
산사태 억지벽체공법에 관한 연구

A Study on the Stabilizing Method against Landslide using Slide Suppressor Wall

김홍택, 강인규
홍익대학교
염경섭
동부건설

〈 요 지 〉

본 연구에서는 Wright 등이 제안한 산사태 억지벽체공법에, nailing system을 추가한 새로운 형태의 사면보강공법을 제시하였다. 이를 위해, nail로 보강된 콘크리트판넬에 작용하는 토압산정법의 제시 및 억지말뚝 해석법의 정립 등이 이루어 졌다. 또한 제시된 토압산정법을 토대로 nail의 효율적인 배치형태 및 설치각도 등에 대한 분석과, 콘크리트 판넬 및 억지말뚝 등으로 구성된 억지벽체의 최적설치위치에 관한 FLAC 프로그램 분석 등이 수행되었다. 이외에도 본 공법의 시공개요를 제시하였으며, 아울러 설계예를 통한 Wright 등의 제안방법과의 비교, 억지말뚝 상호간섭작용의 영향검토 등이 포함되었다.

〈 Abstract 〉

This paper proposes a stabilizing method against landslide using slide suppressor wall reinforced with soil nails. Included are a procedure to predict earth pressures acting on nailed-slide suppressor wall and a method of analysis of the laterally loaded concrete pile. Based on the proposed procedure, the efficient installation type and inclusion angle of nails are analyzed. Also, optimum location of the slide suppressor wall composed of concrete panel and stabilizing pile is examined using the FLAC program. Finally, an example is given to illustrate the analysis and design procedure of the proposed slope reinforcing method.

1. 서론

불안정한 사면의 보강을 위해서는, 접근이 용이하고 주변의 기존 구조물 및 신축건물 등에 의하여 제약을 받지 않을 경우에는 사면의 경사도를 낮추어 안정성을 증대시키는 방법이 역학적으로 가장 효율적이다. 그러나 이와같은 방법을 적용하기 어려운 경우에는, 옹벽 등 일반적인 토류 구조물을 설치할 때 보다, 비용을 40 ~ 50% 정도 훨씬 절감할 수 있는 산사태 억지벽체공법을 Wright 등은 제안한 바 있다. 산사태 억지벽체(slide suppressor walls)는 콘크리트 판넬(panel) 및 drilled shaft 등으로 구성된 지중(embedded) 구조체이며, 미국 텍사스지역에서 주로 집중호우 및 동결융해현상 등의 영향을 쉽게 받아 얕은파괴(shallow failures)가 발생하는 연약한 점성토지반(배수 전단저항각 ϕ 값이 12 ~ 20° 정도인) 사면의 보수에 효율적으로 적용되어 왔다. 또한 이 공법은 프리캐스트 콘크리트판넬의 사용이 가능하기 때문에 공사기간을 단축할 수 있는 잇점이 있으며 이외에도, 산사태 억지벽체 시공 후의 사면형상이 시공 이전의 형상과 거의 변동이 없어 차후 유지보수 등에도 유리한 장점을 지니고 있다.

본 연구에서는 Wright 등이 제안한 산사태 억지벽체공법에, nailing system을 추가한 새로운 형태의 사면보강공법을 제시하고자 한다(그림1). 이를 위해, nail로 보강된 콘크리트판넬에 작용하는 토압산정법의 제시 및 억지말뚝 해석법의 정립 등이 이루어 졌다. 또한 제시된 토압산정법을 토대로 nail의 효율적인 배치형태 및 설치각도 등에 대한 분석과, 콘크리트판넬 및 억지말뚝 등으로 구성된 억지벽체의 최적설치위치에 관한 FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua) 프로그램 분석 등이 수행되었다. 이외에도 본 공법의 시공개요(案)를 제시하였으며, 아울러 설계예를 통한 Wright 등의 제안방법과의 비교, 억지말뚝 상호간섭작용의 영향검토 등이 포함되었다.

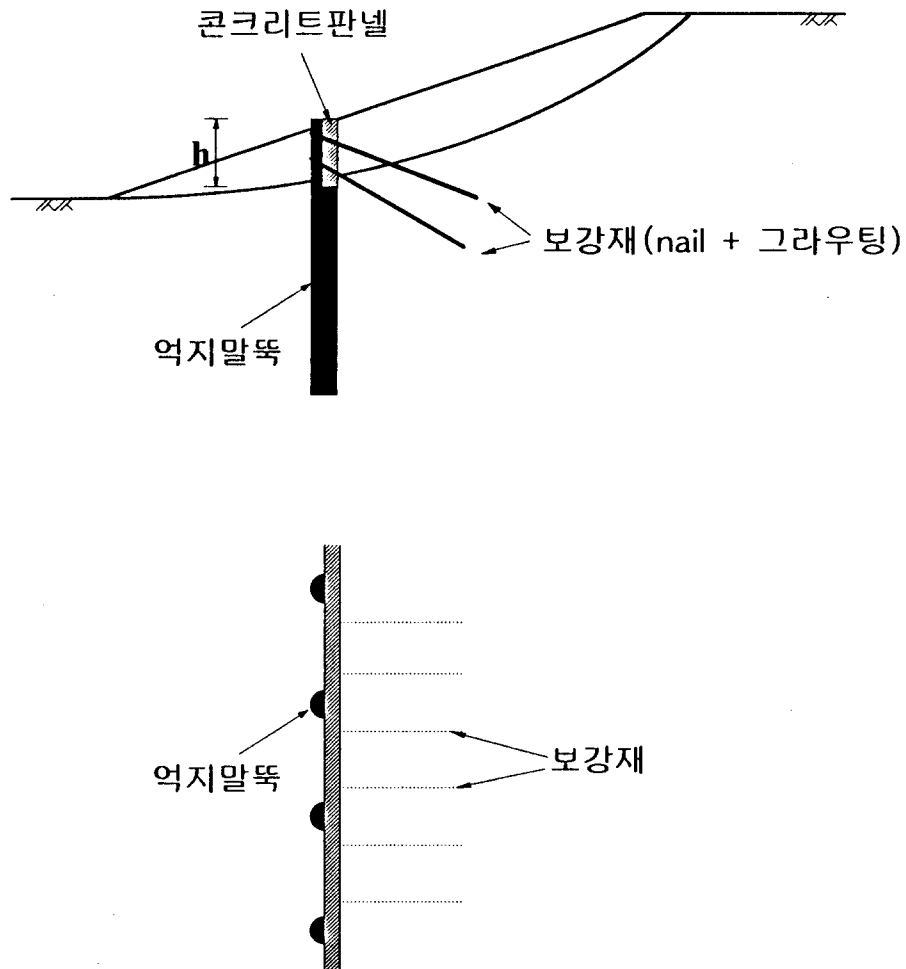


그림 1. nailing system을 적용한 산사태 억지벽체공법 개요

2. Wright 등이 제안한 산사태 억지벽체공법

Wright 등이 제안한 산사태 억지벽체공법(그림1에서 보강재 부분이 제외되는 경우)은 주로 앞은파괴 사면의 보강에 효율적으로 적용되며, 해석 및 설계에 관련된 지반강도정수는 역해석(back-analysis) 등의 방법을 통해 추정 가능하다. 또한, 사면활동깊이 d 와 사면높이 H_s 의 비(ratio)에 해당되는 d/H_s 값이 1/3 또는 그 이하인 경우에는, 점착력을 무시한 즉 비점성토(cohesionless) 지반의 경우로 가정하여 강도정수를 추정하여도 별 문제가 없음을 Wright 등은 분석을 통해 밝히고 있다. 아울러 Wright 등은 한계안정상태(just-stable)인 비점성토 사면의 경우, 지반흙의 전단저항각 ϕ 는 사면의 경사각 β 와 동일하다고 밝힌바 있다.

이외에도 Wright 등은 앞에서 언급한 조건의 경우(d/H_s 값이 1/3 또는 그 이하이고, 사면경사도가 1:2 또는 그 보다 낮은, 한계안정상태의 비점성토 사면의 경우) 분석을 통해, 토압계수 K_a 의 크기는 1.0 보다 다소(10 ~ 20% 정도, 그림2) 작은 경향을 보이고 있다고 밝히고 있다. 따라서 이와 같은 분석결과를 토대로 Wright 등은 콘크리트판넬에 예상되는 토압합력 P 의 근사계산식을 다음과 같이 제시하였다.

$$P = (1/2) \gamma h^2 \dots\dots\dots (1)$$

여기서, h 는 콘크리트판넬의 높이(지표면으로 부터 판넬최하단 지점까지의 깊이)를 의미하며, 일반적으로 사면활동깊이 $d + 0.3m$ 정도에 해당된다.

