

제 2 장 교대의 측방이동

2.1 수동말뚝

수동말뚝은 말뚝주변지반의 측방이동에 의하여 수평하중(측방유동압)을 받게 되는데, 이것은 말뚝주변지반의 침하에 의하여 발생하는 부마찰력(negative friction)과 유사한 현상으로 생각할 수 있다.⁽⁵⁹⁾

측방유동과 부마찰력은 작용방향은 다르지만, 말뚝주변지반이 연직 혹은 수평방향으로 이동하게 되면 지반으로부터의 저항력은 기대할 수 없게 되고, 오히려 지반의 이동은 말뚝에 하중을 가중시키는 결과를 초래하여 불리하게 작용하게 되는데, 그것이 지반의 연직이동의 경우는 부마찰에 의한 연직하중의 증가이고, 지반의 수평이동의 경우는 수평하중의 증가가 된다. 이러한 의미에서 지반이동에 의한 수동말뚝의 인식은 실무에 있어서 중요하다고 생각된다.

일반적으로 말뚝주변지반이 측방이동을 일으킬 수 있는 상황은 말뚝이 성토나 등분포하중 또는 그 주변에 근접해서 설치되어 있는 경우, 말뚝이 사면 내에 설치되어 있는 경우, 근접공사나 지진에 대한 수동말뚝에서 주변지반에 하중이 작용하면 미처 압밀되지 못하고 측방방향으로 이동하게 경우 등을 들 수 있다. 수동말뚝의 구체적인 종류를 열거하면 다음과 같다.⁽⁵⁹⁾

(1) 교대 기초말뚝

교대가 연약지반 중에 설치된 경우 배면성토의 침하와 하중의 증가로 인하여 연약지반이 측방으로 이동하게 되고, 측방이동은 교대 기초말뚝에 측방유동압을 작용시켜 교대를 수평으로 이동시키게 된다.

(2) 성토지지말뚝(Embankment Pile)

배면성토나 도로용 저성토 등을 지지할 목적으로 캡(cap)으로 연결된 말뚝을 다열로 설치하면 성토하중을 격감시킬 수 있으나, 침하가 발생할 경우 측방유동이 일어날 수 있다.

(3) 구조물 기초말뚝

말뚝기초를 갖고 있는 구조물부근 지표면 위에 성토, 야적 등의 상재 하중이 작용하게 되면 말뚝에는 측방유동압이 작용하게 되어 구조물의 측방이동이나 말뚝의 파괴와 같은 사고가 발생하게 된다.

(4) 횡잔교 기초말뚝

불안정한 사면 중에 횡잔교가 설치되면 사면은 임의 파괴면을 따라 이동하게 되고, 이 지반변형으로 인하여 측방유동압이 말뚝에 작용하게 되어 말뚝을 변형시키게 된다.

(6) 사면안정용 말뚝

산사태 등의 사면붕괴를 방지할 목적으로 사면 중에 말뚝을 설치하게 되는데, 이것은 수직말뚝이 가지는 수평하중에 대한 저항특성을 적극적으로 활용한 경우이다.

(5) 근접공사에 대한 구조물 기초말뚝

연약지반에서 다수의 기성말뚝의 타설 공사가 행해질 경우 혹은 지반개량을 위해서 모래말뚝 등의 타설공사나 심층혼합처리공사가 행해질 경우, 지반 내에 여분의 체적이 삽입되므로 그 체적만큼 흙이 측방으로 변형하게된다.

(7) 흙막이용 말뚝

연약지반을 굴착하는 경우에 사용되는 흙막이용 말뚝이 배면지반의 침하나 소성변형에 의한 측방유동압을 받는 경우에는 수동말뚝으로 된다.

(8) 지진시 수동말뚝

지반의 지표면과 지층에 경사가 있는 경우에, 지진에 의한 액상화에 따라 지반이 수평방향으로 변형하므로서 말뚝에 측방유동압을 작용하게 되는 것이다.

2.2 교대 측방이동에 의한 외국의 사례

2.2.1 개요

연약지반 상에 축조되는 구조물은 지반의 특성에 따라 종종 상태의 변화가 발생한다. 연약지반 상에 설치되는 교대의 경우도 역시 마찬가지로 여러 종류의 변화가 발생된다. 교대는 재료특성이 다른 교량부와 토공부와의 경계위치에 설치되고 이들의 지지기구가 다르므로 다음과 같은 문제가 발생할 수 있다.

- ① 산정치 이상의 압밀침하에 의한 교대배면의 단차문제
- ② 교대의 수평이동과 경사문제
- ③ 기타 예상 곤란한 문제

위의 ②의 문제에 있어서는 공사의 시작부터 공사완료 후 까지 현격한 상태의 변화가 발생하는 사례가 많이 보고되고 있고, 이는 배면성토 등의 편재하중에 의한 연약층의 횡방향유동현상(측방유동)에 기인한 것으로 알려지고 있다.^(22 25)

그러나 지반의 측방유동의 역학적인 메커니즘의 해석 및 정량적인 파악이 정확히 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 따라서 측방유동이 발생하는 지반 속 교대의 수평이동과 경사의 해석 및 정량적인 파악은 더욱 어려운 것으로 여겨지고 있다. 그러나 현재 이 분야의 연구는 교대구조물의 안정성 확립을 위하여 반드시 필요한 사항임은 당연한 사실이다.

