

난쟁이 교대배면의 장기 토압거동

Long term earth pressure behavior behind stub abutment

박영호¹⁾, 정경자²⁾, 김낙영³⁾, 황영철³⁾

- 1) 한국도로공사 도로연구소 지반연구실 수석연구원, Director Research Engineer, HRC
2) 한국도로공사 도로연구소 지반연구실 연구원, Researcher, Geotechnical Div. of HRC
3) 한국도로공사 도로연구소 지반연구실 책임연구원, Chief Researcher, Geotechnical Div. of HRC

SYNOPSIS : To find a long term horizontal movement of superstructure caused by seasonal thermal change, several types of gages are installed such as soil earth pressuremeter behind stub abutment and jointmeter between approach slab and relief slab.

As results, maximum passive earth pressure behind integral bridge abutments centerline with lateral movement of superstructure is about 1/6 of classic Rankine's earth pressure. And its distribution is not triangular but rectangular shape due to shape behind integral bridge abutments.

Key words : 계절적 온도변화, 장기교대배면토압, 랭킨토압, 직사각형 토압분포

1. 서론

계절적인 온도변화에 의해 교량의 상부구조물에서는 신축량이 발생하고, 발생한 신축량은 구조물 내에서 흡수를 해주어야 한다. 신축량이 대소에 따라 구조물 내에 설치되는 신축량 해소장치의 수가 결정될 것이다.

기존의 조인트 교량에서 발생하는 상부구조물의 신축량은 교대로 전이되지 않게 교대 위와 PSC Beam 사이에 신축이음장치(expansion joint)를 설치한다. 그러나 무조인트 또는 일체식 교량에서는 교대나 PSC Beam 사이에 신축이음장치를 설치하지 않고, PSC Beam 단부를 서로 용접하여 만든 하나의 큰 상부거더를 교대에 일체시킨다. 이 교대는 난쟁이 교대로써 폭 1m, 높이 4m 이다. 이 교량의 신축량 조절은 신축조절장치(cyclic control joint, CCJ)라는 곳에서 흡수하며, 설치 위치는 상부구조물 내에 설치하지 않고, 접속슬랩브와 완충슬랩브 사이에 30cm의 틈을 주어 일반 아스팔트 콘크리트를 채운다.

계절적인 온도변화에 의해 무조인트 교량의 상부구조물에 신장량이 발생하면, 난쟁이 교대와 말뚝과 접속슬랩브가 완전 일체되어 있기 때문에 말뚝의 강성과 말뚝 주변 흙의 상태, 교대 배면의 수동토압, 접속슬랩브 저면과 보조기층 사이의 마찰력을 저항하고 남는 변위량이 신축조절장치에 전이된다. 반대방향인 신축량도 동일한 양상이다.

여기서는 이러한 변위거동에 작용하는 교대배면의 주동 및 수동 토압의 장기거동을 알아 보고자 한다.

2. 교대 배면 뒷체움 지반조건

2.1 무수층

무조인트 교량에서는 기존의 역T형 옹벽 대신 난쟁이 교대를 사용하기 때문에 별도의 뒷채움부를 두지 않는다. 본 시공에서는 뒷채움부는 교대 배면에 약 1m 정도의 배수층을 두고, 그 배면에 약 1m 정도의 무진동 다짐 구간(또는 완충구간)을 두었다. 특히 배수층은 상부구조물의 온도 팽창과 수축 등에 의해 교대의 수평이동시 입자간의 상호 역물림작용(interlocking)이 이를 저해하지 않도록 점착력이 없고 내부마찰각이 작으며 입자가 비교적 등근 재료(일명 SB-3)를 이용하여 느슨하게 채움하였다(그림 1참조). 완충구간과 배수층 사이에는 부직포를 설치하여 노상층으로부터 세립분의 유입을 막고(분리 및 차단의 기능) 원활한 배수(필터기능)를 도모하였다.

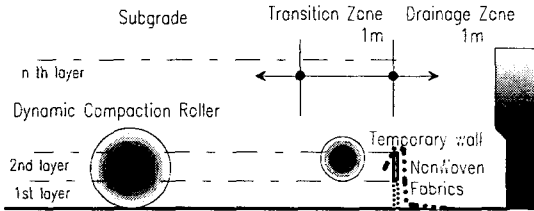


그림 1. 뒤채움 및 노상층의 다짐시공 모식도

본 교량에 사용한 배수층인 SB-3 재료는 SB-2에 비해서 규격이 크고 그림 2에 나타난 것처럼 입도가 불량하다. 다짐은 무다짐상태로 설치하는데 이는 교대의 수평거동시 수동토압의 발생을 최소화하고, 배수를 원활히 하기 위함이다.

