제 8 장 탄소성조인트요소를 포함한 보강사면의 유한요소해석

8.1. 서론

토사지반이나 암반지반에 대한 제반 지반공학적 문제의 해결을 위해 여러 가지 해석법이 도입되어 사용되고 있지만 서로 다른 이질의 재료나 동질의 재료들이 서로 미끌어지거나 분리되는 경우 접촉면에서 힘을 전달하는 상태에 대한 고찰은 불연속체에 대한 역학적 개념을 도입하지 않으면 안된다.

유한요소법을 이용한 불연속모델의 해석은 불연속면의 변형상태를 작용하는 하중이나 구조물의 상태도 응력상태에 따라 다르기 때문에 실제상태에 가급적 충실한 역학모델을 가정하는 것이 중요하다. 불연속면을 표현하는 요소는 양단면의 일차원요소, 조인트요소, 결합요소로 표현될 수 있으며 이 면을 통하여는 인장력이 전달되지 않는다고 가정한다.

억지말뚝을 설치하는 경우 각 굴착단계는 말뚝에 발생하는 힘의 분포에 중요한 영향을 미친다. 특히 그라우팅을 하는 경우 말뚝주위 지반과 말뚝의 접촉 즉, 지반과 그라우트 사이의 접촉면을 따라 마찰이 발생된다. 또한 지반에 관입된 보강재사이의 접촉면에서 구속다이러턴시의 효과는 많은 지반과 구조물의 상호작용 문제에서 중요한 역할을 수행한다. 그러한 효과는 Guillor, Schlosser & Long(1979)에 의한 Strip보강재의 아칭효과로 설명되어 진다. Goodman, Tayor & Brekke[133)] 이후 탄소성조인트요소를 도입하여 여러 가지의 수식으로 제안되었지만 구속다이러턴시효과에 의한 탄소성조인트요소의 언급은 분명히 설명되지 못하였다. 한편, Heuze Barbour[142)]는 인접한 매체에 의한 구속을 고려한 그리고 조인트 전단 동안 조인트의 연직응력의 증강에 의한 구속을 고려한 다이러턴시모델을 제안하였다(표8.1참조). 그러나, 이들 제안식들은 탄소성이론에 기초하지 못하였다.

따라서, 본 장에서는 조인트에 대하여도 Matsui & San[178)]이 제안한 조인트의 활동을 고려한 탄소성조인트요소법을 이용하였고 지반에 대하여는 토사지반은 Duncan-Chang의 비선형탄성모델을, 암반에 대하여는 탄성모델을 적용하여 유한요소해석을 실시하였다.

표8.1 조인트요소의 발달사[258]

Name Reference Number	Date	Geometry			No Thickness	Rotational Stiffness	Dilation	Strain Softening	Fluid Flow	Quadratic
		Plane	Axisym-metric	Three dimention						
Goodman et al.	(1968)	*			*					
Mahtab et al	(1970)			*	*					
Heuze. et al.	(1971)	*			*			*		
Heuze. et al.	(1971)	*			*		*	*		
St. john.	(1972)	*		*	*					
de Rouvray et al.	(1972)	*			*		*	*		
Goodman et al.	(1972)	*			*		*	*		
Ghaboussi et al.	(1973)	*	*				*			
Gale et al.	(1974)	*			*				*	
Ngo	(1975)	*			*					*
Sharma et al	(1976)	*								*
Hilber et al.	(1976)	*							*	
Goodman et al.	(1977)	*			*	*		*		
Heuze	(1979)	*			*	*	*			
Xiurun	(1981)	*			*		*	*		
Van Dillen et al.	(1981)	*		*			*			
Heuze et al.	(1982)		*		*		*			
上岐등	(1982)			*	*	*				
大西등	(1982)	*			*	*		*	*	
松本등	(1983)		*		*				*	

8.2 접촉면에서의 구속다이러턴시 거동

Goodman & Dubois[132)]는 자연적인 조인트시료에 대하여 직접전단시험으로부터 전단하중-전단변위 및 전단하중-연직변위의 관계를 그림 8.1과 같이 나타내었다.

전단하중-전단변위곡선은 등가 응력-변형률곡선이다. A점이하의 낮은 응력상태 즉 OA영역은 탄성영역이고 A점에서 응력은 영구변형이 나타나기 시작하며 이를 항복응력이라 한다. AB영역은 탄소성영역이다. 따라서 전체 변형률은 탄성 및 소성변형률을 포함하고 있다.

변형률경화는 변형에 대한 접촉면재료의 항복응력의 증가로써 간주되어진다. 한계평형해석에서 항상 OB는 탄성영역이고 B점이후에는 한계평형의 해가 관계되어진다.

또한 Goodman(1977)은 접촉면에 대한 다이러턴시를 응력-변형률 곡선을 통해 그 효과를 제시하였다. 본 연구에 사용되는 접촉면에 대한 거동모델은 대단히 작은 범위로 제한되어 있으므로 접촉면에서의 구속다이러턴시 특성을 이상화하면 그림 8.2와 같다.

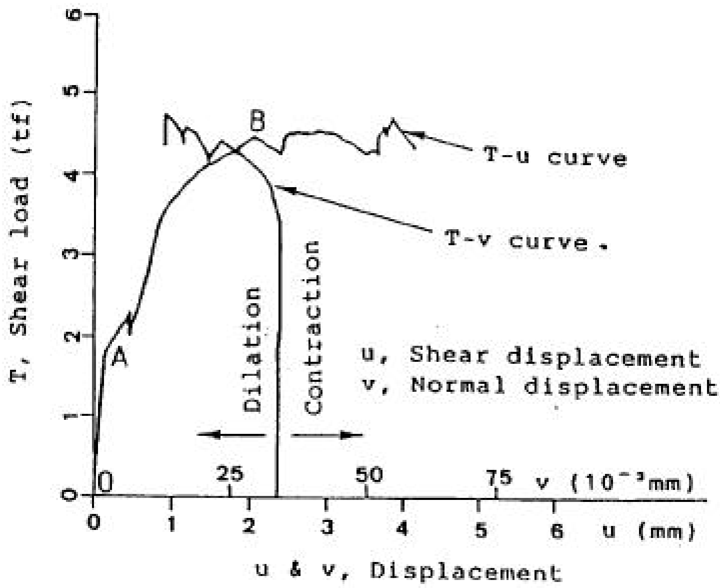


그림 8.1 조인트 시료의 다이러턴시[133)]

그림 8.2는 일정한 연직응력하에서의 연직변위가 없는 경우 전단시험결과를 도시한 것이다. A곡선은 일정한 연직응력하에서 전단동안 접촉면(interface)의 다이러턴시거동을 보여주고 있다. 또한 B곡선은 전단동안의 연직응력으로 증가하는 구속다이러턴시효과를 나타내고 있다. 그림 8.2(c)에서의 B곡선은 일반적인 구속다이러턴시효과를 접촉면에 대하여 설명하고 있다. 따라서, 전단응력과 전단변위 사이를 이중선형으로 이상화하면 그림 8.2(c)와 같다.

