

억지말뚝을 이용한 점성토지반 절토사면의 설계

The Use of Piles to Cut Slopes Design in Cohesive Soils

홍 원 표*¹
Hong, Won-Pyo

한 중 근*²
Han, Jung-Geun

송 영 석*³
Song, Young-Suk

Abstract

A new design technique is presented to stabilize cut slopes in cohesive soils by use of piles. The design method can consider systematically factors such as the gradient and height of slope, the number and position of pile's rows, the interval and stiffness of piles, etc.

The design method is established on the basis of the stability analysis of slope with rows of piles. The basic concept applied in the stability analysis is that the soil across the open space between piles can be retained by the arching action of the soil, when a row of piles is installed in soil undergoing lateral movement such as landslides. To obtain the whole stability of slope containing piles, two kinds of analyses for the pile-stability and the slope-stability must be performed simultaneously.

An instrumentation system has been installed at a cut slope in cohesive soil, which has been designed according to the presented design process. The behavior of both the piles and the soil across the open space between piles is observed precisely. The result of instrumentation shows that the cut slope has been stabilized by the contribution of stabilizing effect of piles on the slope stability in cohesive soil.

요 지

본 연구에서는 억지말뚝을 이용한 점성토지반 절토사면에 대한 새로운 설계법이 제안된다. 이 설계법에 서는 사면의 기울기와 높이, 억지말뚝열의 수와 설치위치, 말뚝의 간격과 강성 등의 요소를 체계적으로 선택

*1 정회원, 중앙대학교 공과대학 건설환경공학과 교수

*2 정회원, 대림대학 토목과 전임강사

*3 중앙대학교 대학원 토목공학과 석사과정

할 수 있게 되어 있다. 이 설계법은 줄말뚝을 포함한 사면의 안정해석법에 근거하여 확립될 수 있다. 말뚝으로 사면을 안정시킬 수 있는 기본적인 개념은 줄말뚝이 산사태와 같은 측방변형지반속에 설치되어 있을 경우 말뚝사이의 지반이 지반아칭현상에 의하여 억지 될 수 있다는데 있다. 줄말뚝을 포함한 사면의 전체안정을 검토하기 위하여 말뚝안정해석과 사면안정해석이 동시에 실시되어야 한다.

제안된 설계법에 따라 설계된 점성토지반 절토사면에 계측기를 설치하여 말뚝 및 말뚝사이 지반의 거동을 면밀히 관찰하였다. 이를 통하여 점성토지반 절토사면에 설치된 억지말뚝의 사면안정효과를 확인할 수 있었다.

Keywords : Design method, Slope stability, Cut slope, Cohesive soil, Stabilizing piles, Safety factor

1. 서 론

최근 고도의 산업발전으로 인하여 새로운 토지의 수요가 나날이 증대되고 있다. 이 수요에 부응하기 위하여 해안을 매립·개량하여 토지를 공급하는 경우가 급증하고 있다. 이와 같이 연약지반을 개량하여 조성한 해안매립지에 구조물을 건설하기 위해서는 기초공사와 지하구조물 공사를 위한 지하굴착작업을 반드시 실시하여야 한다. 이와 같은 점성토지반에 절토공사를 실시할 경우 자연히 사면이 생성되게 된다. 그러므로, 이렇게 생성된 절토사면의 안정성을 확보하기 위해서는 무엇보다 먼저 합리적인 절토사면의 설계법이 확립되어야만 한다.

본 연구의 목적은 점성토지반 절토사면에 대한 합리적인 설계법을 마련함에 있다. 특히, 억지말뚝으로 절토사면을 보강한 경우를 위주로 한 설계법을 마련하고자 한다. 즉, 부지의 제약으로 인하여 절토사면의 기울기가 급하게 될 경우 사면안정성은 감소하게 되고, 이를 방지하기 위하여 억지말뚝을 사용하게 된다. 이때 절토사면안정용으로 억지말뚝을 활용하기 위해서는 사면속에 설치된 억지말뚝의 사면안정효과 및 사면지반과 억지말뚝의 거동이 면밀히 조사·분석되어야 한다. 따라

서, 점성토지반 절토사면에 억지말뚝공법을 적용하여 사면안정의 효과를 검토하고 사면지반과 억지말뚝의 거동을 면밀히 관찰하고자 한다.

그리고, 억지말뚝이 적용된 절토사면의 안정을 해석하기 위하여 지반의 소성변형을 고려한 줄말뚝의 안정해석법 및 사면의 안정해석법을 확대 적용함으로써 합리적인 사면안정해석법을 확립하고자 한다. 여기서, 억지말뚝을 시공한 절토사면의 사면안정해석은 이미 개발된 사면안정해석법을 적용한다(홍원표, 1991). 이 해석법에서는 억지말뚝 및 사면지반의 안정해석을 동시에 실시하여 억지말뚝 및 사면지반 모두의 안정이 검토될 수 있도록 되어 있다(Ito, Matsui and Hong, 1979a, 1979b, 1981, 1982). 그리고, 이러한 사면안정해석법에 근거하여 설계법을 마련한다.

제안된 설계법에 의거하여 설계 및 시공된 절토사면현장에 대해서 계측시스템을 설치하고 억지말뚝과 사면지반의 거동을 관찰하여 본다. 이러한 현장실험 결과를 통하여 억지말뚝으로 인한 점성토지반 절토사면의 사면안정효과를 확인하고, 제안된 설계법의 합리성을 확인하고자 한다.

또한, 해석을 통한 억지말뚝의 예측치와 현장실험으로부터 구한 실측치를 비교하여 적용된 해석법의 합리성을 확인하고자 한다.

