

道路橋標準示方書の 橋臺の土壓問題에 대하여

김 운 영*
Kim, Oon-Young
김 명 모**
Kim, Myoung-Mo

여 다음과 같이 기술하고 있다.

1. 序 言

橋臺는 土壓을 받는 전형적인 土留構造物로서 橋臺의 壁體 斷面 또는 安定을 계산하기 위해서는 먼저 土壓에 대한 올바른 이해가 필요하다. “道路橋標準示方書”(1986)는 이러한 문제에 대한 실무적인 해석 및 설계 기준의 제공이라는 중요한 기능을 감당하여야 하나 현재 통용되는 건설부 제정의 “도로교표준시방서”의 관련 규정 및 해설이 다소 명료치 못하며 “構造物基礎設計基準”(1986)과 “콘크리트 標準示方書”(1989)의 관련 내용과도 일관성이 결여된 부분이 일부 있다. 본고의 목적은 建設部の 道路橋標準示方書를 중심으로 하되 構造物基礎設計基準 및 콘크리트標準示方書와 더불어 토압에 관련된 橋臺 및 擁壁문제의 論議를 통하여 문제점을 살펴보고 개선점을 제시함으로써 關聯技術者の 實務에 조금이나마 도움이 되었으면 한다. 끝으로 本橋를 준비하면서 가능한한 객관적으로 서술코자 노력하였지만 논의내용 중에는 공학적 특성상 필자의 견해도 일부 포함되었음을 밝혀 둔다.

2. 示方書の 關聯 内容

2.1 道路橋標準示方書

시방서(4.2.3절)는 교대에 작용하는 토압에 대하

(1) 교대에 작용하는 토압은 공통편 2.1.8에 의하도록 한다.

(2) 토압의 작용면은 다음 규정에 의하도록 한다.

- 1) 중력식 교대의 경우는
구체 콘크리트 背面으로 한다.
- 2) 역T형과 부벽식 교대의 경우는,
○ 벽의 단면계산에 있어서는 구체 콘크리트 背面,
○ 안정계산에 있어서는 기초 뒷쪽 연단에서 연직인 假想背面으로 한다.

그리고 위의 규정에 대한 해설을 인용하면

- 1) 중력식 교대와 같이 확대기초 뒷쪽 내민 길이가 20~30cm 이하로 짧은 경우 구체 콘크리트 背面을 토압작용면으로 한다(그림 1).
- 2) 역T형이나 부벽식 교대와 같이 확대기초 뒷쪽 내민 길이가 긴 경우
○ 안정계산에 있어서는 그림 2에 나타낸 확대기초 뒷쪽 위의 載荷土(abcd로 둘러 싸인 토사)를 구체의 일부로 보고 dc의 假想背面을 토압의 작용면으로 한다.
○ 벽의 단면 계산에 있어서는 그림 2의 ab면을 토압의 작용면으로 한다.

*정회원, 육군사관학교 토목공학과 조교수
**정회원 서울대학교 공과대학 토목공학과 부교수

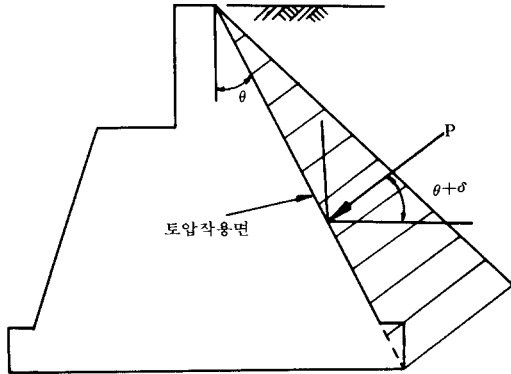


그림 1. 중력식 교대의 토압작용면(도로교표준시방서 해설그림 4.2.3)

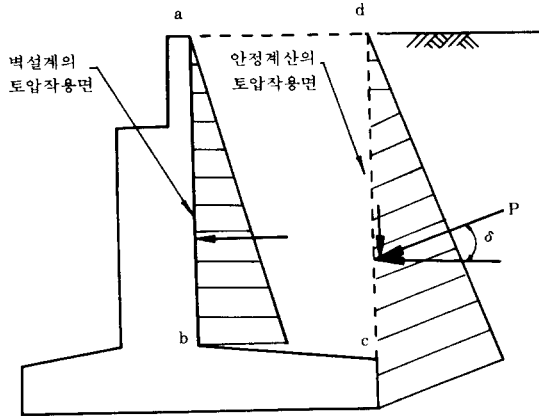


그림 2. 역T형 교대의 토압작용면(도로교표준시방서 해설그림 4.2.4)

그리고 토압의 背面마찰력 δ 는 표 1에 의한다.

표 1(참고: 도로교 표준시방서, 해설표 4.2.1)

교대의 종류	계산의 종류	마찰각의 종류	壁面마찰각 δ
중력식 교대	안정 계산 단면 계산	흙과 콘크리트	$\phi/3$
역T형교대및 부벽식 교대	안정 계산 단면 계산	흙과 흙 흙과 콘크리트	ϕ $\phi/3$

여기서, ϕ : 흙의 剪斷抵抗角 (도)

교대에 작용하는 토압 산정을 위한 시방서 2.1.8절의 내용은 다음과 같다.

토압은 벽면에 작용하는 분포하중으로 하고 하중 강도는 다음과 같다.

1) 可動壁에 작용하는 토압은 식 (1)~(4)에 의해 산출한다.

사질토

$$P_a = K_A \gamma z + K_A q \quad (1)$$

$$P_p = K_p \gamma z + K_p q \quad (2)$$

점성토

$$P_a = K_A \gamma z + K_A q - 2cK_A^{1/2} \text{ 단, } P_a \geq 0 \quad (3)$$

$$P_p = K_p \gamma z + K_p q - 2cK_p^{1/2} \quad (4)$$

단,

$$K_A = \frac{\cos^2(\phi - \theta)}{\cos^2 \theta \cos(\theta + \delta) \left(1 + \frac{\sin(\theta + \delta) \sin(\phi - \alpha)}{\sin(\theta + \delta) \sin(\theta - \alpha)}\right)^{1/2}} \quad (5)$$

$$K_p = \frac{\cos^2(\phi + \theta)}{\cos^2 \theta \cos(\theta + \delta) \left(1 - \frac{\sin(\phi - \delta) \sin(\phi + \alpha)}{\sin(\theta + \delta) \sin(\theta - \alpha)}\right)^{1/2}} \quad (6)$$

단, $\phi + \alpha < 0$ 인 경우에는 $\sin(\phi + \alpha) = 0$ 으로 한다.

