

연약지반상 교대의 측방이동에 관한 연구

A Study on Lateral Movement of Bridge Abutment on Soft Ground

홍 원 표*¹ 권 오 현*²

Hong, Won-Pyo Kwon, Oh-Hyun

한 중 근*³ 조 성 한*⁴

Han, Jung-Geun Cho, Sung-Han

Abstract

In case of using pile foundation to support bridge abutments on soft ground, the soft ground often causes serious troubles such as lateral movement of the bridge abutments.

The foundation piles in soil undergoing lateral movement is one of the typical passive piles. However, Generally, on design of the piles for abutments, the piles have not been considered as a passive piles so far. Because it is difficult to assess the effect of the lateral movement on the design, and reasonable design method is not established yet.

In this study, several abutments, of which lateral movement was taken place, was investigated. Based on the investigation, a criterion was presented to assess the lateral movement of the soft soil under backfill for abutment. By use of the criterion, the lateral movement of abutment could be predicted. As the results of this study, it was known that the lateral movement of abutment could be occurred when the safety factor of slope stability is less than either 1.5(without the pile effect) or 1.8 (with the pile effect). Especially, excessive lateral movements were occurred when the safety factor of slope stability is less than either 1.0(without the pile effect) or 1.1 (with the pile effect).

요 지

연약지반에 위치한 교대의 기초로서 말뚝기초를 채택할 경우 교대배면의 연약지반에는 측방유동같은 문제등이 빈번히 발생하고 있다. 지반이 측방유동을 일으킬 경우 기초말뚝은 전형적인 수동말뚝임에도 불구하고 교대기초말뚝의 설계시 수동말뚝으로 설계되지 않고 있다. 이러한 이유로는 측방유동의 정확한 판정이 어려운 점과 현재까지 합리적인 설계법이 확립되지 않은점 등을 들 수 있다.

*¹정희원, 중앙대학교 공과대학 토목공학과 교수

*²정희원, (주) 두산엔지니어링 주식회사 토질부 이사

*³중앙대학교 대학원 토목공학과 박사과정

*⁴중앙대학교 대학원 토목공학과 석사과정졸

본 연구에서는 측방이동이 발생된 우리나라의 몇몇 교대를 조사하였다. 이 조사에 의거하여 연약지반의 측방유동 판정 및 교대의 측방이동을 예측할 수 있는 판정기준을 제시하고자 한다.

본 연구결과 사면안전율이 말뚝효과를 고려할 경우 1.8이하, 말뚝효과를 무시한 경우 1.5이하에서는 교대측방이동이 발생할 수 있는 것으로 나타났다. 특히 사면안전율이 말뚝효과를 무시한 경우 1.0이하, 말뚝효과를 고려할 경우 1.1 이하에서는 과대한 교대측방이동이 발생하는 것으로 나타났다. 또한 교대의 허용측방이동량을 5cm라고 하면 사면의 소요안전율은 1.4(말뚝효과를 무시한 경우) 혹은 1.6(말뚝효과를 고려한 경우) 이상이 되어야 한다.

1. 서 론

연약지반에 위치한 교대의 기초로서 말뚝기초를 채택할 경우 교대배면의 뒷채움에 의하여 지반은 침하와 함께 측방유동을 일으키는 사례가 빈번히 발생하고 있다. 이와 같은 현상은 원천적으로는 교량설치 지점의 기초지반이 매우 연약한 점성토로 구성되어 있어서 그 위에 재하되는 교대 배면의 성토에 의하여 발생가능하며 이로 인하여 상부교량 및 배면 노면에 피해를 주게 된다.

또한, 연약지반상의 기초말뚝은 전형적인 수동말뚝임에도 불구하고 교대설계단계에서 기초말뚝이 수동말뚝으로 설계되지 않은 연유로 건설 후 수많은 교대에 예상 이상의 측방이동이 발생하고 있다. 현재 기초말뚝에 대한 설계법에 있어서는 교대 자신에 작용하는 배면토압만을 대상으로 한 주동말뚝만으로 설계가 실시되고 지반의 측방유동에 의하여 기초말뚝에 작용하는 측방토압을 대상으로 한 수동말뚝으로서의 검토는 실시되지 않고 있다.

즉 지반의 측방유동으로 인하여 기초에 미치는 영향은 교대설계에 고려한 경우는 극히 드물며, 이와 같은 문제에 대한 인식자체가 미흡한 실정이다. 이러한 이유는 현재 합리적인 설계법이 확립되어 있지 않은 점에도 기인하지만, 구조물이 측방유동을 받는지의 여부를 판정하기가 곤란하여 측방유동을 고려한 설계를 하기 어려운 점이 있다.

이에 본 연구에서는 교대이동이 발생된 국내의 몇몇 자료를 검토하여 교대가 설치된 연약지반의 측방유동 및 교대의 측방이동 판정기준

을 마련하고자 한다.

2. 연약지반의 측방유동현상

2.1 측방유동현상

연약한 점성토지반상에 하중을 재하하면 지반 중에는 하중에 의한 응력이 증가하고 간극수압이 변화하여 체적이 수축되면서 지반의 침하가 발생한다. 그러나 간극수압의 소산에 필요한 충분한 시간이 지나기도 전에 계속적으로 하중을 증가시켜 지반내 과잉간극수압이 증가하게 되면 측방유동압이 발생하게 되므로 수평적인 측방변위가 발생되고 지표면의 융기가 발생하여 결국에는 활동파괴가 유발되어 구조물의 안정이 위태롭게 된다. 연약지반의 이러한 측방으로의 변형현상을 “측방유동”이라고 정의한다. 이러한 현상은 1969년에 Peck에 의해 처음으로 거론되었으며⁴⁾ 1973년에 Tschebotarioff가 모스크바에서 열린 국제토질기초회의 발표 과제로서 구조물에 작용하는 점성토지반의 측방토압을 취급하므로써 측방유동지반속에 말뚝 문제를 거론하였다.⁶⁾

일본에서는 연약지반상에 교대이동의 심각성을 해결하기 위하여 1973년 건설성기술연구회 공통부분 지정과제인 “편하중에 의한 구조물의 수평이동에 관한 연구”로 부터 측방유동지반에 설치된 교대의 측방이동 현상이 거론되었으며, 73~75년의 3년에 걸쳐 건설성토목연구소의 연구주제로 선정하여 연구가 추진되었다. 그후 76~78년까지 수도고속도로공단의 “초연약지반에서의 구조물설계법에 관한 조사

