

측방유동 연약지반상 교대의 안정성

Stability of Bridge Abutments on Soft Ground Undergoing Lateral Flow

홍 원 표* ¹	Hong, Won-Pyo	송 영 석* ²	Song, Young-Suk
신 도 순* ³	Shin, Do-Soon	손 규 만* ⁴	Son, Kyu-Man

Abstract

A criterion is suggested to evaluate the stability of bridge abutments on soft soil undergoing lateral flow. The criterion is obtained by analyzing the relationship between the safety factor of slopes and the lateral movement of bridge abutments. Precise investigation and analyses are performed on thirty cases, in which the lateral movement of bridge abutments has occurred. The slope stability analysis considering lateral movement of bridge abutments and the slope stability effect of foundation piles have been carried out by using SLOPILE(Ver 2.0) program. As the results of this study, it is known that the lateral movement of bridge abutments may occur when the safety factor of slope estimated by considering the measured lateral movement is less than either 1.5 in case without the pile effect or 1.8 in case with the pile effect. The lower criterion on allowable lateral movement of bridge abutments produces the lower contributing effect of foundation piles on slope stability.

요 지

본 연구의 목적은 교대가 설치된 지반의 사면안전율과 교대측방변위의 관계를 분석하여 교대의 측방이동 판정기준을 마련하고자 함에 있다. 이를 위하여 국내의 연약지반에 설치된 30개 교대의 측방이동사례를 조사하고, SLOPILE(Ver 2.0)프로그램을 이용하여 교대의 측방변위와 교대기초말뚝의 사면안정효과를 고려한 사면안정해석을 실시한다. 해석결과 교대기초말뚝의 실측측방변위를 고려할 경우 사면의 소요안전율은 말뚝의 효과를 고려하지 않은 경우 1.5이상, 교대기초말뚝의 효과를 고려한 경우 1.8이상되어야 한다. 또한, 교대기초말뚝의 허용측방변위량에 따른 사면안정 해석결과, 교대의 허용측방변위가 작게 규정될수록 사면안정성에 기여하는 말뚝의 효과는 감소하고 있음을 알 수 있다.

Keywords : Allowable lateral movement, Bridge abutment, Lateral flow, Pile, Safety factor of slope, Soft ground, Stability

1. 서 론

최근 우리나라는 급속한 산업의 발달과 경제규모의 확대에 따라 증가되는 산업물량을 신속하게 수송하기 위하여 전국 각지에 고속도로와 산업도로의 건설이 활발하

게 전개되고 있다. 이러한 도로건설공사는 지반조건이 양호한 산악지역에서 뿐만아니라 연약점성토층이 두텁게 분포되어 있는 서남해안지역에서도 빈번히 실시되고 있다. 연약지반상에 도로를 건설하게 될 경우 성토하중으로 인하여 연약지반에는 침하와 측방유동이 발

*1 정희원, 중앙대학교 공과대학 건설환경공학과 교수
 *2 정희원, 중앙대학교 대학원 토목공학과 박사과정
 *3 정희원, (주)이엔지건설엔지니어링 대표이사
 *4 정희원, (주)이엔지건설엔지니어링 기술연구소 과장

발생하게 된다. 특히, 연약지반상에 교대가 설치되는 경우에는 연약지반의 측방유동에 의해 교대기초말뚝에 측방토압이 작용하게 된다. 이로 인하여 교대기초말뚝이 수평으로 이동하게 되어 교대가 측방으로 이동할 뿐만 아니라 상부구조물에도 악영향을 미치게 된다. 이러한 교대의 측방이동현상은 국내에서도 조사된바 있다(홍원표 외 3인, 1994; 한국도로공사, 1996).

교대의 측방이동현상은 교대가 설치된 위치의 연약지반에 대하여 지반개량공법을 실시하지 않고, 교대축조 및 뒤채움성토를 실시함으로써 발생된다. 연약지반에 설치되는 교대기초말뚝은 전형적인 수동말뚝임에도 불구하고 설계단계에서 기초말뚝이 수동말뚝으로 설계되지 않아 시공이 완료된 후 수많은 교대에 과대한 측방변위가 발생되고 있다(홍원표 외 3인, 1991; 1994). 이러한 원인은 합리적인 설계법이 확립되어 있지 않고, 구조물이 측방토압을 받는지의 여부를 판정하기가 곤란하여 측방유동을 고려한 설계를 하기 어려웠기 때문이다.

최근에는 교대의 측방이동에 관한 연구가 많이 수행되고 있으며, 일부는 설계단계에서 교대기초말뚝에 대한 검토를 실시할 수 있게 되었다. 이들 연구에서는 주로 사면안전율(木村, 1982; 홍원표 외 3인, 1991; 1994), 측방유동지수(高速道路調査會, 1981), 측방이동판정지수(建設省土木研究所, 1981) 및 안정계수(Tschebotarioff, 1973) 등으로 교대측방이동 여부를 판정하고 있다. 필자도 교대기초말뚝의 휨응력이나 전단응력이 허용응력 이내가 되는 경우를 대상으로 사면안정해석을 실시한 바 있다(홍원표 외 3인, 1991). 이러한 경우 해석결과에 의한 교대의 이론적 측방변위는 허용측방변위보다 더 크게 된다. 그러나, 교대는 교량의 상부구조물과의 연결관계에 있어서 교대의 측방변위가 엄격히 억제되어야 하는 구조물이다. 따라서, 교대가 허용측방변위내에 존재하는 경우에 대한 사면안정성도 동시에 만족되어야 할 것이다.

따라서, 본 연구에서는 국내의 연약지반에 설치된 교대의 측방이동사례를 대상으로 교대의 측방변위를 고려한 교대의 안정성을 검토하고자 한다. 이러한 연구를 수행하기 위하여 우선 교대의 허용측방변위 및 교대기초말뚝의 사면안정효과를 고려할 수 있는 전산프로그램을 개발한다. 개발된 프로그램을 이용하여 교대기초말뚝의 응력만을 고려한 경우와 교대기초말뚝의 실측 측방변위 및 허용측방변위를 고려한 경우에 대한 사면안정해석을 실시한다. 각각의 해석결과를 비교 분석하

여 국내 교대측방이동 판정기준을 확립하고자 한다.