그림 8.3(b)는 전단에 의한 연직응력 증가와 전단변위사이의 이중선형관계를 그림 8.2(b)에서 곡선 B로 이상화된다. 그림 8.3(b)에서 보는 바와 같이 활동이 시작하기전 연직응력 증가는 활동이 발생한 후의 것과 비교하여 대단히 작다.

만약, 그림 8.4에서처럼 Coulomb항복규준이 사용되어지면 항복선 아래 응력상태에서 탄성변형을 경험한다. 반면, 응력상태가 항복선에 도달하면 재료는 소성변형을 경험한다. 따라서, 재료는 소성변형을 경험하고 응력점은 항복선을 따라 움직인다.

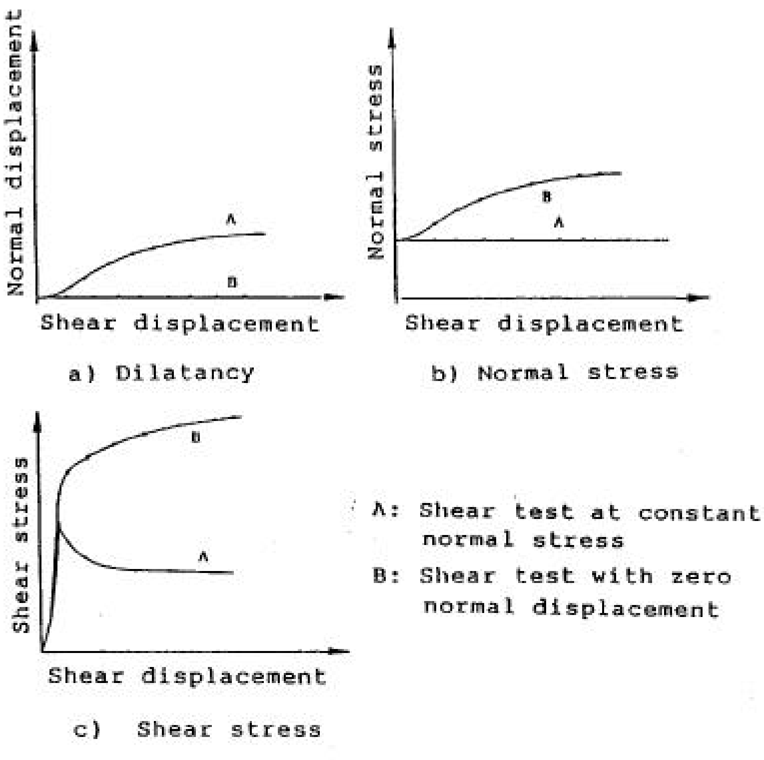


그림 8.2 조인트에서의 다이러턴시와 구속다이러턴시[131)]

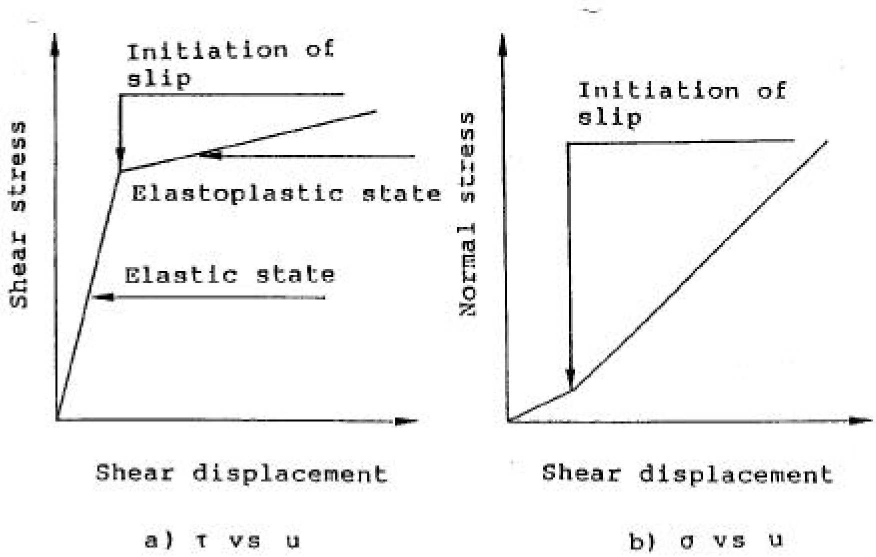


그림 8.3 **경계면에서의 구속 다이러턴트 특성**[178)]

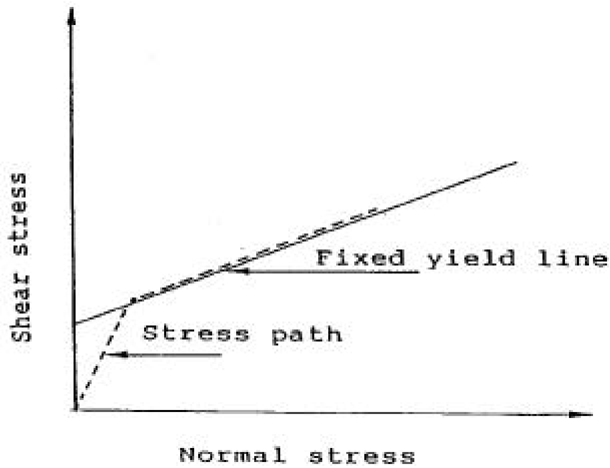


그림 8.4 **경계면에서의 응력경로**[178)]

8.3 탄소성 조인트요소

8.3.1 조인트요소

조인트 요소는 그림 8.5와 같이 자유도를 갖는 중점에서의 상대변위를 갖는다고 가정한다. 상대연직변위 du_r, 상대접선 변위 dv_r는 절점변위 u와 v에 대하여 다음식과 같이 표현된다.