2) 固定壁에 작용하는 토압은 식 (7)에 의해 산출한다.

$$P_s = K_s \gamma z + K_s q \quad (7)$$

위에서,

γ : 흙의 단위중량(ton/m^3)

P_a : 깊이 z 에 있어서의 주동토압(ton/m^2)

P_p : 깊이 z 에 있어서의 수동토압(ton/m^2)

P_s : 깊이 z 에 있어서의 정지토압(ton/m^2)

K_A : 쿠름에 의한 주동토압계수

K_p : 쿠름에 의한 수동토압계수

K_s : 정지토압계수

c : 흙의 점착력(ton/m^2)

ϕ : 흙의 마찰각(도)

q : 상사의 지표 재하하중(ton/m^2)

α : 뒷채움 표면과 수평면이 이루는 각

θ : 壁背面과 연직면이 이루는 각

δ : 壁背面과 흙 사이의 벽면마찰각

2.2 構造物基礎設計基準

옹벽의 전도에 대한 시방서 8.3.1 절의 내용을 소개하면 다음과 같다.

옹벽의 전도에 대한 안전율은 1.5 이상이어야 한다.

이에 대한 해설편의 내용을 요약하면 다음과 같다.

● 중력식 옹벽

옹벽 배면에 작용하는 토압을 사용하여 전도모멘트를 구한다(그림 3).

● 역T형 옹벽

옹벽 저판의 뒷굽치를 통하는 가상배면에 대한 토압을 구하여 전도모멘트로 삼는다(그림 4).

滑動에 대한 시방서 8.3.2 절의 내용은 다음과 같다.

옹벽에 작용하는 토압의 수평성분에 의한 수평방향의 활동에 대해서 안전하여야 한다. 이에 대한 안전율은 1.5 이상이어야 한다.

이에 대한 해설편의 내용을 요약하면 다음과 같다.

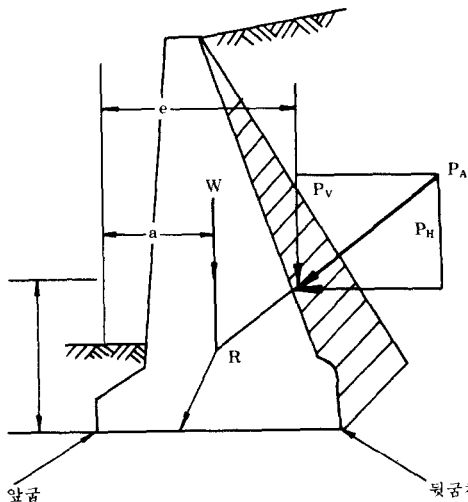


그림 3. 중력식 옹벽
(구조물기초설계기준 그림 8.3)

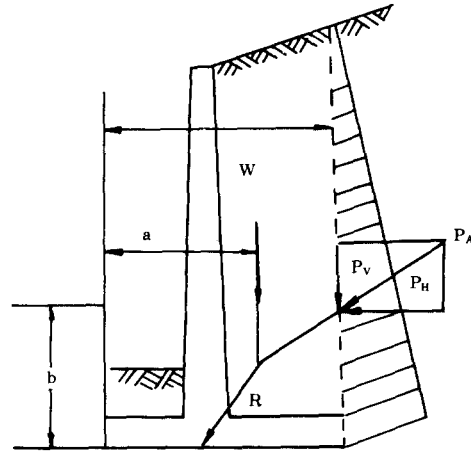


그림 4. 역T형 옹벽
(구조물기초설계기준 그림 8.3)

● 옹벽 전면의 수동토압은 상당히 큰 변형이 일어난 후라야 수동토압이 유효하게 작용되므로 보통 이것을 고려하지 않는다.

● 지지지반이 사질토인 경우 콘크리트와 흙의 마찰계수는 지지지반의 내부마찰각 ϕ 를 채택하고 점착력은 무시한다. 점성토지반에서는 일축압축강도의 $\frac{1}{2}$ 을 활동저항성분으로 한다. 기타의 경우 마찰계수의 표준치는 아래와 같다.

○ 실트 또는 점토를 함유하지 않는 粗粒土 :

0.55 (ϕ = 약 29도)

○ 실트를 함유한 粗粒土 : 0.45 (ϕ = 약 24도)

○ 실트 또는 점토(저판 아래 10cm가 모래 또는 자갈로 치환된 경우) : 0.35 (ϕ = 약 19도)

지표면에 상재하중이 없는 경우 옹벽에 작용하는 토압에 대해서 본 시방서(8.2.1 절)의 내용을 요약하면 다음과 같다.

가. 주동토압

(1) 지표면이 수평, 옹벽배면이 수직이고 벽마찰이 무시되는 경우

Rankine의 주동토압계수를 사용(그림 5)

(2) 일반적인 경우

Coulomb의 주동토압계수를 사용(그림 6)

나. 수동토압

(1) 지표면이 수평, 옹벽배면이 수직이고 벽마찰

이 무시되는 경우
 Rankine의 수동토압계수를 사용
 (2) 도표를 이용하는 경우(시방서 표 8.1)
 (3) 일반적인 경우
 Coulomb의 토압계수를 사용

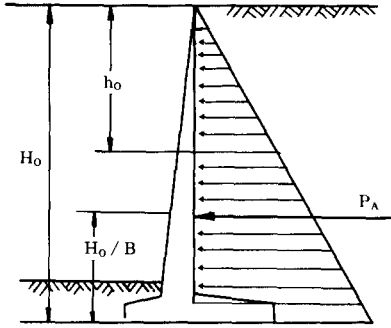


그림 5. 랭킨의 주동토압
 (구조물기초설계기준 그림 8.1)