2. 교대기초말뚝의 안정해석법

2.1 교대의 측방이동

최근에는 교량을 지지하기 위한 교대, 항만시설을 위한 잔교 및 도로의 성토 등이 연약지반상에 실시되는 경우가 많아지고 있다. 그러나, 이러한 구조물이 연약지반상에 축조될 경우, 교대나 잔교의 배면 뒤채움이나 도로의 성토 등은 하부지반에 편재하중으로 작용하게 되어 지반의 측방유동을 유발한다. 또한, 뒤채움이나 성토로 형성된 사면지반의 안정 측면에서도 매우 불안정하게 되는 경우가 많다. 이와 같은 측방유동이 발생할 가능성이 보이는 연약지반에 교대기초말뚝이 설치되어 있으면 말뚝은 지반으로부터 측방토압을 받게 된다. 통상적으로 말뚝이 수평으로 이동하려면 지반으로부터 저항을 받게 된다. 그러나, 불안한 사면지반에서는 기초말뚝이 측방토압에 저항하여 줄 수 있는 지반의 저항력도 크게 부족하게 되어 상부구조물은 수평으로 이동할 수 밖에 없게 된다. 결국, 이러한 현상은 상부교량에 막대한 피해를 주게되어 그 대책이 마련된 예가 많이 보고되고 있는 실정이다(홍원표 외 3인, 2000).

이러한 교대의 피해는 크게 두 가지로 구분된다. 하나는 교대가 기초말뚝과 함께 교량구조물쪽으로 측방변위가 발생하여 교량의 Girder에 균열이 발생하는 경우이며 다른 하나는 교대본체 응력이 뒤로 기울어져 Girder가 추락한 경우이다.

교대기초말뚝의 안정은 교대배면 뒤채움의 편재하중에 의하여 발생하는 지반의 측방토압과 사면안전율 등에 많은 영향을 받게 된다. 따라서, 홍원표 외 3인(1991)은 소성변형지반속 말뚝의 측방토압산정 이론식을 이용하여 기초말뚝의 사면안정효과 등을 고려한 교대기초말뚝의 해석법을 제안한바 있다.

2.2 교대기초말뚝의 안정해석

교대기초말뚝의 설계시에는 사면의 안정검토와 말뚝의 안정검토가 반드시 실시되어야만 한다. 불안한 사면지반에 말뚝이 일렬로 설치되어 있으면 이 말뚝은 사면활동을 방지하는 역할을 하게 된다. 한편 이 경우 말뚝은 사면활동면 상부의 토괴로부터 측방토압을 받게 된

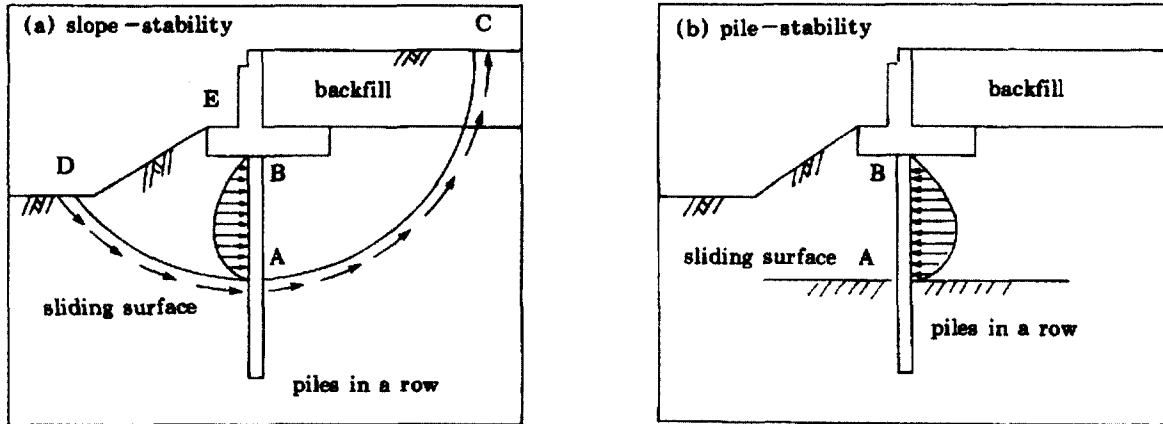


그림 1. 교대기초말뚝이 설치된 지반의 안정 (홍원표 외 3인, 1991)

다. 이 문제를 해석하기 위해서는 이 말뚝의 측방토압을 정확하게 산정하여 말뚝의 사면활동 저지능력 및 말뚝의 거동에 관한 분석을 정확하게 하여야만 한다. 그러나, 말뚝에 작용하는 측방토압의 발생기구는 복잡하기 때문에 정확하게 산정하기가 매우 어려워 강성벽에 사용하는 고전적 토압론에 의거한 토압산정식을 사용하고 있는 실정이다.

일반적으로 말뚝이 설치된 사면안정 문제에 있어서는 사면의 안정과 말뚝의 안정에 대한 두가지의 해석이 그림 1에서와 같이 실시되어야 한다. 왜냐하면 말뚝이 설치된 사면의 전체안정은 사면과 말뚝 모두의 안정이 확보되었을 경우에만 비로소 가능하기 때문이다.

만약, 말뚝에 작용하는 측방토압(혹은 붕괴토괴에 저항하는 말뚝의 저항력)이 알려져 있다면, 먼저 말뚝의 안정이 수평하중을 받는 말뚝(주동말뚝)의 해석법을 응용하여 그림 1(b)와 같이 검토될 수 있다. 그러나, 주동말뚝의 경우는 수평하중이 말뚝머리 부분에 집중하중으로 작용하나 수동말뚝은 사면파괴면 상부의 측방변형지반을 통하여 말뚝에 분포하중으로 작용하게 됨으로 이를 유의하여야 한다. 이상의 말뚝안정계산에서 말뚝의 안정이 확보되면 사면의 안정 계산이 그림 1(a)에서와 같이 파괴면의 전단저항 및 말뚝의 저항력을 고려하여 실시될 수 있다. 이와 같은 교대기초말뚝의 해석법은 이미 홍원표 외 3인(1991)에 의하여 발표된 바 있다.