또한 콘크리트판넬의 단면은 최대휨모멘트 $M_{max}(=pl^2/8, p=토압, l=판넬의 길이)$ 값을 토대로 PCI Design Handbook을 이용해 결정되며, 억지말뚝의 설계는 프로그램 STIFF1 및 LPILE1을 이용해 수행된다.

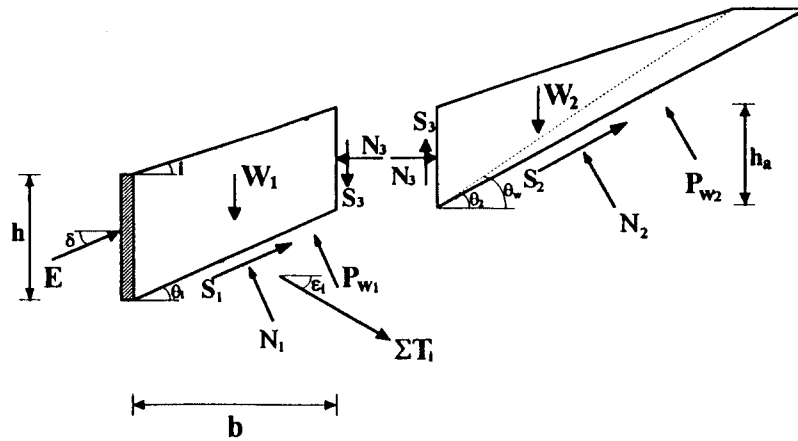
3. nailing system을 적용한 억지벽체의 해석법

3.1 콘크리트판넬에 작용하는 토압산정

억지벽체 위쪽사면 즉, 예상과괴흙체에 작용하는 힘들을 모두 표시하면 그림2와 같다. 본 연구에서는 'two body translation mechanism'을 토대로, 또한 지반강도정수(전단저항각 ϕ 및 점착력 c)에 대해서는 Taylor 안전율이론($F_s = F_{s\phi} = F_{sc}$)을 적용하여, 콘크리트판넬에 작용하는 토압합력 E 의 계산식을 유도하였다.

토압합력 E 는 보강된 토체(passive block, 그림2-a)에 대한 연직방향 및 수평방향 힘들의 평형 조건식에 의해 유도되며, 이를 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 & E \cdot \cos(\theta_1 - \phi' - \delta) \\
 &= (W_1 + C_3') \cdot \sin(\theta_1 - \phi') + P_{W_1} \cdot \sin \phi' + N_3 \cdot \frac{\cos(2\phi' - \theta_1)}{\cos \phi'} \\
 &\quad - C_1' \cdot \cos \phi' - \sum T_i \cdot \cos(\theta_1 - \phi' + \varepsilon_i)
 \end{aligned}
 \dots\dots\dots (2)$$



(a) 보강된 토체(passive block) (b) 보강안된 토체(active block)

그림 2. 예상파괴흩썰기에 작용하는 힘들

또한 식(2)에 포함된 수직력 N_3 의 계산식은, 보강안된 토체(active block, 그림2-b)에 대한 연직 방향 및 수직방향 힘들의 평형조건식을 토대로 유도된다.

결국, 콘크리트판넬에 작용하는 토압합력 E 의 크기는 식(2)를 토대로 한 반복계산에 의해 결정된다. 즉, 보강된 토체(그림2-a)에 관련된 예상파괴면의 경사각 θ_1 을 먼저 가정하여 자중 W_1 및 보강영역에 해당되는 passive block의 폭 b 를 결정한 다음, 보강되지 않은 토체(그림2-b)에 관련된 예상파괴면의 경사각 θ_2 를 다양하게 변화시켜 수직력 N_3 를 각각 계산하고, 이 중에서 최대값을 식(2)에 대입하여 토압합력 E 를 계산한다.

계속해서 경사각 θ_1 을 변화시켜 위의 과정을 반복하고 각각 계산된 E 값 중에서 최대값을 설계에 적용할 한계평형상태의 토압합력 E_{max} 로 결정한다.

그러나, 식(2)를 토대로 예상파괴면의 경사각을 가정하여 토압합력의 최대값 E_{max} 를 최종적으로 계산하기 위해서는, 각 nail에 작용하는 인장력의 합 $\sum T_i$ 와 침투수압합력 P_{w1} , P_{w2} 의 크기가 미리 결정되어야 한다.

3.2 전체인장력 $\sum T_i$ 의 계산

soil nailing system의 경우 흩썰기가 파괴면을 따라 미끄러지는 순간에, 보강재(grouted type의 경우에는 nail과 그라우팅 부분을 모두 포함한 것을 의미하며, driven type의 경우에는 nail 자체만을 의미한다)에는 수동토압 및 휨모멘트 등이 작용하게 되며, 또한 주변흩과의 마찰 등에 의해 축방향으로의 인장력이 발생한다. 그러나 일반적으로, 보강재에 작용하는 수동토압 및 휨모멘트 등은 soil nailing system 전체안정성에 미치는 영향이 비교적 작으며, 주된 저항력은 예상파괴면의 바깥쪽에 위치한 보강재의 주변마찰 등에 의해 유발된다는 사실을 여러 연구자들이 이미 밝힌 바 있다. 따라서 본 연구의 안정해석에서는 수동토압 및 휨모멘트 등의 영향은 무시하였으며, 각 보강재의 축방향을 따라 유발되는 인장력 T_i 만 보강재-주변흩 사이의 상호작용으로 고려하였다.

T_i 의 크기는 파괴면 바깥쪽에 위치한 보강재의 길이(유효길이 l_i)를 따라 발휘되는 마찰응력 및 부착응력을 토대로 결정되며, nail의 인장항복강도 T_{yield} 보다는 작아야 한다.

3.3 침투수압합력 P_{w1} 및 P_{w2} 의 계산

예상파괴면을 따라서의 침투수압, σ_w 의 분포도를 개략적으로 도시하면 그림3과 같다. 이 경우에 보강된 토체와 보강안된 토체의 예상파괴면 경사각이 서로 다르므로, Gray 침투이론을 일부 수정하고 또한 X-Y축에 관한 좌표변환방법을 토대로 침투수압 σ_w 의 계산식이 유도된다. 임의의 깊이 Y에 작용하는 σ_w 의 계산식을 정리하면,

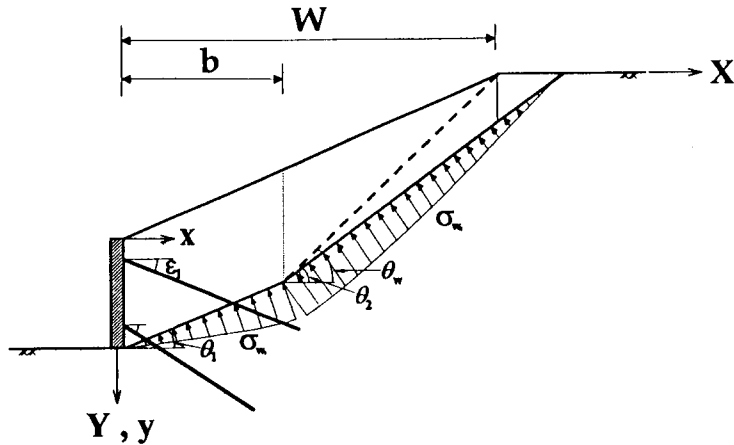


그림 3. 침투수압 분포도

$$\sigma_w = \gamma_w \cdot h_p \quad \dots\dots\dots (3)$$

여기서,
$$h_p = Y - \frac{8h}{\pi^2} \sum_0^{\infty} \left\{ \frac{(-1)^m}{(2m+1)^2} \exp(-MX) \cdot \sin(MY) \right\}$$

결국 예상파괴면에 작용하는 침투수압합력 P_{w1} 및 P_{w2} 은, 보강영역까지의 폭 b 와 사면의 길이 W 사이의 관계를 토대로, 4-point Gauss quadrature 수치적분기법을 이용해 계산된다. 또한 식 (4)에 포함된 보강재의 유효길이 l_t 를 따라서의 침투수압 σ_{wr} 도 이와 유사한 방식에 의해 계산된다.