일반적으로 교대설계에 있어서 검토되는 안전성으로는 다음의 3가지를 들 수 있다.

- ① 배면토압에 의한 활동에 대한 안정성
- ② 작용외력(합력)의 편심경사를 고려한 극한지지력에 대한 안전성
- ③ 작용외력(합력)의 작용점을 기준으로 한 전도에 대한 안정성

또한 연약지반 상에 설치된 교대의 경우, 위에서 열거된 안전성 이외에 교대배면 뒤채움에 의한 편재하중으로 지반의 측방유동이 발생하여 교대가 이동함은 이미 앞에서 기술한 바 있다. 이와 같은 교대의 피해상황은 각국에서 수없이 보고되고 있으며 피해양상도 여러 가지 형태로 보고되고 있어 교대이동의 메커니즘이 단순하지 않음을 알 수 있다.^(51,53 55)

그러나 이 교대이동의 메커니즘을 이동방향에 따라 구분하여 보면 그림 2.1와 같다. 즉 그림(a)는 교대배면성토가 커서 침하량이 크게 발생한 경우이다. 이 경우는 배면성토부 쪽으로 교대가 이동하는 경향이 있다. 이 경향이 커지면 교량상부 거더가 떨어지는 피해가 발생한다. 다음은 그림(b)와 같이 교대배면성토의 침하가 비교적 적은 경우로 교대는 배면성토와 반대방향인 교량 쪽으로 이동하는 경향이 있다.

이 경우 교대의 여러 곳에서 피해가 발생하게 되는데 그 대표적인 것을 열거하면 다음과 같다.

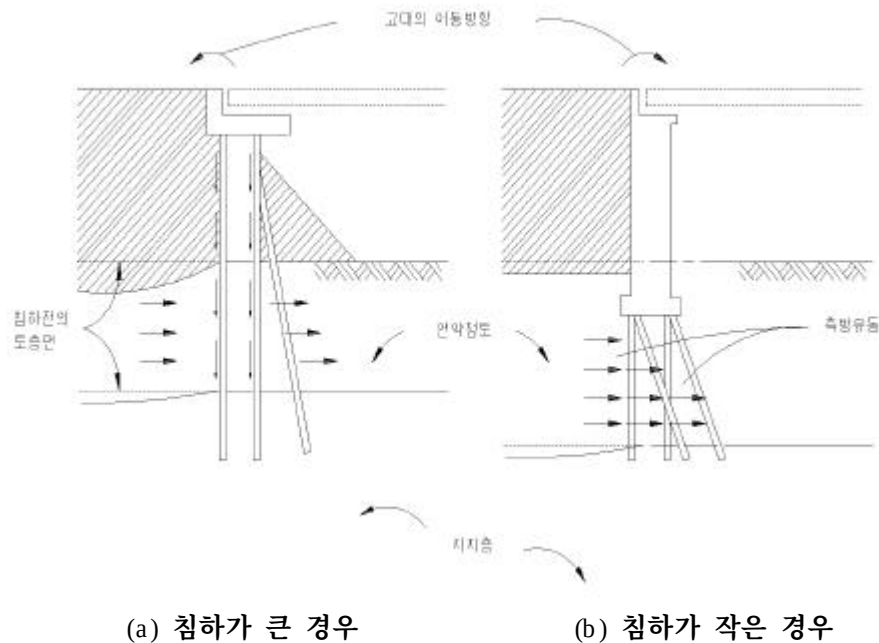


그림 2.1 교대의 이동형태

① Shoe 및 Shoe plate의 파손

교대의 교축방향의 수평변위가 보에 의해 억제되기 때문에 그 연결부인 Shoe가 파손되거나 Shoe plate의 콘크리트가 파괴된다.

② 신축 이음부의 기능저하

Shoe의 가동단이나 고정단이 ①과 같이 파손된 경우에는 신축 이음부의 사이가 좁아져서 극단적인 경우에는 완전히 폐합되거나 혹은 사이가 너무 벌어지는 등 신축 이음부의 기능이 저하된다.

③ 주형(main girder)과 흙벽의 폐합

신축 이음부의 사이가 폐합되면 결국은 주형과 교대 흙벽이 폐합하게 되는 경우가 있다. 이러한 경우 주형이 온도응력 또는 교대로부터의 토압에 의해 파손되거나(주로 주형 단부의 국부좌굴이나 철근콘크리트의 압축파괴), 역으로 흙벽이 주형으로 부터의 반력에 의해 파손되는 등의 피해를 발생시킨다.