기존의 연구에서는 교대측방변위가 크게 발생하더라도 교대기초말뚝은 항상 동일한 사면안정효과를 갖는 것으로 되어 있다. 이것은 교대기초말뚝의 안정해석시 교대측방변위를 고려할 수 없음을 의미한다. 그러나, 실제로 교대측방변위가 발생하게 되면 교대기초말뚝에서는 소성영역이 발생되며, 이로 인하여 교대기초말뚝의

지지기능은 감소하게 된다. 즉, 교대측방변위가 과도하게 발생하게 되면 교대기초말뚝의 사면안정효과는 감소하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 교대기초말뚝의 안정해석시 교대측방변위를 고려할 수 있는 해석이 가능하도록 하였다.

3. 해석프로그램(SLOPILE) 개발

3.1 SLOPILE 프로그램의 개요

역지말뚝 효과를 고려하여 사면의 안정을 해석할 수 있는 프로그램에는 CHAMP(ver 1.0)와 SPILE(ver 1.0)이 있다. CHAMP는 교대기초말뚝의 안정해석용으로 개발된 해석프로그램이다. 즉, 측방유동이 발생할 가능성이 있는 연약지반에 일정간격으로 설치한 말뚝위에 교대를 설치하고 배면에 뒤채움을 실시할 경우의 교대안정검토용 프로그램이다. 또한, 잔교기초말뚝과 벽강관안벽의 사면안정효과를 검토할 경우에도 활용된다. 한편, SPILE은 말뚝의 사면안정효과를 고려한 산사태 역지말뚝 해석프로그램으로 산사태를 방지하기 위한 역지말뚝공의 설계를 실시할 수 있다. 즉, 구릉지에서의 도로건설이나 택지개발시 발생하는 절·성토사면 및 자연사면에서의 사면활동을 파괴면이 토사층과 암층(풍화암) 사이에서 발생된 무한사면의 파괴형태로 취급하여 사면안정성을 검토하고, 사면안정성이 부족한 경우 역지말뚝으로 보강하기 위한 해석프로그램이다. 또한, 본 프로그램은 임의 형태의 파괴면을 설정할 수 있으며 어떤 형태의 파괴면에 대하여도 그 파괴면의 형태를 입력시켜 사면안정율을 계산할 수 있는 특징이 있다. 이 프로그램을 사용하여 산사태 발생가능지역에 안전

한 억지말뚝의 합리적 설계가 가능하고 이를 통해 인위적인 요인으로 말미암아 발생하는 산사태 피해를 방지할 수 있다.

말뚝 효과를 고려한 기존의 사면안정해석 프로그램인 CHAMP와 SPILE을 개선하여 새로운 프로그램 SLOPILE (Ver 2.0)을 개발하였다. 본 프로그램은 말뚝이 설치된 절·성토사면 및 자연사면에 대한 원호파괴해석(Fellenius 법, Bishop간편법) 및 평면파괴해석이 가능하도록 하였다. 그리고, 교대측방변위를 고려한 교대안정해석도 가능하도록 하였다.

3.2 SLOPILE 프로그램의 구성

본 프로그램에서는 통상적인 사면안정해석법에 말뚝의 효과를 고려할 수 있게 되어있다. 즉, 가상원호활동면을 기준으로 활동면 상부의 활동도괴로부터 줄말뚝

에 작용하는 측방토압을 산정하여 말뚝의 안정해석을 실시하며, 말뚝이 저항할 수 있는 측방토압만을 저항력으로 활용하여 사면안전을 계산에 말뚝의 저항력을 추가시켜 사면안정의 기여도를 평가할 수 있도록 되어있다. SLOPILE프로그램의 흐름도는 그림 2와 같다.

먼저, 해석대상사면의 해석을 위해 전체 사면을 일정한 분할요소로 구분한 후 사면안정해석법을 선택한다. 그리고, 설정된 사면안정해석법에 따라 무한사면해석과 원호파괴해석으로 구분하여 실행되도록 하였다. 원호파괴면 해석법의 경우 가상원호활동면의 원점으로 예상되는 부분에 원점망을 작성하여 원점망의 각 절점을 중심점으로 한 무수한 가상원호활동면에 대하여 사면안전을 계산을 반복하여 최소사면안전율이 구하여지는 원점과 가상원호활동면을 찾는다. 사면안전을 계산은 한계평형원리에 입각한 절편법을 사용하였고, 각각의 가상원호활동면에 대하여 사면의 활동모멘트와 지반의 전단저항에 의한 저항모멘트를 계산하여 기억시킨다. 교대기초말뚝이 설치되어 있지 않으면 곧바로 활동모멘트와 저항모멘트로 사면안전을 계산한다. 그러나, 교대기초말뚝이 설치되어 있으면, 먼저 줄말뚝에 작용하는 측방토압식을 사용하여 측방토압을 산정한다. 그 다음으로 원호활동면상부의 말뚝부분은 활동도괴로부터 측방토압을 받게된다. 이 측방토압에 의해 발생할 말뚝의 측방변위에 대하여 말뚝이 지반으로부터 지반반력을 받도록 한 상태에서 말뚝두부와 선단의 구속조건을 고려하여 말뚝의 강성매트릭스를 구성한다(홍원표 외 3인, 1991). 단, 이 지반반력은 지반반력의 상한치를 두어 극한지반반력 범위내에서만 지반반력을 받는 것으로 한다.

말뚝의 휨응력과 전단응력을 계산하여 말뚝의 안전율을 계산한다. 만약 말뚝의 안전율이 소요안전율보다 낮으면 측압부가계수를 수정하여 말뚝의 측방토압을 줄여 계산을 반복한다. 또한, 말뚝의 안전율이 소요안전율보다 높으면 말뚝의 허용변위량을 검토한다. 여기서 계산된 말뚝의 변위량이 허용변위량을 초과하게 되면 앞에서와 동일하게 측압부가계수를 수정하여 말뚝의 측방토압을 다시 줄여 계산을 반복한다. 이러한 작업을 말뚝의 안전율이 소요안전율 이내가 되고, 말뚝의 변위량이 허용변위량 이내가 될 때까지 반복한다.