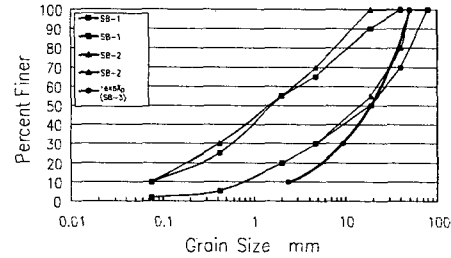


그림 2. SB-3의 입도분포곡선

2.2 노체와 노상

조인트 교량 교대 뒷채움과 달리 교대와 접속슬래브 사이의 구간은 노상성토에 준하는 다짐관리를 시행하였다. 완성된 노상면에 대해 RI장비를 이용하여 측정된 건조밀도와 함수비, 그리고 상대다짐도는 각각 평균 1.82g/cm^3 , 11%, 95~98%이었고, k_{30} 은 $15\sim 16\text{ kg/cm}^3$ 정도였다. 또 다짐횟수는 성토 재료에 따라 차이가 있었으나 대체로 왕복 4~8회 정도였다. 본 교량은 사각이 30도로서 접속슬래브의 단변과 장변의 길이가 약 7~13.5m에 이른다. 평촌1교 노상층 성토재료의 입도분포는 그림 3과 같다.

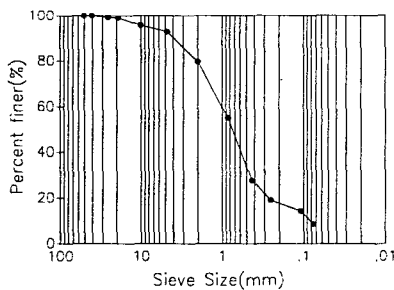


그림 3. 사용된 노상 재료의 입도분포

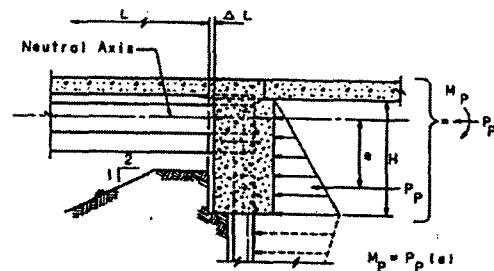


그림 4. 간편화된 수동토압분포

노상 다짐에 사용된 장비는 11t 진동롤러(독일 BOMAG사 모델명 : BW213D)이며 30~36Hz범위의 진동이 가능하나 다짐시에는 고주파수 저진폭 상태인 36Hz(2100rpm)을 적용하였고 다짐방향은 교축(직각)방향, 장비진행속도는 2~4km/h 정도였다.

3. 이론적인 토압분포

3.1 고전적인 토압

상부구조물 신장으로 인한 일체식 교대에 발생하는 수동토압과 교대 배수층 재료의 압축은 그림 4

에 나타나 있다. 수평이동으로 말뚝의 휨저항을 감소시키기 위해, H 말뚝은 약축방향으로 설치하고, 모가 나지 않은 둥근자갈(pea gravel)이나 입도분포가 좋은 모래(fine sand)로 프리보링된 구멍에 채워 넣는다. 이러한 경우에, 총 수동토압은 다음과 같이 이상화할 수 있다.

$$P_p = \left(\frac{1}{3} \text{ or } \frac{2}{3} \text{ or } 1\right) \Sigma \gamma \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \frac{H^2}{2} \quad (1)$$

여기서 P_p : 최대수동토압(psf),

γ : 흙의 단위중량(pcf)

H : 접속슬래브 아래의 깊이(ft),

ϕ : 내부마찰각(degrees)

수동토압의 크기는 흙의 압축정도에 좌우되고, 최대수동토압은 교대 깊이의 약 5%의 흙압축이 발생될 때 생긴다(Wu, 1982; DM-7, 1982). 이 이론에 의하면, 평촌1교의 교대 배수층 재료가 최대 수동토압상태에 도달하기 위해서는 수평변위, $\Delta L=16.82\text{cm}(=0.05 \times 3.364\text{m})$ 가 되어야 한다. 따라서 수동토압 효과는 보통 단경간, 2경간, 3경간 교량에서는 보통 무시한다. 흔히 많이 사용하는 일체식 교량 길이 즉, 강교에서는 90m, 콘크리트 교량 120m 길이에서는 설계시에 최대수동토압의 2/3 크기를 고려한다.