앞에서 기술된 방법과는 달리, 간극수압계수 r_u 를 이용해 σ_w 를 예측하는 경우에는,

$$\sigma_w = \gamma_t \cdot Y \cdot r_u \quad \dots\dots\dots (4)$$

역지말뚝의 해석

본 연구 산사태 역지벽체공법에 적용되는 역지말뚝의 해석은, 참고문헌 4에 제시된 횡하중을 받는 원형단면 콘크리트말뚝의 극한지지력 계산법을 이용해 수행된다.

4. 억지벽체의 효율적인 설치위치

Wright 등은 구체적인 근거를 제시한 바는 없으나, 억지벽체(콘크리트판넬 및 억지말뚝)는 일반적으로 사면길이 W (그림4)의 $1/3$ 정도되는 지점에 설치된다고 밝힌 바 있다. 본 장에서는 사면의 경사도($1 : N$ 또는 경사각 β) 및 지반흙의 강도정수 등이 변화하는 경우, 억지벽체의 효율적인 설치위치를 좀 더 상세히 살펴보기 위해 FLAC 프로그램을 이용한 분석이 이루어 졌다. 본 분석에서는 콘크리트판넬에 설치될 nail의 영향은 포함하지 않았으며, 사면높이 H_s (그림4)는 10m로 가정하였다. 또한, 콘크리트판넬-지반흙 사이의 벽마찰각 및 부착력, 킴투수압의 영향 등은 고려하지 않았다.

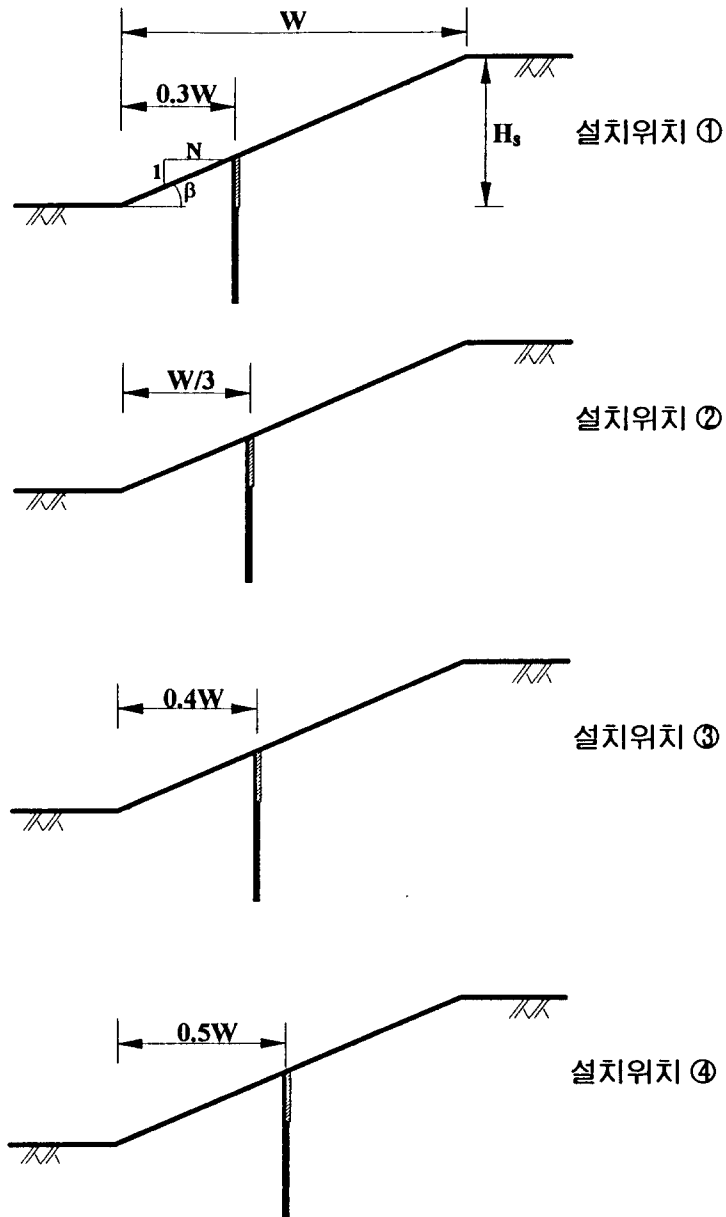


그림 4. 억지벽체의 설치위치

그림4에서 설치위치 ②는 Wright 등이 밝힌 억지벽체의 설치위치이며, 설치위치 ①, ③ 및 ④는 본 연구에서 분석을 위해 가정한 설치위치이다. 본 분석에 적용된 억지벽체의 제원은 표1에 명시되어 있다.

표 1. FLAC 프로그램 해석에 적용된 억지벽체 제원

1. 콘크리트 판넬	2. 억지말뚝
1) 높이 : 2 m	1) 길이 : 8 m (파괴면 아래쪽에서의 근입깊이)
2) 길이 : 5 m	2) 직경 : 0.6 m
3) 두께 : 0.3 m	

FLAC 프로그램 해석에 적용된 사면의 경사도, 지반흙의 강도정수 및 해석결과는 표2에 정리되어 있다. 본 분석에서 채택한 억지벽체 설치위치의 효율성 판정기준에 해당되는 표2의 최대변위 벡터비(ratio of maximum displacement vector)는, 설치위치 ①, ③ 및 ④에 대해 각각 계산된 최대변위 벡터 d_{max} 를, Wright 등이 제안한 설치위치 ②의 경우에 해당되는 최대변위 벡터 d_{max}^* 와 크기를 서로 비교한 값 즉, d_{max}/d_{max}^* 값으로 정의된다. 따라서 최대변위 벡터비 d_{max}/d_{max}^* 값이 1.0 보다 큰 경우의 억지벽체 설치위치는, Wright 등이 밝힌 설치위치 ② 보다 효율성이 떨어지는 설치위치를 의미한다. 또한 d_{max}/d_{max}^* 값이 1.0 보다 작은 경우의 설치위치는 Wright 등이 밝힌 설치위치 ② 보다 효율성이 더 큰 억지벽체의 설치위치에 해당되며, 결국 d_{max}/d_{max}^* 값이 1.0 보다 작으면 작을수록 보강효과가 더욱 뛰어난 즉, 억지벽체 설치위치의 효율성은 Wright 등이 밝힌 설치위치 ②에 비해 더욱 커짐을 나타낸다. 표2의 결과를 분석하면, 억지벽체의 효율적인 설치위치는 사면의 경사도가 급해질수록, 사면하단부에서 상단부 쪽으로 점차적으로 이동하는 경향을 보이고 있다. 이와같은 현상은 사면의 경사도가 급해질수록 억지벽체 상단부쪽 사면의 안정성이 더욱 저하되어, 사면하단부 보다는 상단부 쪽으로 치중해서 억지벽체를 설치하는 것이 더욱 효율적임을 나타내고 있다.

구체적으로 살펴보면, 사면경사도가 비교적 낮은 1:5.0 ~ 1:4.0인 경우까지는 Wright 등이 밝힌 설치위치 ②가 가장 효율적이며, 이와같은 경향은 Wright 등이 본 산사태 억지벽체공법을 주로 적용한 점착력의 영향을 거의 무시할 수 있는 얇은파괴사면 조건에 대체적으로 부합되는 결과라고 판단된다. 그러나, 이보다 경사도가 급한 1:3.5 ~ 1:1.5인 경우까지는 설치위치 ③이 가장 효율적임을 알 수 있다. 여기서 본 분석에 적용된 지반흙의 강도정수(표2)는 억지벽체로 보강되지 않은 사면 각각의 경사도에 대해, 활동에 대한 안전율이 1.0인 한계상태에 해당되며, PCSTABL6 프로그램을 이용한 역해석을 통해 얻어진 값들이다. 참고적으로 FLAC 프로그램 해석결과중 일부(사면경사도 1:3.0인 경우, 설치위치 ②에 대한 최대변위벡터)를 도시하면 그림5와 같다.