말뚝의 변위량이 허용변위량 이내가 되면 말뚝의 안정에 사용한 측방토압을 적용하여 가상원호활동면의 원점을 기준으로 추가적인 저항모멘트를 구한다. 사면

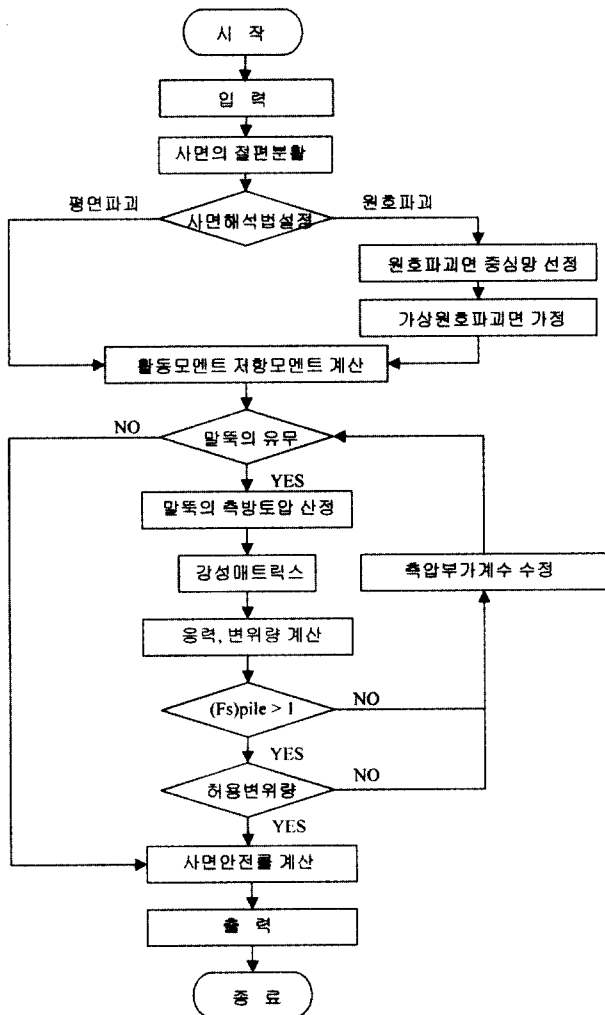


그림 2. SLOPILE 프로그램 흐름도

안전율을 계산시 구하였던 사면파괴면에서의 전단저항에 의한 저항모멘트에 말뚝에 의한 저항모멘트를 가산하여 사면안전율을 계산함으로써 말뚝의 사면안정효과를 산정한다.

이러한 계산작업은 다른 가상원호활동면에 대하여도 반복 실시하여 한 원점에 대한 무수한 가상원호활동면 중 최소안전율을 가지는 활동면과 안전율을 구한다. 또한, 이 원점을 원점망상의 각 절점으로 이동시키면서 동일한 계산을 반복한다.

3.3 SLOPILE 프로그램의 사용방법

SLOPILE은 WINDOWS를 기반으로 제작된 프로그램으로 WINDOWS에서 적용되는 장점들, 예를 들어 멀

티태스킹(Multitasking)의 지원, 그래픽 디바이스 인터페이스(GDI), 시각적인 환경 등을 갖추고 있기 때문에 기존 DOS용 프로그램인 CHAMP, SPILE에서 나타난 사용상의 어려움을 SLOPILE에서는 쉽게 해결할 수 있다. 데이터의 입력 및 수정을 화면상 메뉴에서 제시하는 방식에 의거 쉽게 작성할 수 있으므로 데이터 입력시의 에러를 최소화 할 수 있다. 또한, 출력 및 해석결과를 화면에서 즉시 확인할 수 있으므로 쉽게 수정하여 원하는 해석결과를 얻을 수 있다.

4. 교대의 측방이동 사례

최근에 연약지반에 건설되었거나 건설중인 교량의 교대에서 과도한 측방변위발생이 상당수 보고되고 있

표 1. 사례현장의 교대현황

번호	교대번호	성토고 (m)	연약층두께 (m)	비배수전단강도(t/m ²)	실측변위 (cm)
1	D11	4.2	20.1	2.50	6.0
2	D12	5.1	14.1	2.50	5.0
3	J02	11.0	26.3	0.62	9.5
4	K01	12.5	18.7	5.50	10.0
5	K02	8.7	17.7	4.40	3.2
6	K03	5.0	17.0	4.00	1.0
7	NS1	5.0	11.0	1.98	7.0
8	NS3	4.1	24.6	3.46	1.0
9	R01	7.3	4.8	2.02	5.0
10	S11	5.6	16.5	3.36	3.7
11	S12	6.0	12.0	2.97	1.0
12	S41	12.7	19.5	3.20	3.8
13	S42	12.2	19.2	3.20	7.5
14	S43	11.7	15.5	6.00	0.6
15	S44	11.4	16.7	3.50	6.5
16	Y11	6.0	14.0	2.50	0.6
17	Y12	7.9	12.0	4.45	0.4
18	Y13	9.8	7.3	2.50	3.0
19	Y14	9.4	13.1	1.25	6.0
20	Y15	10.8	7.3	4.37	0.5
21	Y16	13.2	13.1	4.25	0.8
22	Y21	8.6	40.1	4.18	8.1
23	Y25	7.1	35.0	3.84	0.0
24	Y26	8.5	33.0	4.15	0.0
25	Y27	8.4	40.1	5.11	0.0
26	Y28	9.6	40.1	4.13	0.0
27	Y31	7.5	25.2	4.49	0.0
28	Y51	9.4	11.4	2.10	2.5
29	Y52	10.5	12.0	3.90	0.7
30	Y53	7.1	15.8	3.20	1.2