3.2 사이로 토압

그림 5와 같이, 벽체 바로 뒤에 일정한 간격을 두고 강성벽체가 있으면 완전한 주동 흠뻐기의 형성이 불가능하며, 양 벽체의 마찰에 의하여 토압이 감소한다. 따라서 어느 깊이를 넘으면 아치작용으로 자중에 의한 응력이 사이로 측면에 전해져서 연직 및 수평토압이 거의 증가하지 않는데 이를 사이로 작용(silo action)이라고 한다. 이러한 경우의 토압을 사이로 토압이라고 하며 그 크기는 다음과 같다.

지반의 자중과 벽마찰력이 같을 때, 깊이 h_0 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$h_0 = \frac{b}{2k \tan \delta_f} \quad (2)$$

여기서, b : 사이로 폭, μ : 벽면의 마찰계수 = $\tan \delta_f$, δ_f : 벽마찰각, k : 사이로 수평토압계수 = 벽면에 대한 토압계수

토압은 h_0 에서 최대 수평토압이 되고, $h > h_0$ 에서는 그 크기가 일정하다.

$$p_{\max} = \gamma h_0 k = \frac{\gamma b}{2 \tan \delta_f} \quad (3)$$

여기서, γ : 대상 재료의 단위중량

또한 Petersen & Schmidt(1974)에 의하면 폭이 0.5~1.0m이면, 깊이 15m 까지 다짐에 의한 토압은 40kN/m^2 를 초과하지 않는다(이상덕, 1996).

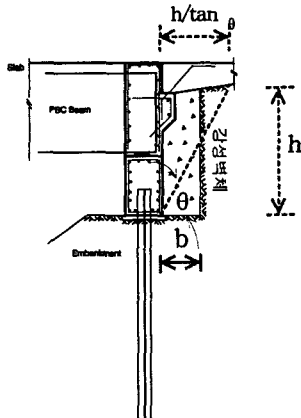


그림 5. 두 강성벽체사이의 주동 파괴면과 사이로 토압

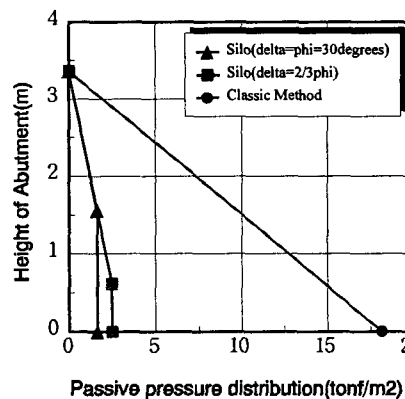


그림 6. 고전적인 토압과 사이로 토압 비교

따라서 교대 배면의 배수층에 대한 조건을 표 1과 같이 가정하고 구한 고전적인 수동토압과 사이로

토압은 그림 6과 같다.

표 1. 사일로 토압 계산에 적용한 물성치

구분	사일로 폭, b	대상 재료의 단위중량, γ	내부마찰각, ϕ	벽마찰각, δ_f	벽면의 마찰계수, $\mu = \tan \delta_f$	사일로 수평토압 계수, k	고려한 깊이, h
기준	1(m)	자연지반의 모래 및 모래자갈 조건	30° 가정	$\delta_f = 2/3 \phi$ $\delta_f = \phi$	$\mu = \tan \delta_f$	1-sin ϕ	난쟁이 높이
참고문헌	-	도로교표준시방서, 1996, p.52	도로교표준시방서, 1996, p.52	이상덕, 기초공학, 1996, p.351	-	-	-
적용	1(m)	1.8(tonf/m ³)	30°	10°	0.18	0.5	3.364(m)

4. 장기거동 계측기 부착

4.1 토압계

토압의 최대크기는 동일한 크기의 날개벽 이동에 대해 날개벽의 방향에 영향을 받는다(Thomson, 1999). 여기서는 상부구조물의 최대신축량에 따른 날개벽 90°인 난쟁이 교대의 장기 수동 및 주동토압 분포를 알아보기 위해서, 일본의 (주)동경측기연구소(TML)의 제품인 토압계(Soil pressure gauge:KDA-200KPA)을 난쟁이 교대 A1, A2 배면 중앙에 각각 4개씩 부착하였다.

