편토압에 의한 교대 측방이동 및 압성토의 말뚝변형 억제효과 검토

양성호 | 토목기술부 대리 | 02-3433-7776 | E-mail: yang1222@mail.ssyenc.co.kr

1. 개요

1.1 검토개요

OO 도로현장의 반성철도육교 교대 기초는 강관말뚝으로 계획되어 있으나 아래 [표 1]과 같이 평균 말뚝항타근입길이중성토층근입길이가 50%를초과하고있는실정이다.

[표1] OO교대기초강관파일시공현황

구 분		시공본수 (ea)	말뚝의평균항타근입길이(m)	말뚝의성토층근입길이 (m)
상행선	교대A1	28	8.37	4.67
	교대A2	28	8.45	4.85
하행선	교대A1	32	7.95	4.63
	교대A2	32	8.52	4.97

또한, 2002년3월중순현재교대기초하부구간성토, 강관파일 항타 및 교대Footing을 시공 완료한 상태이며, 앞으로교대벽체구조물공사, 교대전면압성토 공사및 교대배면성토(뒷채움 포함) 공사를완료하여야한다. 본고에서는교대배면부성토시편토압에의한교대기초하부지반의전단변형가능성, 압성토체에 의한 말뚝변형억제효과및말뚝의지지력과수평변위에대한안정성을검토하였다.

1.2 검토내용

지반조사자료, 설계도서 및 관련문헌을 참조하여 다음사항에대하여검토하였다.

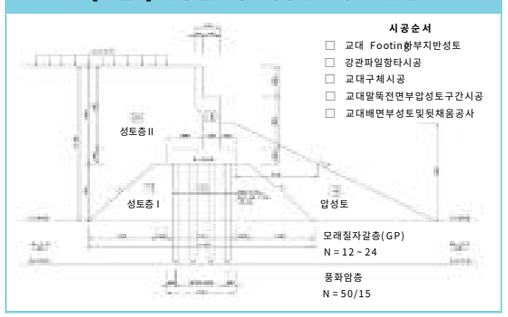
- 교대배면 성토시 편토압에 의한 교대 기초하부 지반의전단변형가능성검토
- 압성토체에의한말뚝변형억제효과검토
- 말뚝기초의안정성검토

2. 검토조건

2.1 검토단면

본 검토서에서는 성토층이 가장 두텁고, 교대 높이가가장높은하행선교대 A2를대표단면으로선정하였다.

[그림1] 반성철도육교하행선교대A2 단면도



2.2 구조형식

가. 상부공 형식

Steel Box Girder교(STA.6K357.00 ~ 6K487.00)

경간: 40+50+40 =130m, 교량폭: W=9.67m

나. 교대 하부공 형식 : 역T형옹벽

상행선(높이: H=8.0m, 교대폭: L=9.67m,
Footing 길이: B=5.10m)

하행선(높이: H=8.5m, 교대폭: L=10.18m,
Footing 길이: B=5.10m)

다. 기초공 형식

- 말뚝기초
- 강관Pile : 말뚝지름φ450×12t, L=8.5m

2.3 설계적용지반정수

지반조사자료에 따르면 원지반은 지표로부터 모래질자갈층및 풍화암층으로성층되어 있으며, 설계 적용토질물성치는실험값, 경험식및문헌값을참조하여다음[표 2]과같이적용하였다.

[표2] 설계적용토질물성치요약표

구 분	단위중량(t/㎥) γ	내부마찰각 φ(deg)	점착력 c (t/㎡)	비고
모래질자갈층	1.9	30	0.0	
풍화암층	2.1	35	5.0	
성 토 층	2.0	35	0.0	다 짐
압성토층	1.7	29	0.0	비다짐

2.4 과재하중

지표면 과재하중은 설계시 적용한 $q_0 = 1.0t/㎡$을 적용하였다.

2.5 지하수위

지반조사자료를참조하여EL + 18.3m를적용하였다.

3. 교대 기초하부 지반의 전단변형 가능성 검토

3.1 개요

검토 대상지반은상부로부터성토층, 모래질자갈층 및 풍화암으로 성층되어 있으므로, 연약점성토 지반상에 편토압 재하시 발생하기 쉬운 측방유동의 가능성은없는것으로판단된다. 그러나, 교대설치부의성토고가 최대 H = 13.5m에 이르고 공용시 반복 차량하중이작용할경우교대Footing 하부로의전단변형즉, 사면활동의가능성에대하여는당초설계시검토가 누락되어 있다. 따라서, 본 장에서는 원호활동에대한안전율을확인하여성토에 따른지반의활동가능성을검토하였다.

3.2 성토사면의허용안전율

도로설계실무편람에 의하면 교대의 측방유동에 대한판단은사면 안정 검토를실시하여 판정하는것을 원칙으로 한다. 또한, 성토사면의 최소안전율은 [표 3]과같이 1.1 ~ 1.3정도이나본검토서에서는파일의 저항효과를 고려하지 않고 한국도로공사 기준을 적용하여성토사면활동검토를위한기준 안전율은 1.3을 사용하였다. 다음 [표 3]은 각 기관별 성토사면의 안전율을나타낸것이다.