표 2. 사례현장의 교대 및 기초말뚝의 제원

번호	교대번호	교 대			기초말뚝						
		형식	길이 (m)	폭 (m)	재료	직경 (mm)	두께 (mm)	길이 (m)	간격 (m)	열수	열간격 (m)
1	D11	역T형	5.0	18.5	강관	406	9	24.7	1.0	4	1.0
2	D12	역T형	5.0	18.5	강관	406	9	17.6	1.0	4	1.0
3	J02	역T형	4.4	9.6	강관	406	9	33.5	1.4	3	1.6
4	K01	뒷부벽식	9.1	28.5	강관	508	9	25.0	1.5	6	1.5
5	K02	뒷부벽식	8.6	29.5	강관	508	9	29.0	1.4	6	1.4
6	K03	뒷부벽식	4.4	25.5	강관	508	9	22.0	1.5	2	2.75
7	NS1	역T형	2.95	24.8	강관	609	9	29.0	1.55	2	1.5
8	NS3	역T형	4.0	25.4	강관	406	9	29.0	1.4	3	1.4
9	R01	역T형	4.4	8.5	강관	406	9	21.0	1.3	4	1.2
10	S11	역T형	4.4	25.5	강관	508	9	29.8	1.0	2	2.4
11	S12	역T형	4.4	25.5	강관	508	9	29.8	1.0	2	2.4
12	S41	뒷부벽식	9.1	27.0	강관	508	9	24.3	1.0	6	1.4
13	S42	뒷부벽식	9.1	27.0	강관	508	9	24.3	1.0	6	1.4
14	S43	뒷부벽식	8.6	30.6	강관	508	9	29.0	1.0	6	1.32
15	S44	뒷부벽식	8.6	29.0	강관	508	9	26.8	1.0	6	1.32
16	Y11	역T형	3.8	44.3	강관	406	9	30.0	1.0	3	1.0
17	Y12	역T형	3.8	46.4	강관	406	9	30.0	1.0	3	1.0
18	Y13	역T형	5.7	33.8	강관	406	9	12.0	1.0	4	1.2
19	Y14	뒷부벽식	12.7	10.3	강관	406	9	21.5	1.0	7	1.7
20	Y15	역T형	5.7	33.8	강관	406	9	12.0	1.0	4	1.2
21	Y16	뒷부벽식	44.1	10.3	강관	406	9	21.5	1.0	33	1.3
22	Y21	역T형	5.3	12.1	강관	508	9	50.4	1.0	4	1.1
23	Y25	역T형	5.0	17.0	강관	508	9	40.0	1.0	3	1.5
24	Y26	역T형	5.0	17.0	강관	508	9	40.2	1.0	3	1.5
25	Y27	역T형	5.3	12.1	강관	508	9	50.4	1.0	4	1.1
26	Y28	역T형	5.3	12.1	강관	508	9	49.2	1.0	4	1.1
27	Y31	역T형	5.0	24.2	강관	914	14	59.4	1.0	2	1.5
28	Y51	역T형	5.0	28.2	강관	813	16	45.5	1.0	2	1.5
29	Y52	뒷부벽식	5.0	8.91	강관	813	16	43.0	1.0	2	1.5
30	Y53	역T형	5.0	8.91	강관	813	16	44.2	1.0	2	1.5

다. 국내의 교대측방이동에 관한 조사로는 홍원표 외 3인(1994)에 의해 6개 현장 12개 교대에 대하여 측방이동 사례가 분석된 연구 및 한국도로공사(1996)에서 140여개 교량의 교대중에서 40여개의 교대에서 측방변위가 발생된 것을 조사한 연구를 들 수 있다. 이러한 교대측방이동에 대한 원인으로는 설계시 연약지반의 측방유동에 대한 검토부족, 교대측방이동 및 판정법에 대한 이해 부족 등을 들 수 있다. 교대 설계시 해당 연약지반의 특성을 파악하여 연약지반의 측방유동이 예상될 때에는 교대기초말뚝의 설계를 주동말뚝 뿐만아니라 수동말뚝으로도 실시하여야 하며, 이에 따른 적절한 해석 및

대책공법을 적용함으로써 교대측방이동이 방지될 수 있다. 따라서, 연약지반에 축조되는 교대의 설계시에는 이들 교대의 측방이동현상에 대한 정확한 판정법 및 해석법의 확립이 필요하다.

본 연구에서는 국내에서 조사된 30개 교대의 측방이동 사례에 대한 자료를 토대로 교대의 측방변위를 적용한 경우에 대한 사면안전율의 판정기준을 검토하고자 한다. 본 연구에서 조사된 교대측방이동 사례현장의 교대현황과 기초말뚝의 현황은 각각 표 1 및 표 2에 정리하여 나타내었다.

5. 해석결과 및 고찰

5.1 사면안정해석

연약지반에 축조되는 교대의 측방변위발생에 영향을 미치는 요인으로는 교대배면의 성토고, 교대배면 성토재의 단위중량, 연약층의 전단강도, 연약층의 두께, 교대형식, 교대치수, 기초형식 및 기초의 강성 등이 있다. 기존의 교대측방이동 판정법들은 이들 요소중 일부를 조합하여 판정기준치를 정립하거나 사면안전율을 구하여 허용기준치와 비교함으로써 교대측방이동에 대한 판정을 실시하였다. 또한, 이들 판정법은 실제 교대측방이동사례 조사결과에 근거하여 제안된 판정법이므로 실용성이 우수한 것으로 판단된다. 따라서, 간편하게 교대의 측방이동여부를 검토하고자 할 경우 기존의 교대측방이동 판정법을 활용할 수 있을 것이다.

그러나, 교대기초말뚝의 설계를 실용적이고 계통적으로 실시하는 입장에서는 지반의 안정성을 우선적으로 극한평형문제로 취급하는 접근방식이 바람직하다고 판단된다. 즉, 교대의 측방이동판정 유무는 상기의 8가지 영향요소를 종합적으로 반영할 수 있는 지표로 통상적인 사면안전율을 생각할 수 있다. 따라서, 사면의 안전율에 의하여 교대의 측방이동 발생여부를 검토하는 것이 가장 효과적이라고 판단된다. 그 판정기준으로는 사면안전율이 소요안전율보다 큰 경우 측방유동은 발생하지 않은 것으로 한다. 즉, 사면안전율이 소요안전율보다 크면 수동말뚝으로 검토할 필요가 없어지게 되어 주동말뚝만으로 설계되고 사면안전율이 소요안전율보다 작으면 수동말뚝으로도 검토가 필요하게 된다. 따라서, 교대측방이동의 판정 및 실용적 설계를 위하여 소요안전율의 정립이 필요하다고 판단된다. 소요안전율에 대한 현재까지의 연구결과로는 국외의 경우 Marche(1973)가 제안한 1.4, 일본 수도고속도로공단(木村, 1982)에서 제안한 1.6 등이 있으며, 국내의 경우 홍원표 외 3인(1994)에 의해 제안된 1.5(말뚝효과 무시)와 1.8(말뚝효과 고려)이 있다. 홍원표 외 3인(1994)의 연구에서는 사면안정해석시 교대기초말뚝의 사면안정효과는 고려하고 있으나, 교대기초말뚝의 측방변위는 고려하지 못하고 있다. 즉, 말뚝의 안정해석시 교대기초말뚝의 휨응력이나 전단응력만을 고려하여 계산하고, 허용응력내의 말뚝의 효과를 사면안정해석에 도입하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 국내 교대측방이동사례에 대

하여 교대기초말뚝의 응력만을 고려한 경우와 교대기초말뚝의 실측측방변위 및 허용측방변위를 고려한 경우에 대한 사면안정해석을 실시하여 비교 검토하고자 한다. 이러한 해석을 통하여 각각의 해석결과를 비교 분석하고 설계에 적용할 수 있는 교대측방이동 판정기준을 제안하고자 한다.