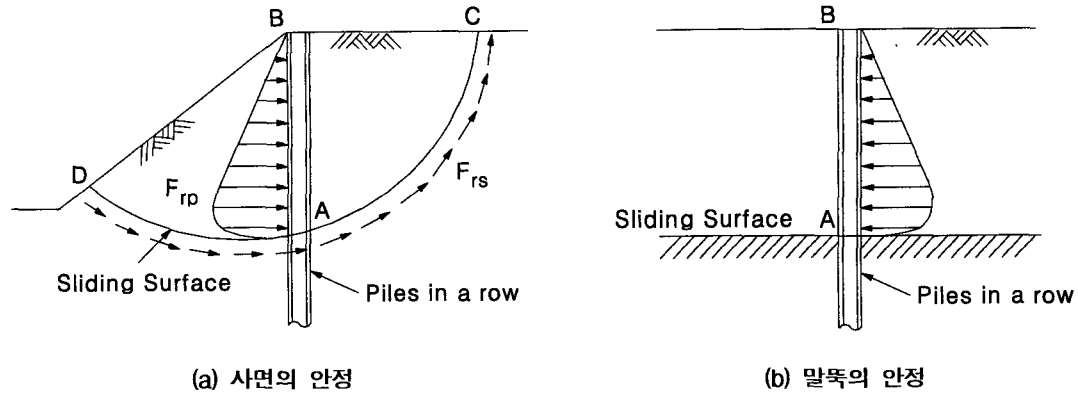


그림 1. 역지말뚝이 설치된 사면의 안정

2. 점성토지반 절토사면 설계법

2.1 역지말뚝설치사면의 안정해석법

역지말뚝이 설치된 절토사면의 안정을 해석하기 위해서는 그림 1에 도시된 바와 같이 말뚝과 사면의 두가지 안정에 대하여 해석하여야 한다. 만약 토괴활동에 의하여 말뚝에 작용하는 측방토압을 알 수 있다면 그림 1(b)에 도시된 바와 같이 말뚝의 안정을 먼저 검토할 수 있다. 이때 말뚝의 안정은 수평하중을 받는 말뚝의 해석법을 적용할 수 있다. 말뚝의 안정해석을 통하여 말뚝의 안정성이 확보될 수 있는 범위까지의 최대수평하중을 구하고 이 수평하중을 그림 1(a)에 도시된 바와 같이 말뚝의 사면활동방지용 수평저항력으로 간주할 수 있다. 이 수평저항력을 사면활동저항력에 부가시켜 통상의 사면안정해석법을 적용하면 사면의 안정을 검토할 수 있다. 여기서, 측방토압의 산정은 사면안정을 위한 역지말뚝설계에 있어서 매우 중요한 사항이 되므로 이 값을 정확하게 예측하는 것이 매우 중요하다. 왜냐하면, 말뚝의 안정과 사면의 안정에 미치는 측방토압의 영향이 서로 상반되기 때문이다. 즉, 측방토압을 실제보다도 크게 산정하여 설계할 경우, 말뚝의 안정에 관하여는 안전측이나 사면의 안정에 관하여는 위험

측이 된다. 반대로 측방토압을 실제보다 적게 산정하여 설계할 경우에는 그 반대현상이 발생할 것이다(홍원표, 1982, 1984).

이러한 역지말뚝이 설치된 사면의 안정해석법은 산사태 역지말뚝과 교대기초말뚝의 안정해석법에서 기본적 해석원리가 자세히 설명된 바 있다(홍원표, 1991 ; 홍원표 외 3인, 1990, 1991 ; 홍원표 · 한중근, 1993 ; 홍원표 외 2인, 1998). 따라서, 상세한 사항은 이들 논문을 참조하기로 한다.

2.2 설계법

점성토지반의 절토사면 설계시 사면의 안정에 영향을 미치는 요소들로는 지반의 기하학적 형상, 토질정수, 부지의 제약조건, 말뚝 관련사항 등이 있다. 그러므로, 절토사면의 설계시 이러한 조건들은 반드시 고려되어야 한다.

역지말뚝으로 보강된 점성토지반 절토사면의 설계는 그림 2와 같은 순서로 진행됨이 바람직하다. 즉, 그림 2는 역지말뚝으로 보강된 절토사면의 설계순서를 블럭차트로 나타낸 그림이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 사면과 역지말뚝의 설계는 네단계로 크게 구분할 수 있다. 즉, 한가지 결정단계와 세가지 선택단계로 구성되어 있다.

첫번째 단계에서는 그림 2에서 보는 바와 같이

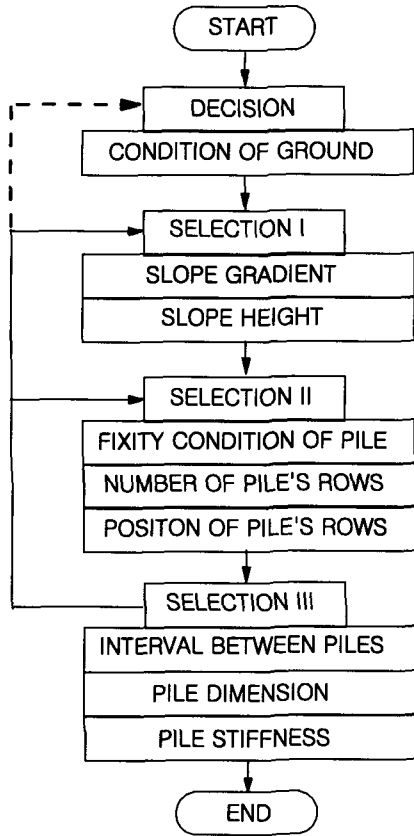


그림 2. 역지말뚝을 이용한 절토사면의 설계 흐름도

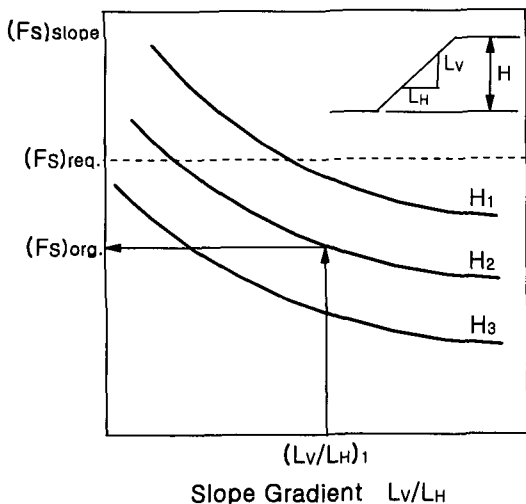


그림 3. 사면설계 개략도

지반조건 결정단계로서 점성토지반 절토사면의 설계를 위하여 우선적으로 대상지반에 대한 실내시험 및 현장시험을 실시하여 토질정수 및 지하수위 등의 지반조건을 정확히 조사·결정하여야 한다.

두번째 단계는 선택 I의 단계로 지반조건이 결정되면 대상지역의 제약조건과 기하학적 형상을 고려하여 절토사면의 기울기와 사면높이를 선정한다. 이때, 사면기울기와 사면높이를 선정하기 위하여는 사면기울기(L_V/L_H)와 사면높이(H) 및 사면안전율(F_s)_{slope}의 관계를 개략적으로 도시한 그림 3을 활용할 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 횡축은 사면기울기(L_V/L_H)를 취하고 종축에는 사면안전율을 취하여 사면기울기에 따른 사면안전율의 관계를 나타내고 있다. 또한 그림중에는 사면높이 H 의 영향도 도시하고 있다. 전단계에서 대상지반의 지반조건에 의하여 단위체적중량 γ_t 와 비배수전단강도 c_u 가 결정되므로 소요 안전율을 고려하여 사면높이 H 가 결정될 수 있다. 즉, 첫번째 단계에서 정하여진 지반의 비배수전단강도 c_u 와 단위체적중량 γ_t 로부터 예상절토높이 H 를 선정하여 그림내 해당되는 곡선을 정한다. 이렇게 결정된 사면높이 H 에 사면기울기 L_V/L_H 도 선정하면 사면절토높이와 사면기울기로부터 사면안전율을 구할 수 있다. 예를 들어, 그림 3에서 사면기울기를 $(L_V/L_H)_1$ 로 선정하고 H_2 가 되는 사면높이를 선정하였다면 사면안전율은 $(F_s)_{org.}$ 이 된다. 만약 이 사면안전율이 소요안전율 $(F_s)_{req.}$ 보다 크면 설계가 완료되며 작으면 역지말뚝에 의한 사면보강 설계단계로 진행되어야 한다.