토압계의 모서리 영향(edge effect) 때문에 토압계 직경의 2배 만큼을 콘크리트로 에워싸고 하행선 교대 배면 중앙에 부착하였다. 교대 A1에 부착된 토압계의 위치는 기초저면에서 토압계 중심까지의 거리가 0.525, 1.3, 2.07, 2.7m에 부착되어 있고, 교대 A2의 위치는 그림 7과 같이, 0.525, 1.333, 2.133, 2.74m에 부착되어 있다.

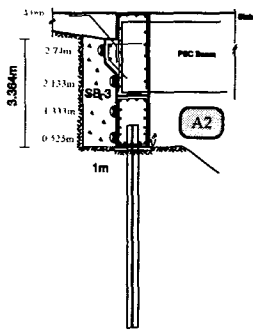


그림 7. 난쟁이 교대 토압계 부착 위치도

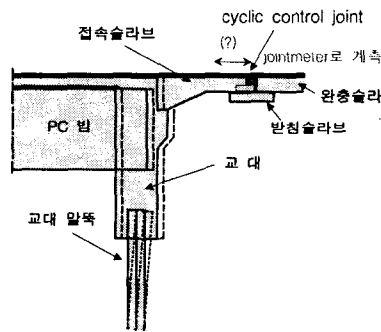


그림 8. 조인트 미터의 설치 위치

4.2 조인트 미터

조인트 교량의 상부구조물에서 발생하는 신축량은 상부구조물의 지점과 교대에 설치된 신축이음장치(expansion joint)가 순수하게 흡수한다. 하지만 무조인트 교량인 일체식 교량에서는 H 말뚝 주변지반의 강성과 난쟁이 교대 배면의 수동토압 및 주동토압, 접속슬라브와 보조기층 재료와의

마찰력에 의해 소진되고 남은 변위만이 신축조절장치(cyclic control joint:CCJ)에 변위가 전달된다(그림 8 참조).

이 변위량을 측정하기 위하여, 매입형 Jointmeter(KJ-10A)를 1차선, 2차선 교대 A1, A2에 각각 1개씩 총 4개를 부착하였다(그림 9, 10 참조). 여기서 A11(12)는 하행선 A1 교대측 1(또는 2)차선 중앙부 매설 위치이고, A21(22)는 하행선 A2 교대측 1(또는 2)차선 중앙부 매설 위치이다.

5. 수평이동에 따른 교대배면 토압 거동

5.1 상부구조물의 수평변위 거동

2001년 9월 2일, 조인트미터를 신축조절장치(CC)부에 설치한 날로부터 당해연도 12월달까지 상부 구조물의 수평이동량을 계측한 결과는 그림 12와 같다. 조인트미터를 설치하고 8일 경과후, 9월 10일에는 9월 2일보다 날씨가 추워서 상부구조물이 수축하는 거동을 나타내었다. 이 장치 내에 아스팔트 콘크리트를 타설하였을 때에는 아스팔트 콘크리트의 열에 의해 일시적으로 인장하는 거동을 보였다. 계절이 가을에서 겨울로 접어들면서 상부구조물이 수축하게 거동을 보였고, 계측한 날의 최대 수축량은 교대 A1의 A11과 A12 지점에서는 각각 8.8, 9.7mm가 발생하였다. 그리고 교대 A2의 A21과 A22에서는 각각 10.6, 10.9mm가 발생하였다.