표2. FLAC 프로그램 해석결과

사면의경사도 (1:N 및 β)	지반흙의 전단저항각 ($^\circ$)	지반흙의 단위중량 (t/m^3)	억지벽체 설치위치	최대변위 벡터비	사면의경사도 (1:N 및 β)	지반흙의 전단저항각 ($^\circ$)	지반흙의 단위중량 (t/m^3)	억지벽체 설치위치	최대변위 벡터비
1:5.0 ($\beta=11.31^\circ$)	11.2	1.5	①	1.333	1:3.0 ($\beta=18.43^\circ$)	18.17	1.6	①	1.022
			②	1.000				②	1.000
			③	1.134				③	0.800
			④	1.156				④	0.971
1:4.5 ($\beta=12.52^\circ$)	12.4	1.5	①	1.460	1:2.5 ($\beta=21.80^\circ$)	21.43	1.6	①	1.038
			②	1.000				②	1.000
			③	1.444				③	0.623
			④	1.269				④	1.213
1:4.0 ($\beta=14.04^\circ$)	13.9	1.5	①	1.239	1:2.0 ($\beta=26.57^\circ$)	24.8	1.7	①	1.544
			②	1.000				②	1.000
			③	1.182				③	0.816
			④	1.066				④	1.149
1:3.5 ($\beta=15.94^\circ$)	15.75	1.5	①	0.915	1:1.5 ($\beta=33.69^\circ$)	31.8	1.7	①	1.113
			②	1.000				②	1.000
			③	0.863				③	0.565
			④	1.173				④	0.835

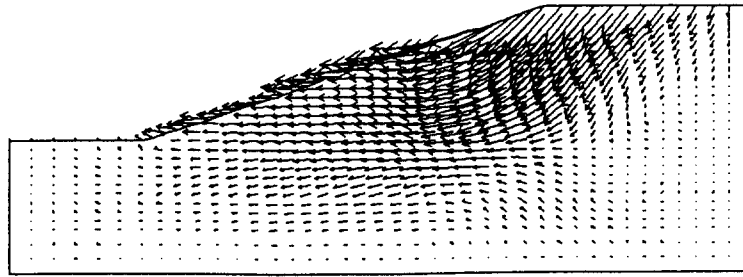


그림 5. FLAC 프로그램 최대변위벡터 출력결과(사면경사도 1:1.5, 설치위치 ③)

5. 효율적인 nail의 배치형태 및 설치각도

본 장에서는, 4장에서 효율적인 설치위치 분석이 이루어진 억지벽체의 구성요소인 콘크리트판넬에 추가로 설치될 nail에 대해, 효율적인 배치형태 및 설치각도 등에 대한 분석이 수행되었다. 본 분석에서 고려한 nail의 배치형태는 수직방향 설치간격을 서로 달리한 3가지 case로 그림6과 같다. 본 분석에서는 비교적 얇은깊이의 파괴사면에 대한 보강을 주요 분석대상으로 하여, 2개의 nail (동일한 길이 $L = L_1 = L_2 = 5.0m$)을 설치하는 것으로 가정하였다. 또한 콘크리트판넬 제작의 용이성을 감안하여, 설치 nail의 상하단 수직간격은 동일하게($h/6$, $0.25h$ 및 $0.2h$, h = 콘크리트판넬의 높이) 가정하였다. 분석에 적용된 nail의 제원은 표3과 같으며, 콘크리트판넬의 제원은 표1과 또한 각각의 경사도에 대해 적용된 지반흙의 강도정수는 표2와 동일하다. 이외에도 본 장의 분석에서, 지반흙의 전단저항각에 대한 안전율 Fs_ϕ (식(2) 참조)는 1.5를 적용하여 토압계산이 이루어졌다.

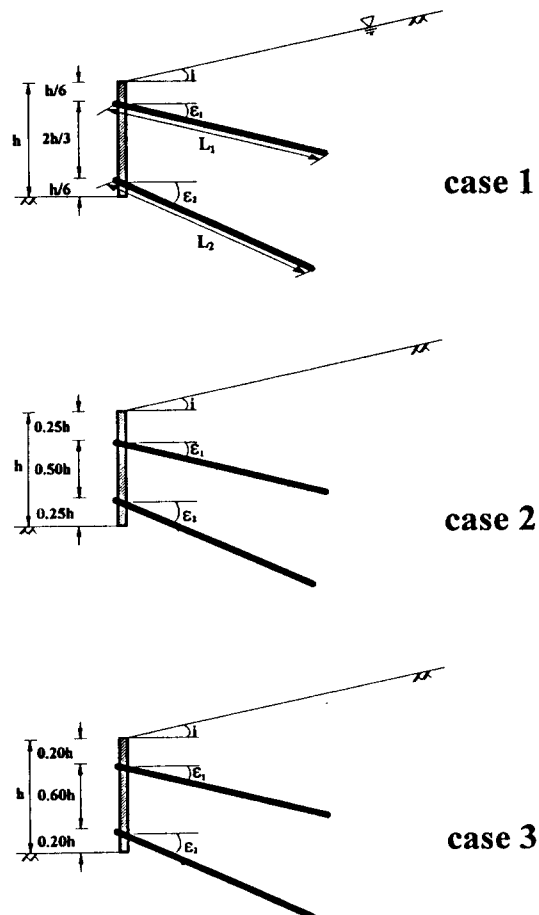


그림 6. nail의 배치형태

표3. 분석에 적용된 nail의 제원

nail의 수평방향 설치간격 : 1.5 m
nail의 천공직경 : 0.1 m
nail의 직경 : 0.026 m
nail의 인장항복강도 : 3600 kg/cm ²

효율적인 nail의 설치각도

우선 case 1 배치형태에 대해, 효율적인 nail의 설치각도(ϵ_1 및 ϵ_2 , 그림6) 결정을 위해 본 연구에서 채택한 판정기준 및 이루어진 분석결과를 정리하면 다음과 같다.

일차적으로 상하단 2개 nail의 설치각도를 동일하게 가정하고($\epsilon = \epsilon_1 = \epsilon_2$), 동일한 설치각도 ϵ 의 크기를 변화시켜 각각의 경우에 대해, 콘크리트판넬에 작용이 예상되는 수평토압합력 E_{hr} 의 크기를 계산하였다. 계산된 E_{hr} 과 E_{hu} (nail 보강이 전혀없는 경우의 수평토압합력)의 크기를 서로 비교하여 %로 표현하였으며, 이 비교결과를 토대로 예상되는 nail 설치에 따른 토압감소효과의 정도를, nail 설치각도의 효율성 판정기준으로 하여 분석이 이루어 졌다. 각각의 사면경사도에 대한 비교결과는 그림7(간극수압계수 $r_u = 0.2$ 인 경우)에 명시되어 있다.