절토사면에 역지말뚝을 설계할 경우는 그림 2의 흐름도에서 보는 바와 같이 먼저 선택 II 단계에서 역지말뚝의 구속조건, 줄말뚝의 열수 및 설치 위치를 선정하여야 한다. 여기서, 말뚝의 두부구속조건은 자유, 회전구속, 힌지, 고정, 네가지 경우를 생각할 수 있다. 자유는 말뚝두부를 구속 하

지 않는 상태로 됨으로서 말뚝두부의 수평변위와 회전이 모두 가능하게 한 상태이고, 회전구속은 말뚝두부의 수평변위는 발생되게 하나 회전은 구속되게 한 상태이다. 한편, 힌지는 말뚝두부의 수평변위는 구속된 상태에서 회전만 발생되게 하는 구속상태이고, 고정은 말뚝두부의 수평변위와 회전 모두 발생되지 않게 구속하는 경우에 해당된다. 통상적으로 회전구속은 말뚝두부를 보로 연결한 형태에 해당되며 고정은 이 연결보를 타이롯드나 앵커로 지지시킨 경우에 해당된다. 한편 힌지는 고정과 유사하나 말뚝두부의 연결보가 회전이 가능하도록 연결시킨 경우에 해당된다. 그러나 일반적으로 말뚝두부는 말뚝을 횡으로 연결시키기만 함으로서 회전구속상태로 함이 가장 경제적이며 효과적이다. 즉, 말뚝두부를 띠장이나 철근콘크리트 보로 서로 연결시켜 가급적 두부가 회전되지 않게 하고 수평방향으로 이동만 하도록 한다. 특히 두열이상의 말뚝열을 설치할 경우는 트러스모양으로 말뚝두부를 강제로 서로 연결시키므로써 두부회전구속의 조건이 된다. 한편 말뚝선단은 지지층에 관입되는 깊이에 따라 힌지나 고정의 상태가 된다. 말뚝의 두부 및 선단의 구속조건이 결정된 다음에는 설치할 말뚝의 열수 및 위치를 결정한다.

다음은 선택Ⅲ의 단계로서 말뚝의 실질적인 설계단계가 된다. 여기서, 말뚝의 치수, 강성 및 설치간격을 선정하게 된다. 이 선정작업을 체계적으로 실시하기 위하여 그림 4와 같은 개략도를 활용한다. 즉 그림 4는 말뚝간격, 말뚝치수 및 말뚝강성을 설계하기 위한 개략도이며 횡축에는 말뚝간격비 D_2/D_1 (D_1 은 말뚝중심간 거리이고, D_2 는 말뚝순간격이다), 종축에는 사면안전율 $(F_s)_{slope}$ 을 취하였다. 말뚝폭(혹은 직경) 및 강성이 각각 B_1 , $(E_b I_b)_1$ 인 말뚝 I을 사용하는 경우, 말뚝의 설치간격에 따른 사면의 최소안전율의 변화는 그림 4의 말뚝 I 곡선과 같이 된다. 이 경우 사면의 소요안전

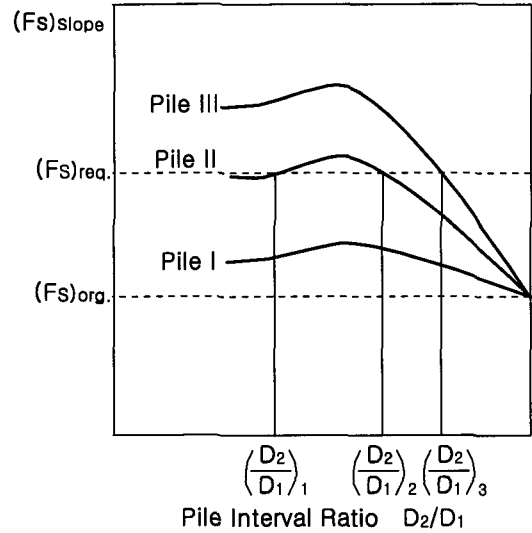


그림 4. 말뚝설계 개략도

율을 $(F_s)_{req.}$ 라 하면, 이 종류의 줄말뚝으로는 사면의 소요안전율을 얻을 수 있는 말뚝간격이 존재하지 않게 된다. 그러나 말뚝 I보다 큰 강성 $(E_b I_b)_2$ 를 가지는 말뚝 II를 사용하면, 그림 중 말뚝 II 곡선으로 도시되는 바와 같이 말뚝간격은 간격비가 $(D_2/D_1)_1$ 과 $(D_2/D_1)_2$ 사이의 범위에서 설계가 가능하게 된다. 이 설계가능 말뚝간격비 중 제일 간격이 넓은 경우인 $(D_2/D_1)_2$ 가 최적말뚝간격비가 된다. 또한 말뚝강성이 더 큰 $(E_b I_b)_3$ 강성을 가지는 말뚝 III을 선정하면 설계가능 말뚝간격비가 $(D_2/D_1)_3$ 이하가 되어 최적말뚝간격비는 $(D_2/D_1)_3$ 이 된다.

이러한 말뚝과 사면에 대한 제반사항의 설계가 끝나면, 설치된 말뚝과 보강사면에 대한 안정검토를 실시하여 사면과 말뚝의 안정이 모두 만족되는가 여부를 검토한다. 만약 이들 안정이 확보되지 못하면 feed back선을 따라 선택Ⅲ의 단계로 가서 말뚝의 치수, 강성 혹은 간격을 재선정한 후 말뚝 안정을 재검토한다. 여기서 만약 말뚝의 안정이 확

보되면 다음으로는 사면안정을 검토하여야 한다. 만약 여기서도 만족스러운 효과가 얻어지지 않으면 선택II단계로 가서 말뚝열의 수와 위치 혹은 말뚝구속조건을 다시 선정한후 계산과정을 반복한다. 이러한 말뚝의 보강으로 사면의 안정을 확보하지 못할 경우는 사면기울기와 절토높이의 선정단계인 선택I 단계 및 지반조건을 결정단계까지 feed back하여 이들 조건을 변경할 수 밖에 없다. 즉, 사면의 기울기와 절토높이를 완만하고 얕게 하거나 지반을 개량하여 지반강도를 증가시켜 소요 안전율을 만족할 수 있도록 설계하여야 한다.

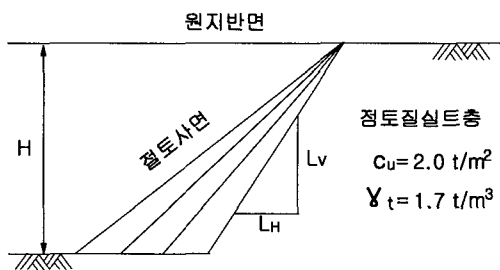


그림 5. 설계예

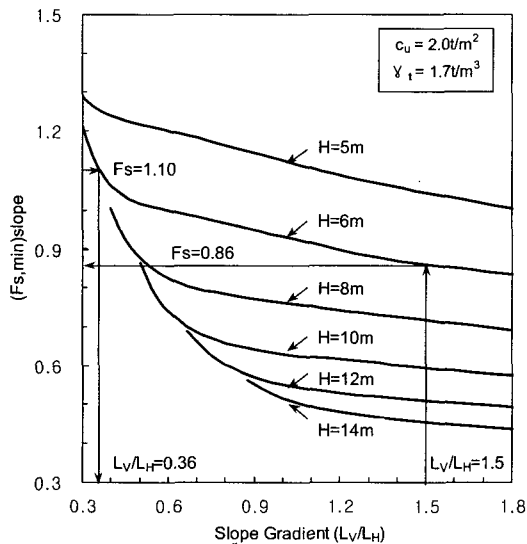


그림 6. 사면기울기에 따른 사면안전율의 변화

3. 설계예

3.1 설계조건

2절에서 제안된 설계법에 의거하여 점성토지반 절토사면의 설계를 실시하기 위하여 그림 5에 제시된 예를 선정하고자 한다. 이 지반은 상당깊이의 점토질실트층으로 이루어져 있으며 비배수전단강도 c_u 는 2t/m^2 이고 단위체적중량 γ_t 는 1.7t/m^3 이다. 이는 그림 2의 설계흐름도에 의거하면 첫 번째 설계단계인 지반조건 결정단계에 해당된다.