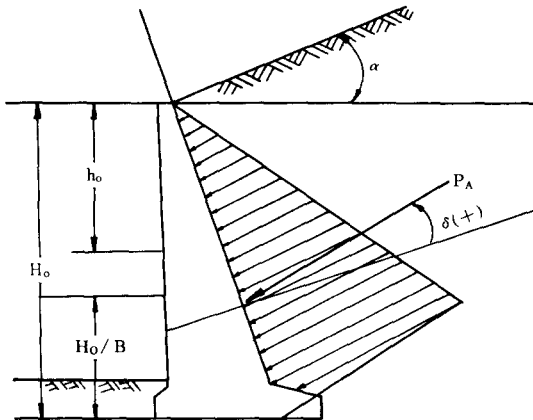


그림 6. 쿨롱의 주동토압
 (구조물기초설계기준 그림 8.1)

2.3 콘크리트 標準示方書

외력에 대한 옹벽의 안정에 관한 시방서의 내용(11.2절)을 소개하면 다음과 같다.

- 활동에 대한 저항력은 옹벽에 작용하는 수평력의 2.0배 이상이어야 한다
- 전도에 대한 저항모멘트는 횡토압에 의한 전도모멘트의 2.0배 이상이어야 한다.

이에 대한 해설편의 주요 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 안전율의 상향조정
 횡토압에 대한 강도규준과 일치하는 안정규준이 되기 위해서는 옹벽의 활동 및 전도에 대한 안전율이 2.0이상 되어야 하므로 종전의 1.5에서 2.0으로 상향조정하였다.
- 지반이 흩일때 옹벽 저변과 지반사이의 마찰각은 지반흩 마찰각의 2/3로 한다.
- 역T형 옹벽에 대한 顛倒安定解析의 경우 그림 7과 같이 假想背면에 작용하는 토압을 고려하며 a점(옹벽 저판앞굽치)을 중심으로 전도모멘트와 저항모멘트를 계산한다.

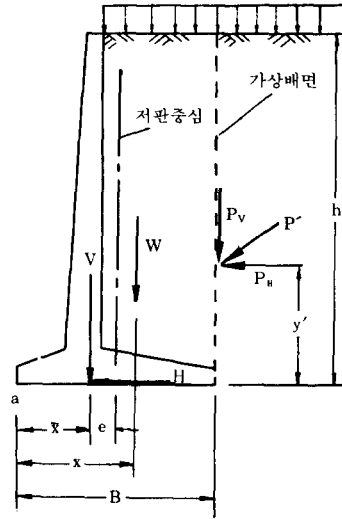


그림 7. (콘크리트 표준시방서 해설그림 11.1)

3. 示方書 内容에 대한 論議

앞에서 옹벽에 대한 示方書의 관련 내용을 인용하였는데 전반적인 개념면에서는 특별한 하자가 없으나 부분적인 오류와 내용의 불일치를 찾아볼 수 있었으며 이를 도로교표준시방서를 중심으로 논의한다.

3.1 道路橋 標準示方書

도표교시방서의 경우 다른 두 시방서에 비해

단면과 안정계산을 위한 토압작용면의 설정요령은 구체적으로 명시되어 있는 반면 顛倒, 滑動 등에 대한 안전율계산의 구체적인 항목들이 시방서 본문에 제시되어 있지 않을뿐만 아니라 안전율의 최소치들이 정의되어 있지 않은 점을 먼저 지적할 수 있다. 시방서 본문 및 해설상의 구체적인 주요 지적사항들은 다음과 같다.

1) 公式의 誤記

시방서에 표기된 원래의 (4)식은

$$P_p = K_p \gamma z + K_p q - 2cK_p^{1/2}$$

로서 점착력항이 “-”로 표기되어 있는데 수동토압의 경우 점착력의 증가에 따라 수동토압도 증가하므로 “+”로 바뀌어져야 한다.

2) 土壓力 作用方向의 誤謬

4.2.3 절 해설편에 소개되었던 그림 2에서 역 T형옹벽 背面 ab에 토압이 작용하는 경우 시방서 지침에 따라 쿨롱의 토압계수를 사용한다면 토압 작용방향은 벽마찰각 δ 를 반영하여야 하는데 그림에서는 토압의 작용방향이 수평으로 나타나있다. 이를 시방서의 토압이론에 부응하자면 구체배면의 토압작용방향도 중력식 옹벽(그림 1)과 마찬가지로 벽마찰각 δ 가 반영되어야 일관성이 유지될 것이다.

그리고 그림 2의 dc는 어디까지나 Rankine의 토압이론을 전제로 한 假想土壓力作用面으로서 이 假想背面상에는 흙과 흙사이의 相對變位가 없는만큼 전단이 발생하지 않는다. 따라서 가상배면에 작용하는 토압의 작용방향은 배면토의 기울기와 일치하여야 한다(Wu, 1975, Das, 1984, NAVFAC, 1982, 정인준 및 김상규, 1987). 따라서 배면토가 수평이면 가상배면상의 토압방향도 수평하여야 한다($\delta=0$). 토압방향에 관한 오류는 그림 2 뿐만아니라 그림 8(시방서 해설그림 4.2.5)에서도 찾아볼 수 있다.

3) 흙-벽체 摩擦角의 單純性

시방서 4.2.3 절 해설편의 “토압작용면의 壓面摩擦角”(표 1)에서는 벽면마찰각을 단순히 내부마찰각(ϕ)의 1/3을 취하도록 규정하고 있으나 실제 벽면마찰각은 콘크리트의 面質에 따라서도 달라진다. 그리고 본시방서의 경우 滑動에 대한 安定 해석시에도 $\frac{1}{3}\phi$ 를 그대로 적용하는지에 대해서는 별도로 기술하고 있지 않다.