연구"가 계속되었다. 또한 일본 도로공단에서는 고속도로조사회를 통하여 "연약지반상의 교대기초에 관한 조사연구"를 1978~1981년까지 실시한 바 있다.⁷⁾

그러나 이 문제의 중요성에 대한 인식은 아직 일반적으로 미흡하며, 측방유동이 구조물에 미치는 영향을 설계에 고려하는 경우는 거의 없다. 이것은 설계법이 확립되어 있지 않은 것에 기인한다. 즉, 구조물이 측방변위의 영향을 받는지의 여부를 판정하기가 현재로서 어려우며 설계시에 측방변위를 고려하는 것이 대단히 어렵다. 그러나 최근의 연구성고가 축적되고 측방변위와 그 영향을 대상으로 어느 정도의 방향이 보여지고 있다.¹⁾

2.2 측방유동의 기존 판정법

1) 일본 수도고속도로공단법

연약지반 지층의 중량을 지나는 원호활동면의 안전율을 F_0 , 압밀침하량 δ_s 와의 관계에 의해 $F_0 \geq 1.6$ 및 $\delta_s < 10\text{cm}$ 이면 교대이동의 우려가 없고 $F_0 < 1.2$ 및 $\delta_s > 50\text{cm}$ 이면 교대이동의 우려가 있다.

2) 일본도로공단법(1979)

안정수 $c/\gamma H$ 를 연약층 두께(D)로 보정한 유동지수 F를 정의하여 $F = c/\gamma H \times 1/D < 4.0 \times 10^{-2}$ 이면 교대 이동발생으로 판단한다.

3) 건설성 토목연구소

안정계수 $\gamma H/c$ 를 연약층 두께 D, 기초판입 길이 ℓ , 기초체 폭의 총합 b(말뚝기초이면 말뚝기초의 총합), 교대폭 B, 교축방향 교대길이 A등으로 보정하는 판정수 I를 정의하여 판단한다.

$$I = \left(\frac{D}{\ell}\right) \left(\frac{b}{B}\right) \left(\frac{D}{A}\right) \left(\frac{\gamma H}{c}\right) \geq 1.2 \text{ 이면 이동.}$$

4) 캐나다법

미국, 캐나다의 수백개의 교대에 대한 조사 결과에서 수직변위 S_v 와 수평변위 S_h 에 대하여

$S_v > 100\text{mm}, S_h > 50\text{mm}$ 이면 불안으로 판정한다.

3. 연약지반상 교대기초말뚝의 해석법

3.1 주동말뚝과 수동말뚝

수평력을 받는 말뚝은 말뚝과 지반중 어느것이 움직이는 주체인가에 따라 그림 1에 도시된 바와 같이 주동말뚝(active pile)과 수동말뚝(passive pile)의 2종류로 대별할 수 있다.

주동말뚝은 그림 1(a)에서 보는 바와 같이 말뚝이 지표면상에 기지의 수평하중을 받는 경우이다. 그 결과 말뚝이 변형함에 따라 말뚝 주변지반이 저항하게 되고 이 저항으로 하중이 지반에 전달된다. 이 경우에 있어서는 말뚝이 움직이는 주체가 되어 먼저 움직이게 되고 말뚝의 변위가 주변지반의 변형을 유발시키게 된다.

한편 수동말뚝은 그림 1(b)에서 보는 바와 같이 우선 어떤 원인에 의하여 말뚝주변지반이 먼저 변형하게 되고 그 결과로서 말뚝에 측방토압이 작용하고 나아가 부동지반면하의 지반으로 이 측방토압이 전달된다. 이 경우에 있어서는 말뚝주변지반이 움직이는 주체가 되어 말뚝이 지반변형의 영향을 받게 된다.

이들 두 종류의 말뚝의 최대 상이점은 말뚝에 작용하는 수평력이 주동말뚝에서는 미리 주어지는데 비하여 수동말뚝에서는 지반과 말뚝 사이의 상호작용의 결과에 의하여 정하여 지는 점이다. 말뚝주변지반의 변형상태 및 말뚝과의 상호작용이 대단히 복잡한 점을 고려하면 수동말뚝이 주동말뚝에 비하여 더욱 복잡한 것을 알 수 있을 것이다.

한편, 수동말뚝은 비교적 최근에 이르러 기초공학 분야에서 주목되기 시작한 말뚝이다. 수동말뚝의 전형적인 예로는 성토, 광석의 야적 등에 의하여 측방변형이 발생하는 연약지반속의 구조물기초말뚝, 사면파괴 혹은 지반의 측방유동을 방지하기 위하여 사용하는 말뚝 등이 있다. 결국 이러한 지반의 측방소성변형은

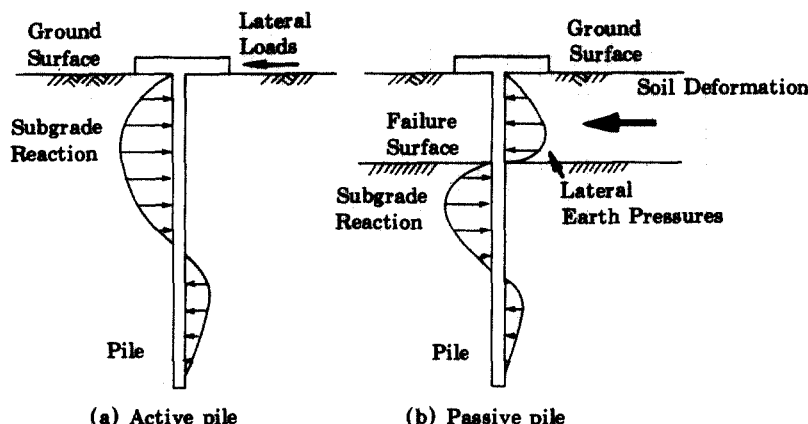


그림 1. 수평력을 받는 말뚝

말뚝에 영향을 미치게 되고 말뚝과 지반의 상호작용의 결과로 말뚝은 측방토압을 받게 되어 예상치 않았던 피해가 발생하는 경우가 종종 있다. 더우기 말뚝을 사용한 토목, 건축구조물이 나날이 증가하여 감에 따라 이러한 수동말뚝의 사용도도 점차 증가되고 있으며 이에 관한 연구도 최근에 토질 및 기초공학 국제회의에서 Specialty Session을 마련하여 집중적으로 정리토론된 바도 있다. 즉, 제 8회 Moscow 국제회의(1973) Session Specialty 5와 제 9회 동경국제회의(1977) Specialty Session 10이 그 예이다.²⁾

3.2 교대기초말뚝의 해석법 개요

교대말뚝기초의 해석시에는 사면의 안정검토와 말뚝의 안정검토가 반드시 실시되어야만 한다. 불안한 사면지반에 말뚝이 일렬로 설치되어 있으면 이 말뚝은 사면활동을 방지하는 역할을 하게 된다. 이 경우 말뚝은 사면활동면 상부의 토피로부터 측방유동을 받게 된다. 이 문제에 대처하기 위해서는 작용하는 측방토압을 정확하게 산정하는 것이 매우 중요하다.