$$du_r = \frac{u_4 + u_3 - u_2 - u_1}{2}$$

$$dv_r = \frac{v_4 + v_3 - v_2 - v_1}{2} \tag{8.1}$$

조인트요소에서 두개의 변형률 요소는 상대변위에 관련되며 연직변형률 $d\varepsilon = du_r / t$, 전단변형률 $d\gamma = dv_r / t$로 가정한다. 여기서, t는 조인트 요소의 두께,

전체 강성matrix K는 식(8.2)와 같다

$$K = \int_v B^T D_{ep} B \; d(vol) \tag{8.2}$$

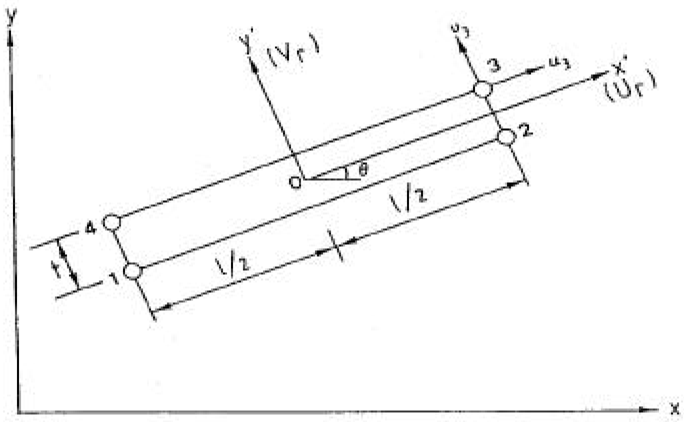


그림 8.5 조인트요소[133)]

여기서, D_{ep}는 탄소성응력-변형률관계의 matrix이고 한 요소에 대한 요소강성 matrix K의 절점값은 $K = tlB^T D_{ep} B$ (l은 조인트 요소의 길이이다)이다.

탄성 응력-변형률 matrix D_e는

$$D_e = \begin{bmatrix} G & 0 \\ 0 & E \end{bmatrix} \tag{8.3}$$

고체 및 조인트의 특성 사이의 상호관계는 k_n, k_s로 나타낼 수 있으며 다음과 같이 정의된다.

$$E = k_n t \quad , \quad G = k_s t \tag{8.4}$$

8.3.2 탄소성응력-변형률관계

Matsui & San(1989)은 조인트요소에 대한 탄소성응력-변형률관계를 다음과 같이 제안하였다.[178)]

Coulomb항복함수와 관련흐름법칙에 따라

$$|\tau| = \sigma \tan\phi + c \tag{8.5}$$

따라서 항복함수 f는 다시 쓰면 식 (8.6)과 같다.

$$f = \tau^2 - (\sigma \tan\phi + c)^2 \tag{8.6}$$

소성 정상흐름법칙상태에서 소성변형률증분벡터 $\delta\varepsilon_p$는 소성포텐셜함수와 직교된다. 그러므로 관련흐름법칙으로 가정하면

$$\delta_{ep} = \lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma} \tag{8.7}$$

여기서, λ양은 양의 스칼라 계수이다.
소성흐름에 따라

$$df = \frac{\partial f}{\partial \sigma} d\sigma = 0 \tag{8.8}$$

식 (8.6)을 식 (8.8)에 대입하면

$$df = \tau d\tau - (\sigma \tan\phi + c)\tan\phi d\sigma = 0 \tag{8.9}$$

전체변형률 증분 $d\varepsilon$는 탄성변형률증분 $d\varepsilon_e$와 소성변형률증분 $d\varepsilon_p$로 구성된다.

$$d\varepsilon = d\varepsilon_e + d\varepsilon_p \tag{8.10}$$

따라서, 탄성변형률증분은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{pmatrix} d\gamma_e \\ d\varepsilon_e \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1/G & 0 \\ 0 & 1/E \end{bmatrix} \begin{pmatrix} d\tau \\ d\sigma \end{pmatrix} \tag{8.11}$$

식 (8.6)을 미분하면 식(8.12)와 같다.

$$\frac{\partial f}{\partial \sigma} = [2\tau - 2s]^T \tag{8.12}$$

여기서, $s = (\sigma \tan\phi + c)\tan\phi$
식 (8.10)에 식 (8.6), 식 (8.11), 식 (8.12)를 대입하여 정리하면

$$\begin{pmatrix} d\gamma \\ d\varepsilon \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1/G & 0 \\ 0 & 1/E \end{bmatrix} \begin{pmatrix} d\tau \\ d\sigma \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} 2\tau \\ 2s \end{pmatrix} \tag{8.13}$$

식 (8.13)을 다시쓰면 식 (8.14)와 같다.

$$\begin{pmatrix} d\tau \\ d\sigma \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} G & 0 \\ 0 & E \end{bmatrix} \left(\begin{pmatrix} d\tau \\ d\sigma \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} 2\tau \\ 2s \end{pmatrix} \right) \tag{8.14}$$

식 (8.10)에 식 (8.14)를 대입하여 간단히 하면

$$\lambda = \frac{\tau G d\gamma - sE\, d\varepsilon}{2\tau^2 G + 2s^2 E} \tag{8.15}$$

식 (8.14)에 식 (8.15)를 대입하면 식(8.16)이 얻어진다.

$$D_{ep} = \begin{bmatrix} G & 0 \\ 0 & \tau \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \tag{8.16}$$

여기서, $D_{11} = \dfrac{\tau^2 G}{\tau^2 G + s^2 E}$

$$D_{12} = D_{21} = \frac{\tau G s}{\tau^2 G + s^2 E}$$

$$D_{11} = \frac{s^2 G}{\tau^2 G + s^2 E}$$

8.3.3 구속직접전단시험에서의 접촉면에 대한 유한요소해석

접촉면의 구속전단시험에 대한 해석을 위하여 그림 8.6과 같이 모델을 설정하여 유한요소해석을 실시하였다.[178)] 그림에서 보는 바와 같이 접촉면은 굵은 실선으로 나타내었으며 접촉면의 연직변위는 구속시켰다. 모델은 탄성체로 가정하였으며 탄성계수는 4.0 × 10^5 t/m^2, 포아손비는 0.3, 조인트요소의 연직 및 전단방향의 강성은 모두 1.5 × 10^5 t/m^2 으로 가정하였다. 전단강도 c, ϕ는 각각 1.0t/m^2 ,30 ° 로 하였다. 또한, 조인트는 초기응력이 작용하지 않는 것으로 하였으며 하중단계를 6.0t/m^2까지 0.1t/m^2씩 증가시켜 해석을 수행하였다.