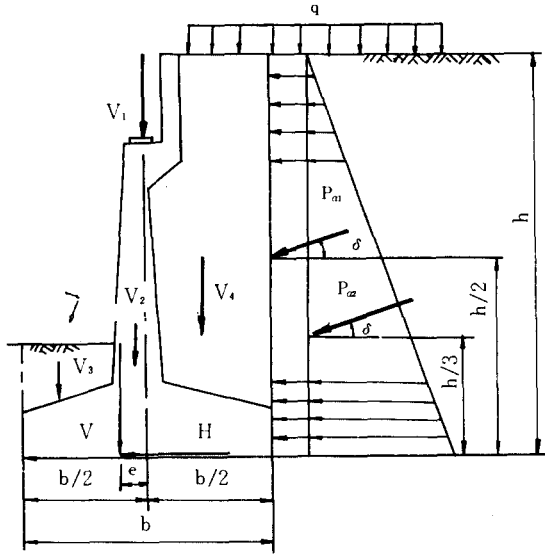


그림 8. 안정계산시 하중상태 (도로교표준시방서 해설 그림 4.2.5)

끝으로 표 1에 보인바와 같이 역 T형 교대의 안정계산을 위하여 설정한 假想背面상의 마찰각을 $\delta=\phi$ 로 제시하였는데 앞에서 지적한바와 같이 가상배면에 대해 “벽면마찰각”의 적용은 적절치 않다.

표 2. 콘크리트의 面質 및 흙의 종류에 따른 壁面摩擦角

	경 계 면 상 태	흙-콘크리트 마찰각(도)
Mass Concrete	상태가 양호하며 깨끗한 암석	35도
	깨끗한 자갈, 자갈-모래, 粗粒모래	29~31도
	깨끗한 細粒~中粒모래, 실트질 中粒~粗粒모래, 실트질 또는 점토질 자갈	24~29도
	깨끗한 細粒모래, 실트질 또는 자갈질의 細粒~中粒모래	19~24도
	細粒의 모래질 실트, 非塑性의 실트	17~19도
Formed Concrete	깨끗한 자갈, 자갈-모래 混合土, 粒度가 양호한 spall의 rock fill	22~26도
	깨끗한 모래, 실트질 모래-자갈 혼합토, 단일 크기의 hard rock fill	17~22도
	실트질 모래, 실트 또는 점토가 섞인 자갈 또는 모래	17도
	細粒의 모래질 실트, 非塑性 실트	14도

참고로 흙-콘크리트 마찰에 관해 구체적으로 세분한 NAVFAC DM-7.2의 내용을 소개하면 표 2와 같다.

4) 橋梁構造物設置가 土壓에 미치는 影響 不考慮

橋臺위에 보 및 床板과 같은 교량구조물이 설치된 경우 橋臺의 변위는 정지상태에 가까우므로 일종의 unyielding wall로 간주할 수 있다. 따라서 土壓에 저항하는 橋臺壁體의 단면설계시 주동토압 계수보다 정지토압계수를 적용하는 것이 바람직하다(Wu, 1974, NAVFAC, 1982). Craig(1974)도 교량구조부재에 의해 구속효과를 갖는 橋臺의 경우 설계토압으로서 정지토압 또는 정지토압과 주동토압 사이의 값을 사용을 기술하고 있다. 물론 橋臺와 背面土만 있을 경우는 일종의 전형적인 옹벽으로서 전도 또는 활동에 대한 안정해석시 주동토압을 적용한다. 본 시방서의 경우 2.1.8 절에서 土壓算出을 위하여 주동 및 수동토압의 可動壁과 정지토압의 固定壁으로 구분하고 있을뿐 위의 문제에 관련된 지침은 명시되어 있지 않다.

3.2 構造物基礎設計標準

본 시방서(8.3절)에서도 옹벽의 안정문제의 해설을 위하여 제시한 그림3의 중력식 콘크리트옹벽 배면상의 토압력 작용방향과 그림 4의 가상배면상의 토압력 작용방향이 토압작용면에 대해 어떤 기울기를 갖는지에 대해 구체적으로 명시하고 있지 않다. 앞의 도로교 표준시방서의 논의내용과 일관성을 갖기 위해서는 그림 3의 중력식 옹벽의 경우 P_A 의 작용방향에는 그림 1과 같이 배면경사각(θ)과 벽마찰각(δ)이 표기되어야 하며, 그림 4의 역 T형 옹벽의 경우 가상배면상의 P_A 의 기울기는 背面土의 경사와 일치함을 明記하여야 할 것이다.

3.3 콘크리트 標準示方書

그림 7에서 볼 수 있듯이 본 시방서에서도 역 T형 옹벽의 경우 배면토가 수평임에도 불구하고 가상배면상의 全土壓力방향을 경사지게 표기하고 있음을 미루어 가상배면상의 마찰각 δ 를 가정하는

오류가 있음을 알 수 있다. 따라서 앞의 논의내용과 일관성을 갖기 위해서는 그림 7에서도 全土壓力의 작용방향을 수평하게 수정하여야 한다.

특히 본시방서에서는 전도 및 활동에 대한 안전율을 1.5에서 2.0으로 상향조정하였음을 밝히고 있는데 가상배면상 토압방향을 그림 7과 같이 가정하여 산출된 顛倒에 대한 안전율이 2.0을 상회하더라도 本橋의 제안에 따라 계산할 경우 오히려 일반적으로 통용하고 있는 안전율 1.5보다도 더 낮아 질 수 있으므로 안전율의 상향조정보다 토압 방향의 올바른 설정이 더 중요함을 알 수 있다. 이에 대해서는 후술할 예제를 통하여 다시 한번 설명하기로 한다.

그리고 滑動에 대한 안정성 해석에서 “구조물기초설계기준”의 경우 사질토에 대해 저판과 지반과의 마찰각을 ϕ 로 채택했음에 반하여 “콘크리트표준시방서”에서는 벽체저면 아래가 암반이 아니라 흙인 경우 $\frac{2}{3}\phi$ 의 사용을 시방서 11.2절의 해설편에서 제안하고 있는데 滑動시 발생하는 전단변위의 크기를 고려하면 後者が 합리적이라고 볼 수 있다. 그러나 보다 정확한 안전율 산정을 위해서는 여기서도 NAVFAC과 마찬가지로 벽체콘크리트 底面의 面質과 흙의 종류에 따른 세분화가 필요하다고 본다.