일반적으로 교대기초말뚝이 설치된 사면의 안정문제에 있어서는 사면의 안정과 말뚝의 안정에 대한 두가지의 해석이 그림 2(a)(b)에서

와 같이 실시되어야 한다. 왜냐하면 교대기초 말뚝이 설치된 사면의 전체안정은 사면과 기초 말뚝 모두의 안정이 확보되었을 경우에만 비로소 가능하기 때문이다.

만약 말뚝에 작용하는 측방토압(혹은 붕괴 토피에 저항하는 말뚝의 저항력)이 알려져 있다면, 먼저 말뚝의 안정이 수평하중을 받는 말뚝(주동말뚝)의 해석법을 응용하여 그림 2(b)와 같이 검토될 수 있다. 그러나 주동말뚝의 경우는 수평하중이 말뚝머리 부분에 집중하중으로 작용하나 수동과피말뚝은 사면과피면 상부의 측방변형지반을 통하여 말뚝에 분포하중으로 작용하게 된다.

이상의 말뚝안정 계산에서 말뚝의 안정이 확보되면 사면의 안정계산이 그림 2(b)에서와 같이 파괴면의 전단저항 및 말뚝의 저항력을 고려하여 실시될 수 있다.

이상에서 설명한 이론적 배경에 의거한 교대기초 말뚝의 해석법은 이미 洪元杓등에 의하여 확립 발표된 바 있다.¹⁾

3.3 해석 프로그램(CHAMP)

앞절과 같은 이론에 의거하여 중앙대학교 기초공학연구실에서 개발된 프로그램(CHAMP:과기처등록 프로그램)을 본 연구에 활용하였다. 이

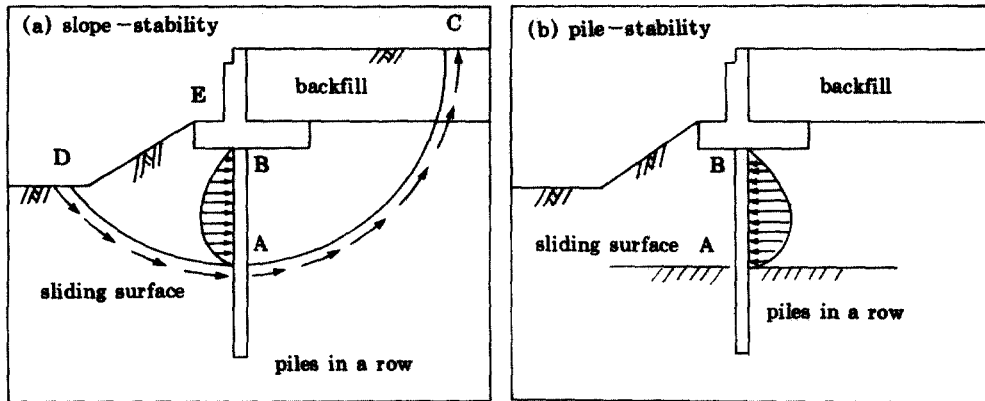


그림2. 교대기초말뚝이 설치된 지반의 안정

프로그램은 통상적인 사면안정해석법에 말뚝의 효과를 고려할 수 있게 되어 있다. 즉, 가상원호활동면을 기준으로 활동면이 교대기초와 교차하는 상부의 활동토피로부터 줄말뚝에 작용하는 토압을 산정하여 말뚝의 안정을 검토하며 말뚝이 안전한 범위내에서 말뚝이 저항할 수 있는 토압만을 사면의 안전을 계산에 추가시켜 사면안정의 기여도를 평가할 수 있도록 되어 있다.

가상원호활동면의 중심점으로 예상되는 부분에 Grid를 작성하여 Grid의 각 절점을 중심점으로 한 무수한 가상원호활동면에 대하여 상기와 같은 계산작업을 반복하여 최소사면안전율이 구하여지는 곳을 찾는다. 사면안정 계산은 한계평형원리에 입각한 분할법을 사용하였고 절편에 작용하는 부정정력은 서로 평형을 이루고 있다고 가정하였다. 각각의 원호활동면에 대하여 사면의 활동모멘트와 지반의 전단저항에 의한 저항모멘트를 계산하여 기억시킨다.

교대기초말뚝이 설치되어 있지 않으면 곧바로 활동모멘트와 저항모멘트로 사면안전율을 계산한다. 말뚝이 설치되어 있으면, 먼저 줄말뚝에 작용하는 측방토압식을 사용하여 측방토압을 산정한다. 그 다음으로 원호활동면 상부의 말뚝부분은 활동토피로부터 측방토압을 받

고 이 측방토압에 의하여 발생된 말뚝의 수평변위에 대하여, 말뚝이 지반으로 부터 지반반력을 받도록 한 상태에서 말뚝머리와 선단의 구속조건을 고려하여 말뚝의 강성 Matrix를 구성한다.

말뚝의 휨응력과 전단응력 및 변위량을 계산하여 말뚝의 안전율을 계산한다. 만약 말뚝의 안전율이 소요안전율보다 낮으면 측압부가계수 α_n 값을 줄여서 수정하여(말뚝의 측방토압을 줄여)계산을 반복하여 말뚝의 안전율이 소요안전율을 이내가 될때까지 반복한다.

말뚝의 안전율이 소요안전율보다 크게 되면 말뚝의 안정에 사용한 측방토압을 사용하여 가상원호활동면의 중심을 기준으로 저항모멘트를 구한다. 사면안전율 계산시 구하였던 지반의 전단저항에 의한 저항모멘트에 말뚝에 의한 저항모멘트를 가산하여 사면안전율을 계산하여 말뚝의 사면안정 효과를 산정한다.

이러한 계산작업은 다른 가상원호활동면에 대하여도 반복 실시하여 한 중심점에 대한 무수한 가상원호활동면중 최소안전율을 가지는 활동면과 안전율을 구한다. 또한 이 중심점을 Mesh상의 각 절점으로 이동시키면서 동일한 계산을 반복한다.