④ 교대기초의 파손

교대기초는 지반속에 있기 때문에 실제로 파손이 확인된 경우는 거의 없다. 통상 파손에 의해 말뚝두부가 힌지 결함화하는 것을 고려하여 설계되어 있기 때문에 구조물의 안전성에는 그다지 큰 영향을 주지 않는 것으로 생각된다.

2.2.2 일본도로공단의 조사사례

일본도로공단시험소에서는 1976년부터 교대이동의 정도파악 및 발생 측방유동이 문제가 되는 연약지반에서는 말뚝기초를 사용하는 경우가 많은데, 일반적으로 말뚝두부가 교대에 강결되어 있기 때문에 지반의 측방유동으로 인하여 말뚝두부에 큰 휨모멘트가 발생한다. 이로 인하여 말뚝두부가 파손 요인 분석을 위하여 현지 실태조사를 실시한 바 있다.^(54 56)

이 조사는 76 77년에 걸쳐 東名高速道路 20교(사용후 8년), 東北自動車道 22교(사용후 5년), 東名阪道 3교(사용후 2년), 北陸自動車道 8교(사용후 4년) 계 33교(54교대)를 대상으로 실시하였다.

(1) 교대이동 정도의 분류

이 조사결과에서는 교대이동의 정도에 따라 A,B,C 3개그룹의 교대로 분류하였다.

① A교대

교대의 이동이 커서 시공 중에 교대의 형식을 변경한 경우의 교대나, 신축이음부, Shoe 등의 보수를 실시한 경우의 교대이다.

② B 교대

교대이동이 발생되었으나 보수없이 신축이음장치의 사이가 없어진 경우나 사이가 커진 경우이다.

③ C 교대

교대이동을 인정할 수 없는 경우, 혹은 이음부간격의 관찰로 이동이라 추측은 되지만 유지·관리상 문제가 없는 경우이다.

조사결과에 따르면 A교대(8개) 및 B교대(4개)가 전 조사대상 교량(54개)에 대하여 차지하는 비율은 각각 15%와 7%였다.

교대형식과 변형과의 관계를 보면 벽식(여기에서는 역T형 및 케이스 기초를 포함한 벽식 등을 총칭한다)이 이동하기 쉬운 형식으로 나타났고 (21예중 8예, 38% 이동), 어프로치 쿠션식 및 중공식(中空式)은 이동한 예가 보이지 않는다.

또한 지반처리공에 대하여는 무처리의 경우는 10예중 4예의 40%로 이동하는 가능성이 컸고 프리로딩을 어떤 형식으로든 실시한 사례에서는 33예중 5예, 15%정도밖에 이동하지 않는다.

또한 시공시 교대이동이 발생하였기 때문에 교대의 형식변경을 실시한 교대에서는 그후에 이동이 계속된 사례는 발견되지 않았다.

(2) 이동발생 요인분석

일본도로공단에서는 ①일본도로공단 ②수도고속도로공단 및 ③건설성토목연 구소의 3기관에서 수집한 91개의 교대사례를 대상으로 교대측방이동에 영향을 미치는 주요인자를 조사한 바 있다.^(54 56)

여기에서 ①의 사례는 앞에서 기술한 54개의 교대 이외에 일본도로공단에서 별도로 수집한 16개 교대의 사례를 더하여 70개 교대를 대상으로 하였다. 이들 91개 교대중 요인분석의 대상으로 한 것은 ①의 사례 가운데, 대책공 실시 후의 교대, 구조형식이 특수한 교대, 특수한 지반개량을 실시한 교대, 시공중인 교대를 제외한 나머지 54개 교대와 ② 및 ③의 사례 중 지반조건이 명확한 교대로 계 75개 교대만으로 하였다.

요인분석의 목적은 측방이동을 일으키는 요인과 이에 의한 교대이동과정을 명확히 하기 위한 것이었다. 이동의 정도를 나타내는 기준으로는 다음과 같이 가정하였다.

A교대 : 이동량 $\delta \geq 10\text{cm}$ 의 변형상태를 보이는 교대

B교대 : 이동량 $2\text{cm} \leq \delta \leq 10\text{cm}$ 의 변형상태를 보이는 교대

C교대 : 이동량 $\delta < 2\text{cm}$ 의 변형상태를 보이는 교대

제1단계 분석에서는 교대형식, 성토고, 기초형식(말뚝의 수를 포함), 연약층 두께, 연약층 일축압축강도, 지반처리유무 등 16개 항목의 요인을 설정하고 양자의 단순한 상관성을 조사하였다. 그 결과 명확한 상관성이 보여지는 것은 적었지만 다음 사항이 확인되었다.

① A교대의 교대형식은 벽식이 압도적으로 많았다.

② 어프로치쿠션 기초형식은 대부분 이동하지 않았지만 케이슨기초형식의 경우는 전 경우에 변형이 발생하였다.