4. 安定計算例

역 T형 타입 옹벽의 경우 安定해석시 가상배면상의 토압을 사용하는데 기존의 관련시방서에서는 가상배면에 작용하는 토압력의 작용방향이 잘못 설정되어 있거나 분명치 못함을 앞에서 지적하였다. 본 절에서는 예제를 통하여 먼저 가상배면에 작용하는 토압력의 잘못된 가정이 안전율에 미치는 영향을 보이고 이해의 증진을 위하여 뒷채움이 경사진 경우에 대한 안전율 산출의 예제를 소개하고자 한다.

4.1 토압작용방향이 安定에 미치는 영향

①, ②, ③의 수직력을 계산하면(여기서, 콘크리트의 단위중량은 $2.4t/m^3$)

$$\text{①: } 2.4 \times (0.4 \times 5.6) = 5.376t/m$$

$$\text{②: } 2.4 \times (0.4 \times 2.3) = 2.208t/m$$

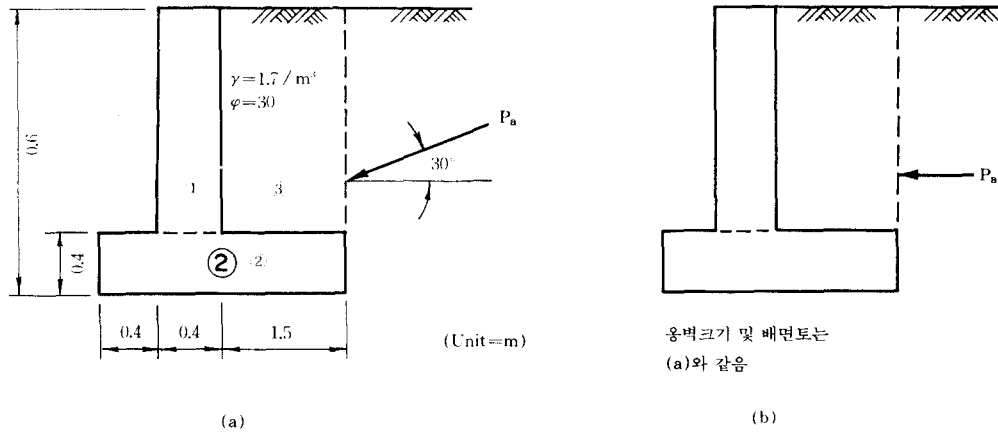


그림 9. 가상배면상의 토압력 작용방향이 안정이 미치는 영향

③: $1.7 \times (1.5 \times 5.6) = 14.280t/m$
 랭킨의 토압이론에 따라 가상배면에 작용하는 전주동토압을 계산하면

$$P_a = \frac{1}{2} K_A \gamma H^2$$

$$= \frac{1}{2} \tan^2(45 - 30/2) \times 1.7 \times 6^2 = 10.2t/m$$
 먼저 가상배면에 작용하는 주동토압이 시방서의 제안대로 가상배면의 수직면과 마찰각(30도)만큼 기울어져 작용한다면 수평 및 수직분력은

$$P_h = P_a \times \cos\phi = 10.2 \times \cos 30 = 8.833t/m$$

$$P_v = P_a \times \sin\phi = 10.2 \times \sin 30 = 5.1t/m$$
 c 점에 대한 전도모멘트는

$$M_D = 8.833 \times 2 = 17.67t \cdot m$$
 c 점에 대한 각 힘의 모멘트팔의 길이를 고려하여 저항모멘트를 계산하면

$$M_R = 5.376 \times 0.6 + 2.208 \times 1.15 + 14.28 \times 1.55 + 5.1 \times 2.3 = 39.63t \cdot m$$
 따라서 전도에 대한 안전율은

$$FS = M_R / M_D = 39.63 / 17.67 = 2.24$$
 로서 "콘크리트표준시방서"의 최소안전율 2.0의 측면에서 본다면 전도에 대해 안전하다고 볼 수 있다.
 그러나 앞에서 지적한 바 처럼 마찰을 고려한 假想背面에서의 分力化는 옳지 못하므로 주동토압이 수평방향으로 작용하는 것으로 보아 전도에 대한 안전율을 재계산해 보기로 한다.
 c 점에 대한 전도모멘트는

$$M_D = 10.2 \times 2 = 20.4t \cdot m$$
 c 점에 대한 각 힘의 모멘트팔의 길이를 고려하여 저항모멘트를 계산하면

$$M_R = 5.376 \times 0.6 + 2.208 \times 1.15 + 14.28 \times 1.55 = 27.9t \cdot m$$
 顛倒에 대한 안전율은

$$FS = M_R / M_D = 27.9 / 20.4 = 1.37$$
 로서 이 값은 오히려 기존의 최소안전율 1.5에 못미치므로 불안전측이 된다.

표 3 배면토 및 지반의 마찰각 $\phi=30$ 도

콘크리트저면-지반 마찰각 (도)	가상배면의 토압력 방향	콘크리트저면-지반 활동저항력 (t/m)	수평 토압력 (t/m)	계산 안전율	시방서 최소 안전율	관련 시방서
30	$\sigma = \phi$	15.56	8.83	1.76	1.5	구조물기초
30	$\sigma = 0$	12.62	10.20	1.24	1.5	구조물기초
20	$\sigma = \phi$	9.81	8.83	1.11	2.0	콘크리트
20	$\sigma = 0$	7.96	10.20	0.78	2.0	콘크리트

본 예제의 경우 가상배면상의 토압력의 작용방향에 따라 顛倒安全率은 약 40%의 차이가 발생함을 보여주었는데 이를 볼 때 토압력의 작용방향에 대한 그릇된 가정이 전도에 대한 안정성을 잘못 판정할 수 있는 가능성이 충분히 있음을 시사하고 있다.