4. 교대측방이동 사례

급속한 산업발전에 따른 도로나 항만등의 산업기반시설은 막대한 용지를 필요로 하게되며 용지부족 및 선형유지를 위해 대형 구조물이 연약지반상에 위치하는 경우가 점차 발생하게 되었다.

최근에 연약지반에 건설되었거나 건설중인 교량의 교대에서 과도한 변위발생이 상당수 보고되고 있으며 이에 따른 교량자체의 안정성 및 향후 교통소통에 큰 영향을 주게된다. 이 현상은 연약지반에 건설된 항만구조물에서도 발생되고 있다.

상기 현상의 원인은 설계시 연약지반의 측방유동에 대한 검토를 실시하지 않아서 발생하는 것이 대부분이다. 국내에서는 현재까지 교대의 측방이동 사례소개 및 판정법에 대한 이해가 잘 되어 있지 않다. 따라서 설계자나 시공자가 공히 이에 대한 지식이 없이 교대기초 밑쪽 설계시 주로 주동밑쪽 설계만을 수행하여 공사가 진행되는 일이 많았다. 따라서 특별한 조치가

표 1 사례현장 교대현황

No.	교대 No.	성토고 (m)	연약층 두께(m)	비배수 전단강도 (t/m^2)	발생변위 (cm)
1	K-1	12.45	15.5	5.50	10.00
2	K-2	8.67	12.5	4.40	3.18
3	K-3	5.03	16.8	4.00	1.00
4	S-1	5.00	10.9	1.98	7.00
5	S-2	7.30	13.3	2.38	23.95
6	S-3	4.10	24.6	3.46	1.00
7	J-1	8.54	28.8	1.55	22.25
8	J-2	11.00	26.3	0.62	9.50
9	J-3	8.54	29.3	0.83	19.75
10	Y-1	13.60	13.1	1.25	*
11	R-1	7.30	4.8	2.02	5.00
12	C-1	9.00	9.4	1.76	*

* 과도변위가 예상되어 대책공법 적용한 현장

없는한 연약지반상에 축조되는 교량에서는 측방유동 현상이 발생할 가능성이 상존하고 있다.

표 2 사례현장 기초현황

No.	교대 No.	기초밑쪽 채원							연약지반 개량공법
		재료	직경(mm)	두께(mm)	길이(m)	간격(m)	열수	열간격(m)	
1	K-1	강관	508.0	9.0	20.0~25.0	1.50	6	1.50	sand drain and sand compaction pile
2	K-2	강관	508.0	9.0	24.0~29.0	1.40	6	1.40	sand drain and sand compaction pile
3	K-3	강관	508.0	9.0	20.0~22.0	1.50	2	2.75	sand drain and sand compaction pile
4	S-1	강관	609.0	9.0	29.0	1.55	2	1.50	sand drain and pre loading
5	S-2	강관	406.0	9.0	29.0	1.60	3	1.10	paperboard drain
6	S-3	강관	406.0	9.0	29.0	1.20~1.60	3	1.40	sand drain
7	J-1	강관	406.0	9.0	36.5	1.50	3	1.50	sand drain
8	J-2	강관	406.0	9.0	33.5	1.40	3	1.60	sand drain
9	J-3	강관	406.0	9.0	34.0	1.50	3	1.50	sand drain
10	Y-1	강관	406.0	9.0	21.0	1.50	8	1.20	pack drain
11	R-1	강관	406.0	9.0	21.0	1.30	4	1.20	무처리
12	C-1	P.C	400.0	75.0	7.0	1.50	4	1.20~1.40	sand drain and sand compaction pile

이러한 교대의 측방이동 현상은 원설계시 해당 연약지반의 특성을 파악하여 연약지반의 측방유동이 예상될 때에는 교대기초 말뚝설치는 수동말뚝으로도 실시하여야 하며 적절한 해석 및 대책공법을 적용함으로써 방지될 수 있다.

따라서 연약지반에 축조되는 교대의 측방이동 현상에 대한 정확한 판정법 및 해석법의 확립이 필요하다. 현재까지 알려져 있는 많은 측방유동 판정법 및 해석법들은 주로 외국에서 경험적으로 정립된 것이다. 이들을 우리나라에서 사용하기 위하여는 국내의 사례현장에 적용하여 그 적용성 및 해석시 고려사항에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

따라서 여기서는 표 1, 표 2에서 보는 바와 같이 국내에서 발생된 6개현장 12개 교대의 측방이동 사례에 대한 자료를 토대로 기존 판정법의 적용성 여부 및 교대변위량 해석법에 대한 고찰을 실시하고자 한다. 이러한 연구의 목적은 향후 연약지반에 축조될 대형구조물에 대한 적절한 설계법의 정립을 도모하고자 함에 있다.

5. 측방이동 교대의 분석

5.1 개 요

연약지반에 축조되는 교대의 측방이동량에 영향을 미치는 요인으로는 1)교대배면의 성토고 2)교대배면 성토재의 단위중량, 3)연약층의 전단강도 4)연약층 두께 5) 교대형식 6) 교대치수 7)기초형식 8)기초의 강성으로 알려져 있다. 기존의 판정법들은 이들 요소중의 3~4개를 조합하여 판정기준치를 정하거나 사면안전율을 구하여 기준치와 비교함으로써 측방유동 판정을 하게된다. 또한 이들 판정법은 측방유동 사례조사결과에 근거하여 제안된 판정법이므로 실용성이 있는 것으로 여겨진다. 따라서 간편하게 지반의 측방유동을 검토하고자 할 경우 활용할 수 있을 것이다.

그러나 교대기초 말뚝의 설계를 실용적이고

계통적으로 실시하는 입장에서는 지반의 안정성을 우선적으로 극한평형 문제로서 취급하는 접근방식이 바람직하다고 생각된다.

즉, 지반의 측방유동 유무판정은 상기의 8가지 영향요소를 종합적으로 반영할 수 있는 지표통상적인 사면안전율을 생각할 수 있다. 따라서 사면의 안전율에 의하여 측방이동 발생여부를 검토하는 것이 가장 효과적이라고 여겨진다.

그 판정 기준으로는 사면안전율이 어떤 기준 안전율보다 큰 경우 측방유동은 발생하지 않는 것으로 한다. 즉 사면안전율이 기준안전율보다 크면 수동말뚝으로 검토할 필요가 없어지게 되어 주동말뚝만으로 설계되고 사면안전율이 기준안전율보다 적으면 수동말뚝으로도 검토할 필요가 있게된다. 따라서 측방유동의 판정 및 실용적 설계를 위해서는 상기의 기준안전율의 정립이 필요하다고 판단된다.