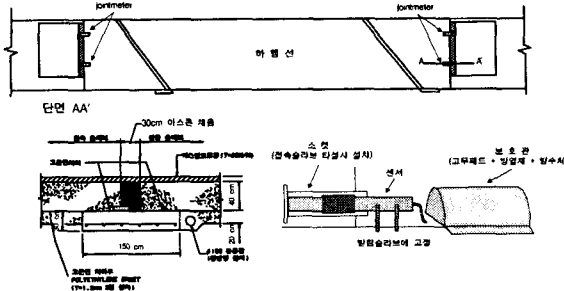


그림 9. 조인트 미터 설치단면도

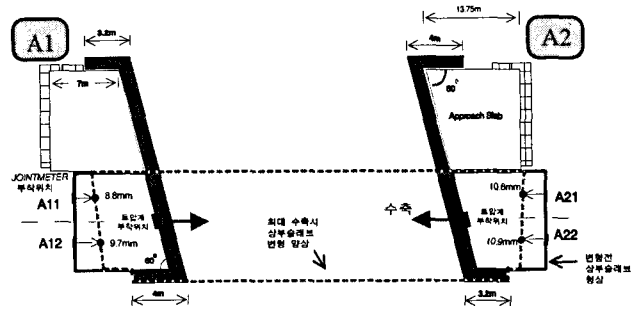
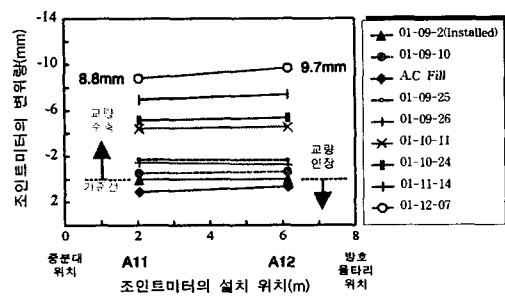
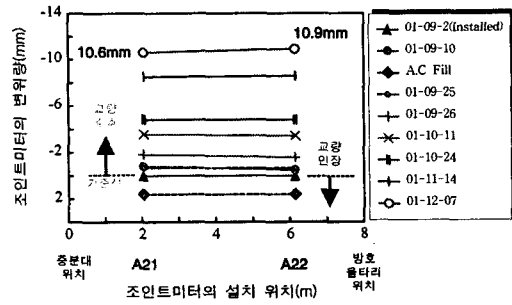


그림 10. 교대배면 토압계 설치 단면도



(a) 교대 A1



(b) 교대 A2

그림 11. 각 조인트 미터에 발생된 변위 거동

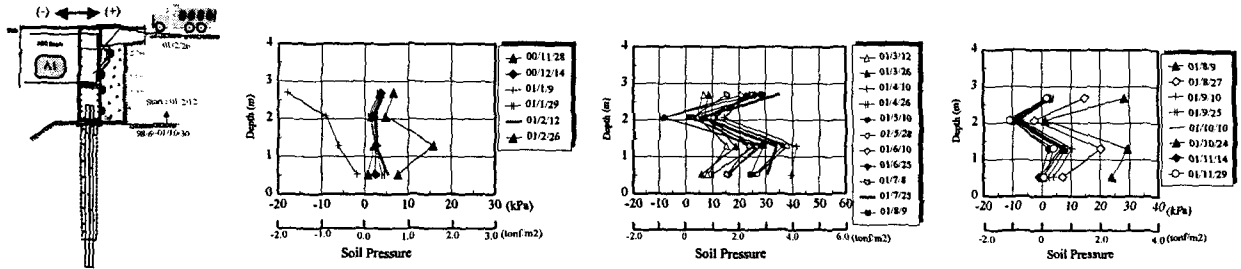
조인트미터의 최대값을 평촌1교 교량의 평면도에 나타내면 그림 10과 같다. 이 그림에 의하면, 교대 A1, A2가 교축방향으로 균등하게 수축되는 것이 아니라, 약간 비균등하게 즉, 중분대쪽 보다는 방호울타리쪽이 더 많은 수축량을 보였다. 이는 평촌1교가 사각 30도에 곡률반경, R=2km과 종단구배 2.852%(A1에서 A2로)을 지니고 있기 때문인 것으로 판단된다.

5.2 교대배면 토압거동

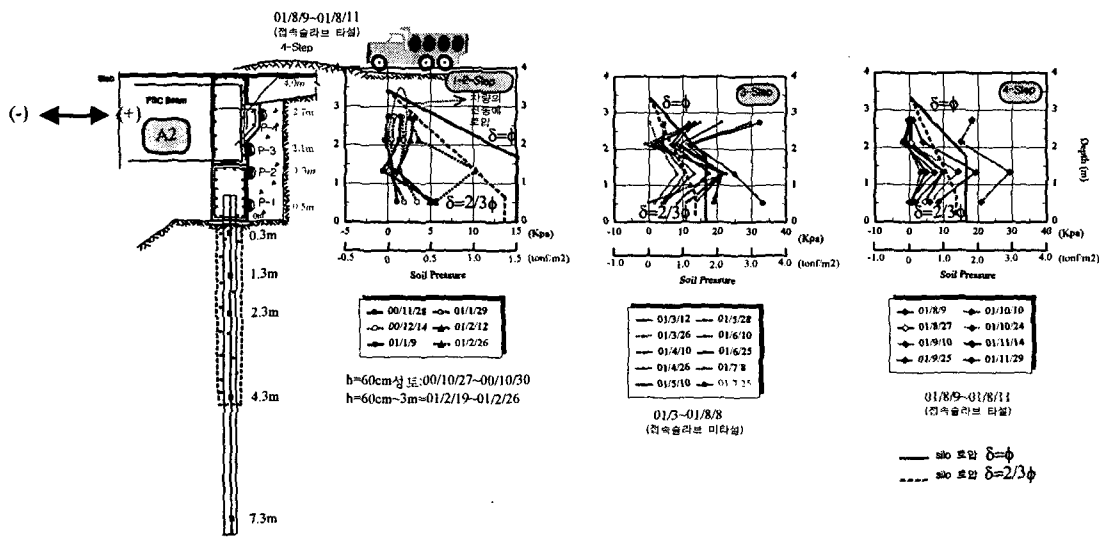
접속슬래브 설치하기 전에 2001/2/12~2001/2/26까지 교대 A1, A2 배면의 배수층 설치와 교대배면의 성토체 다짐시의 토압거동을 각각 그림 12(a)와 13(a)에 나타나 있다. 그리고 2001/2/12 전까지 교대 A1의 계측 결과에 의하면, 교대배면의 무성토 상태에서 토압계의 변화가 발생하였다. 그리고 교대 A2에서 1단계 성토높이(0~60cm)를 다짐한 후, 교대배면 토압은 썩석에 묻힌 최하단 토압계에서만 실측되어야 하는데, 다짐하지 않고 3개월 동안 방치된 3개의 상부 토압계에서도 약간의 토압이 증가하는 거동을 보였다. 이는 교량 측면에 있는 가도로 주행하는 작업차량의 진동에 의한 것으로 판단된다.