활동에 대한 안정성해석의 경우 벽체콘크리트 저면과 지반흙 사이의 마찰각이 “구조물기초설계기준”의 경우 ϕ 를, “콘크리트표준시방서”의 경우 $\frac{2}{3}\phi$ 를 제안하고 있기 때문에 위의 顛倒문제에 서처럼 같이 단일안전율을 얻을 수는 없으나 토압력의 작용방향이 미치는 영향을 알아보기 위하여 계산결과를 요약하면 표 3 과 같다.

위의 계산결과에서 보다시피 가상배면상의 토압력 방향을 잘못 설정함으로써 활동안전율은 저면-지반 마찰각이 30도의 경우 1.24에서 1.76으로, 20도의 경우 0.78에서 1.11로 과대계산될 수 있음을 지적할 수 있다 그리고 저면-지반 마찰각의 감소($\phi \rightarrow \frac{2}{3}\phi$)에 따라서는 활동안전율이 토압력방향이 ϕ 인 경우 1.76에서 1.11로, 수평한 경우 1.24에서 0.78로 상당히 감소함을 볼 때 콘크리트저면-지반 마찰각의 올바른 결정도 매우 중요함을 알 수 있다. 특히 “콘크리트 표준시방서”의 경우 “구조물기초설계기준”에 비하여 저면-지반 마찰각을 ϕ 에서 $\frac{2}{3}\phi$ 로 낮춤과 동시에 최소안전율을 1.5에서 2.0으로 상향조정함으로써 활동에 대한 안정성을 이중적으로 증가시킴을 볼 수 있다.

4.2 傾斜背面土의 顛倒에 대한 安定 計算例

이번 예제에서는 實務的 參考로서 그림 10과 같이 흔히 당면할 수 있는 역 T형 옹벽으로서 뒷채움이 경사진 경우에 대한 顛倒安全率의 계산예를 보이고자 한다. 마참가지로 옹벽저판의 右端(heel)을 지나는 연직면의 假想背面을 따라서는 Rankine의 主動狀態로 본다.

그림 10으로부터

$$H' = H_1 + H_2 + H_3 = 2.6 \tan 10^\circ + 6 + 0.7 = 7.158 \text{ m}$$

주동토압계수에 관한 식으로부터

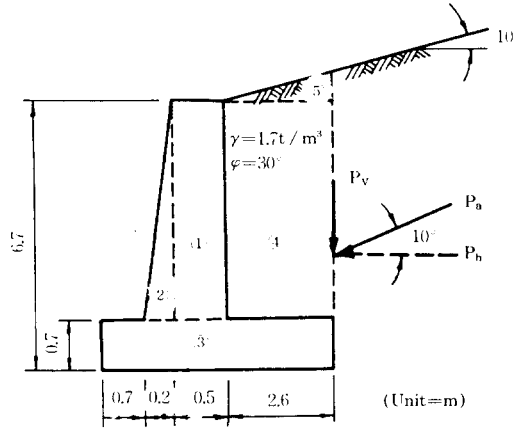


그림 10. 背面土가 경사진 경우의 顛倒에 대한 安定

$$\begin{aligned} K_A &= \frac{\cos \alpha - (\cos^2 \alpha - \cos^2 \phi)^{1/2}}{\cos \alpha + (\cos^2 \alpha - \cos^2 \phi)^{1/2}} \cos \alpha \\ &= \frac{\cos 10^\circ - (\cos^2 10^\circ - \cos^2 30^\circ)^{1/2}}{\cos 10^\circ + (\cos^2 10^\circ - \cos^2 30^\circ)^{1/2}} \cos 10^\circ \\ &= 0.3549 \end{aligned}$$

따라서

$$\begin{aligned} P_a &= 1/2 \times 1.7 \times 7.158^2 \times 0.3495 = 15.22 \text{ t/m} \\ P_v &= P_a \times \sin 10^\circ = 15.22 \times 0.1736 = 2.64 \text{ t/m} \\ P_n &= P_a \times \cos 10^\circ = 15.22 \times 0.9848 = 14.99 \text{ t/m} \end{aligned}$$

c 점을 중심으로 顛倒하려는 경향에 저항하는 모멘트는 아래와 같이 계산할 수 있다.

콘크리트의 단위중량 = 2.4 t/m³

단면 번호	단면의 면적 (m ²)	단위길이당 무게 (t/m)	C 점으로부터의 거리 (m)	C 점으로부터의 모멘트 팔의 길이 (t-m)
1	3.0	7.2	1.15	8.28
2	0.6	1.44	0.83	1.20
3	2.8	6.72	2.0	13.44
4	15.6	26.52	2.7	71.60
5	0.596	1.01	3.13	3.16
P _v		2.64	4.0	10.56
				$\Sigma M_R = 108.24 \text{ t-m}$

顛倒모멘트, M_o는

$$M_o = P_n \times H' / 3 = 14.99 \times 7.158 / 3 = 35.77 \text{ t-m}$$

따라서 顛倒에 대한 安全率은 다음과 같다.

$$FS = \Sigma M_R / M_o = 108.24 / 35.77 = 3.03$$

5. 提 案

5.1 土壓에 대하여

1) 적용토압

앞에서 논의한 것처럼 橋臺의 경우 교대 構築後 교량구조물이 설치되면 벽체변위가 거의 허용되지 않으므로 unyielding wall로서 정지상태로 볼 수 있다. 따라서 주동토압(K_A)보다는 정지토압(K_0)을 적용하여 벽체 단면을 설계하는 것이 타당하다. 그러나 교량구조물 설치前의 경우 벽체 변위가 허용되므로 안정성 해석시 주동토압을 적용한다.

2) 토압이론

앞에서 논의한 기존시방서들은 원칙적으로 Coulomb의 토압이론을 강조하고 있으나 假想土壓面을 설정할 경우 Rankine의 토압이론이 적용되어야 함을 지적한 바 있는데 여기서 이러한 가상 토압면은 비단 역 T형 옹벽뿐만 아니라 중력식 옹벽에서도 생각할 수 있다(그림 11). 橋臺의 경우 배면토가 대부분 수평이며 그림 12에서 보는바와 같이 도로표준시방서에서 제안한 벽면마찰각 $\frac{1}{3}\phi$ 를 고려하더라도 Rankine과 Coulomb의 토압계수는 그리 큰 차이를 보이지 않는다. 따라서 다음과 같은 이유에서 實務的으로 Rankine 토압을 사용하는 것이 실용적으로 사료된다.

