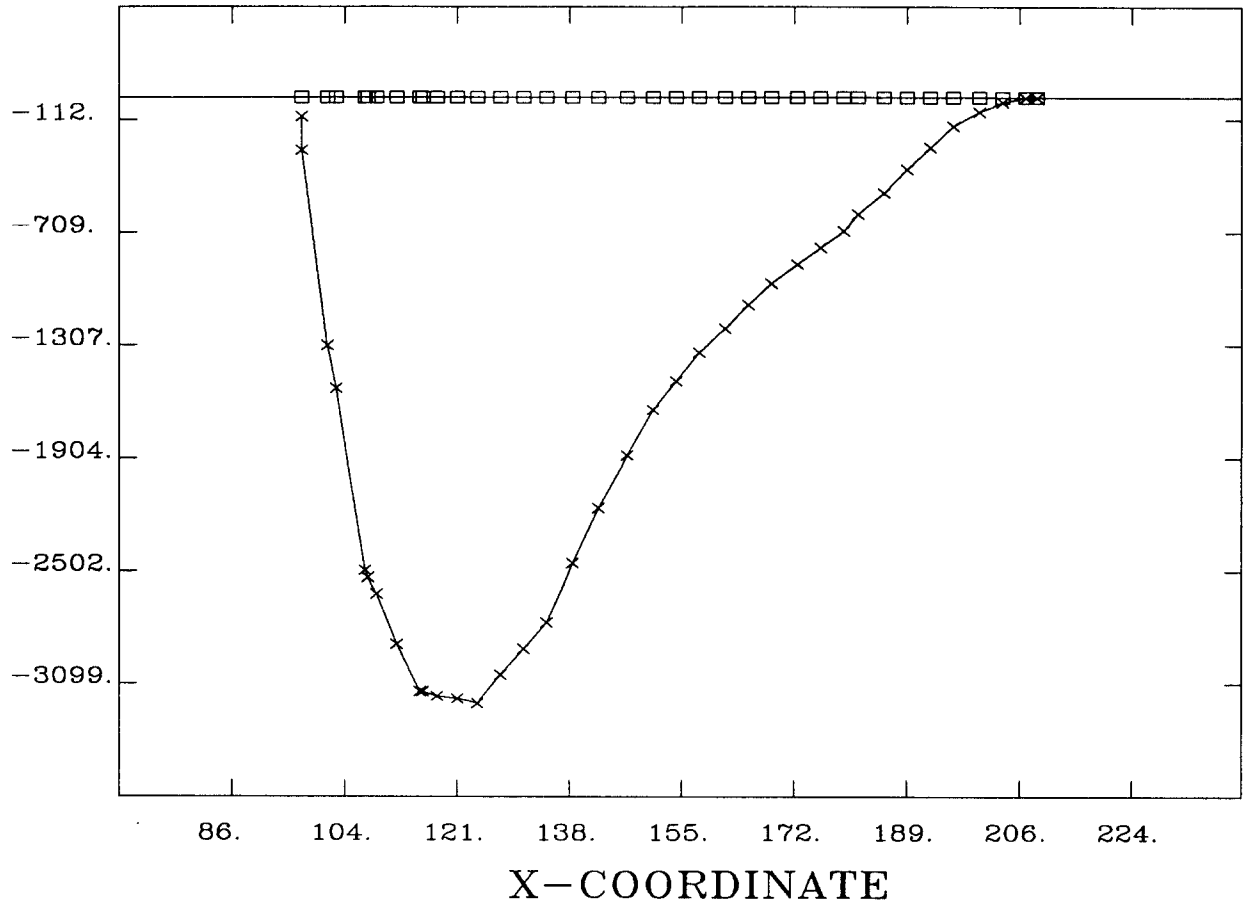
CARSINGTON DAM SLOPE STABILITY ANALYSIS

NO.1

1991.9.30

CARSINGTON DAM UPSTREAM SLOPE

FORCE / UNIT LENGTH & PRESSURE



X = Interslice Normal Force
 Open Squares = Interslice Shear Force
 File name : dd5-a.DET

(그림 4-10) 절편의 수직면에 작용하는 힘