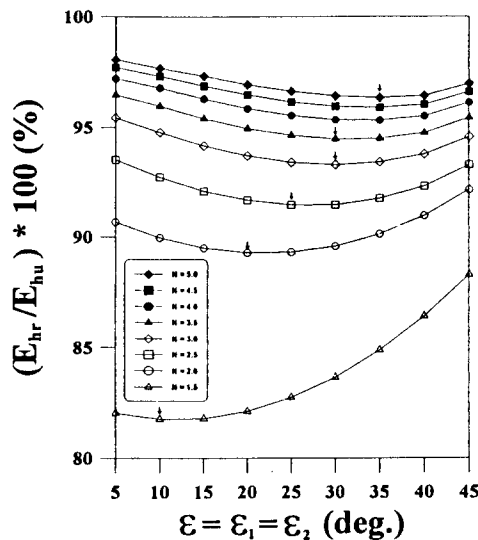


그림 7. 효율적인 nail의 설치각도 분석 1

이차적으로는 ϵ_1 (상단 nail이 수평방향 x-축과 이루는 각도, 그림6)의 크기를 그림7에서 화살표로 표시된 토압감소효과가 가장 큰 즉, $(E_{hr}/E_{hu}) \times 100\%$ 값이 최소가 되는 각도로 결정하고, 하단 nail의 설치각도 ϵ_2 는 ϵ_1 보다 1° 씩 증가시켜 $(E_{hr}/E_{hu}) \times 100\%$ 값의 추가적인 감소 여부를 각각의 사면경사도에 대해 살펴보았다. $r_u = 0.2$ 인 경우 각각의 사면경사도에 대한 계산결과 중 일부가 그림8에 명시되어 있다. 결과를 종합적으로 분석하면, 상하단 nail을 동일한 각도로 설치하는 경우보다, 하단 nail의 설치각도 ϵ_2 를 상단 nail의 설치각도 ϵ_1 보다 크게(사면경사도에 따라, $r_u = 0.2$ 인 경우 6 ~ 13° 정도 크게)하는 경우가 더욱 토압감소효과가 큰 즉, 효율성이 더욱 커지는 현상을 나타내고 있다. 또한 사면의 경사도가 급해질수록 nail에 의한 보강효과는 점차 커짐을 즉, $(E_{hr}/E_{hu}) \times 100\%$ 값이 점차 감소함을(토압감소율이 점차 증가함) 알 수 있다. 또한 간극수압이 포함되지 않은 경우가 더욱 두드러진 토압감소효과를 보이고 있으며, 경사각 $\beta = 33.69^\circ$ 인 경우는 34.84% 정도의 비교적 큰 토압감소율을 나타내고 있다.

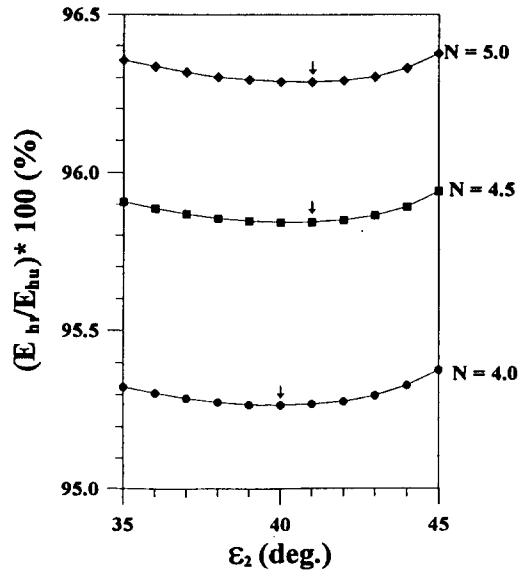


그림 8. 효율적인 nail의 설치각도 분석 2

효율적인 nail의 배치형태

앞에서 기술된 분석을 case 2 및 3 배치형태에 대해서도 동일한 방법으로 수행하였으며, 각 case 배치형태에 대해 최종적으로 결정된 $(E_{hr}/E_{hu}) \times 100\%$ 값의 최소치를, 다양한 사면경사도에 대해 비교하면 그림9($r_u = 0.2$ 인 경우)와 같다. 결과를 분석하면, case 1 배치형태가 가장 효율적임을 알 수 있으며, case 3, case 2 배치형태의 순으로 효율성이 낮아지는 경향을 보이고 있다. 그러나 각 case 배치형태에 대해 계산된 $(E_{hr}/E_{hu}) \times 100\%$ 값의 차이는 0.7% ($0.1 t/m$) 이하로 그다지 크지 않으며, 이와같은 현상은, 본 분석에서 채택한 콘크리트판넬의 높이 h 가 $3.0m$ 로 비교적 작은 데 원인이 있다.

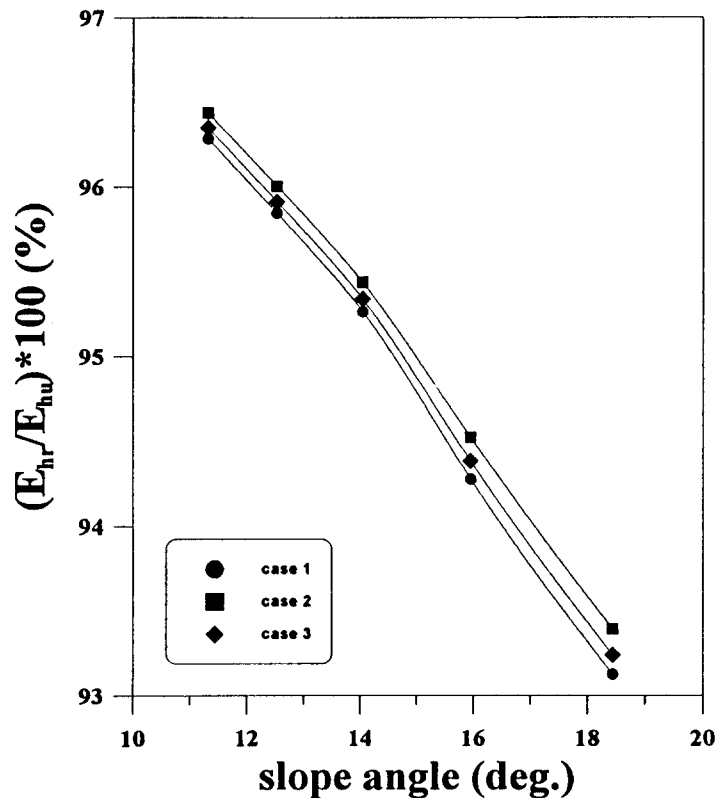


그림 9. nail 배치형태 및 경사도에 따른 토압감소율 변화

6. 설계예

우선 그림10에 명시된 사면의 현상태 안정성을, 간극수압계수 r_u 를 달리하여 PCSTABL6 프로그램 해석을 통해 확인한 결과, 간극수압의 영향을 무시하는 경우($r_u = 0.0$ 인 경우)의 안전율 FS 는 1.317로 소요안전율 기준($FS \geq 1.3$)에는 어느 정도 충족됨을 알 수 있었다. 그러나 r_u 값이 0.1 이상인 경우에는, r_u 값이 커짐에 따라 한계안전율($FS=1.3$)에 점차적으로 훨씬 미달되는 불안정한 상태를 나타내고 있다($r_u=0.2$ 인 경우, $FS=1.064$). 따라서 $r_u=0.2$ 인 경우까지 소요안전율 기준($FS \geq 1.3$)을 충족시키기 위해 억지벽체 및 nail 등으로 그림10의 사면을 보강하는 경우, 필요로 하는 해석 및 설계절차의 구체내용을 본 연구에서 제시된 해석법 등을 토대로 정리하면 다음과 같다. 파괴면 및 보강재에 작용하는 수압은 간극수압계수를 토대로 한 2장의 식(4)을 이용해 예측하였으며, 실제로 발휘되는 지반강도정수에 적용되는 안전율 $F_s (= F_{s\phi} = F_{sc})$ 값은 1.3을 택하여 토압계산 등이 이루어 졌다.

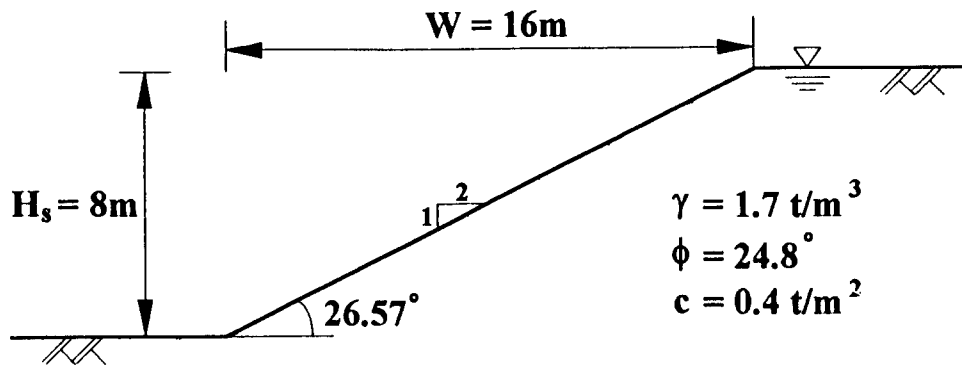


그림 10. 보강안된 설계사면 개요

그림10 사면의 경사도는 1:2.0(= 1:N, $\beta=14.04^\circ$)이므로, 표2의 분석결과를 참고로 하여 억지벽체의 효율적인 설치위치는, $0.5W$ 지점인 설치위치 ④(그림4 참조)로 결정하였다. 이 경우에 $0.5W$ 지점에서 지표면으로 부터 파괴면까지의 연직깊이는 PCSTABL6 프로그램 해석결과 3.43m이며, 따라서 콘크리트판넬의 높이 h 는 3.50m로 결정하였다. 또한 2개의 nail을 콘크리트판넬 상하단에 설치하는 것으로 가정하였으며(그림11), 배치형태는 토압감소율을 토대로 효율성이 비교적 큰 것으로 5장에서 기 분석된, case 1(그림6 참조) 배치형태로 결정하였다.