- 안전측의 계산결과
- 적용이론의 일관성
- 계산과정의 간편성

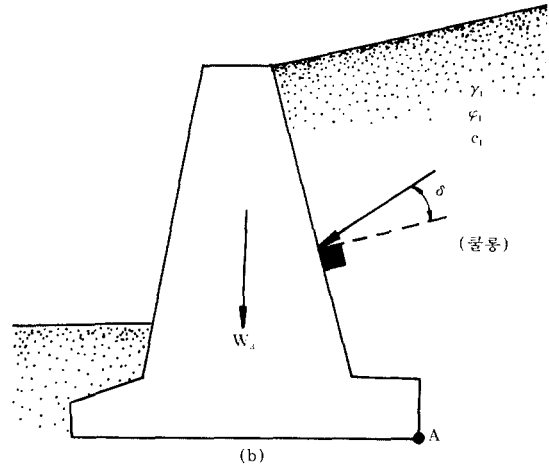
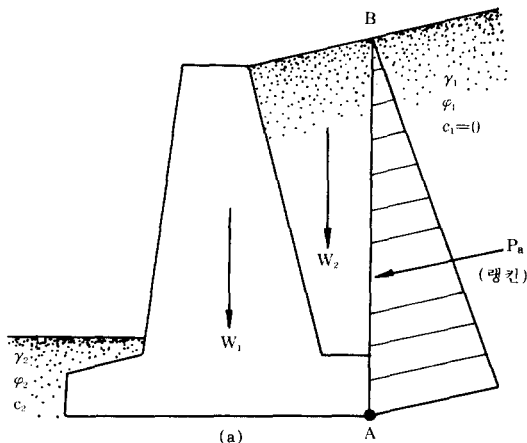


그림 11. 중력식 옹벽에서의 작용토압 (Das, 1984)

○ 타형식의 구조물(예: 슈트파일)에서 이를 通用

- 벽체 재질: 콘크리트
- $\delta = \frac{1}{3}\phi$ (1986년판 도로표준시방서)
- 벽체: 수직 ($\theta=0$)
- 뒷채움면: 수평 ($\alpha=0$)

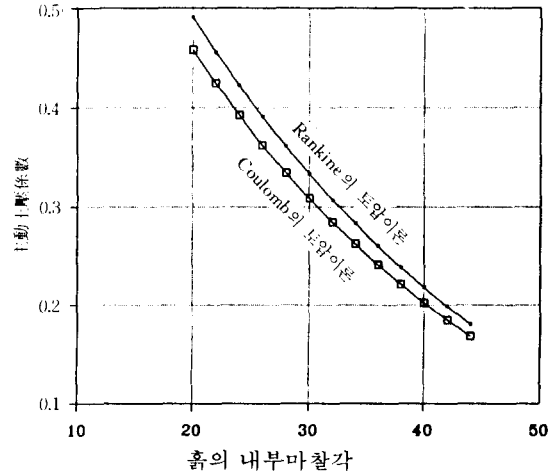


그림 12. Rankine과 Coulomb의 주동토압계수

그러나 全土壓은 壁體高의 제곱에 비례하는 만큼 壁體高가 높은 경우 Rankine의 방식이 非經濟的인 설계를 초래할 수도 있으므로 Coulomb의 방식과의 비교가 필요하다(構造物基礎設計基準解説, 1986). 단, 여기서도 토압이 벽면에 직접 작용하는 것이 아니라 가상토압면에 작용할 경우에는 당연히 Rankine 토압이 적용되어야 한다.

끝으로 토압에 관한 示方書 내용에 일관성을

부여하는 취지에서 표 1의 내용을 아래의 표 4과 같이 再整理하였다. 유의할 것은 橋臺의 경우 벽체단면 설계계산시 Rankine 또는 Coulomb의 주동토압보다는 정지토압이 바람직함을 상기할 필요가 있다.

표 3 橋臺種類와 土壓理論

橋臺의 종류	計算의種類	適用理論	비 고	참고그림
重力式 橋臺	斷面計算 및 安定計算	Coulomb理論	壁體-흙 마찰 고려. 벽체 및 뒷채움면 경사가 토압계수에 직접 반영됨	그림 1 그림 3 그림 6 그림 11右
		Rankine理論	壁體-흙 마찰 무시. 배면토 경사와 토압작용방향은 평행. Coulomb에 비해 安全側. 안정계산시 경우에 따라 假想背面 고려함.	그림 11左 그림 12
역T형 및	斷面計算	Coulomb理論	上記 쿨롱이론과 동일	그림 2*
		Rankine理論	上記 랭킨이론과 동일	그림 5
부벽식 교대	安定計算 (顛倒)	Rankine理論	假想背面상의 토압을 사용.**	그림 9 (b) 그림 10

*그림 2의 ab면에 작용토압은 벽마찰 때문에 δ 만큼 경사한다.

**그림 2의 dc면, 그림 7의 가상배면, 그림 8에서는 배면토가 수평한만큼 가상배면상의 전토압력의 작용방향도 수평하여야 하고 그림 4에서는 배면토 경사와 P_A 의 기울기가 같아야 한다.

5.2 벽체-흙의 마찰각에 대하여

1) 壁體背面과 背面土

앞에서 도로교표준시방서의 벽마찰각 제안치인 $\frac{1}{3}\phi$ 를 무시하더라도 벽체배면 수직, 배면토 수평의 경우 주동토압차이가 약 8% 정도로서

安全性과 簡便性을 생각할 때 Rankine 방식이 실용적임을 제안한 바 있는데 經濟性 측면에서 Coulomb의 방식을 고려할 경우 $\delta = \frac{1}{3}\phi$ 보다는 NAVFAC의 제안(표 2)처럼 콘크리트의 面質과 채움흙의 종류를 고려하여 세분화하는 것이 합리적이라고 사료된다. 참고로 그림 13은 흙의 내부마찰각(ϕ)의 변화에 따른 벽체-흙의 마찰각(δ)과 주동토압계수(K_A)의 관계를 보여주고 있다.