3.2 사면 및 억지말뚝의 설계

3.2.1 사면의 설계

두번째 설계단계는 그림 2에서 보는 바와 같이 사면의 기울기와 높이를 선정하는 선택 I의 단계이다. 이들 사항을 선정하기 위하여는 그림 3과 같은 그림을 작성할 필요가 있다고 하였으므로 본 설계예를 대상으로 동일한 도면을 작성하면 그림 6과 같다. 그림 6은 사면지반의 절토높이 H 가 5m에서 14m까지의 경우에 대한 사면안정해석결과이며 사면의 기울기 L_v/L_H 는 0.3에서 1.8사이의 사면에 대한 사면안정해석결과이다. 이 결과에 의하면 동일한 사면기울기를 가지는 경우 사면의 높이가 높을수록 사면의 안전율이 낮아짐을 알 수 있다. 이는 사면의 높이가 클수록 사면이 불안정함을 의미한다. 만약, 사면의 높이가 일정한 경우는 사면의 기울기 L_v/L_H 값이 클수록(즉 사면이 가파를수록) 사면의 안전율이 감소한다.

그림 6을 활용하면 본 설계예에 대한 사면의 기울기와 높이를 선정할 수 있을 것이다. 여기서, 만약 사면의 높이 H 를 6m로 하고 사면의 소요안전율을 1.1이라 하면 사면의 기울기 L_v/L_H 는 0.36 이하가 되어야 하므로 사면수평거리는 약 17m이상 되어야 한다. 그러나, 실제 현장에서는 주변

부지의 제한상황으로 인하여 사면의 기울기를 0.36정도로 완만하게 선정하지 못하는 것이 일반적이다. 또한 사면의 소요안전율을 1.2라 하면 이를 만족시키는 사면의 기울기는 존재하지 않는다. 만약 사면기울기 L_V/L_H 를 1.5로 가파르게 하면 사면안전율은 그림 6에 표시된 바와 같이 0.86으로 된다. 이 사면안전율은 소요안전율 1.2보다 훨씬 낮으므로 그림 2의 설계흐름도에 의하면 이 사면에는 억지말뚝을 이용하여 보강대책이 강구되어야 한다.

3.2.2 억지말뚝의 설계

앞에서 선정된 사면기울기와 높이를 가지는 사면에 억지말뚝을 설치하여 보강을 실시하는 경우, 그림 2의 설계흐름도에 의하면 선택Ⅱ단계로 먼저 억지말뚝의 열수와 설치위치 및 구속조건을 선정하여야 한다. 먼저, 1열의 말뚝을 선정하고 말뚝의 위치를 그림 7에서 보는 바와 같이 변화시키면서 사면안정해석을 실시하여 보았다. 이 사면안정 해석에서는 억지말뚝으로 H-300×300×10×15의 H말뚝을 1.8m간격으로 설치한 경우를 대상으로 하였다. 즉, 1열의 억지말뚝을 사면의 정상위치에서부터 좌측 수평방향으로 1m, 2m, 3m 그리고 4m위치에 각각 배치하여 사면안정검토를 실시하

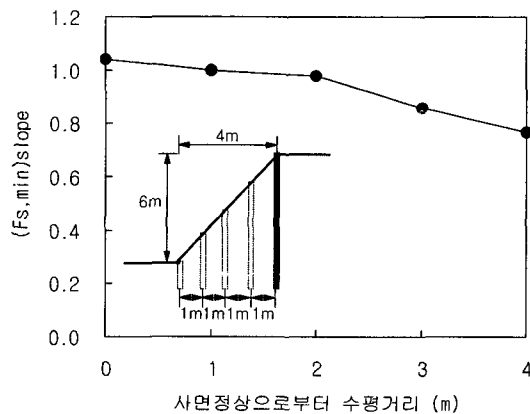


그림 7. 1열말뚝위치에 따른 사면안전율의 변화

면 결과는 그림 7과 같이 된다. 이 결과에 의하면 사면정상위치에 억지말뚝열이 설치된 경우가 사면안전율이 가장 크므로 1열의 억지말뚝은 사면의 정상위치에 설치됨이 바람직하다.

이상과 같이 1열의 억지말뚝을 사면정상위치에 설치하기로 결정하면 다음은 그림 2의 설계흐름도에 따라 선택Ⅲ단계에서 말뚝의 간격비, 치수 및 강성을 선정하여야 한다. 이들 사항을 선정하기 위하여는 그림 4와 같은 도면을 작성할 필요가 있다. 따라서 1열말뚝을 사면정상위치에 설치한 경우에 대한 말뚝치수와 강성의 변화에 따른 말뚝 간격비와 사면안전율의 관계를 나타내면 그림 8과 같이 된다. 이 해석에서는 사용말뚝을 H-100×100에서 H-400×400까지의 네가지 경우를 대상으로 하였다. 그림에서 보는 바와 같이 말뚝의 폭, 두께 및 강성이 커질수록 사면안전율은 증가하고 있다. 그리고, 말뚝간격비(D_2/D_1)가 감소할수록 사면의 안전율은 간격비가 0.55일때까지 증가하였다가 그 이하에서는 감소하고 있다. 만약 H-300×300×10×15 말뚝을 사용하고, 말뚝간격비를 0.83으로 할 경우 소요안전율 1.2를 만족하지 못한

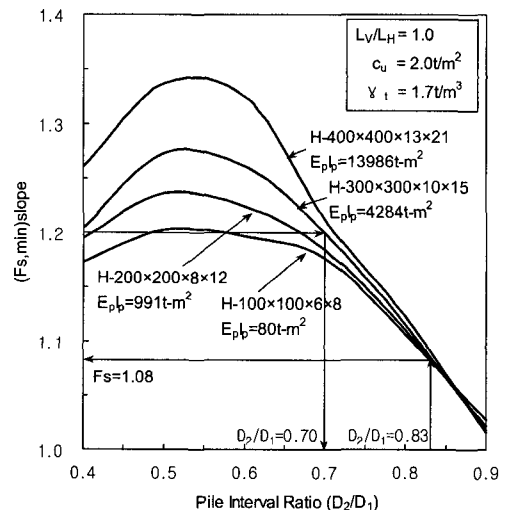


그림 8. 말뚝강성에 따른 말뚝간격비와 사면안전율의 관계

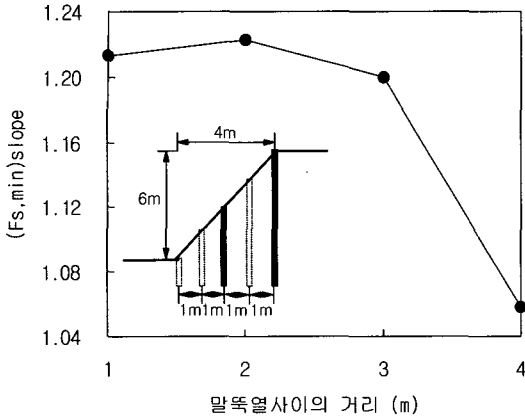


그림 9. 2 열말뚝위치에 따른 사면안전율의 변화

다. 따라서, 이 사면의 안정성을 확보하기 위하여는 말뚝간격비를 0.7이하(말뚝중심간격이 1.0m이하)로 하거나 2열이상의 역지말뚝이 설치되어야 할 것이다. 만약 말뚝열수를 증가시킬 경우는 그림 2의 feed back선을 따라 선택Ⅱ단계로 돌아가서 말뚝열의 수와 위치를 다시 선정하여야 한다.