그림 12(b)와 13(b)는 접속슬래브를 설치하지 않은 상태에서 교대가 배면쪽으로 움직일 때의 거동을 나타내고 있다. 교대가 배면쪽을 움직이면 움직일수록 수동토압 크기는 점진적으로 증가하는 경향을

보였다. 하지만 기초저면에서 최상단(2.7m)에 부착된 토압계의 토압크기가 다른 위치에 부착되어 있는 토압크기 보다 상대적으로 크게 나타났는데, 이는 교대 배면의 형상이 다른 면보다 30cm 튀어나와 있고, 배수층의 폭(70cm)이 다른 교대 배면의 폭(1.0m) 보다 작기 때문으로 판단된다.



(a) 겨울철 (b) 여름철 (c) 여름철과 겨울철
그림 12. 신축량에 따른 교대배면 뒷채움 토압분포 거동 - 교대 A1



(a) 겨울철 : 접속슬래브 미설치 (b) 여름철 : 접속슬래브 미설치 (c) 여름철과 겨울철: 접속슬래브설치
그림 13. 신축량에 따른 교대배면 뒷채움 토압분포 거동 - 교대 A2

접속슬래브를 설치하고 난후에 교대 배면에서 발생하는 수동 및 주동 토압분포를 그림 12(c)와 13(c)에 나타나 있다. 접속슬래브를 설치하고 난후의 토압크기(01/8/9~01/8/27)는 설치하지 않았을 때의 토압크기 보다 작게 나타났는데, 이는 접속슬래브의 건조수축과 접속슬래브와 보조기층재료와의 저항력에 의해 토압이 감소한 것으로 판단된다. 그리고 상부구조물이 신장할 때, 다시 수동토압이 증가하는 거동을 보였다. 최대수동토압은 고전적인 랭킨토압의 삼각형과 사일로 토압분포를 보이지 않고 지그재그 분포를 보였다. 이는 전술한 바와 같이, 교대 배면의 단면형상에 의한 것으로 판단된다. 그리고 대기온도의 저하로 토압은 점차적으로 감소하는 거동을 보였다. 또한 최대수동토압이 작용하는 위치는 교대 저면에서 1.3m(0.38H)이었다.

그리고 주동토압 분포는 기초저면에서 1.3m 위에 설치된 토압계에서 조금 크게 나타나고 그외의 계측기에서는 거의 0에 가까운 값을 보였다. 이는 상부구조물이 수축되면서 SB-3 재료의 입자재배열에 의한 토압크기인 것으로 판단된다. 이 크기는 작아서 무시해도 좋을 것 같다. 하지만 교대 A1의 기초저면에서 2.1m 높이의 토압계는 다른 위치보다 작을 뿐만아니라 부의 토압이 계측되었다. 이는 SB-3 재료의 아칭작용에 의한 것으로 판단된다.

6. 주동 및 수동 토압분포 제안

6.1 수동토압 분포 제안

그림 14는 그림 12(c)와 13(c)에서 교대 A1, A2 배면의 배수층에서 발생한 최대 수동토압거동이다.