결국 교대형식이 역T형 등의 벽식을 가진 경우와 기초가 케이슨 기초인 경우는 측방이동하기 쉽다는 점을 알 수 있다.

또한 교대측방이동의 주원인이 연약지반의 유동현상에 있으며, 그 유동현상을 지지력이론에 따르게 한다면 그 유동방향은 교대배면 연장선상의 한 점을 중심으로 하는 동심원호에 가까운 형으로 연결된다.

여기서 교대배면의 교축방향의 길이를 크게 한다면 유동선이 장원형의 호를 그리게 되거나 유동선이 길게되는 부분만큼 유동저항이 증가하게 되어 교대의 이동이 작게 된다고 하였다.

제2단계 분석에서는 측방이동에 영향을 미치는 주요요인을 선정할 목적으로 수량화이론을 적용하여 요인분석을 행하였다.

일본건설성토목연구소, 일본도로공단, 수도고속도로공단 등의 세기관에서 수집한 연약지반상의 교대에 대하여 수량화이론을 적용하여 요인분석을 행한 결과 교대측방이동에 크게 관여한다고 생각되는 요인은 ①기초형식(말뚝기초의 경우는 말뚝의 열수를 포함), ②연약층의 일축압축강도, ③연약층의 두께, ④성토높이, ⑤교대형식 등이 됨을 밝혔다. 그밖에도 이들 검토에서는 누락되어 있으나 말뚝의 총강성(말뚝1개의 강성 $\times$ 말뚝총수)도 교대측방이동에 영향을 미치고 있다고 할 수 있다.

이상을 종합하여 정리하여 보면 교대측방이동에 크게 영향을 미치는 요인으로 다음의 8개 항목을 열거할 수 있다.

- ① 교대배면의 성토고
- ② 교대배면 성토재료의 단위중량
- ③ 연약층의 전단강도
- ④ 연약층의 두께
- ⑤ 교대형식
- ⑥ 교대치수
- ⑦ 기초형식
- ⑧ 기초강성

이들중 ① ④는 지반에 관련된 요소이고 ⑤ ⑧은 구조물에 관련된 요소이다. 특히 ① ③의 세요인은 Tayler가 사면안정에 활용하였던 안정수(Stability number) $N = \frac{c}{\gamma h}$ 에 관련된 사항이므로 함께 취급할 수 있다.

따라서 ⑤교대형식 및 ⑥기초형식에 대한 사항을 정성적으로 취급 혹은 결정한다면 ① ④의 지반관련요인과 ⑧의 말뚝관련 요인으로 구분할 수 있다.

2.3 교대측방이동 판정방법

연약지반상의 교대측방이동은 연약지반 자체가 교대배면의 뒤채움 편재하중에 의하여 발생되기 때문에 교대가 측방이동을 할 것인가 여부를 판정하기 위하여는 Marche법, German Recommendation법, Tschebotarioff법에서 설명한 지반의 측방유동 판정기준도 활용할 수 있다.

여기서는 이들 방법 이외에 측방이동이 발생된 교대의 조사연구로부터 제시된 몇몇 연구결과를 정리하여 보고자 한다.

2.3.1 사면안전율과 압밀침하량에 의한 판정

수도고속도로공단에서는⁽⁵⁷⁾ 약 20개의 교대사례를 대상으로 하여 원호활동 저항비 F_c (성토단부의 연직선상에 중심점을 놓아서 연약층의 중간을 통과하는 원호활동에 대해서 계산한 원호활동 안전율)의 고려방식(그림 2.2)을 도입하여 지반의 측방유동량과 F_c 치 및 연약점토층의 압밀침하량 δ_s 와의 관계(그림 2.3 및 그림 2.4)에 의해 다음과 같은 교대이동유무의 판정기준을 나타내었다.

$F_c \geq 1.6$ 및 $\delta_s < 10\text{cm}$: 교대이동 우려 없음

$F_c < 1.2$ 및 $\delta_s > 50\text{cm}$: 교대이동 우려 있음

표 2.1 측방유동 판정표

구 분	결 과 치		판 정	비 고
	F_s	S (cm)		
1	$F_s \geq 1.6$	$S < 10$	위험성 없음	
2	$1.2 \leq F_s \leq 1.6$	$10 \leq S \leq 50$	측 방 변 위 고려한 설계	
3	$F_s < 1.2$	$S > 50$	위험성 있음	대책공법 필요