2열의 역지말뚝을 설치할 경우에도 마찬가지로 먼저 역지말뚝의 설치위치를 결정하여야 한다. 그림 9에서 보는 바와 같이 첫번째 말뚝열의 역지말뚝은 사면정상에 고정시키고 나머지 한 열은 고정 배치된 말뚝열로부터 좌측 수평방향으로 1m, 2m, 3m 그리고 4m에 추가로 설치하여 사면안정검토

를 실시한 결과는 그림 9와 같이 된다. 사면안전율은 사면정상에 설치된 첫번째 말뚝열로부터 2m 떨어진 위치에 두번째 말뚝열이 설치된 경우가 가장 높은 것으로 나타났으며, 이때 사면안전율은 1.22가 되어 소요안전율 1.2를 만족하게 된다. 따라서, 본 단면에 말뚝열사이 간격을 2m로 한 두열의 역지말뚝을 그림 9 내에 도면처럼 설치할 경우 사면의 소요안전율을 만족하므로 설계를 종료하게 된다.

4. 현장실험

4.1 현장개요

점성토지반 절토사면에 대해 역지말뚝을 이용한 설계법의 합리성을 검증하기 위하여 경기도 안산시 고잔지구에 P아파트가 건설되는 공사현장에서 현장실험을 실시하였다(홍원표, 1998 ; 홍원표 외 3인, 1998). 그림 10(a)에서 보는 바와 같이 아파트단지 조성을 위한 전체적인 절토면적은 500m×250m이고, 절토깊이는 6.2m이다. 그리고, 절토공사의 시공단계는 A구역과 B구역으로 구분하여 시공하였으며, 먼저 A구역에 대하여 절토공사를 실시한 후 B구역에 대한 공사를 진행하였다.

그림 10(a)의 평면도에 도시된 보링위치에서의 지층깊이별 토질분포를 정리하면 그림 10(b)와 같이 상부층으로부터 매립토층, 점토질실트층, 모래자갈층, 풍화토층, 그리고 풍화암층으로 구성되어 있다. 점토질실트층은 1.5m 두께의 매립토층 아래 14.8m의 두께로 분포하고 있으며 암회색을 띠고 있다. 표준관입시험 결과를 보면 N치는 1~32의 값을 갖으며 상부에서는 연약하고 하부로 갈수록 굳은 상태를 보이는 것으로 나타났다.

사면안정검토를 위한 해석상의 토질정수를 구하고 지반의 특성을 파악하기 위하여 그림 10(a)에 나타난 바와 같이 A구역의 3곳을 결정하여 불교관 시료를 채취하였다. 채취된 시료는 각각의 위치에

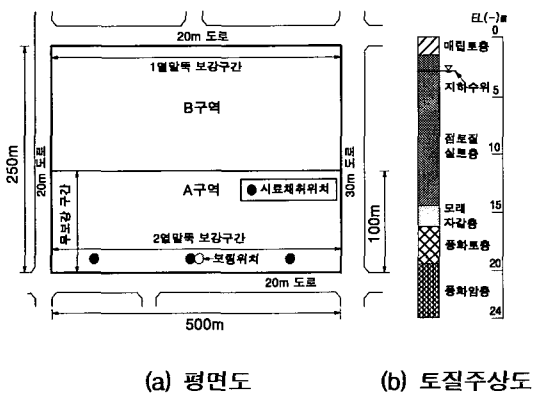


그림 10. 시공평면도 및 토질주상도

서 2.0m~6.7m깊이에 있는 점토질실트이며 실내 토질시험결과 비배수전단강도 c_u 는 $2t/m^2$ 이고, 단위체적중량 γ_t 는 $1.68t/m^3$ 로 결정하였다. 그리고, 모래자갈층은 내부마찰각이 34° 이고, 단위체적중량이 $1.9t/m^3$ 이며, 풍화토층은 내부마찰각이 38° 이고, 단위체적중량이 $2.0t/m^3$ 로 결정하였다.

4.2 실험계획

본 현장은 위치에 따라서 건축물 시공부지와 사면정상부 사이에 시공가능한 여유폭이 차이가 있으므로 3절의 설계예에서와 같이 사면기울기의 변화에 따른 여러가지 절토사면의 설계와 시공이 가능하였다. 따라서, 말뚝을 보강하지 않은 사면 구간(무보강사면구간이라 한다), 1열말뚝으로 보강한 사면구간(1열말뚝보강사면이라 한다), 그리고 2열말뚝으로 보강한 사면구간(2열말뚝보강사면이라 한다)을 선정하여 이들 구간에서 각각 현

장실험을 수행하였으며 각 구간별 실험위치는 그림 10(a)에 표시된 바와 같다. 2절에서 제안된 설계법에 따라 각 구간별 보강대책을 마련하였으며, 각 구간별 절토사면기울기(L_V/L_H)에 대하여 무보강시 사면안전율과 역지말뚝보강시 사면안전율을 검토하면 표 1과 같으며, 역지말뚝보강시 사면단면도는 그림 11과 같다. 여기서, 역지말뚝으로는 H-300×300×10×15 크기의 H말뚝을 사용하였다.

표 1은 본 설계법에 의해 제안된 절토사면의 기울기와 그에 따른 사면안전율, 그리고 말뚝보강시 사면안전율을 나타낸 결과이다. 시공경계면까지의 여유폭이 약 16m인 경우는 사면의 기울기를 1:2.7로 하여 사면보강을 실시하지 않았으며, 여유폭이 약 6m인 경우 사면의 기울기를 1:1로 하여 1열의 역지말뚝보강을 실시하였다. 그리고, 여유폭이 약 4m인 경우 사면의 기울기를 1:0.7로 하여 2열의 역지말뚝보강을 실시하였다.