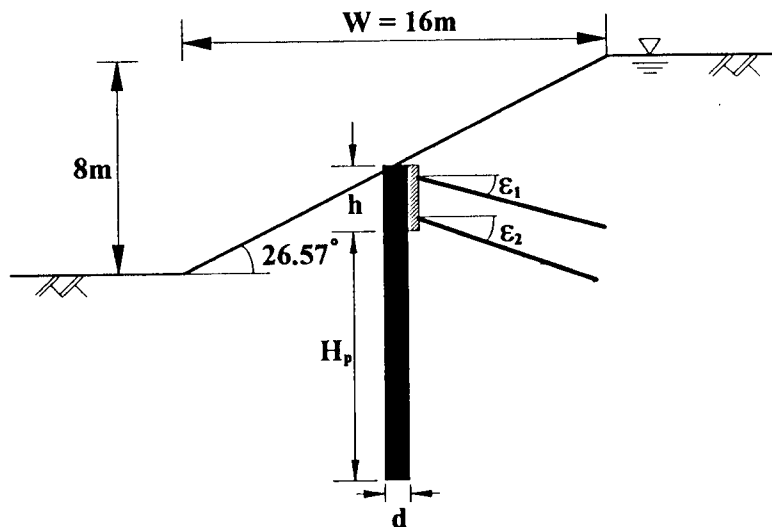


그림 11. 본 연구 억지벽체공법을 적용한 보강설계사면 개요

또한 동일한 길이로 가정한 상하단 nail의 설계길이 L 을 결정하기 위해, $L = 5.0, 6.0$ 및 $7.0m$ 인 3가지 경우에 대해, nail 설치에 따른 토압감소효과 즉, $(E_{nr}/E_{na}) \times 100\%$ 값의 변화를 길이 L 에 따라 분석해 본 결과는 그림12에 명시되어 있다. 그림12의 분석에 적용된 nail의 제원은 표3과 동일하다. 본 예에서 상하단 nail의 설계길이 L 은 $7.0m$ 로 결정하였으며, 이 경우에 예상되는 nail 설치에 따른 토압감소율은 36.5% 정도이며(그림12에서 $r_u=0.2$ 인 경우), 앞에서 결정된 콘크리트판넬 높이($h=3.5m$)의 2배에 해당되는 nail 길이이다. 그림12의 결과를 살펴볼 때, r_u 값이 작을수록 nail 보강에 의한 토압감소효과는 더욱 커짐을 알 수 있다. 그림12에서 seepage condition은 Gray 침투이론을 일부 수정한 3장의 식(3)을 토대로 수압을 산정한 경우이며, dry condition은 $r_u=0.0$ 인 경우에 해당된다. seepage condition의 경우 예상되는 수압의 크기를, 본 예에서 적용하고 있는 수압산정방법 즉, 3장 식(4)의 간극수압계수 r_u 로 환산하면 0.37 ~ 0.38(nail 보강이 이루어진 경우) 또는 0.45(nail 보강이 시행되지 않는 경우) 정도의 비교적 큰 값에 해당된다.

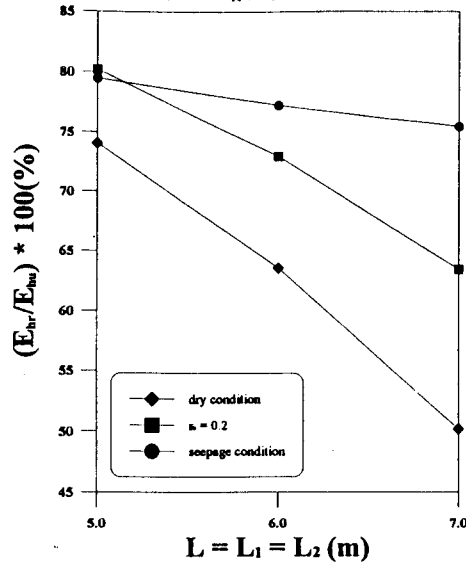


그림 12. nail의 설계길이 L 에 따른 토압감소율 변화

계속해서 효율적인 nail의 설치각도(ϵ_1 및 ϵ_2 , 그림12) 결정을 위해 5장에서 기술된 방법 및 판정기준 등을 토대로 분석이 이루어 졌으며, $r_u=0.2$ 인 경우의 결과는 그림12에 명시되어 있다. 그림12의 결과에 따르면, 상단 nail의 최적설치각도 ϵ_1 은 15° 이고, 하단 nail의 최적설치각도 ϵ_2 는 30° 이다. 이와같은 결과는 비점성토 지반흙에 대해 분석한 5장의 결과 즉, $\epsilon_1=20^\circ$ 및 $\epsilon_2=33^\circ$ 보다는 $5 \sim 8^\circ$ 정도 작은값에 해당된다.

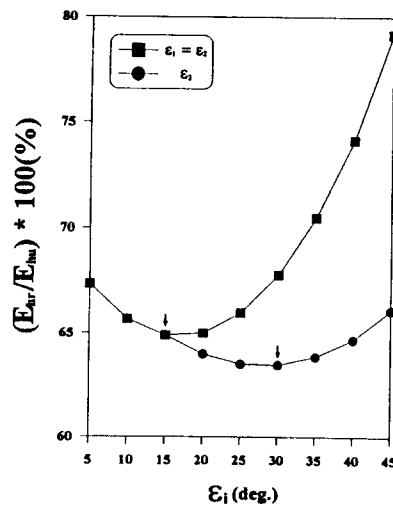


그림 13. 효율적인 nail의 설치각도(ϵ_1 및 ϵ_2) 분석결과

결국 앞에서 결정된, case 1 배치형태, nail의 설계길이 $L=7.0m$ 및 nail의 최적설치각도 $\epsilon_1=15$, $\epsilon_2=30$ 등을 토대로, 간극수압비 $r_u=0.2$ 인 경우에 높이 $h=3.5m$ 인 콘크리트판넬이 받게되는 최대수평토압합력은 $6.915t/m$ 이며, 이에 근거하여 콘크리트판넬의 두께 및 길이(=억지말뚝의 수평설치간격)를 결정하면 다음과 같다.

표4는 스팬크리트가 받게되는 등분포하중(스팬크리트의 자중을 포함하여)의 크기에 따라, 휨모멘트 조건이 충족되는 스팬(span)의 두께 및 최대길이를 명시한 자료이다. 본 예의 경우, 콘크리트판넬에 작용이 예상되는 평균최대수평토압은 $1.976t/m^2$ 이므로, 표4에서 등분포하중이 $2.0t/m^2$ 일 경우에 해당되는 값들 중에서 두께 및 길이를 적절히 선택하면 된다. 본 예에서 nail의 수평설치간격은 $1.5m$ 로 가정했으므로, 시공성을 감안하여 콘크리트판넬의 길이(=억지말뚝의 수평설치간격)를 $6.0m$ 로 결정하였다. 따라서, 콘크리트판넬의 두께는 표4로 부터 $300mm$ 로 결정할 수 있다. 만약 nail에 의한 보강이 없는 경우, 콘크리트판넬에 작용이 예상되는 평균최대수평토압은 $3.113t/m^2$ 으로 커지게되고, 따라서 동일한 두께(=300mm)의 콘크리트판넬을 사용하는 경우, 억지말뚝의 수평설치간격은 $4.73m$ 보다 더욱 작은값으로 축소되어야 한다(표4 참조).