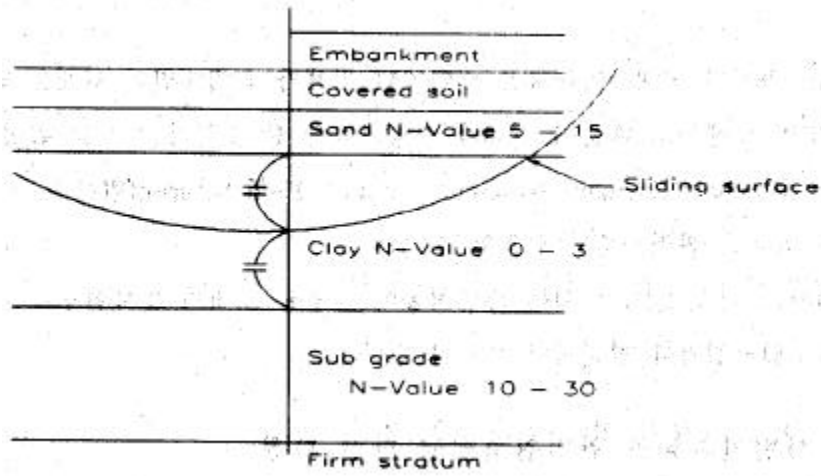


그림 2.2 원호활동계산(임계원)

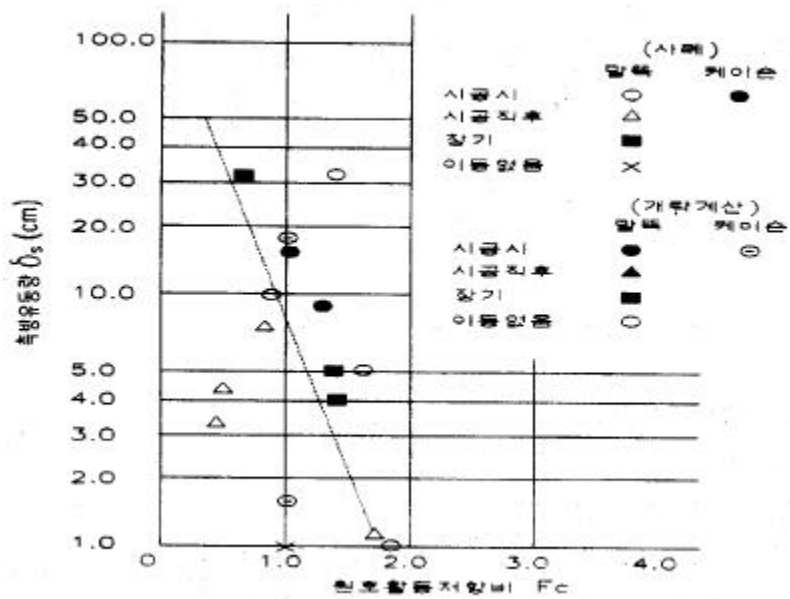


그림 2.3 F_c 치와 측방유동량의 관계

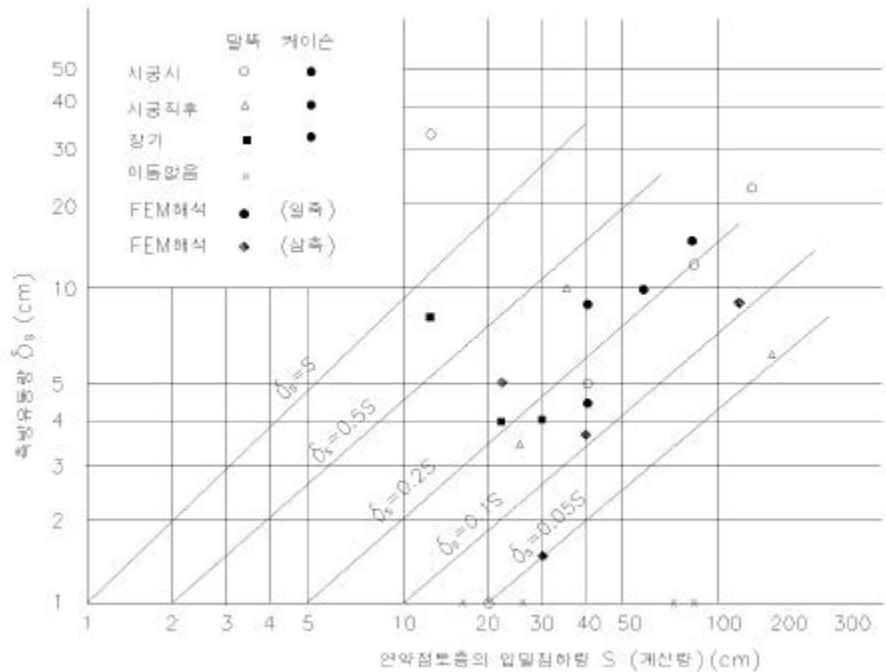


그림 2.4 측방유동량과 압밀침하량과의 관계

2.3.2 측방유동지수 (F)에 의한 판정

일본도로공단에서는⁽⁵⁶⁾ 75개의 교대사례를 대상으로 하여 수량화 이론에 의한 요인분석을 행하였다. 교대이동에 상관성이 높은 요인을 조합하여 지수(F치)로 나타냈으며 이 F치를 기초로 하여 교대이동의 유무를 판단하였다. F치는 다음의 식으로 구한다.(그림 2.5)