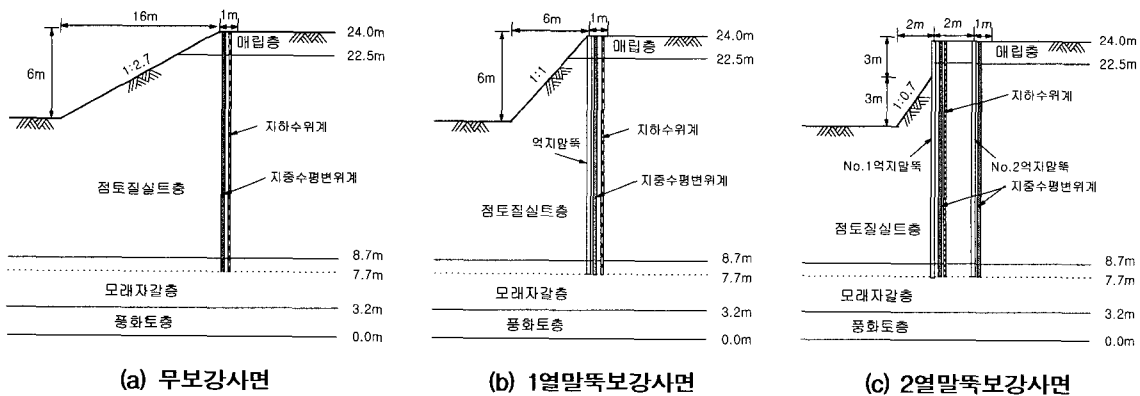
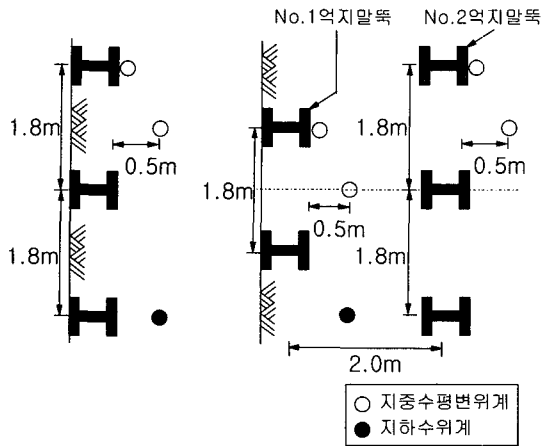


그림 11. 설계사면 및 계측기설치단면도

표 1. 설계된 사면의 사면안전율

구분	무보강사면	1열말뚝보강사면		2열말뚝보강사면	
사면기울기 (L_V/L_H)	1:2.7 (0.38)	1:1 (1.0)		1:0.7 (1.42)	
사면안전율	1.1	보강전	보강후	보강전	보강후
		0.9	1.1	0.7	1.2



(a) 1열말뚝보강구간 (b) 2열말뚝보강구간

그림 12. 계측기설치평면도

4.3 계측기설치계획

본 현장에 설치된 억지말뚝과 사면지반의 변형 거동을 파악하기 위하여 적절한 계측장비를 활용하였다. 즉, 절토사면에 보강된 억지말뚝에는 경사계를 설치하였고, 사면지반에는 경사계와 지하수위계를 설치하였다. 설치단면도는 그림 11에서 표시된 바와 같이 무보강사면, 1열말뚝보강사면, 그리고 2열말뚝보강사면으로 구분하여 각각 도시하였다. 그림 12는 1열말뚝과 2열말뚝보강구간에서의 계측기설치평면도를 도시한 것이다. 억지말뚝의 거동을 관찰하기 위해서는 억지말뚝에 밀착시켜 경사계를 설치하였고, 사면지반의 거동과 지하수위를 관찰하기 위해서는 억지말뚝사이 중앙부에 말뚝으로부터 배면으로 0.5m 떨어진 소성영역지반내에 각각 경사계와 지하수위계를 설치하였다. 그리고, 경사계와 지하수위계는 지표면으로부터 약 15~17m깊이까지 설치하였다.

4.4 시공단계

시공단계에 따른 억지말뚝과 사면지반의 변형

거동을 조사·분석하기 위하여 각 구간별로 시공 과정을 구분하였다. 먼저, 무보강사면구간에서는 사면기울기를 1:2.7로 하여 제1단계로 GL(-)3m까지 굴착하고 제2단계로 GL(-)6m까지 굴착을 실시하였으며, 제3단계로 사면정지작업을 실시하였다. 다음으로 1열말뚝보강사면구간에서는 제1단계로 굴착전 억지말뚝을 설치하고 말뚝상부를 띠장으로 연결한 후 사면의 기울기를 1:1로 하여 GL(-)3m까지 굴착을 실시하였다. 그리고, 제2단계에서는 GL(-)6m까지 굴착을 실시하고 제3단계에서는 사면정지작업을 실시하였다. 또한, 2열말뚝보강사면구간에서는 제1단계로 두열의 억지말뚝을 설치하고 No.1열말뚝에만 띠장을 설치하고 GL(-)3m까지 직립으로 굴착을 실시하였다. 그 다음 제2단계에서는 GL(-)6m까지 1:0.7 기울기의 사면을 두어 굴착을 실시하였다. 이때 제2단계 굴착완료후 억지말뚝과 사면지반의 수평변위가 급증하여 No.2열말뚝에도 띠장을 설치하였고 No.1열말뚝과 No.2열말뚝의 두부를 강제로 트러스모양이 되게 서로 결합시켰다. 이와 같은 결합시공 작업 전후를 제3단계와 제4단계로 구분하였다.

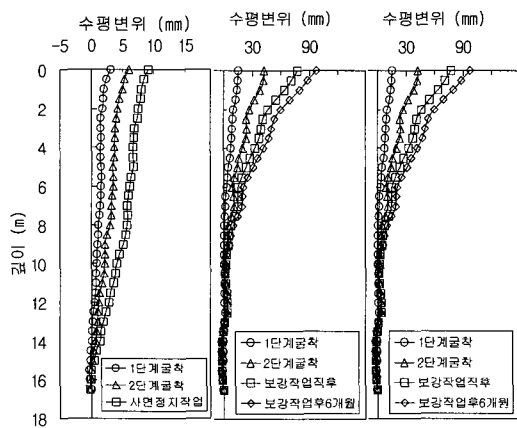
5. 실험결과 및 고찰

5.1 억지말뚝의 거동

그림 13은 각 구간별 억지말뚝에 설치된 경사계의 계측결과를 시공단계에 따라 도시한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 굴착단계에 따라 억지말뚝의 수평변위는 증가하고 있다. 그림 13(a)에서 보는 바와 같이 1열말뚝구간에서 발생된 수평변위는 쾨틸레버모 형태의 변형양상을 보이며, 최대 수평변위는 말뚝두부에서 발생되었다. 한편, 그림 13(b)와 (c)는 2열말뚝보강구간에 설치된 No.1열 및 No.2열 억지말뚝의 수평변위를 도시한 것이다. 2열말뚝보강구간에서는 굴착전에 No.1말뚝열 두

부에만 띠장을 설치하였으나 굴착후 수평변위가 급격히 발생하여 No.2말뚝열 두부에도 띠장을 설치하고 No.1말뚝열과 트러스모양으로 결합을 실시하였다. 그 결과 두부결합에 의한 구속효과로 인하여 수평변위의 증가속도는 매우 크게 감소되었다. 그리고, 굴착전 말뚝두부의 띠장을 설치한 No.1말뚝열에서는 말뚝두부에 구속효과가 발생되었으므로 굴착전 말뚝두부의 띠장설치로 인한 억지말뚝의 구속효과를 확인할 수 있었다.