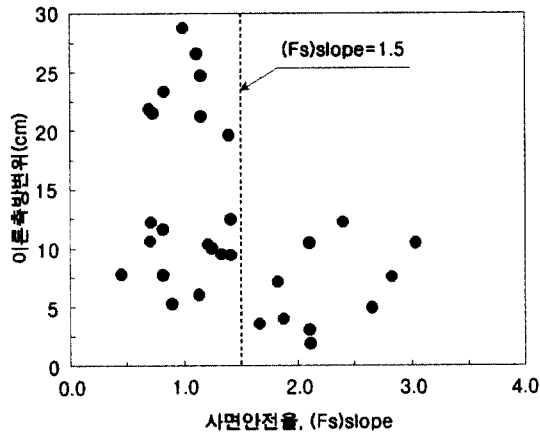
표 1에 정리된 30개 교대측방이동사례에 대한 사면안정해석은 본 연구에서 개발된 SLOPILE(Ver 2.0) 프로그램을 사용하여 실시한다. 사면안정해석법으로는 Bishop 간편법을 적용하여 실시한다.

측방유동지반상 교대에 대한 안정해석을 실시할 경우 교대기초말뚝의 사면안정효과와 교대의 측방변위가 고려되어야 한다. 따라서, 교대기초말뚝의 사면안정효과와 실측측방변위 및 허용측방변위를 고려한 사면안정해석을 각각 실시한다.

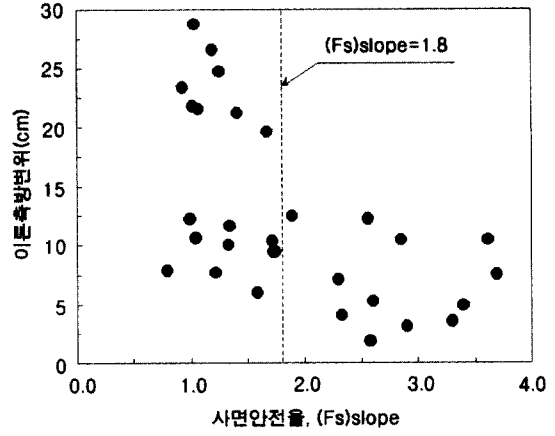
먼저 교대기초말뚝의 응력만을 고려한 경우의 사면안정해석을 실시한다. 이 경우 사면안정해석은 교대기초말뚝의 효과를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우로 나누어 실시한다. 그리고, 실측된 교대의 측방변위가 발생할 경우에 대한 사면안정성을 해석 추정한다. 마지막으로 교대의 허용측방변위가 1.5cm 및 5.0cm인 경우에 대한 사면안정해석을 실시한다. 즉, 교대의 측방변위가 1.5cm 및 5.0cm가 될때까지만 교대기초말뚝이 사면안정효과를 가진다고 생각하여 사면안정해석을 실시한다.

5.2 교대기초말뚝의 응력을 고려한 사면안정해석

앞절의 교대측방이동사례에 대하여 교대기초말뚝의 응력만을 고려한 경우의 사면안정해석결과는 그림 3과 같다. 그림의 횡축에는 교대기초말뚝의 응력만을 고려하여 구한 사면안전율을 도시하고, 종축에는 해석결과에 의한 교대기초말뚝의 이론적 측방변위를 도시하였다. 우선, 그림 3(a)는 교대기초말뚝의 사면안정효과를 고려하지 않은 경우의 사면안정해석결과이다. 그림 3(a)를 살펴보면 사면안전율 1.5이하에서 교대기초말뚝의 이론적 측방변위가 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 한편, 그림 3(b)는 교대기초말뚝의 사면안정효과를 고려한 경우의 사면안정해석결과이다. 그림 3(b)를 살펴보면 사면안전율 1.8이하에서 교대기초말뚝의 이론적 측방변위가 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 이들 해석결과에 의하면 교대기초말뚝의 이론적 측방변위는 1.8~28.7cm의 크기를 갖는 것으로 나타났다.

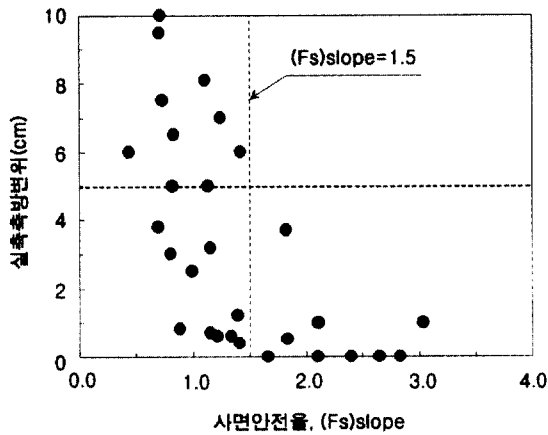


(a) 말뚝효과를 무시한 경우

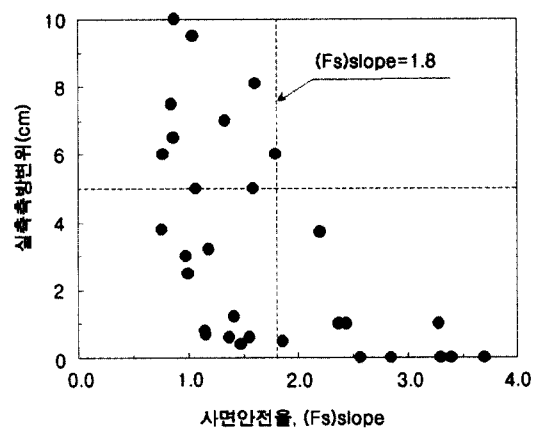


(b) 말뚝효과를 고려한 경우

그림 3. 교대기초말뚝의 응력만을 고려한 사면안정해석결과



(a) 말뚝효과를 무시한 경우



(b) 말뚝효과를 고려한 경우

그림 4. 교대기초말뚝의 실측측방변위를 고려한 사면안정해석결과

따라서, 교대기초말뚝의 응력만을 고려한 경우의 사면안전율은 말뚝효과를 고려하지 않은 경우 1.5이하, 말뚝효과를 고려한 경우 1.8이하에서 교대기초말뚝의 이론적 측방변위가 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 기존의 홍원표 외 3인(1994)에 의해 연구된 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