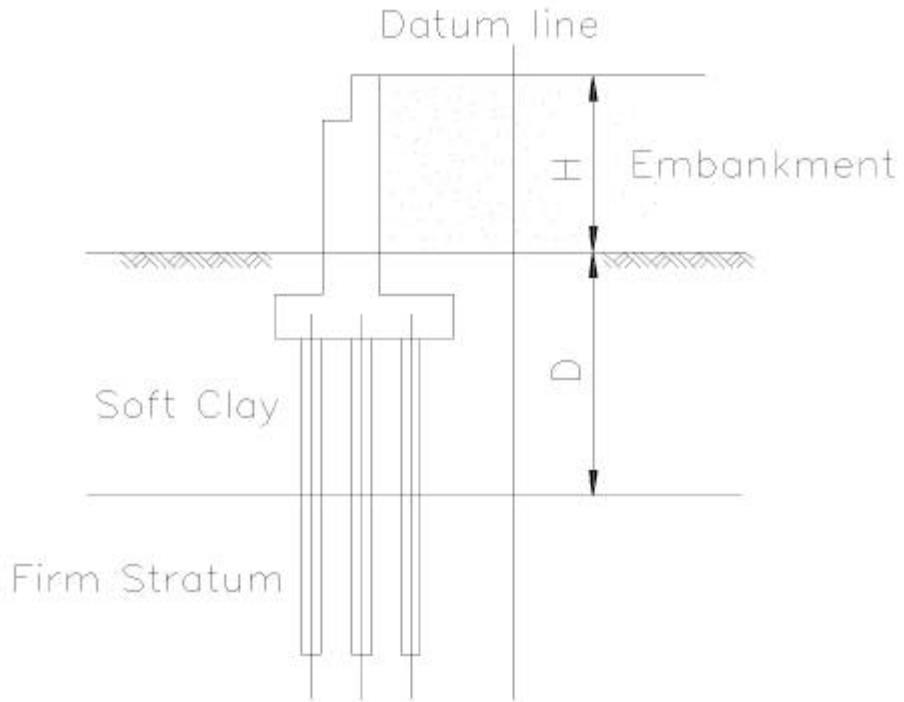


그림 2.5 측방유동지수의 계산(일본도로공단)