기준안전율에 대한 현재까지의 연구 결과로는 Marche가 제안한 1.4, 일본 수도고속도로 공단의 1.6 등이 있다. 이들 기준은 외국의 교대변위사례에 대한 분석결과이며 국내의 변위 사례에 대한 분석 및 측방유동검토에는 찾기 어렵고 검토를 실시한 경우에도 말뚝의 강성에 의한 지지효과를 무시한 경우가 대부분이다.

따라서 본 연구에서는 국내 교대변위 사례에 대하여 말뚝효과를 무시한 경우와 말뚝효과를 고려한 경우에 대한 각각의 사면안전율을 구하여 현장에서 실측된 측방변위와 비교분석을 실시하였다. 또한 사면안전율을 기존의 판정치로 사용되고 있는 측방유동지수 및 안정계수와도 비교분석을 통하여 측방유동시 말뚝의 영향과 국내 변위 사례에 부합하는 판정기준을 유도하려 한다.

사면의 안정해석은 중앙대학교 기초공학연구소에서 개발된 교대 기초말뚝 해석 전용 프로그램인 "CHAMP"를 사용하여 실시하였다. 이 프로그램은 수동말뚝의 사면안정효과를 무시한 경우의 사면안전율과 수동말뚝의 사면안정효과를 고려한 경우의 사면안전율을 모두 구할 수 있게 개발되었다. 또한 수동말뚝의 사면안정 효과를 무

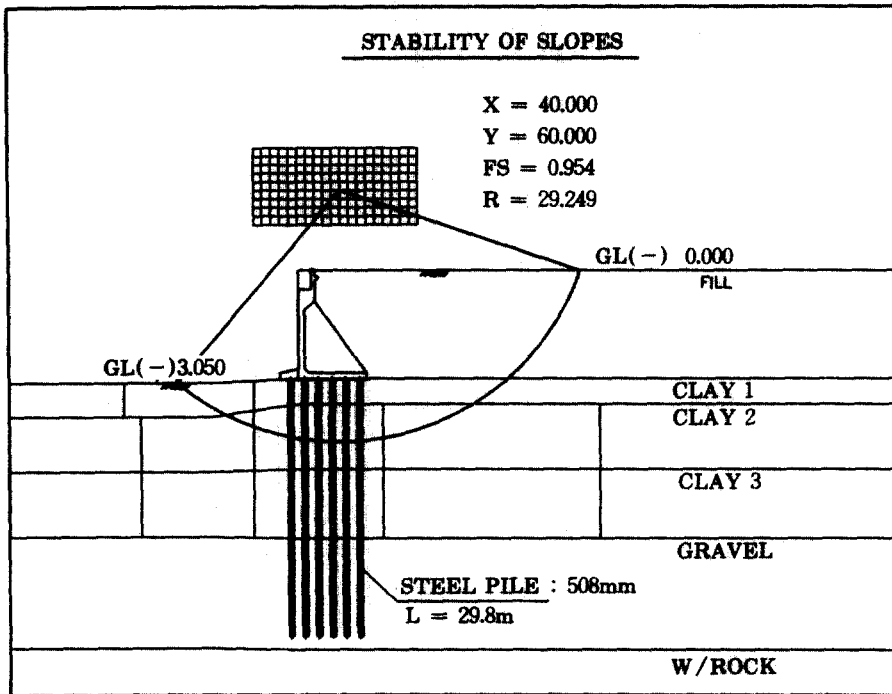


그림3. 가상파괴면

시한 경우는 미국 Purdue 대학에서 개발된 프로그램인 "STABL"을 사용하여 함께 비교하였다.

5.2 사면안전을

5.2.1 프로그램 "CHAMP" 사용시

1) 사면안정 해석결과

연약지반상 교대의 측방이동판정에 필요한 사면안전을 계산시 교대기초말뚝의 지지효과를 고려하는 것이 타당하다고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 교대 기초말뚝의 지지효과를 고려할 수 있는 프로그램인 "CHAMP"를 사용하여 말뚝효과를 무시한 경우와 말뚝효과를 고려한 경우에 대하여 해석을 실시하였다.

해석 대상 12개 교대중 K-1교대는 교대 높이가 14.0m 이고 하부 연약층의 두께가 15.5m, 연약층의 비배수 전단강도는 5.5ton/m²인 경

우로 상기 K-1 교대에 대한 해석결과 얻은 최소안전율시의 가상 파괴면 및 최소 사면안전율은 그림 3과 같다.

2) 말뚝해석 결과

프로그램 "CHAMP"는 해당 원호활동면에 대하여 말뚝효과에 대한 계산을 병행하여 말뚝의 안전율이 소요안전율에 도달하도록 계산과정을 반복하며 이 결과 그림 4와 같이 말뚝의 측방변위, 휨모멘트, 전단력 등이 산출된다. 따라서 각 말뚝의 변위 및 안전도등을 검토할 수 있다.

위와 같은 과정을 해석대상 12개 교대에 대하여 실시한 결과는 표 3과 같다.

5.2.2 프로그램 "STABL" 사용시

연약지반상 교대의 측방이동판정에 필요한 사면안전을 계산시 교대말뚝의 효과를 고려하는 것이 타당하다고 판단된다. 그러나 일반적인 사면안정계산 프로그램들은 말뚝의 영향