5.3 교대기초말뚝의 측방변위를 고려한 사면안정해석

앞에서 교대기초말뚝의 측방변위를 이론적으로 산정한 결과 이들 30개 교대에서 1.8cm~28.7cm로 크게 발생되었다. 그러나, 실제 발생한 실측측방변위는 10cm이 내로 발생되었음을 표 1에서 알 수 있다. 이와 같은 이론치와 실측치에 차이가 발생하고 있는 이유는 여러 가지들을 들 수 있을 것이다. 예를 들어, 현재도 측방변위가

발생되어 중국적으로 계속하여 발생할 수도 있으며 시공중 일부 보강이 실시된 경우도 들 수 있다. 그러나, 만약 이러한 요인이 없다고 한다면 응력만으로 말뚝의 안정을 검토할 경우 말뚝의 측방변위는 과다 산정될 우려가 있다고 할 수 있을 것이다. 따라서, 이번에는 교대의 실측측방변위를 기준으로 하여 현재의 사면안정성을 추측하여 보기로 한다.

교대기초말뚝의 실측측방변위를 고려한 경우의 사면안정해석결과는 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 그림 4의 횡축에는 교대기초말뚝의 실측측방변위를 고려하여 구한 사면안전율을 도시하였고, 종축에는 현장에서 실측된 교대기초말뚝의 측방변위를 도시하였다. 우선, 그림 4(a)는 교대기초말뚝의 사면안정효과를 고려하지 않은 경우의 사면안정해석결과이다. 그림 4(a)를 살펴보면 사면안전율 1.5이하에서 교대기초말뚝의 측방변위가

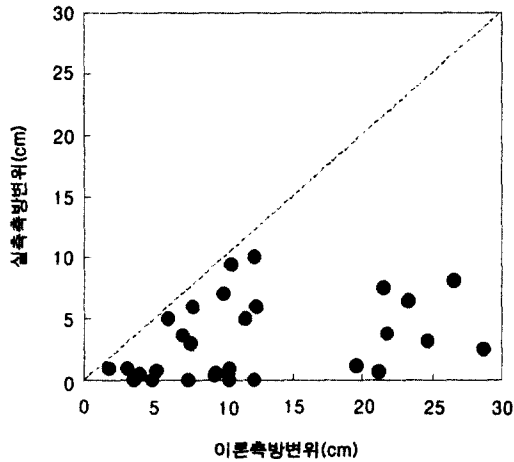


그림 5. 실측측방변위와 이론측방변위의 비교

급격히 증가하는 것으로 나타났다. 한편, 그림 4(b)는 교대기초말뚝의 사면안정효과를 고려한 경우의 사면안정 해석결과이다. 그림 4(b)를 살펴보면 사면안전을 1.8이하에서 교대기초말뚝의 측방변위가 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 따라서, 현장에서 발생하는 교대기초말뚝의 허용측방변위를 5.0cm라고 한다면 교대기초말뚝의 효과를 고려하지 않은 경우 사면안전율은 1.5이상, 교대기초말뚝의 효과를 고려한 경우 사면안전율은 1.8 이상이 되어야 안전하다고 할 수 있을 것이다. 이는 소요 사면안전율의 기준측면에서 보면 교대기초말뚝의 응력만을 고려하여 해석한 그림 3의 결과와 유사함을 알 수 있다.

그림 5는 교대기초말뚝의 응력만을 고려하여 해석한 경우에 교대기초말뚝의 이론적 측방변위와 실측된 교대기초말뚝의 측방변위를 비교한 결과이다. 그림 5의 종축에는 교대기초말뚝의 실측측방변위를 도시하고, 횡축에는 교대기초말뚝의 이론측방변위를 도시하였다. 그림 5에서 중앙의 점선은 교대기초말뚝의 실측측방변위와 이론측방변위가 동일한 값을 갖는 경우에 해당한다. 그림 5를 살펴보면 모든 점들은 점선의 하부측에 도시되어 있는 것으로 나타났다. 즉, 실측된 교대기초말뚝의 측방변위는 교대기초말뚝의 응력만을 고려하여 구한 이론적 측방변위보다는 작은 값을 갖는다.

위의 결과로부터 교대기초말뚝의 응력만을 고려하여 사면안전을 계산하면 교대기초말뚝의 측방변위는 과다산정되는 것으로 나타났다. 따라서, 교대기초말뚝의 안정성은 교대기초말뚝의 응력보다 측방변위를 기준으로 판정함이 합리적이라고 판단된다. 즉, 연약지반상 교대측방이동 안정검토시에는 시방서 등에서 제시된 허

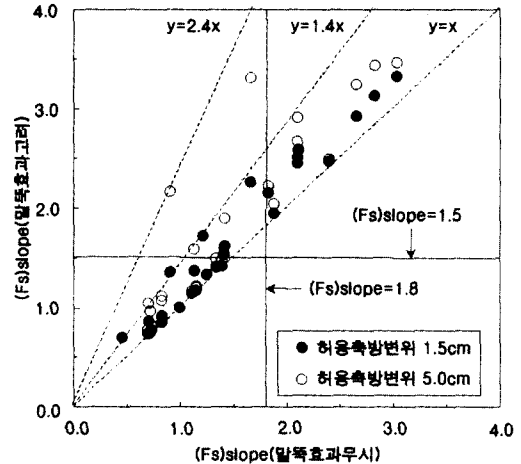


그림 6. 교대기초말뚝의 허용측방변위량에 따른 사면안전을 비교

용측방변위를 고려하여 사면안정해석을 실시하여야 할 것으로 생각된다.