그림 8.7은 전단응력과 전단변위의 관계를 조인트요소 1번과 4번에 대하여 해석결과를 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 이중선형관계가 잘 도시되어 있음을 알 수 있다. 또한 그림 8.8은 조인트요소 1번과 4번에 대한 연직응력과 전단변위의 관계를 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 활

동이 발생된 후 선형관계를 나타내고 있고 활동전에 발생된 연직응력은 활동후와 비교하여 무시할만하다 하겠다.

한편, 조인트요소 1번과 4번에 대한 응력경로를 살펴보면 그림8.9와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 조인트요소 1번은 항복점에 도달한 후 항복선을 따라 이동하지만 조인트요소4번은 항복점에 도달한후 약간 불안정한 상태를 보이다 이내 항복선을 따라 이동하고 있다.

그림 8.10은 접촉면을 따라 분포하는 전단 및 연직응력을 그림 8.11은 접촉면을 따라 분포하는 전단변위와 연직응력을 도시한 것이다. 그림8.10에서 보는 바와 같이 접촉면을 따라 발생하는 연직응력은 활동전 전단응력과 비교하여 볼 때 무시할 만 하지만 연직응력은 접촉면에서 구속다이러턴시의 효과에 의해 활동 후 전단응력보다 대단히 큰 값을 나타내게 된다. 또한 그림8.11에서 보는 바와 같이 연직변위는 전단변위에 비교하여 대단히 작게 나타나고 있다. 접촉면을 따른 연직응력의 발생은 연직방향의 변형에 의한 것이 아니라 접촉면에서의 구속다이러턴시 효과에 기인한 전단변위에 의한 것이라 할 수 있다.

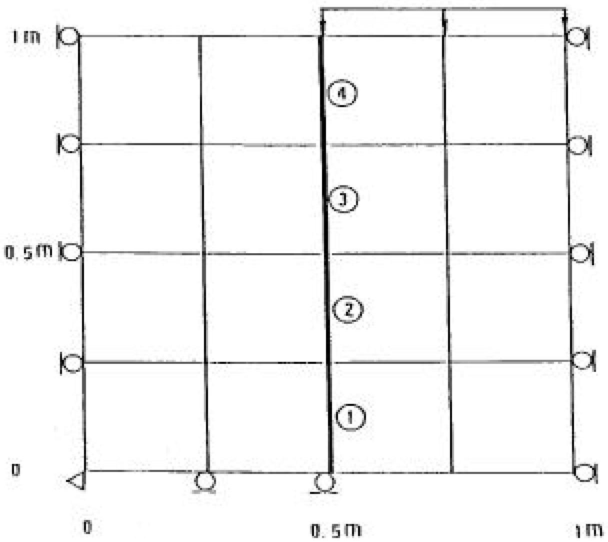


그림 8.6 구속전단시험의 유한요소망[178)]

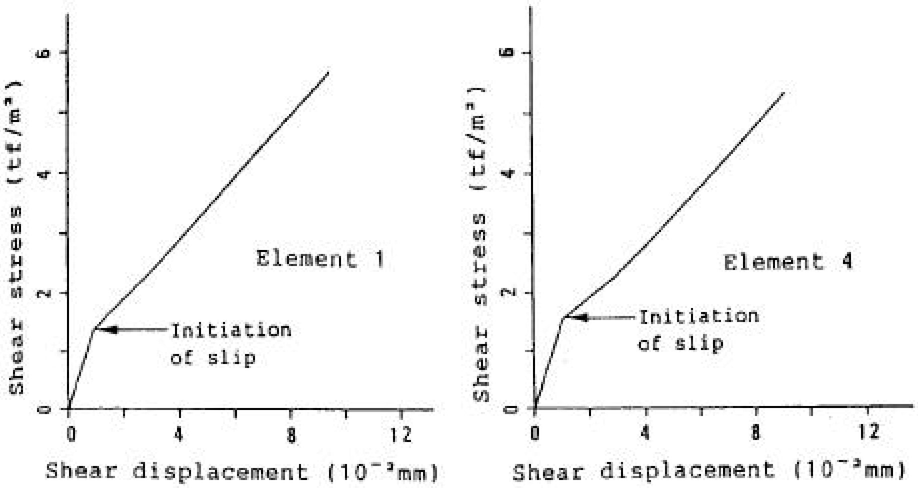


그림 8.7 접촉면의 조인트요소1과 4에 대한 전단변위와 전단응력관계[178)]