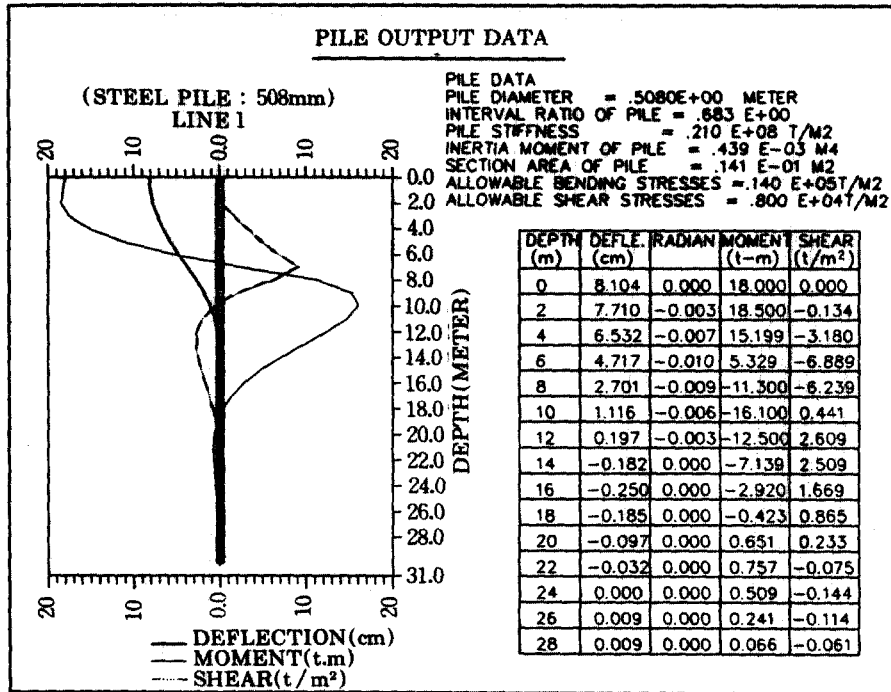


그림4. GRAPHIC OUTPUT FOR PILE

표 3 프로그램 "CHAMP" 에 의한 사면안전을

교 대 No.	성 토 고	사면안전을	
		말뚝효과 무시	말뚝효과 고려
K-1	12.45M	0.682	0.954
K-2	8.67M	0.871	1.146
K-3	5.03M	1.391	1.698
S-1	5.00M	1.315	1.570
S-2	7.30M	0.872	1.103
S-3	4.10M	1.103	1.374
J-1	8.54M	0.853	1.107
J-2	11.00M	0.714	0.924
J-3	8.34M	0.702	0.998
Y-1	13.60M	0.851	1.032
R-1	7.30M	0.921	1.162
C-1	9.00M	0.702	0.854

을 고려할 수 없어 말뚝의 사면안정 효과를 무시한 사면안전율이 산출된다. 본 연구에서는

보편적으로 보급되어 있는 사면안정계산 프로그램인 "STABL"을 사용하여 말뚝효과를 무시한 경우의 사면안전율을 구하여 말뚝효과를 고려한 경우와 비교, 분석하여 보기로 한다.

표 4 프로그램 "STABL" 에 의한 사면안전을

교 대 No.	성 토 고	사면안전을
K-1	12.45M	0.921
K-2	8.67M	1.246
K-3	5.03M	1.338
S-1	5.00M	1.309
S-2	7.30M	0.923
S-3	4.10M	1.238
J-1	8.54M	0.896
J-2	11.00M	0.771
J-3	8.34M	0.801
Y-1	13.60M	0.902
R-1	7.30M	1.062
C-1	9.00M	0.740

위와 같은 과정을 해석대상 12개 교대에 대하여 실시한 결과는 표 4와 같다.

5.3 해석결과 및 분석

5.3.1 사면안전율과 측방변위의 관계

본 연구의 대상인 6개 현장 12개 교대의 사면안전율을 구하기 위하여 5.2절과 같은 해석을 각각의 교대에 대하여 실시하였고 그 결과 산출된 사면안전율과 현장에서 실측된 교대의 측방변위량과의 관계는 그림 5와 같다.

그림 5(a), (b)는 프로그램 "CHAMP"를 사용하여 구한 사면안전율과 측방변위의 관계이며 사면안전율이 1.1을 기준으로 (말뚝효과 무시한 경우는 0.9) No.1, 5, 7, 8, 9 교대에서 10cm 이상의 큰 변위가 발생된 것을 볼 수 있으며 No. 2, 3, 4, 6, 11 교대에서는 비교적 작은 변위가 발생된 것을 볼 수 있으며 사면안전율이 1.8 이상이면 (말뚝효과 무시의 경우 1.5) 측방이동에 대하여 안전한 것으로 판정된다.

그러나 만약 교대의 허용측방이동량을 5cm 라고 한다면 사면의 소요안전율은 1.4(말뚝효과를 무시한 경우) 혹은 1.6(말뚝효과를 고려한 경우) 이상이 되어야함을 그림 5(a) 및 (b)에서 알 수 있다.

그림 5(c)는 프로그램 "STABL"을 사용하여 구한 사면안전율과 측방변위의 관계이며 사면안전율이 1.0보다 적은 No.1, 5, 7, 8, 9 교대에서 10cm 이상의 큰 변위가 발생된 것을 볼 수 있다. 또한 사면안전율이 1.0보다 큰 No. 2, 3, 4, 6, 11 교대에서는 비교적 작은 변위가 발생된 것을 볼 수 있으며 사면안전율이 1.5 이상이면 측방이동에 대하여 안전한 것으로 판정된다.

따라서 교대의 측방이동 발생여부의 판정을 위한 사면안전율 기준으로는 Modified Bishop 법 사용시는 1.5, Fellenius법 사용시는 (a) 말뚝효과를 무시할 경우 1.5 (b) 말뚝효과를 고려할 경우 1.8이 적합할 것이다.