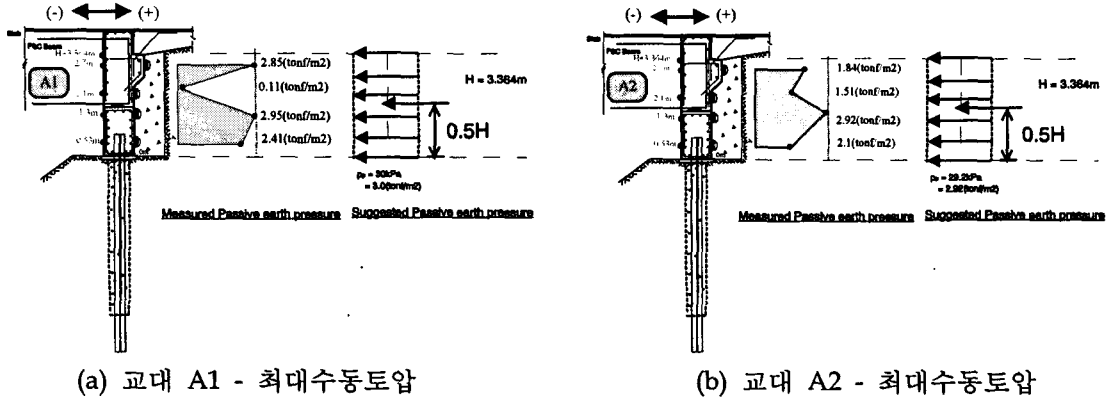


그림 14. 교대 배면의 최대수동토압

교대 배면 배수층의 실측 토압분포는 지그재그의 토압분포를 보이고, 최대수동토압 위치는 기초저면에서 1.3m 즉, 0.38H 위치에 실측되었다. 이를 설계에 즉, 보수적으로 사용하기 위하여, 실측한 수동토압중에서 최대값을 기준으로 균등한 직사각형 분포형식으로 개략화하고, 최대수동토압 위치를 기초저면에서 0.5H 위치에 작용하는 것으로 하였다. 동일한 총 수동토압이라고 가정하고 도심관점에서 보면, 새로 제안한 도심에서 작용하는 총 수동토압은 고전적인 방법의 총 수동토압(합력 도심은 1/3H) 보다 상부구조물에 작용하는 힘은 작게, 하부기초에 작용하는 힘은 크게 작용한다(그림 5 참조). 하지만 실측한 최대수동토압 크기는 29.2~30kPa로 일반 성토재료의 수평토압 크기보다 약 1/10 정도의 크기이다.

그림 12(c)와 13(c)에서 구한 계측 결과에 의하면, 최대 수동토압은 매우 작기 때문에 설계시에 이를 무시하는 것이 좋을 것 같다. 그리고 그림 12~14의 교대 A1, A2 배면에서 발생하는 수동 및 주동토압 크기 차이가 발생하는 것은 본 교량이 지니고 있는 사각과 곡률반경에 의한 것으로 판단된다.

6.2 수동토압 식 제안

6.2.1 토압크기 비교

장기 계측에 의한 최대수동토압의 크기는 $p_p=2.92\sim 3.0(\text{tonf}/\text{m}^2)$ 이고, 고전적인 최대수동토압, $p_p^R=18.16(\text{tonf}/\text{m}^2)$ 에 알맞는 최대수동토압 계수는 다음과 같다(식 1, 그림 6 참조). 단, 여기서는 배수층의 내부마찰각, $\phi=30^\circ$ 로 가정한다.

$$F = \frac{18.16(\text{tonf}/\text{m}^2)}{3(\text{tonf}/\text{m}^2)} = 6.0 \quad (4)$$

$$p_p^{\text{suggested}} = \frac{p_p^R}{F} = \frac{\gamma H \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)}{F} = \frac{18.16(\text{tonf}/\text{m}^2)}{6} = 3.0(\text{tonf}/\text{m}^2) \quad (5)$$

그리고 총 수동토압 식은 다음과 같다.

$$P_p = p_p^{\text{suggested}} H = 3 \times 3.364(\text{m}) = 10.1(\text{tonf}) \quad (6)$$

여기서 제안한 총 수동토압은 고전적인 방법에서 토압계수, 1/6를 곱하면 실측한 값과 매우 유사한 결과를 얻을 수 있다.