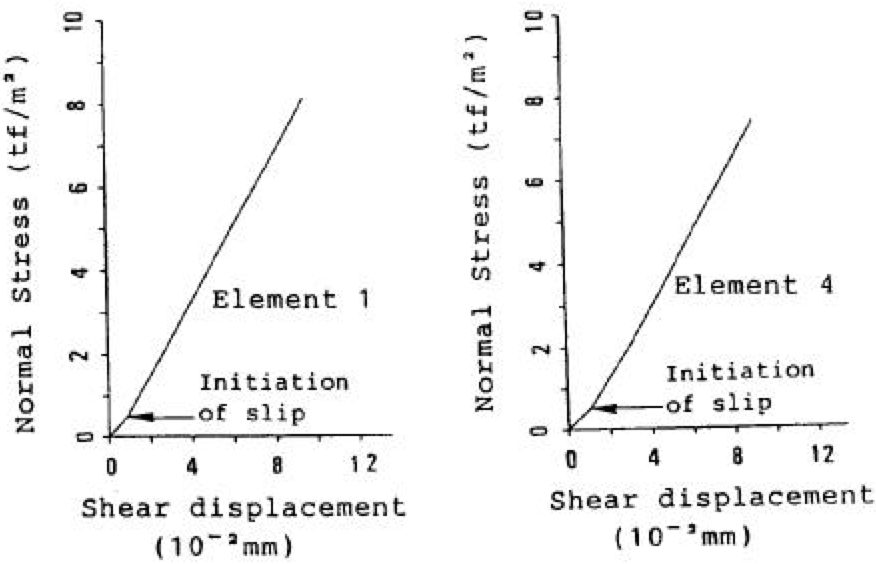
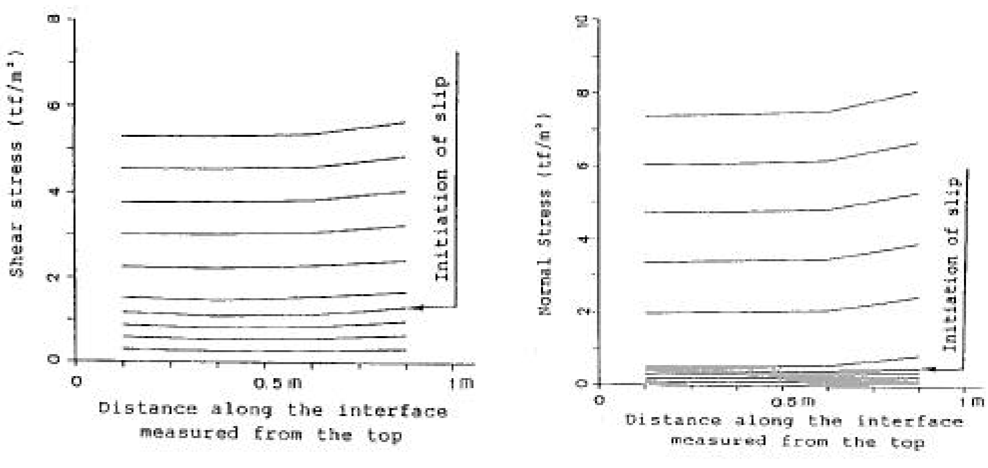


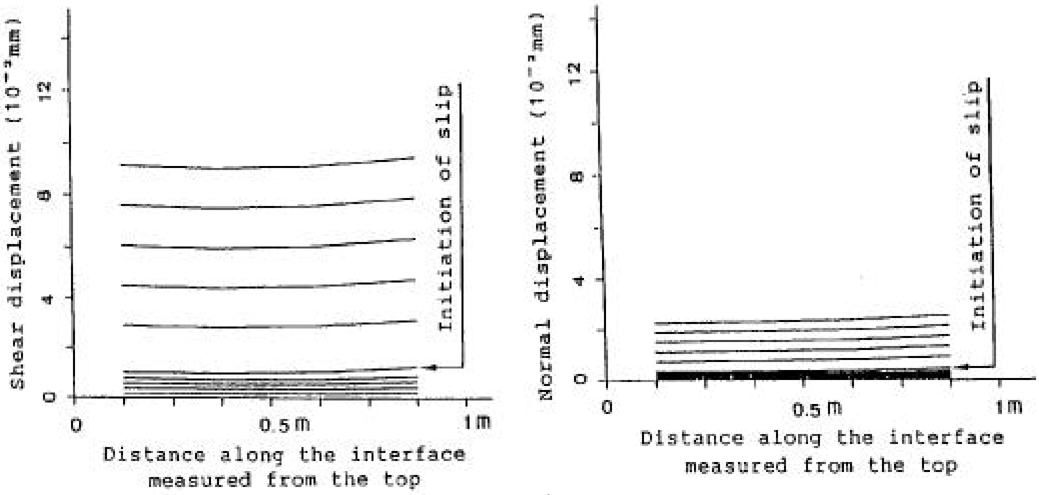
그림 8.8 접촉면의 조인트요소1과 4에 대한 전단변위와 연직응력관계[178)]

그림 8.9 전단동안 접촉면의 조인트요소1과 4에 대한 응력경로[178)]



(a) (b)

그림 8.10 접촉면을 따른 연직응력 및 전단응력 분포도[178)]



(a) (b)

그림 8.11 **접촉면을 따른 연직변위 및 전단변위 분포도**[178)]

8.4 쌍곡선 응력-변형률관계

본 논문에서 해석대상으로 한 지반의 모델을 가정함에 있어서 토사지반은 쌍곡선모델로 암반은 탄성모델로 가정하였다. 쌍곡선모델에 대한 구성식들에 대하여 본 절에서 간략히 서술하면 다음과 같다.

8.4.1 쌍곡선모델

점증하중이 가해지는 동안 응력의 변화상태는 몇 개의 매개변수와 계수들로 표현되며 1963**년** Kondner**에 의해 처음으로 제안되었고** Duncan & Chang(1970)**에 의해 수정보완되었다**.[115)] Kondner(1963)**는 일정구속응력상태하의 삼축상태에서 구한 응력-변형률 곡선을 쌍곡선 형태로 식**(8.17)**과 같이 정의하였으며 그림** 8.12**와 같다**.

$$\varepsilon = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{E_i \left[1 - \dfrac{R_f \ (\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}\right]} \qquad (8.17)$$

여기서 $(\sigma_1 - \sigma_3)$: 주응력차

$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$: 파괴시의 주응력차

R_f : 파괴비

ε : 축변형률

E_i : 초기 접선변형계수로 구속압에 관계한다.

식 (8.17)의 응력-변형률 관계를 선형화시키면 그림 8.13과 같다. 응력과 변형률은 구속응력에 따라 변화하므로 Duncan and Chang(1970)은 응력에 의존하는 초기 접선변형계수 E_i를 식(8.18)과 같이 제안하였다.

$$E_i = KP_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right)^n \tag{8.18}$$

여기서 K : 변형계수 정수(modulus number), P_a : 대기압,

σ_3 : 최소주응력, n : 변형계수 지수

극한상태에서의 주응력차와 파괴상태에서의 주응력차의 비율은 토질에 따라 변화하므로 이를 정의하면 식(8.19)와 같다.

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \tag{8.19}$$

여기서 R_f : failure ratio

$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$: 파괴시의 주응력차이다.

식(8.17)을 Mohr-Coulomb의 포락선으로부터 구하여 보면 식(8.20)과 같이 된다.

$$\varepsilon = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{E_i \left[1 - \dfrac{R_f\,(\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin\phi)}{2c \cdot \cos\phi + 2\sigma_3 \cdot \sin\phi}\right]} \tag{8.20}$$

여기서 c : 점착력

ϕ : 전단저항각이다.