점성토지반의 절토사면에 대한 억지말뚝 보강 효과는 그림 11에서와 같이 억지말뚝을 지지하고 있는 지반의 형상 즉, 말뚝전면지반의 지지효과에 따라 차이가 있는 것으로 나타났다. 즉, 그림 13(a)에서 보는 바와 같이 1열말뚝구간의 전면지반 지지효과와 그림 13(b),(c)와 같이 거의 직립으로 강제결합된 2열말뚝구간의 보강효과를 비교하여 보면 1열말뚝구간의 경우가 더 좋은 효과를 가지는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 2열말뚝구간에서 굴착깊이까지만 말뚝의 수평변위가 크게 발생하고 굴착깊이 아래에서는 전면지반의 지지효과로 인하여 말뚝의 수평변위가 적게 발생하는 것으로서 확인할 수 있다.



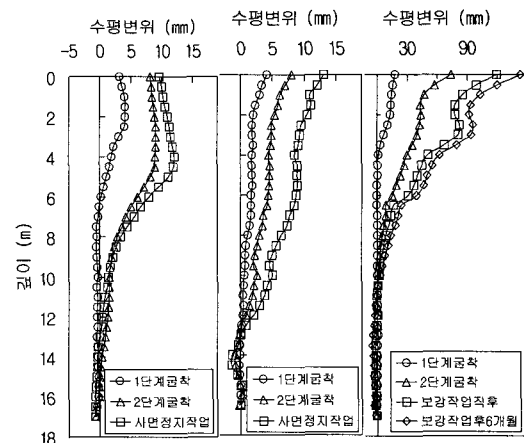
(a)1열말뚝구간(b)2열말뚝구간(c)2열말뚝구간 (No.1말뚝열) (No.2말뚝열)

그림 13. 시공단계별 억지말뚝의 수평변위

5.2 사면지반의 거동

그림 14는 각 구간별 사면지반에 설치된 경사계로부터 측정된 지반의 수평변위를 도시한 것으로 절토를 실시함에 따라 지반의 수평변위는 증가하고 있는 것으로 나타났다.

그림 14(a)는 무보강구간에서 사면지반의 수평변위를 나타낸 것으로 지표면으로부터 4m부근까지 지반의 수평변위는 동일하게 크게 발생되었으나, 절토면아래의 깊이에서는 전면지반의 지지효과로 인하여 수평변위가 적게 발생되었다. 그림 14(b)는 1열말뚝구간에서 말뚝열의 소성영역지반에 대한 수평변위를 나타낸 것으로 켈틸레버보 형태의 변형양상을 보이며, 최대수평변위는 지표면에서 발생되었다. 본 단면의 사면기울기는 무보강구간의 사면기울기보다 매우 급하나 억지말뚝의 보강으로 인하여 무보강구간과 유사한 최대수평변위량을 나타내었다. 그러므로 억지말뚝의 보강으로 인한 사면지반의 수평변위 억제효과가 발생되었음을 알 수 있다. 그림 14(c)는 2열말뚝보강구간에서 No.1말뚝열의 말뚝사이 소성영역지반에



(a)무보강구간(b)1열말뚝구간(c)2열말뚝구간 (No.1말뚝열)

그림 14. 시공단계별 사면지반의 수평변위

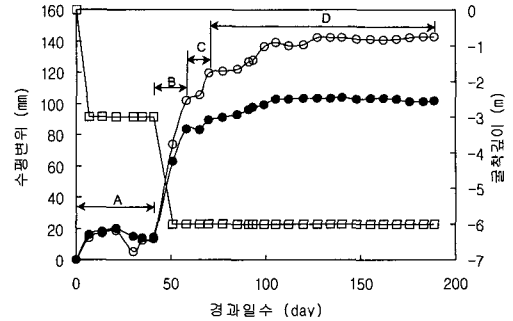
대한 수평변위를 나타낸 것으로 최대수평변위는 지표면에서 발생되었다. 지표면부근의 과도한 수평변위발생은 그림 11(c)에서 보는 바와 같이 역지말뚝전면에 3m깊이까지는 사면지반이 없고 3m깊이하에서만 사면지반이 존재하기 때문에 지반반력을 받지 못하였기 때문으로 생각된다. 절토완료후까지 말뚝과 지반의 수평변위는 급증하였으나 No.1말뚝열과 No.2말뚝열 말뚝두부를 연결한 후 수평변위의 증가속도는 감소되었으므로, No.1말뚝열과 No.2말뚝열의 두부결합으로 인한 말뚝과 지반의 수평변위 억제효과를 확인할 수 있었다.

5.3 역지말뚝의 사면안정효과

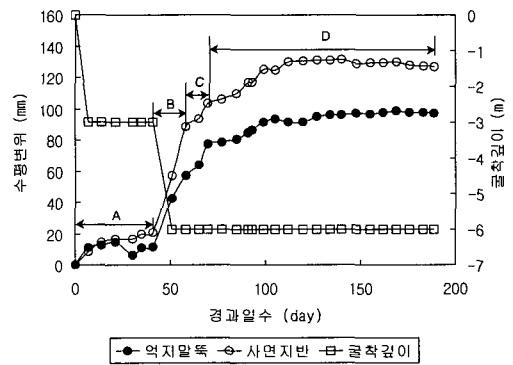
그림 15는 사면의 기울기를 1:0.7로 하고 2열말뚝을 보강한 구간에서의 역지말뚝과 사면지반의 최대수평변위량을 시공단계별로 각각 도시한 것이다. 제1차굴착단계(A단계)에서는 말뚝과 지반의 수평변위가 유사하게 발생하고 있으나, 제2차굴착단계(B단계)에서는 지반의 수평변위가 말뚝의 수평변위보다 급속하게 증가하는 것으로 나타났다. 역지말뚝보강단계(C단계)에서는 말뚝열사이의 연결로 인하여 말뚝과 지반 모두에서 수평변위의 억제효과가 발생되었으며, 시공완료단계(D단계)에서는 말뚝과 지반의 수평변위가 모두 수렴되고 있는 것으로 나타났다.

그림 15(a)와 (b)를 비교하여 보면, No.1말뚝열에서 지반의 수평변위는 No.2말뚝열의 지반에서 보다 더 큰 값을 갖는 것으로 나타났다. 이것은 절토로 인한 지반의 소성변형이 No.2열말뚝지반에서 보다 No.1열말뚝지반에서 크게 발생하였기 때문이다. 따라서, 지반의 수평변위를 억제하기 위해 설치된 역지말뚝의 수평변위 또한 No.2말뚝열보다 No.1말뚝열에서 더 큰 값을 갖는다.

또한 그림 15의 결과를 보면 말뚝의 변위량이



(a) No.1열의 말뚝과 지반



(b) No.2열의 말뚝과 지반

그림 15. 2 열말뚝구간 역지말뚝과 사면지반의 최대수평변위량 비교

지반의 변형량보다 작게 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 절토로 인하여 발생된 사면지반의 소성변형이 말뚝의 강성에 의하여 억제되고 있으며, 말뚝과 지반의 거동은 절토단계에 따라 많은 영향을 받고 있음을 의미한다.