표 4. 콘크리트판넬의 두께 및 최대길이

두께 (mm)	200		250		300	
휨모멘트 (t·m)	4.43	6.159	6.574	8.164	9.005	12.352
등분포 하중(t/m^2)						
2.0	3.92	4.62	4.72	5.10	5.41	6.33
2.5	3.55	3.87	4.21	4.21	4.93	5.53
3.0	3.27	3.29	3.58	3.58	4.56	4.73

간극수압비 $r_u=0.2$ 인 경우에, 콘크리트판넬이 받게되는 최대수평토압합력은 $6.915t/m$ 이며, 콘크리트판넬의 길이(=억지말뚝의 수평설치간격)는 $6.0m$ 로 앞에서 결정되었다. 따라서 1본의 억지말뚝이 받게되는 횡하중은 $41.49t$ 이며, 이와같은 크기의 횡하중에 저항할 수 있는 억지말뚝의 단면 및 근입길이 H_p (파괴면 아래쪽에 위치하는 억지말뚝의 길이, 그림 11 참조)를 결정하면 다음과 같다.

참고문헌 4의 해석방법을 토대로 요구되는 억지말뚝의 최소근입길이 $H_{p(min)}$ 을, 지반흙의 전단저항각 ϕ 값을 서로 달리하여 각각 계산한 결과는, 설계도표형태로 그림14(억지말뚝의 직경 $d=0.4m$ 인 경우)에 명시되어 있다. 본 예의 경우 앞에서 계산된 $41.49t$ 을 억지말뚝이 저항할 수 있는 극한횡하중 P_{ult} 로 간주하여, 그림14 설계도표의 세로축에 해당되는 값을 계산하면,

Design Chart

($D=40cm, h=3.5m, FS=1.0$)

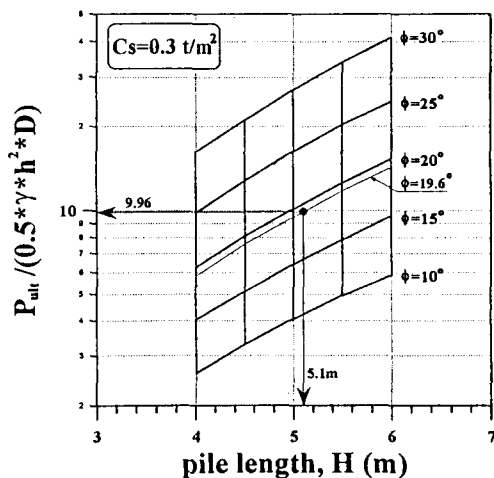


그림 14. 설계도표

$$\frac{P_{ult}}{0.5 \cdot \gamma \cdot h^2 \cdot d} = \frac{41.49}{0.5 \cdot 1.7 \cdot 3.5^2 \cdot 0.4} = 9.96$$

여기서, h =콘크리트판넬의 높이

위에서 계산된 값을 토대로, 요구되는 억지말뚝의 최소근입길이 $H_{p(\min)}$ 은 그림14로 부터 5.1m로 결정된다. 그림14의 설계도표는 안전율 $F_s=1.0$ 인 경우의 계산결과이며, 따라서 본 예의 경우 안전율 1.3을 적용하여 발휘되는 지반흙의 전단강도정수값이 결정되었다. 즉,

$$\phi' = \tan^{-1}\left(\frac{\tan \phi}{F_s}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{\tan 24.8^\circ}{1.3}\right) = 19.6^\circ$$

$$c_s' = \frac{c_s}{F_s} = \frac{0.4}{1.3} = 0.3 \text{ t/m}^2$$

또한 본 예의 경우는, 억지말뚝의 설치간격 $s(=6.0\text{m})$ 와 직경 $d(=0.4\text{m})$ 의 비(ratio)에 해당되는 s/d 값이 15.0이므로, 억지말뚝의 설치간격이 촘촘해 상호간섭작용에 의해 1본의 억지말뚝이 저항할 수 있는 횡방향 극한지지력이 감소하는 현상(그림15)과는 무관할 것으로 판단된다. 이외에도 억지말뚝 단면에 대한 응력검토는 FLAC 프로그램 해석결과를 토대로 이루어 졌으며, 결과적으로 안전추임을 확인하였다.

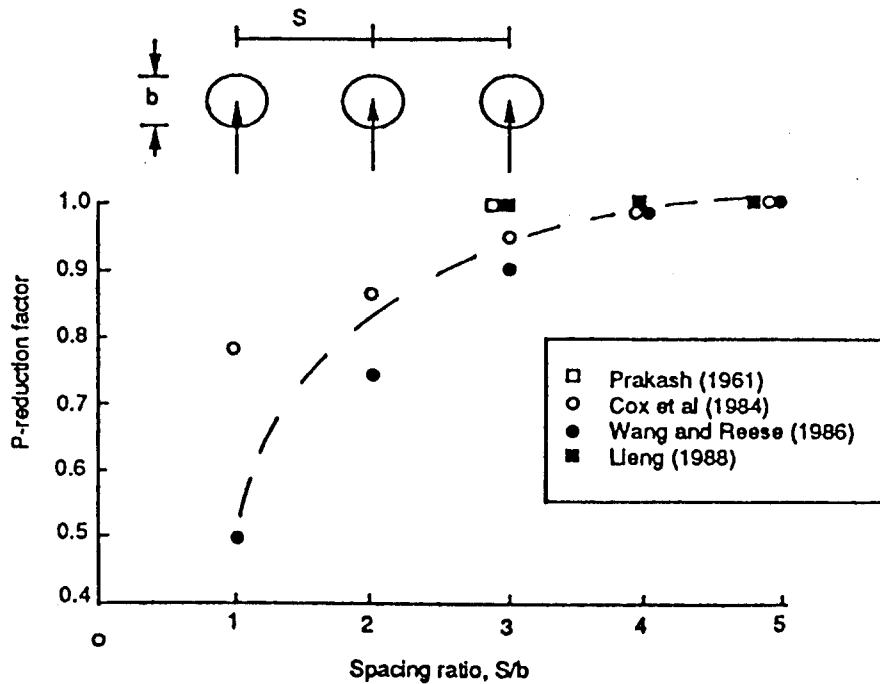


그림 15. 억지말뚝 상호간섭영향 분석

7. 시공개요

nailing system을 적용한 본 산사태 억지벽체공법의 시공개요(案)를 간략히 정리하면 다음과 같다(그림16).