상기 식들로부터 접선변형계수 E_t에 대한 식을 구하면 식8.21과 같다.

$$E_t = \{\frac{R_f(1 - \sin\phi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cdot \cos\phi + 2\sigma_3 \cdot \sin\phi}\}^2 KP_a (\frac{\sigma_3}{P_a})^n \quad (8.21)$$

또한 흙이 제하(unloading) 또는 재재하(reloading)를 받게될 때 응력-변형률의 관계는 접선변형계수 E_{ur}는 식(8.22)와 같다.

$$E_{ur} = K_{ur} P_a (\frac{\sigma}{P_a})^n \quad (8.22)$$

대부분의 흙은 응력에 의존하여 체적변화를 일으키는데 이것을 정확히 예측하기란 어렵다. Duncan and Chang(1970)은 처음에는 접선포아송의 비로 이러한 체적변화를 나타내어 사용하였으나 파라미터의 수가 많고 초기의 압밀 및 함수비에 따른 변화의 폭이 크므로 체적탄성계수 B(체적계수, bulk modulus라고 함)를 써서 구속응력에 의한 함수로 표시하였다.

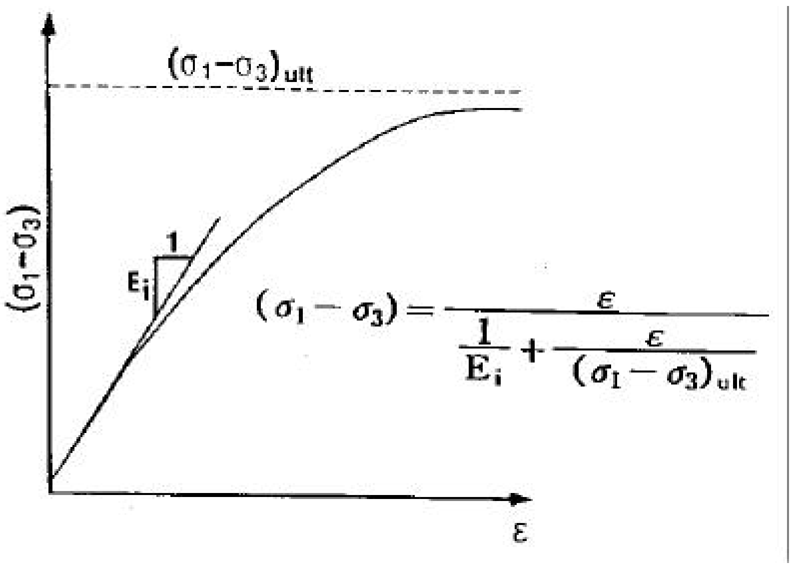


그림 8.12 실제 Hyperbolic 응력-변형률 곡선

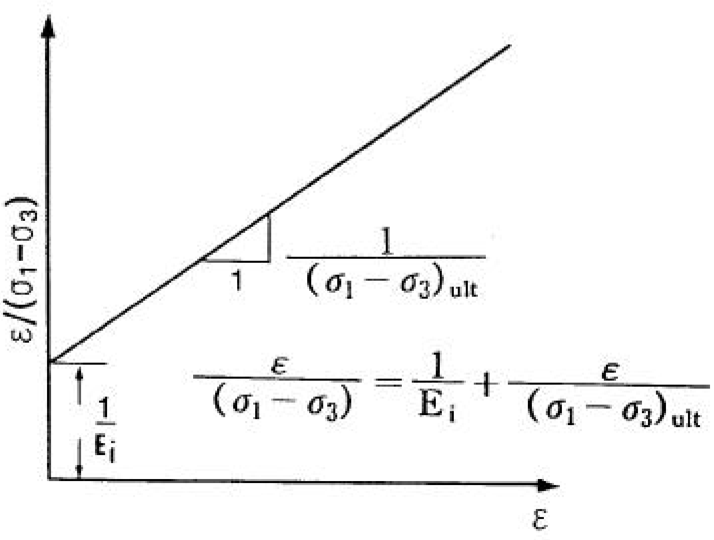


그림 8.13 선형화 시킨 Hyperbolic 응력-변형률 곡선

8.5 억지말뚝이 보강된 절개사면의 유한요소해석

억지말뚝이 설치된 절개사면의 유한요소해석을 위하여 현장실험이 실시된 현장(5장참조)을 대상으로하여 굴착단계별 유한요소해석을 실시하고자 한다. 또한 본장에서 사용된 프로그램은 지반과 구조물간의 상호작용에 대한 문제를 해결할 수 있도록 작성된 탄소성조인트요소를 고려한 유한요소해석프로그램으로 일본 오오사까대학에서 개발·사용되어오던 프로그램을 개량하여 사용하였다.

8.5.1 해석방법 및 순서

본절에서 수행하고자 하는 해석대상사면은 5장에서 이미 설명된 바와 같으며 그림 5.3과 동일한 단면을 채택하였다. 유한요소의 해석을 위하여 토사지반은 비선형 탄성모델, 암반지반은 탄성모델로 가정하였으며 억지말뚝과 흙막이말뚝은 보요소로, 앵커는 트러스요소로 가정하였다. 또한, 앞절에서 언급한 바와 같이 구조물과 지반사이의 상호작용을 고려하기 위하여 접촉면에 대해서는 탄소성조인트요소를 도입하므로써 지반과 구조물사이의 접촉면에 대한 문제를 해결하였다. 뿐만 아니라 토사지반과 기반암과의 사이에도 탄소성조인트요소를 적용하므로써 산사태가 발생할 경우 가상활동면에 대한 것도 고려할 수 있도록 하였다. 앵커에 대하여는 인장이 없는 것으로 가정

하였다.