2) 壁體底面과 地盤

앞의 시방서 논의부분과 예제부분에서 언급하였듯이 벽체저면과 지반사이에 설정된 마찰각 크기에 따라 滑動에 대한 안전율이 크게 달라짐을 볼 때 기존 시방서들의 벽체저면-지반 마찰각 결정 방식은 지나치게 단순하다고 생각되며 마찬가지로 NAVFAC의 제안처럼 콘크리트의 面質과 지반토의 종류에 따라 좀 더 세분하여 시방서에 반영할 필요가 있다고 본다.

5.3 假想背面에 작용하는 全土壓力의 作用方向과 安全率에 대하여

本稿에서 가장 중점적으로 강조하고 싶은 사항으로서 顛倒 및 滑動에 대한 안전율 계산을 위하여 설정한 土壓作用面인 假想背面을 따라서는 剪斷應力이 발생하지 않으므로 선택의 여지없이 랭킨의 토압이론을 따르며 假想背面에 작용하는 토압력의 작용방향은 背面土의 기울기와 일치하여야 한다. 즉, 背面土가 수평할 경우 假想背面의 토압력 작용방향도 수평이 되어야 한다. 그리고 가상배면상의 토압력 작용방향을 수평으로 정정할 경우 계산안전율이 감소하므로 "콘크리트표준시방서"의 최소 안전율 2.0은 1.5로 환원하는 것이 바람직하며 참고로 주요문헌에서도 아래에 보인바와 같이 대부분 1.5를 기준으로 하고 있다.

- Craig, R.F.(1974) : 1.5(활동)
- Wu, T.H.(1975) : 1.5(전도)
- NAVFAC(1982) : 1.5(전도)
- 1.5(활동, 벽체前面下部 수동토압 고려시는 2.0)
- Das, B.M.(1984) : 1.5~2.0(전도)
- 1.5(활동)

○ 벽 체 : 수직($\theta=0$)
 ○ 뒷채움면 : 수평($\alpha=0$)

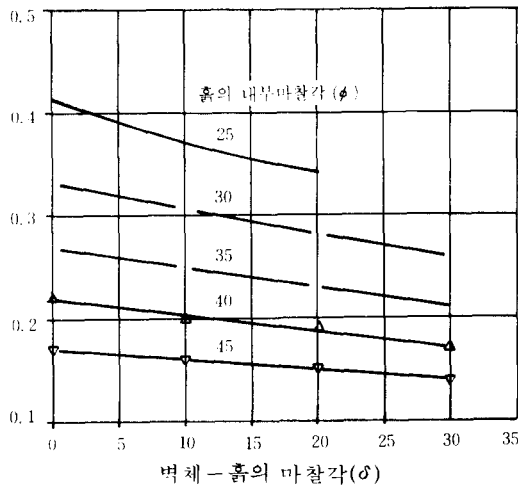


그림 13. 벽체-흙의 마찰각 변화에 따른 주동토압계수의 변화

○ 鄭寅峻, 金翔圭(1987): 1.5(활동)

특히 “도로교 표준시방서”의 경우 안전율에 대한 기준이 명시되어 있지 않는데 교대의 특성을 고려하여 시방서 규정에 반영할 필요가 있다.

6. 結 論

토압으로 인한 橋臺의 문제에 대하여 기존 시방서의 관련내용을 중심으로 검토하였다. 이로부터 강조하고 싶은 주요사항들은 다음과 같다.

- 1) 實務에서 차지하는 示方書의 중요성을 감안할 때 시방서의 관련 규정 및 해설내용의 보다 명확한 敍述과 諸示方書의 관련내용간에 안전율, 벽체-흙 마찰등에 관한 상호일관성이 요망된다.
- 2) 역 T형 또는 중력식 橋臺의 경우 假想背面이라 불리우는 土壓作用面을 가정, Rankine 토압이론에 근거하여 작용토압력을 계산하여 安定解析을 실시한다. 이 때 假想背面에 작용하는 토압력의 방향은 배면토의 기울기와 일치하여야 한다. 즉, 배면토가

수평할 경우 假想背面상 토압력 작용방향도 수평하다.

- 3) “콘크리트 표준시방서”의 顛倒 및 滑動에 관한 최소안전율 2.0은 “구조물기초설계기준”과 동일하게 1.5로 환원하는 것이 타당하다.
- 4) 교량구조물에 의한 교대변위의 억제효과를 감안할 때 벽체단면 결정시에는 주동토압보다 정지토압을 적용하는 것이 바람직하다.
- 5) 橋臺의 경우 Rankine의 토압이론이 안전측으로서 보다 實用的이라고 사료된다.

參考文獻

- 建設部(1986)
 “道路橋 標準 示方書”, pp.36~41, 889~893
- 大韓土質工學會(1986)
 “建設部 制定 構造物基礎設計基準 解説”, pp.425~458
- 鄭寅峻, 金翔圭(1987)
 “土質力學”, 東明社, pp.145~175.
- Cernica, J.N.(1982)
 “Geotechnical Engineering”
 Holt, Rinehart and Winston, The Dryden Press, pp.312~348
- Craig, R.F.(1974)
 “Soil Mechanics”,
 Van Nostrand Reinhold Co., pp.118~156
- Das, B.M.(1984)
 “Principles of Foundation Engineering”
 Brooks / Cole Engineering Division, Wadsworth, Inc., pp.207~266
- Department of Navy, U.S.A.(1982)
 “Foundations and Earth Structures”
 Design Manual 7.2, pp.7.2-59~7.2-127
- Lambe, T.W. and Whitman, R.V.(1979)
 “Soil Mechanics”
 John Wiley & Sons, pp.162~194
- Winterkorn, H.F. and Fang, H.Y.(1975)
 “Foundation Engineering Handbook”
 Van Nostrand Reinhold Co. pp.402~417(Retaining Walls, by Wu, T.H.)