$$F = \frac{c}{\gamma h} \times \frac{1}{D} \quad (2.1)$$

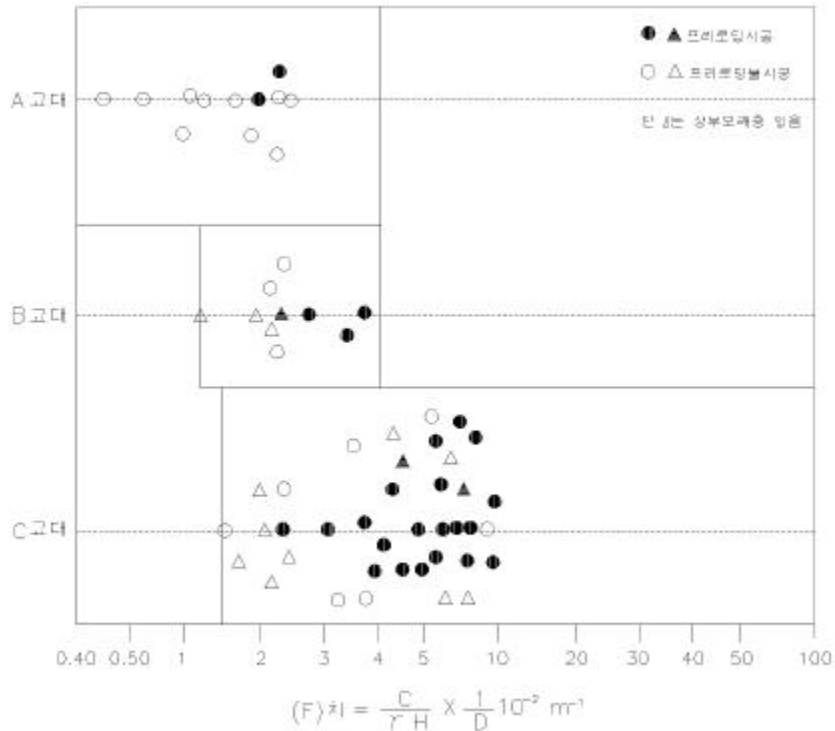
F : 측방 유동지수

c : 연약층의 평균점착력

γ : 성토의 단위체적중량

h : 성토고

D : 연약층 두께



※ 그림 2.6 F치 범위

그림 2.6은 교대의 변형과 F치와의 관계를 나타내고 있다. 이 그림에서 A교대는 앞절에서 이미 설명되어 있는 바와 같이 이동의 정도가 커서 교대형식을 변경하였거나 신축이음이나 지지점의 보수가 행해진 경우의 교대이며, B교대는 보수는 하지 않았지만 신축이음부 간격이 없어졌거나 크게 벌어진 경우의 교대이고, C교대는 이동이 인정되지 않는 경우 혹은 유지관리상의 문제가 없는 경우를 의미한다. 그림 2.6에서 보는 바와 같이 기능상 지장을 초래한 정도의 변형이 발생한 교대 (A교대 및 B교대)에 대한 F치의 상한값은 $4 \times 10^{-2} \text{ m}^{-1}$ 인 점으로부터 이 값을 수동말뚝으로서의 검토가 필요한지 아닌 지의 판정기준으로 삼았다. 즉, 수동말뚝으로서의 설계순서는 $F \geq 4 \times 10^{-2} \text{ m}^{-1}$ 을 만족하도록 여러 대책을 강구하여야 한다.

2.3.3 측방이동 판정식 (I_L)

일본건설성 토목연구소에서는⁵⁴⁾ 교대의 측방이동에 관련된 요인으로 교대, 기초말뚝, 지반에 관한 각종 요인이 고려되고 있으나, 교대의 측방이동이 흙구조물의 안정문제와 깊은 관련이 있는 것으로는 성토의 안정계수를 기본으로 하고 있다. 그 밖의 주요한 요인에 대하여는 3가지의 보정계수를 활용하는 형식으로 지수(I 치)를 식(2.2)에 의거 산정하여 교대이동의 유무를 판정하도록 하고 있다.(그림 2.7)

$$I = \mu_1 \mu_2 \mu_3 \frac{\gamma h}{c} \quad (2.2)$$

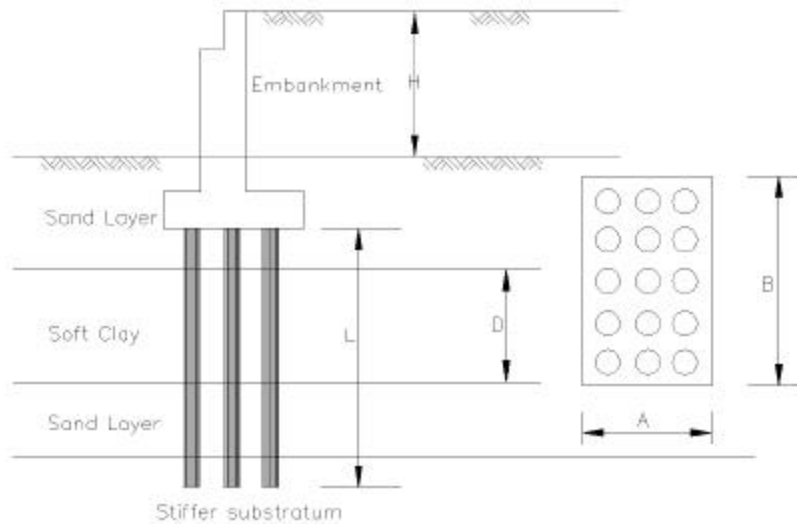


그림 2.7 측방유동 판정수의 계산 (건설성토목연구소)

여기서

I : 측방이동 판정지수

μ_1 : 연약층 두께에 관한 보정계수 ($\mu_1 = D/l$)

μ_2 : 기초체 저항에 관한 보정계수 ($\mu_2 = b/B$)

μ_3 : 교대의 길이에 관한 보정계수 ($\mu_3 = D/A \leq 3$)

γ : 성토재료의 단위중량 (t/m^3)

h : 성토높이 (m)

c : 연약층의 점착력의 평균값 (t/m^3)

A : 교축방향 교대길이 (m) B : 교대폭 (m)

D : 연약층 두께 (m)

b : 기초체폭의 합계 l : 기초의 근입길이 (m)

그림 2.8은 교대의 변형상태정도와 I 치와의 관계를 나타내고 있다. 이 그림에 있어서 「변형발생」은 2)에 설명했던 A교대 및 B교대에 상응하며, 「변형없음」이란 C교대에 상응한다.

그림 2.8에서 교대이동의 유무가 I 치의 1.2부근을 경계로 하여 나뉜다. 즉, $I \geq 1.2$ 의 경우 교대 이동의 우려가 있으며, $I < 1.2$ 의 경우 교대 이동의 우려가 없다.

따라서 아래와 같은 판정 기준에 의하여, 교대이동여부를 판정하고 교대이동이 판정되면 수동말뚝으로서의 설계순서에 의하여 설계하여야 한다.