본 해석에 사용된 지반과 구조물에 대한 재료정수는 표8.2와 같다. 조인트 요소에 대한 전단 및 연직강성계수K_s와 K_n는 1.5×10 t/m^2, 점착력과 내부마찰각은 1t/m^2, 30° 로 각각 가정하였으며 파괴비 R_f = 0.8로 가정하였다.[178)]

표 8.2 해석에 사용된 재료정수

재료정수	풍화토	풍화암	연암	억지말뚝	앵커
탄성계수 E(t/m^2)	100	250	1000	2.1×10^7	2.1×10^7
단면계수 I(m^4)	-	-	-	20400×10^{-8}	-
단위중량 γ(t/m^3)	1.85	1.90	2.0	-	-
포아손비 ν	0.3	0.3	0.3	-	-
내부마찰각 ϕ(DEG)	25.5	35	40	-	-
점착력 c(t/m^2)	1.35	1.5	2.0	-	-
정지토압계수 K_0	0.43	0.33	0.25	-	-
단면적 A(t/m^2)	-	-	-	119.8×10^{-4}	6.334×10^{-4}

8.5.2 해석과정

현장단면에 대하여 유한요소해석망을 도시하면 그림 8.14와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 불연속면은 굵은 실선으로 표시하였다. 즉, 억지말뚝과 지반사이의 접촉면, 앵커와 지반사이 접촉면, 연암층과 풍화암층사이는 불연속면으로 가정하고 조인트요소를 설치하였다. 앵커에 대하여는 인장이 없는 상태로 하였다.

또한 그림 8.15는 굴착단계별 요소망을 도시한 것이다. 그림 8.15(a), 8.15(b)는 엄지말뚝 전면의 4단 굴착단계를 2단계 굴착과 4단계 굴착 단계로 구분하여 유한요소해석을 실시하기 위한 요소망을 도시한 것이다.

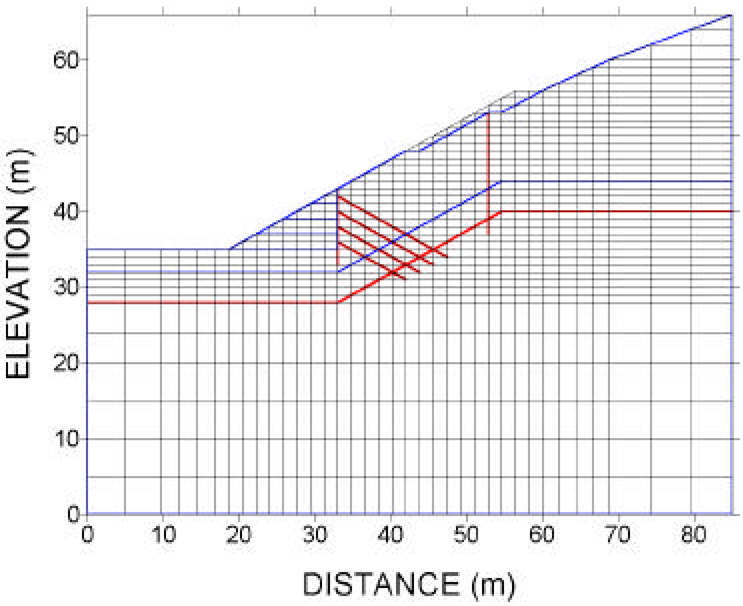
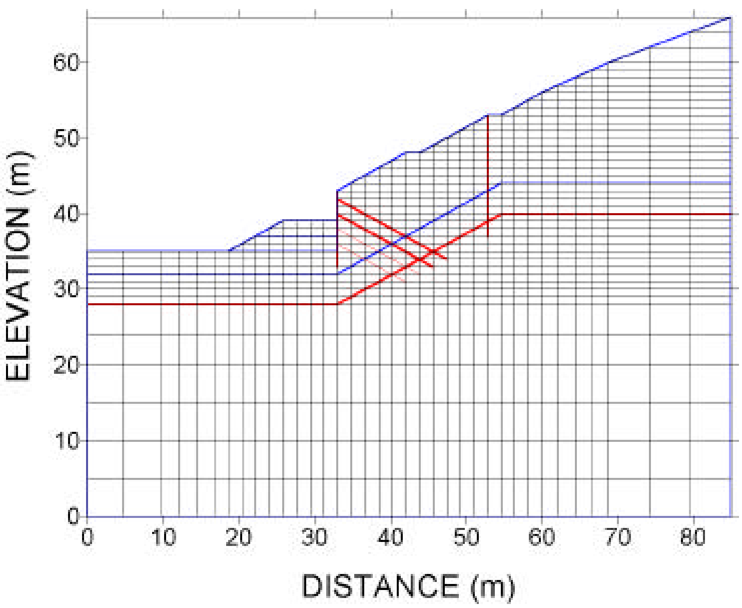
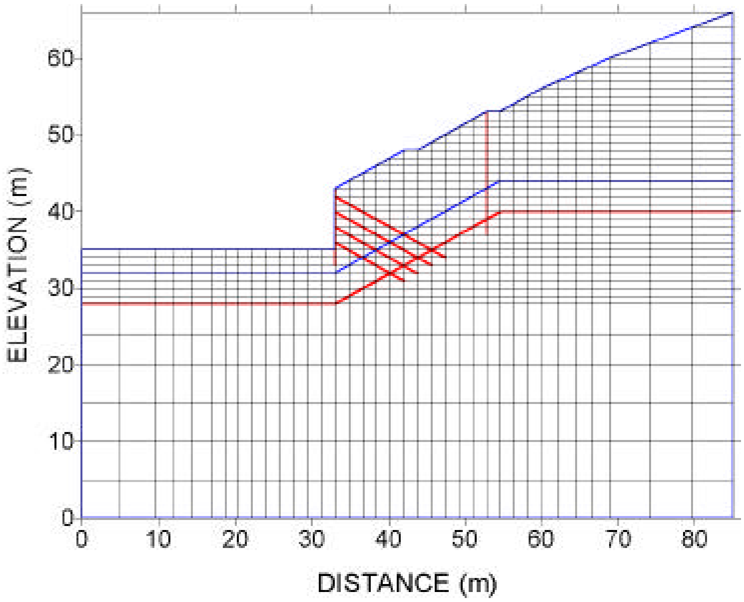