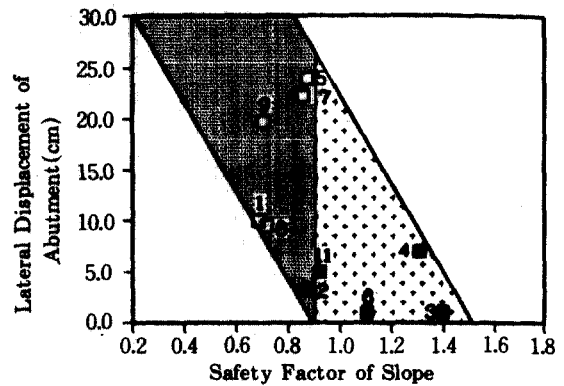


그림5. (a) 사면안전율과 측방변위의 관계
프로그램 "CHAMP": 말뚝효과 무시

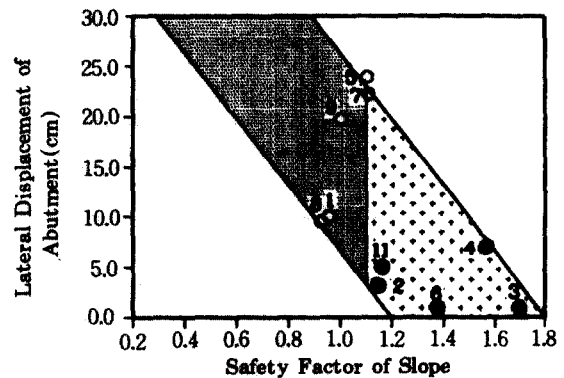


그림5. (b) 사면안전율과 측방변위의 관계
프로그램 "CHAMP": 말뚝효과 고려

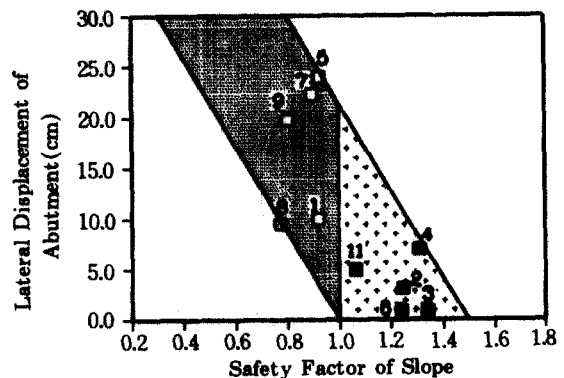


그림5. (c) 사면안전율과 측방변위의 관계
프로그램 "CHAMP": 말뚝효과 무시

또한 변위가 크게 발생된 K-1 교대에 대한 주동말뚝해석을 실시한 결과 예상교대 변위는

1cm이며 수동말뚝 해석결과는 8cm로 나타나며 실제 교대의 변위량은 5~10cm 정도로 주동말뚝 해석결과보다 매우 크게 나타난다.

따라서 측방유동이 발생하는 지반속의 교대 변위량의 예상을 위해서는 수동말뚝 해석이 반드시 병행되어야 한다고 판단되며 측방유동의 판정 및 측방이동량 계산을 위해서는 연약지반의 강도 및 변형계수, 성토재의 단위중량, 연약층 두께 등 사면안정 계산에 필요한 토질자료가 필요하다. 연약지반상의 교대기초 설계를 위한 지반조사시에는 반드시 상기의 토질자료를 구할 수 있도록 계획되어야 한다.

5.3.2 사면안전율과 측방유동지수의 관계

그림 6(a),(b)는 사면안전율과 일본 도로공단이 발표한 측방유동지수, (F치)와의 관계도 표이다. 측방유동지수는 1)교대배면의 성토고 2)교대배면 성토재의 단위중량 3)연약층의 전단강도 4)연약층 두께의 함수로 F치가 4×10^{-2} 이하이면 측방유동의 우려가 있다고 판정하고 있다.^{7,8)}

본 연구에서는 기존의 판정법인 측방유동지수와 사면안전율의 관련성을 비교 분석하려 한다.

$$F = \frac{c}{\gamma H} \times \frac{1}{D} \quad (1)$$

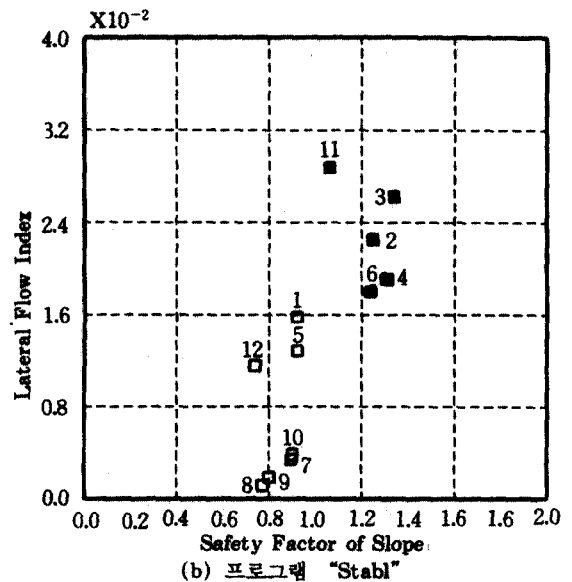
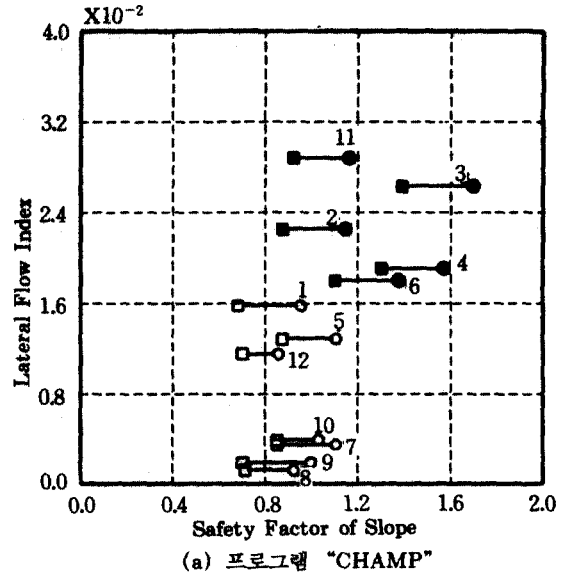
여기서, c : 연약층의 평균점착력

γ : 교대배면 성토재의 단위 중량

H : 교대배면의 성토고

D : 연약층 두께

그림 6(a)는 말뚝 효과를 고려할 경우이며 사면안전율이 1.15이하인 No.1, 5, 7, 8, 9, 10, 12에서는 측방유동지수가 2×10^{-2} 이하로 나타나며 사면안전율이 1.15이상인 No.2, 3, 4, 6, 11 교대의 경우 측방유동지수가 $2 \sim 3 \times 10^{-2}$ 정도로 나타났다. 이와같이 전 교대의 측방유동지수가 4×10^{-2} 이하로 나타나 기존 판정법과 일치되는 결과가 도출되었다.



LEGEND

	말뚝효과 고려	말뚝효과 무시
변위 大	○	□
변위 小	●	■

그림 6. 사면안전율과 측방유동지수의 관계

그림 6(b)는 말뚝 효과를 무시한 경우이며 사면안전율이 1.0이하인 No.1, 5, 7, 8, 9, 10, 12 교대의 측방유동지수가 2×10^{-2} 이하인 것을 볼

수 있다. 또한 사면안전율이 1.0보다 큰 No.2, 3, 4, 6, 11 교대의 경우 측방유동지수가 $2 \sim 3 \times 10^{-2}$ 정도인 것을 관찰 할 수 있고 전 교대의 측방 유동지수가 4×10^{-2} 이하로 나타나 측방유동 지수가 4×10^{-2} 이하에서 측방유동이 일어날 수 있다는 기존 판정법과 상당히 일치한 결과가 도출된다.