[표3] 성토사면의안전율

구 분	내 용	최소안전율
건설부	구조물기초설계기준	1.3
한국도로공사	도로설계요령	1.3
일본토질공학회	가설구조물등일반적인안정	1.0 ~ 1.2
	일반적인구조물의경우	1.3
	주요구조물의경우	1.5
일본건설성	표준적인계획안전율	1.1 ~ 1.3
일본항만협회	항만시설기술상의기준, 동해설	1.5

(도로설계편람,1996)

3.3 원호활동에의한안정성검토결과

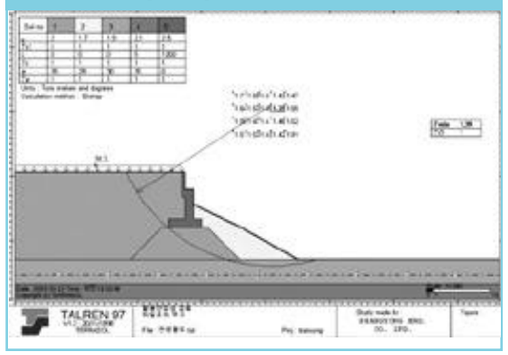
사면 안정해석 프로그램인 Talren97을 사용하여 사면 안전율을 검토한 결과 활동 안전율이 FS = 1.35로써 기준안전율FS = 1.3보다 크므로 교대 배면지반의 성토에 의한 편토압에 의해

Footing 하부로의 원호활동의 가능성은 작은 것으로판단된다. 따라서, 말뚝은교대에작용하는작용력을 지반에 전달하는 주동말뚝의 역할을 할 것으로판단된다.

[표4] 사면안정해석결과

교량명	안전율(FS)	기준값(FS)	판정
반상철도육교(A2)	1.39	1.3	안정

[그림2] 활동안전성검토결과



4. 압성토의 말뚝변형 억제효과에 대한 검토

4.1 개요

압성토체는 사면활동을 억제하는 기능과 편토압에 따른 구체와 말뚝기초의 변형을 억제하는 기능이 있다. 사면활동을억제하는측면에대해서는이미본검토서 3장에서 검토하였으므로 본 장에서는 압성토체가 말뚝의 수평력에 대하여 충분히 지반반력을 발휘할수있는지즉, 당초설계조건을만족할수있는지여부를검토하였다.

말뚝전면부의소단폭이작으면말뚝두부에작용하는 수평력에 대하여 지반은 충분한 지지력을 발휘할 수 없게되고, 과다한 수평변위가 발생할 것이며 이러한과다한수평변위는교대의측방이동의원인이되어 교대의안정성에치명적인영향을미칠수도있다.

또한, 교대 설계시 말뚝의 근입대상 지반은 N = 10의 반무한 탄성지반으로 가정하여 설계하였으나, 실제는 최외측 말뚝으로부터 사면까지의 직선 거리가 6.5m정도인 유한평면지반이다. 따라서, 본장에서는 소단폭이 6.5m이고 사면 경사가 1:1.8일 경우 압성토체가 설계에서 요구하는 지반반력을 충분히 발휘할수있는지그적정성여부를검토하였다.

4.2 관련자료

한국지반공학회지(Vol.16, No.11 2000.11)의 자료에따르면특성계수 $1/\beta$와소단폭을비교하여다음식을만족하는경우유해한영향은없다고판단한다.

$B = 1.5(1/\beta) \sim 2.0(1/\beta)$

여기서, $\beta = (K_h B_1 / 4EI)^{1/4}$

B : 소단폭

K_h : 수평지반반력계수

B_1 : 말뚝의직경

EI : 말뚝의휨강성

특성계수를사용하는방법은말뚝에대한검토예가 있다. 茶谷文男 · 宮崎祐助(1993)의모형실험에따르면 수평저항에 미치는 소단의 영향은 말뚝에서 소단까지의 수평거리가 $1/\beta$의 2.5배 이상에서는 무시할 수 있고, 1.5배 정도에서는 약간의 영향이 있으며, 1.0배이하로되면급격히증대한다.

4.3 교대전면부압성토체의적정성검토

· 근입대상지반의N값추정

말뚝주변은 다짐지반이나 다짐층 전면부는 비다짐 의압성토이다. ([그림2] 참조)

사면구배가 1:1.8로 형성되고 내부마찰각이 $\phi = 29°$ 정도의지반은도로교시방서제안식 $\phi = \sqrt{15N} + 15$로부터 역산하면 N = 1정도의 지반에 해당하며, 당초 설계시가정한 N = 10은말뚝주변의다짐효과를일부 고려할경우다소보수적인가정값이라고할수있다.

본 검토서에서는 근입대상 지반의 N값을 당초 설계시 적용한 N = 10로 가정하여도 무리가 없다고 판단되며, 다음[표 5]은다짐도, 상대밀도및N값의상관관계를나타낸것이다.