그림 8.14 **해석단면의 전체요소망**



(a) **엄지말뚝전면** 2**단굴착후 요소망**



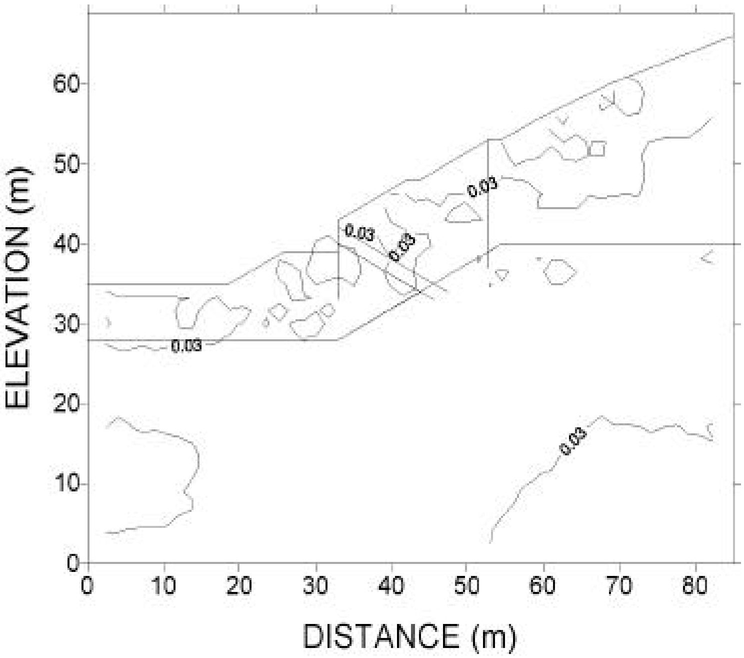
(b) 엄지말뚝전면 4단굴착후 요소망

그림 8.15 굴착단계별 유한요소망

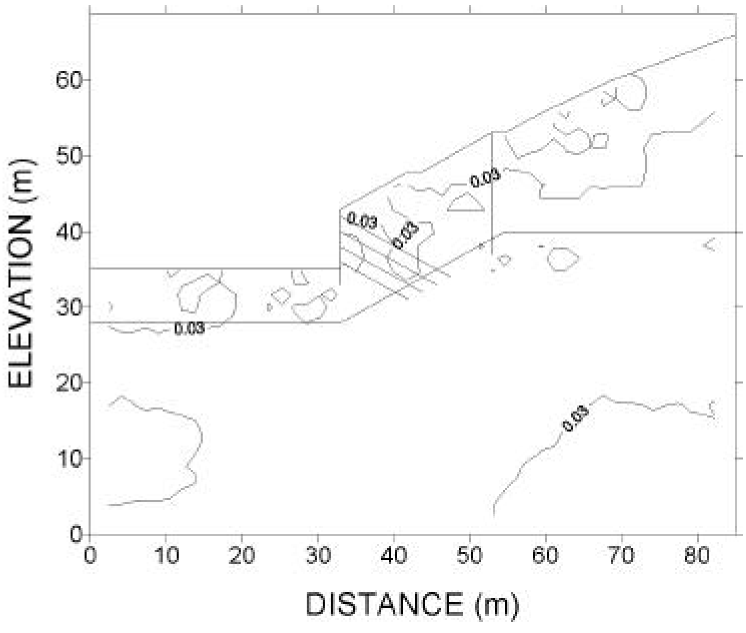
8.5.3 굴착단계별 해석 결과

앞절에서 설명한 바와 같이 토사지반은 비선형 탄성모델, 암반지반은 탄성모델로 가정하고 토사지반과 구조물, 그리고 암반과 토사지반 사이의 접촉면을 탄소성조인트 요소를 적용하였다. 이와 같이 가정한 해석대상사면에 대하여 그림 8.15와 같이 2단계 굴착별로 유한요소해석을 실시하여 그림 8.16과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 그림 8.16은 굴착단계별 전단변형률도를 표시한 것이다. 그림에서 보는바와 같이 전단변형률은 3%이상인 경우에 대하여서만 표시하였다.

2단굴착후 전단변형률을 보면 지표경사를 따라 변형률이 분포하고 있다. 억지말뚝배면과 전면의 전단변형률 상태를 살펴보면, 억지말뚝배면의 전단변형률은 억지말뚝설치 위치까지 서서히 감소하여 억지말뚝전면의 사면시작부분까지 감소하고 있다. 또한 엄지말뚝배면의 사면시작부분과 앵커시공하단부에서 엄지말뚝전면의 굴착에 의해 전단변형률이 집중되고 있다. 한편, 굴착단계별 전단변형률의 변화를 보면 굴착단계가 증가할수록 전단변형률분포도는 엄지말뚝과 앵커가 설치되어 있는 관계로 전단변형률의 확산은 더 이상 없었으며 엄지말뚝전면하부의 굴착에 의한 엄지말뚝전면의 전단변형도 없어지므로써 굴착에 따른 보강사면의 안정은 확인가능하였다.



(a) **엄지말뚝 전면 2단 굴착후**



(b) **엄지말뚝 전면 4단굴착후**

그림 8.16 **굴착단계별 전단변형률 해석 결과**

따라서, 본 해석결과를 통해 억지말뚝으로 보강된 절개사면은 안정된 상태로 유지되고 있음을 알수 있었고 굴착시 전단변형률분포를 통하여 억지말뚝과 엄지말뚝 그리고 앵커의 보강효과를 알수 있었다.(그림8.16참조)

본 논문에서 제시된 바 있는 억지말뚝 설계법의 순서 및 결과와 비교하여 볼 때 억지말뚝이 설치된 경우의 억지말뚝 설계법 및 해석법과 동일한 효과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.

8.6 요약

본 논문에서는 산사태억지말뚝의 사면안정효과, 해석법 그리고 설계법을 제시한 바 있고 또 그 해석법을 간단히 사용할 수 있도록 도식해법등이 제시되었다. 따라서 본 장에서는 유한요소법을 이용한 수치해석을 실시하였고 이를 통하여 본 논문에서 제시된 사항들에 대하여 검증을 시도하였다.

수치해석을 위하여 토사지반은 비선형탄성모델, 암반지반은 탄성모델로 가정하고,접촉면에 대하여는 토사지반과 구조물, 그리고 암반과 토사지반 사이의 접촉면을 탄소성조인트요소모델을 적용하였다. 탄소성조인트요소모델에 대하여는 Matsui & San이 제안한 접촉면의 활동을 고려한 경우를 적용하였다.

이와 같이 모델을 주어진 조건에 적합하도록 가정하여 굴착단계별 검토를 3단계로 나누어 유한요소해석을 실시하였다. 즉 사면정지 단계와 엄지말뚝 전면의 2단 굴착단계, 4단 굴착단계로 각각 구분하여 실시하였으며 전단변형률 3%인 상태를 검토한 결과 본 논문에서 검토제시 하였던 산사태억지말뚝의 해석법과 설계법의 타당성을 검증할 수 있었고 본장에서 제시된 탄소성조인트요소의 적용성도 확인할 수 있었다.