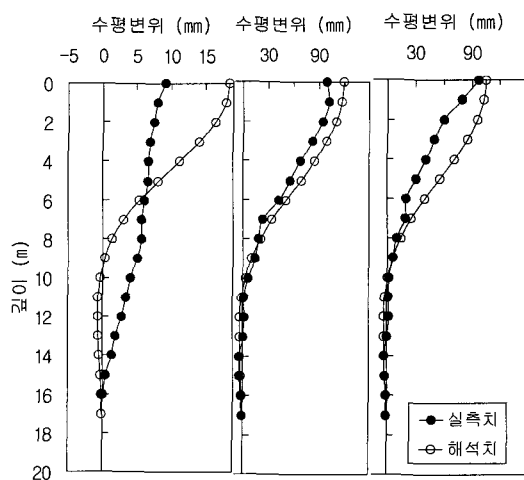
5.4 해석결과와의 비교

본 연구에서 사용한 해석방법은 먼저 가상원호 활동면을 기준으로 활동면 상부의 활동토피로부터 줄말뚝에 작용하는 축방토압을 산정하여 말뚝의 안정해석을 실시하며, 말뚝이 저항할 수 있는

측방토압만을 저항력으로 활용하여 사면안전을 계산에 말뚝의 사면활동저항력으로 추가시켜 사면안정의 기여도를 평가할 수 있도록 되어있다(홍원표, 1991 ; 홍원표 외 3인, 1991).

그림 16은 각 구간에서 실제 계측된 말뚝의 수평변위와 해석을 통하여 얻은 결과를 함께 비교한 결과이다. 그림 16(a)는 1열말뚝 설치구간에 대한 결과로 실측치는 말뚝의 두부에서 해석치보다 작게 나타나고, 지표면으로부터 약 5m에서 해석치보다 크게 나타나고 있다. 이는 상부 매립층의 영향과 말뚝상부의 띠장결합으로 인한 수평변위 억제효과가 예상한 것보다 크게 발생하였기 때문으로 판단된다.

그림 16(b)와 (c)는 2열말뚝 설치구간에 대한 결과로 No.1열과 No.2열의 말뚝수평변위는 실측치와 해석치가 매우 유사한 값을 갖는 것으로 나타났다. 그리고, 실제 시공시 No.1말뚝열은 굴착 전에 띠장을 설치하여 두부구속효과가 발생되었으나, No.2말뚝열은 굴착이 완료된 상태에서 띠장을 설치하였기 때문에 두부구속효과가 발생되지



(a) 1열말뚝구간 (b) 2열말뚝구간 (No.1말뚝열) (c) 2열말뚝구간 (No.2말뚝열)

그림 16. 역지말뚝 수평변위의 실측치와 해석치의 비교

않았다.

위의 해석 결과로 보아 실측치와 해석치는 유사한 거동을 나타내고 있으며 두 값의 오차는 비교적 적다. 따라서, 역지말뚝을 이용한 점성토지반의 절토사면에 대한 설계법의 합리적인 적용성을 확인할 수 있었다.

6. 결론

본 연구에서는 역지말뚝을 이용한 점성토지반 절토사면에 대한 설계법을 제안하였다. 그리고 본 설계법의 합리성을 확인하기 위하여 현장실험을 실시하였으며, 현장실험시 역지말뚝과 사면지반의 거동을 관찰하기 위하여 계측시스템을 설치하였다. 계측결과를 통하여 역지말뚝과 사면지반의 상호거동을 분석하였으며, 제안된 설계법의 합리성을 확인하였다.

- 1) 역지말뚝을 이용한 점성토지반 절토사면의 설계법을 제안하였으며, 본 설계법은 지반조건 결정단계, 절토사면의 기울기와 높이 선택단계, 말뚝두부구속조건, 열수 및 설치위치 선택단계, 그리고, 말뚝치수, 강성 및 설치간격 선택단계로 구성되어 있다.
- 2) 점성토지반 절토사면 설계시에는 사면기울기와 사면높이를 사면안전율과 관련시킨 상관도를 작성하여 유기적으로 결정할 수 있다.
- 3) 제안된 설계법에 의하여 실제 현장에 대한 설계를 실시할 경우 가장 중요한 요소는 건축물 시공부지와 사면정상부 사이의 시공여유폭이다. 그러므로, 시공여유폭에 따라 무보강사면, 1열말뚝보강사면, 2열말뚝보강사면으로 나누어 설계를 실시할 수 있다.
- 4) 제안된 설계법의 합리성은 실제 역지말뚝을 이용한 점성토지반 절토사면의 현장실험을 통하여 검증될 수 있었다. 즉, 현장실험 결과 역지말

뚝의 변위량이 사면지반의 변형량보다 작게 발생되고 있으므로 절토로 인하여 발생된 사면지반의 소성변형이 말뚝의 강성에 의하여 억지되고 있음을 알 수 있다.

- 5) 점성토지반 절토사면에 설치된 억지말뚝의 거동에 대한 해석치와 실측치를 비교하여 본 결과 매우 유사한 거동을 나타내고 있다.

감사의 글

본 연구를 수행하기 위하여 실험현장을 지원해 준 풍림산업(주)과 현장계측을 도와준 이엔지건 설엔지니어링에 감사드리는 바이다.

참고 문헌

1. 홍원표(1982), "점토지반속의 말뚝에 작용하는 측방 토압", 대한토목학회지, 제2권, 제1호, pp.45~52.
2. 홍원표(1984), "측방변형지반속 줄말뚝에 작용하는 측방토압", 대한토목학회지, 제4권, 제1호, pp.59~68.
3. 홍원표(1991), "말뚝을 사용한 산사태 억지공법", 한국지반공학학회지, 제7권, 제4호, pp.75~87.
4. 홍원표(1998), 안산고잔지구 풍림아파트 신축부지 지하굴착에 관한 연구보고서, 중앙대학교.

5. 홍원표, 윤중만, 한중근, 송영석(1998), "줄말뚝을 이용한 자립식 흙막이벽의 변형거동", 대한토목학회 학술발표회 논문집 (Ⅱ), pp.413~416.
6. 홍원표, 이우현, 남정만, 한중근(1990), "편재하중을 받는 연약지반 속의 벽강관식 안벽의 안정해석", 한국강구조학회 논문집, 제2권, 제4호, pp.213~226.
7. 홍원표, 이우현, 안종필, 남정만(1991), "교대기초말뚝의 안정", 대한토질공학회지, 제7권, 제2호, pp.67~79.
8. 홍원표, 한중근(1993), "말뚝을 사용한 사면안정공법", 한국지반공학회 사면안정 학술발표회 제2집, pp.19~52.
9. 홍원표, 한중근, 이재호(1996), "절개사면에 설치된 억지말뚝의 사면안정효과", 한국지반공학회 사면안정 학술발표회 논문집, pp.90~97.
10. Ito, T., Matsui, T. and Hong, W. P.(1979a), "Design method for the stability analysis of the slope with landing pier", Soils and Foundations, Vol.19, No.4, pp.43~57.
11. Ito, T., Matsui, T. and Hong, W. P.(1979b), "Effect of foundation piles for landing pier on slope-stability", 京阪論叢, 第4号, pp.323~344.
12. Ito, T., Matsui, T. and Hong, W. P.(1981), "Design method for the stabilizing piles against landslide - one row of piles", Soils and Foundations, Vol.21, No.1, pp.21~37.
13. Ito, T., Matsui, T. and Hong, W. P.(1982), "Extended design method for multi-row stabilizing piles against landslide", Soils and Foundations, Vol.22, No.1, pp.1~13.

(접수일자 1999. 4. 28)