5.4 허용측방변위량에 따른 사면안전율의 변화

앞에서 설명한 바와 같이 교대측방이동 검토를 위한 사면안정해석시 교대기초말뚝의 측방변위를 고려하여 해석을 실시하는 것이 타당함을 알 수 있었다. 일반적으로 시방서에서는 교대의 허용측방변위를 설정하여 교량상부구조의 안정성을 확보하도록 하고 있다. 이 허용측방변위로는 1.5cm 혹은 5.0cm를 주로 사용하고 있다. 이 경우 설계에 있어서는 교대기초말뚝의 측방변위가 1.5cm 혹은 5.0cm로 발생될 때까지 말뚝의 사면안정효과를 고려하는 것이 가능하다. 따라서, 본 절에서는 허용측방변위량의 변화에 따른 사면안전율의 변화상태를 검토하여 보고자 한다.

그림 6은 교대기초말뚝의 허용측방변위량의 변화에 따른 사면안전율의 변화를 도시한 결과이다. 그림 6은 교대기초말뚝의 사면안정효과를 무시한 경우와 이를 고려한 경우를 서로 비교한 결과이다. 즉, 그림 6의 종축에는 교대기초말뚝의 사면안정효과를 고려한 경우의 사면안전율을 도시하고, 횡축에는 교대기초말뚝의 효과를 무시한 경우의 사면안전율을 도시하였다. 그림 6에서 중앙의 점선은 교대기초말뚝의 효과를 무시한 사면안전율과 교대기초말뚝의 효과를 고려한 사면안전율이 같은 경우를 나타낸 것이다. 그림 6을 살펴보면 모든 점들은 중앙 점선($y=x$)의 상부측에 위치하는 것으로 나타났다. 이는 교대기초말뚝의 사면안정기여효과에 의하여 사면안전율이 향상하였음을 의미한다. 교대의 허용측방

변위를 5.0cm로 규정할 경우가 교대의 허용측방변위를 1.5cm로 규정할 경우보다 사면안전율이 더 크게 나타났다. 이에 대한 회귀분석결과 교대의 허용측방변위를 각각 1.5cm 및 5.0cm로 규정할 경우 교대기초말뚝의 효과를 고려한 경우의 사면안전율은 이를 무시한 경우의 사면안전율보다 각각 1.12배 및 1.23배 더 큰 것으로 나타났다. 그리고, 그림 6에서 점선으로 표시한 상한치를 조사하여 보면 교대의 허용측방변위가 각각 1.5cm 및 5.0cm일 경우 교대기초말뚝의 효과를 고려한 사면안전율은 이를 무시한 사면안전율보다 각각 1.4배 및 2.4배로 나타났다. 따라서, 교대의 허용측방변위가 작을수록 사면안정성에 기여하는 교대기초말뚝의 효과가 감소함을 알 수 있다. 결국, 교대의 허용측방변위를 엄격하게 적용할수록 교대기초말뚝의 사면안정성에 대한 기여도는 감소하는 경향을 보인다.

6. 결론

본 연구에서는 교대측방이동 여부를 판정하기 위하여 사면안정해석시 교대기초말뚝의 사면안정효과와 측방변위를 고려할 수 있는 전산프로그램 SLOPILE(Ver 2.0)을 개발하였다. 개발된 프로그램을 이용하여 국내 30개 교대측방이동 사례현장에 대한 사면안정해석을 실시하고 사면안전율과 교대측방변위량의 상관관계를 검토하였다. 이 결과를 토대로 합리적인 교대측방이동의 안정성 검토방법과 교대설계시 적용가능한 교대측방이동 판정기준을 제안하였다. 이상의 본 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 교대측방이동에 대한 안정성 검토를 위하여 사면안정해석을 실시할 경우 교대기초말뚝의 사면안정기여효과와 교대의 측방변위는 반드시 고려되어야 하며, 개발된 전산프로그램 SLOPILE(Ver 2.0)에서는 이들 사항을 합리적으로 고려할 수 있다.
- (2) 교대기초말뚝의 응력에 대한 안정성만을 고려하여 사면안정해석을 실시할 경우 교대의 측방변위는 과다산정되므로 교대기초말뚝의 안정성은 말뚝의 응력보다 측방변위를 기준으로 판정함이 합리적이다.

- (3) 교대기초말뚝이 설치된 위치지반의 사면안정해석에서 소요사면안전율은 말뚝의 사면안정효과를 무시한 경우 1.5이상, 말뚝의 사면안정효과를 고려한 경우 1.8이상이 되어야 교대의 측방이동에 대하여 안전하다.
- (4) 교대기초말뚝의 허용측방변위량에 따른 사면안정해석결과 교대의 허용측방변위량이 작게 규정될수록 교대기초말뚝의 사면안정에 대한 기여효과는 감소한다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단에서 지원하는 2000년도 산학협력연구과제(2000-31100-002-1)에 의하여 실시된 연구(말뚝이 설치된 사면의 안정해석 프로그램개발 연구)의 결과임을 밝히며 동 기관에 감사의 뜻을 전하는 바이다.

참고 문헌

1. 한국도로공사 (1996), 교대변위 억제대책에 관한 연구(II).
2. 홍원표, 권오현, 한중근, 조성한 (1994), "연약지반상 교대의 측방이동에 관한 연구", 한국지반공학회는논문집, 제10권, 제4호, pp.53-65.
3. 홍원표, 송영석, 윤중만, 이승주 (2000), "연약지반상 교대측방이동에 대한 사례연구", 2000년도 대한토목학회 학술발표회 논문집(II), pp.239-242.
4. 홍원표, 이우현, 안종필, 남정만 (1991), "교대기초말뚝의 안정", 대한토질공학회지, 제7권, 제2호, pp.67-79.
5. Marche, R. (1973), Discussion, Specialty Session 5, Proc. 8th ICSMFE, Moscow, pp.247-252.
6. Tschebotarioff, G. P.(1973), "Lateral pressure of clayey soils on structures", Proc, 8th ICSMFE, Special session 5, Moscow, Vol. 4.3, pp.227-280.
7. 建設省土木研究所 (1981), "橋臺の側方移動に關する研究", 土木研究所資料, 第1804號.
8. 高速道路調査會 (1981), 軟弱地盤上の橋臺移動に關する調査研究報告書.
9. 木村衛 (1982), "軟弱地盤上の橋臺の側方移動對策", 土と礎, Vol.30, No.5, pp.33-40.

(접수일자 2001. 3. 5)