5.3.3 사면안전율과 안정계수의 관계

그림 7은 사면안전율과 안정계수(N_s)와의 관계 도표이며 Tschebotarioff는 안정계수가 3.0이상이면 측방유동 현상의 우려가 있다고 발표한 바 있다.

$$N_s = -\frac{\gamma H}{c} \quad (2)$$

여기서, γ : 교대배면 성토재의 단위 중량

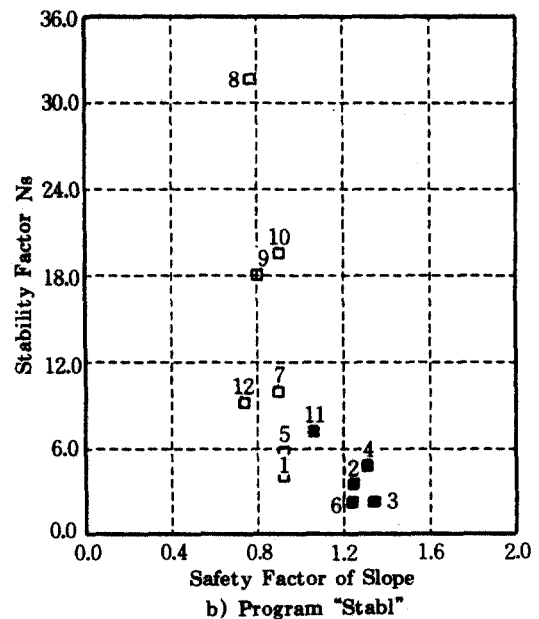
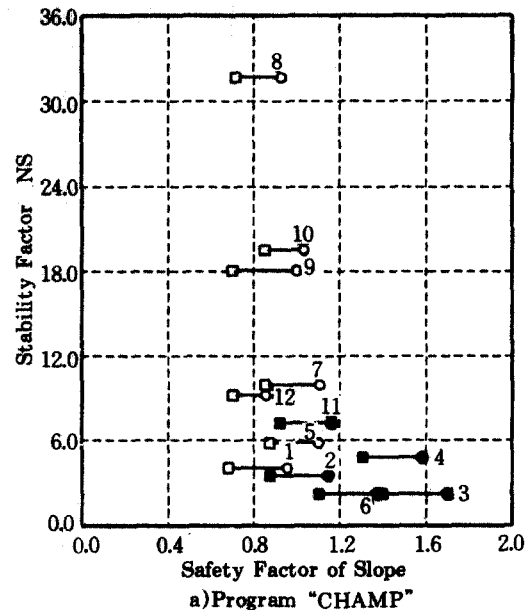
H : 교대배면의 성토고

c : 연약층의 평균점착력

그림 7(a),(b)에서 보면 비교적 변위가 적은 No. 3, 6교대의 안정계수가 2.0정도이며 나머지 교대는 전부 안정계수가 3.0보다 커서 측방 유동의 우려가 있는 것으로 나타난다.

그러나 변위가 큰 No. 1, 5, 7교대의 안정계수보다 No. 8교대의 안정계수가 더 크게 나오는 등 교대의 측방이동량을 예측하기가 어렵게 나타나고 있다. 이는 안정계수를 사용하는 방법이 측방유동의 발생을 예상할 수는 있으나 측방이동량은 연약층의 두께 및 말뚝의 강성과 매우 관련성이 있기 때문에 정성적 판정만으로는 부족하며 정량적 판단이 필요한 것으로 생각된다.

따라서 지반의 측방유동 판정 및 교대측방 이동량의 예상은 사면 안전율을 근간으로 하여 측방유동의 발생이 예상될 경우 수동말뚝해석을 하는 것이 현실에 가장 가까운 방법이 될 것이다.



LEGEND

	말뚝효과 고려	말뚝효과 무시
변위 大	○	□
변위 小	●	■

그림7. 사면안전율과 안정계수의 관계

6. 결 론

상기와 같은 고찰을 통하여 아래와 같은 결론에 도달하였다.

- 1) 교대의 측방 이동에 영향을 주는 요소는 여러가지가 있으며 이를 복합적으로 가장 잘 표현할 수 있는 인자는 사면안전율이다.
- 2) 검토결과 사면안전율이 말뚝효과를 무시할 경우 1.5이하, 말뚝효과를 고려할 경우 1.8이하에서는 측방이동이 발생할 우려가 있다.
- 3) 특히 사면안전율이 말뚝효과를 무시한 경우 1.0이하, 말뚝효과를 고려할 경우 1.1이하에서는 과대한 측방이동이 발생하는 것으로 나타나므로 대책공법 선정시 신중을 기해야 할 것으로 판단된다.
- 4) 교대의 허용측방이동량을 5cm라고 하면 사면의 소요안전율은 1.4(말뚝효과를 무시한 경우) 혹은 1.6(말뚝효과를 고려한 경우)이상이 되어야 한다.
- 5) 연약지반상에 축조되는 구조물의 기초용 말뚝은 설계시 주동말뚝해석 뿐만 아니라 상기 판정식에 의해 측방유동의 가능성이 있을 경우 반드시 수동말뚝해석도 실시하여야 한다.
- 6) 측방유동이 발생하여 교대변위가 과대해지는 경우의 하자규모는 매우 크므로 연

약지반이 축조되는 교대의 지반조사에는 측방유동을 판정할 수 있는 토질 상수를 구할 수 있도록 계획되어야 한다.

감사의 글

본 연구는 (주)두산건설의 지원에 의하여 실시되었음을 밝히며 동 회사에 감사를 표하는 바이다.

참 고 문 헌

1. 홍원표 외 3인(1991): "교대기초 말뚝의 안정", 대한 토질공학회지 제7권 제2호, pp.67-79.
2. 홍원표(1994): "수동말뚝", 이진문화사
3. 이상환(1991): "측방유동지반속 교대기초 말뚝의 설계법" 중앙대 건설대학원 석사학위논문.
4. Peck, R.B., Hanson, W.E. & Thornburn, T.H. (1974): "Foundation Engineering" John Wiley & Sons, New York.
5. 日本土質工學會(1985): 杭基礎の設計法とその解説.
6. Tschebotarioff, G.P.(1973): Lateral pressure of clayey soils on structures, Proc., 8th ICSMFE, Specialty Session 5, Moscow, Vol.4.3
7. 高速度道路調査會(1979): 軟弱地盤上の橋臺基礎に関する調査研究報告書.
8. 高速度道路調査會(1980): 軟弱地盤上の橋臺基礎に関する調査研究報告書.(その2)
9. ISSMFE(1977): The effect of horizontal loads on piles due to surcharge or seismic effect, Proc., 9th ICSMFE, Specialty Session 10, Tokyo.

(접수일자 1994. 7. 20)