$I < 1.2$: 측방이동없음

$I > 1.2$: 측방이동우려

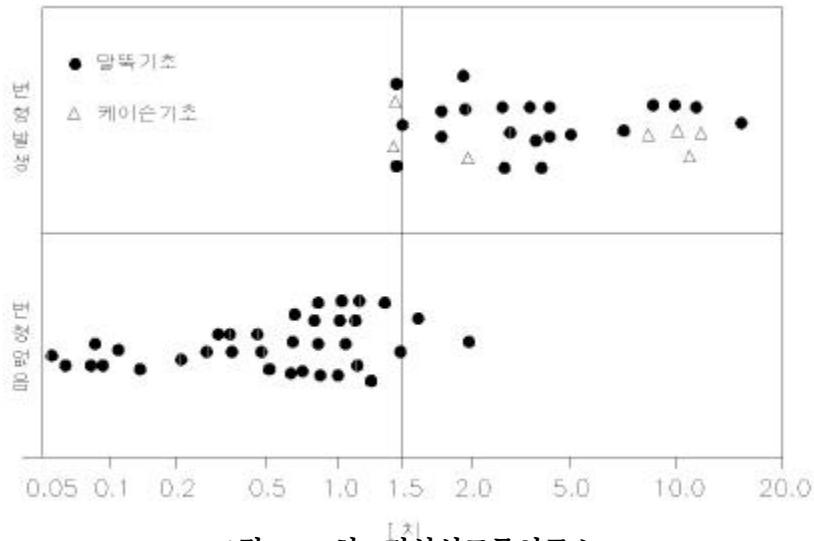


그림 2.8 1차 (건설성토목연구소)

2.3.4 캐나다법

캐나다에서는 캐나다 및 미국 내의 약 90개의 지지말뚝이 설치된 교대·교각 사례의 변형상태의 조사가 행해졌다. 각 교대·교각의 연직변위 S_V 와 수평변위 S_H 의 관계에서 다음과 같은 판정기준을 수립하였다.

즉, $S_V < 50\text{mm}$, $S_H < 25\text{mm}$: 유지관리상 문제없음

$50\text{mm} \leq S_V \leq 100\text{mm}$: 상당한 변형 있음

$25\text{mm} \leq S_H \leq 50\text{mm}$: 상당한 변형 있음

$S_V > 100\text{mm}$, $S_H > 50\text{mm}$: 유지관리상 문제 있음

이 판정 기준에서는, 유지관리상 문제없는 경우는 조사결과와 거의 일치하지만, 큰 변위가 생기는 경우의 교대·교각이 반드시 유지관리·보수가 필요하다는 것은 아니다. 이 이유로서 큰 변위에서도 동일한 변위가 발생하면 반드시 교대·교각에 문제가 되는 것은 아니고 동일한 변위보다 부등변위 및 회전 변위가 더 문제가 됨을 지적하고 있다.

2.3.5 말뚝효과를 고려한 사면안전율에 의한 판정⁽²²⁾

교대의 측방이동에 영향을 주는 요소는 여러 가지가 있으며 이를 복합적으로 가장 잘 표현할 수 있는 인자는 사면안전율이다. 이들 사면안전율과 측방변위와의 관계를 나타내면 그림 2.9와 같다.

해석결과 사면안전율이 말뚝효과를 무시할 경우 1.5이하, 말뚝효과를 고려할 경우 1.8이하에서는 측방이동이 발생할 우려가 있는 것으로 나타났다. 특히 사면안전율이 말뚝효과를 무시할 경우 1.0이하, 말뚝효과를 고려할 경우 1.1이하에서는 과대한 측방이동이 발생하는 것으로 나타나므로 대책공법 선정시 신중을 기해야 할 것으로 판단된다.

교대의 허용측방 이동량을 5cm라고 하면 사면의 소요안전율은 1.4(말뚝효과를 무시한 경우) 혹은 1.6(말뚝효과를 고려한 경우)이상 이 되어야 한다. 연약지반상에 축조되는 구조물의 기초말뚝은 설계시 주동말뚝해석 뿐만 아니라 상기 방정식에 의해 측방유동의 가능성이 있을 경우 반드시 수동말뚝해석도 실시하여야한다. 측방유동이 발생하여 교대변위가 과대해지는 경우의 하자규모는 크므로 연약지반이 축조되는 교대의 지반조사에는 측방유동을 판정할 수 있는 토질 상수를 구할 수 있도록 계획되어야 한다.^(20 22)

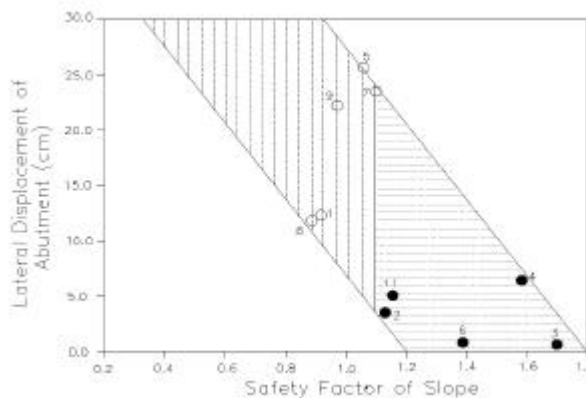


그림 2.9 사면안전율과 측방변위의 관계
(프로그램 CHAMP : 말뚝효과 고려)