6.2.2 사일로 토압식과 비교

벽면마찰각을 $\delta_f = \frac{2}{3}\phi$, $\delta_f = \phi$ 로 가정하여 구한 사일로 토압, p_p 과 총토압, P_p 은 각각 2.47, 1.56(tonf/m²)과 4.92, 3.9(tonf)이다. 벽면마찰각을 $\delta_f = \frac{2}{3}\phi$ 로 가정하여 구한 사일로 토압, $p_p =$

2.47(tonf/m²)과 실제로 측정한 토압, $p_p = 2.92\sim 3.0(\text{tonf/m}^2)$ 와 비슷한 크기이지만, 총토압은 사일로 토압력보다 실측한 값이 크게 나타났다.

실제로 측정한 토압, $p_p = 2.92\sim 3.0(\text{tonf/m}^2)$ 는 벽면마찰각을 $\delta_p = \frac{2}{3}\phi$ 로 가정하여 구한 사일로 토압, $p_p = 2.47(\text{tonf/m}^2)$ 보다 약간 크게 나타났고, 고전적인 토압크기 보다는 1/6배 작게 나타났다. 따라서 설계시, 교대 배면토압의 형태와 작용점과 크기는 각각 균등한 직사각형 분포형식, 기초저면에서 0.5H, 고전적인 토압크기, p_p 에 1/6배를 적용할 것을 제안한다. 그리고 최대주동토압은 매우 작기 때문에 이를 무시하는 것이 좋을 것 같다.

7. 결론

토압의 크기는 작용면적과 날개벽의 방향, 수평이동량 등에 대해서 영향을 받는다. 여기서는 상부 구조물의 신축량에 따른 날개벽 90°인 난쟁이 교대의 장기 수동 및 주동토압 분포를 알아보기 위해서, 토압계는 하행선 양 교대 배면 중앙에 각각 4개를, 신축조절장치는 하행선 완충과 접속 슬래브 사이에 조인트미터를 각각 2개씩 설치하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 본 교량의 수평이동량은 교대 A1, A2에서 균등하게 수축되는 것이 아니라, 약간 비대칭으로 즉, 중분대쪽(8.8~10.6mm) 보다는 방호울타리쪽(9.7~10.9mm)이 더 많은 수축량을 보였다. 이는 평촌1교가 사각 30도에 곡률반경, R=2km과 종단구배 2.852%을 지니고 있기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 교대 A1 보다 낮은 위치에 있는 교대 A2의 방호울타리쪽에서 10.9mm의 최대 수축 변위량이 발생하였다.
- (2) 장기 측정에 의하면, 교대 배면의 수동토압은 지그재그형의 토압분포를 보이고, 최대수동토압 위치는 기초저면에서 1.3m(0.38H) 위치에 실측되었다. 이를 고전적인 토압과 사일로 토압과 비교하면, 실측한 토압분포는 고전적인 토압과 사일로 토압과는 상이한데 이는 교대배면의 형상에 의한 것으로 판단된다.
- (3) 장기거동에 의한 주동토압 분포는 기초저면에서 1.3m에 설치된 부분이 조금 크게 나타나고 그 외는 거의 0에 가까운 값을 보였다. 이는 상부구조물이 수축되면서 SB-3 재료의 입자재배열에 의한 토압크기인 것으로 판단된다. 이 크기는 작아서 무시해도 좋을 것 같다.
- (4) 실측한 최대수동토압, $p_p = 2.92\sim 3.0(\text{tonf/m}^2)$ 는 벽면마찰각을 $\delta_p = \frac{2}{3}\phi$ 로 가정하여 구한 사일로 토압, $p_p = 2.47(\text{tonf/m}^2)$ 보다 약간 크게 나타났고, 고전적인 수동토압 크기 보다 1/6배 작게 나타났다. 따라서 설계시, 교대 배면토압의 형태와 작용점과 크기는 각각 균등한 직사각형 분포 형식, 기초저면에서 0.5H, 고전적인 토압크기, p_p 에 1/6배를 적용할 것을 제안한다. 그리고 최대 주동토압은 매우 작기 때문에 이를 무시하는 것이 좋을 것 같다.

참고문헌

1. 이상덕, "토질역학", 새론, pp.344~346, 1998.
2. 한국도로공사, "고속도로전문시방서", pp.4-20~4-23, 1998
3. Tien Hsing Wu, Soil Mechanics, I.H. Wu, Worthington, Ohio, 1982, pp.276~280.
4. Thomson, Jr. and Lutenegger, A.,(1999) "Passive Earth Pressure Tests On An Integral Bridge Abutment", *Proceedings of the 4TH International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, May, 1999, pp.733~739.