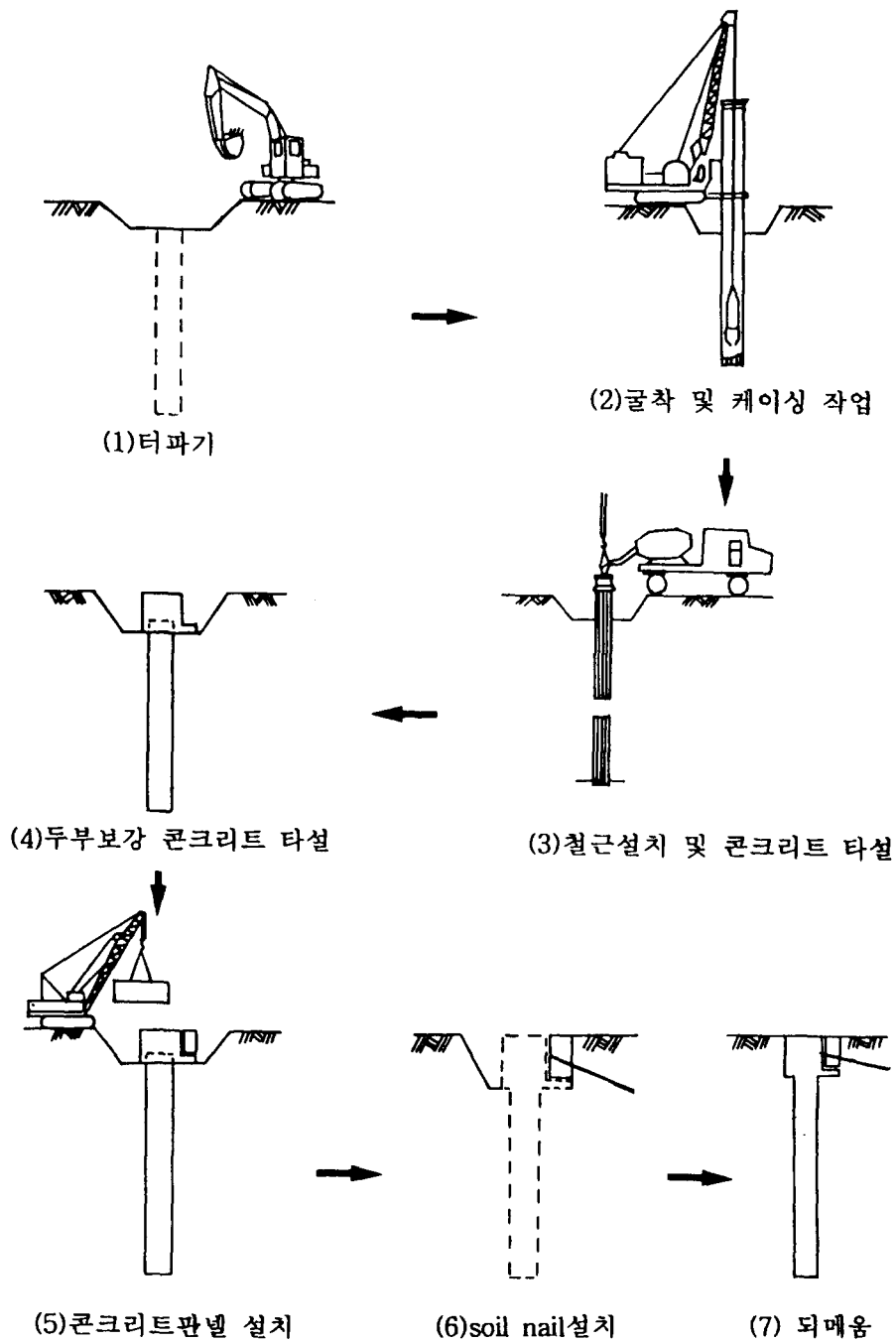


그림 16. nailed-slide suppressor wall 시공개요(案)

터파기

터파기는 억지말뚝 일부분이 설치될 부분(지표면으로 부터 콘크리트판넬 하단부 까지)을 먼저 거푸집 작업을 할 수 있는 소요의 폭으로 터파기하여 억지말뚝을 시공하고, 두부보강부를 설치한 후 판넬이 설치될 위치에 길이방향으로 터파기를 하여 판넬을 억지말뚝에 연결한다. 이와 같이 터파기를 두단계로 나누어 하는 것은, 억지말뚝설치용 터파기와 판넬설치용 터파기를 동시에 진행하는 경우에 현장타설 콘크리트의 경화 및 판넬설치 등 공사기간이 길어져서 억지벽체 위쪽의 흩새기가 활동할 위험성이 예상되기 때문이다.

억지말뚝

억지말뚝은 작용토폰의 크기에 따라 직경 600~1,500mm, 근입깊이는 10m 이내인 경우가 대부분이고, 사용재료로는 현장타설 철근콘크리트말뚝, 강관말뚝 및 H형강말뚝 등이 있다. 주로 현장타설 철근콘크리트말뚝이 이용되며, 두부보강 콘크리트의 단면은 판넬을 설치하기에 편리하도록 정방향으로 만드는 것이 좋다.

콘크리트판넬

콘크리트판넬은 현장타설로 시공하는 방법과 전문업체에서 생산하고 있는 기성제품을 사용할 수 있으며, 필요에 따라서는 다양한 크기와 형상의 프리캐스트 콘크리트판넬을 주문 제작하여 사용할 수 있다. 현장타설시 제품의 품질성 확보 문제, 인건비 및 공사기간 조절 등의 어려움이 예상되어, 이러한 문제점을 해결하는 방법으로 후자를 택하는 것이 바람직하다. 또한, 판넬의 설치높이가 클 경우에는 판넬폭이 1.0m와 1.2m인 규격품을 여러단으로 연결하여 설치 가능하다. 억지말뚝과 콘크리트판넬과의 일체화를 위한 접합방법은 볼트로 체결하는 방법과 용접하는 방법이 있으나, 영구구조물로서의 내구성을 확보할 수 있는 방법을 선택하는 것이 바람직하다.

nail의 설치

nail은 억지말뚝과 콘크리트판넬이 시공완료된 후에 판넬에 기 천공되어 있는 삼입구에 그림 17과 같이 설치한다.

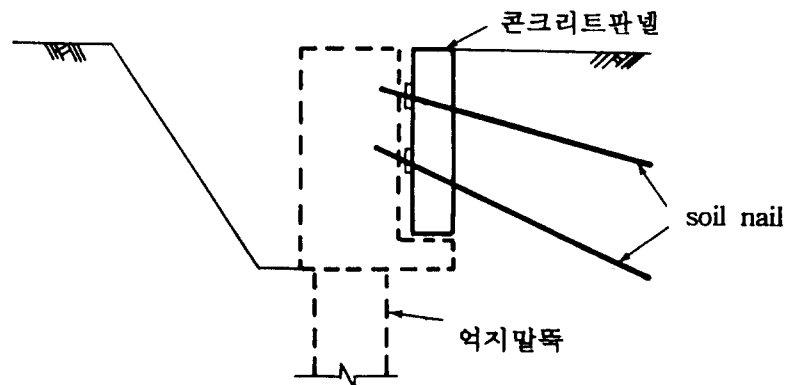


그림 17. nail 설치시공 개요

배수처리

강우나 지하수로 인한 수압의 상승을 저하시키기 위하여, 그림6과 같이 콘크리트판넬 하단부에 길이방향으로 쇠석층이나 맹암거를 설치하여 한 곳으로 모아 배수시킨다.

되메움 및 법면보호공

억지말뚝과 콘크리트판넬의 설치작업이 모두 끝나면 되메움을 실시하여 원래의 사면으로 복구시켜야 하며, 지표수에 의한 법면 유실을 막기 위하여, 식재나 블럭을 설치하여 지표면의 안정화를 도모한다.

8. 결론

본 연구에서는 Wright 등이 제안한 산사태 억지벽체공법에, nailing system을 추가한 새로운 형태의 사면보강공법을 제시하였다. 이를 위해, nail로 보강된 콘크리트판넬에 작용하는 토압산정법의 제시 및 억지말뚝 해석법의 정립 등이 이루어 졌다. 또한 제시된 토압산정법을 토대로 nail의 효율적인 배치형태 및 설치각도 등에 대한 분석과, 콘크리트판넬 및 억지말뚝 등으로 구성된 억지벽체의 최적설치위치에 관한 FLAC 프로그램 분석 등이 수행되었다. 이외에도 본 nailing system을 적용한 산사태 억지벽체공법의 시공개요를 제시하였으며, 아울러 설계예를 통해 Wright 등의 제안 방법과의 비교, 억지말뚝 상호간섭작용의 영향검토 등이 이루어 졌다.

참고문헌

- 1) Gässler, G.(1988). "Soil Nailing -Theoretical Basis and Practical Design," Proc. of the Int. Geotechnical Symposium on Theory and Practice of Earth Reinforcement, pp.283~288.
- 2) Gray, H., "Contribution to the Analysis of Seepage Effects in Backfills," Geotechnique, Vol.8, No.4, 1958, pp.517~522.
- 3) Isenhower, W.M., Wright, S.G. and Kayyal, M.K.(1989), Design Procedures for Slide Suppressor Walls, Transportation Research Record No. 1242, pp.15~21.
- 4) Kim, H.T.(1984). "Development of Lateral Earth Pressures along a Pile Subjected to Lateral Loading in Cohesionless and Cohesive Soils," Master's Thesis, Univ. of Notre Dame.
- 5) Wright, S.G., Isenhower, W.M. and Kayyal, M.K. (1989), "Evaluation of Earth Pressures Acting on Slide Suppressor Walls," Transportation Research Record 1242, pp.8~14.
- 6) Slurry Wall Committee of Deep Foundation Institute (1991), Soil Nailing Design and Applications.
- 7) Schlossor, F.(1991), Recommendations Clouterre 1991, FHWA-SA-93-026., Federal Highway Administration.
- 8) Catalogue(1992), TAMROCK OY, Finland.
- 9) 日本土質工學會 (1985), 杭基礎の設計法とその解説.
- 10) 김홍택, 강인규, 최인식, 순광수 (1993), "Soil Nailing 공법의 적용 및 설계", 한국지반공학회지 반굴착위원회 학술발표집, pp. 19~47