[표5] 다짐도, 상대밀도D_r 및N값의상관관계

Compactness	D_r	N (SPT)
Very loose	< 0.15	< 4
Loose	0.15 ~ 0.35	4 ~ 10
Medium dense	0.35 ~ 0.65	10 ~ 30
Dense (compact)	0.65 ~ 0.85	30 ~ 50
Very dense	0.85 ~ 1.0	> 50

(Gibbs and Holtz(1957))

· 수평방향지반반력계수K_h의추정

- 도로교표준시방서에의한방법

$$K_{H0} = k_{H0}\left(\frac{B_H}{30}\right)^{-\frac{3}{4}}$$

여기서, K_h : 수평방향지반반력계수 (kg/cm²)

k_{H0} : 지름 30cm의 강체원판에 의한 평판재하시험의 값에 상당하는 수평방향지반반력계수로서, 각종 토질시험 · 조사에의해구한변형계수로부터추정하는경우는다음식에서구한다.

$$K_{H0} = \left(\frac{1}{30}\right)\alpha E_0$$

α, E_0 : 지반반력계수의추정에쓰이는계수 및지반변형계수(kg/cm²)로서, 아래의 [표 6]의 E_0와 α의관계참조

[표6] E_0와 α값

다음의시험방법에의한변형계수E_0 (kg/cm²)	α	
	평상시	지진시
지름30cm의강체원판에의한평판재하시험을반복시킨 곡선에서구한변형계수의 1/2	1	2
보링공내에서측정한변형계수	4	8
공시체의1축또는3축압축시험에서구한변형계수	4	8
표준관입시험의N값에서E_0 = 28N으로추정한변형계수	1	2

B_H : 하중작용방향에 직교하는 기초의 환산재하폭 (cm)으로말뚝기초의경우 $B_H = \sqrt{D/\beta}$이다.

D : 하중작용방향에 직교하는 기초의 재하폭으로서 말뚝기초의경우파일의직경

β: 기초의특성치 $\beta = (K_h D / 4EI)^{1/4}$ (cm⁻¹)

EI : 기초의휨강성 (kg/cm²)

위에제시한식을간단히정리하면다음과같다.

$K_h = 0.34(\alpha E_0)^{1.1} D^{-0.3} (EI)^{-0.1}$

$= 0.34 \times (1 \times 280)^{1.1} \times 45.72^{-0.31} \times (2100000 \times 41600)^{-0.1} = 4.12 \text{kg/cm}^3$

여기서, $\alpha = 1$, $E_0 = 28N = 28 \times 10 = 280 \text{kg/cm}^2$

말뚝의직경 D = 45.72cm

강관말뚝의탄성계수 $E = 2.1 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$

말뚝의단면2차모멘트 $I = 41600 \text{cm}^4$

- N값을이용하여지반변형계수E_0를산정하는방법

[표7] 흙의종류별E_0 (kg/cm²)

흙의종류	E_0/N
실트, 모래질실트	4
가는내지중간모래	7
굵은모래	10
모래질자갈, 자갈	12 ~ 15

(철도설계기준, 1999)

따라서, 굵은모래인 $E_0 = 10N$을 적용하면, $E_0 = 10 \times 10 = 100 \text{kg/cm}^2$

도로교 표준시방서 유도식에 위에서 계산한 값을 대입하면다음과같다.

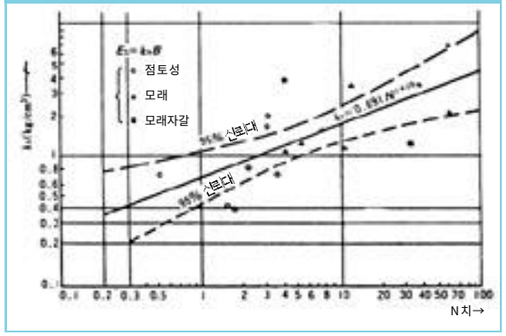
$K_h = 0.34(\alpha E_0)^{1.1} D^{-0.3} (EI)^{-0.1}$

$= 0.34 \times (1 \times 100)^{1.1} \times 45.72^{-0.31} \times (2100000 \times 41600)^{-0.1} = 1.33 \text{kg/cm}^3$

- Hukuoka의제안

$K_h = 0.691N^{0.406} = 0.691 \times 10^{0.406} = 1.76 \text{kg/cm}^3$

[그림3] N값과 Kh의관계



· Bowels(1982)의제안

[표8] Kh의범위

Soil	K_h , kcf	K_h , MN/m³
Dense sandy gravel	1400 ~ 2500	220 ~ 400
Medium dense coarse sand	1000 ~ 2000	157 ~ 300
Medium sand	700 ~ 1800	110 ~ 280
Fine or silty, fine sand	500 ~ 1200	80 ~ 200
Stiff clay (wet)	350 ~ 1400	60 ~ 220
Stiff clay (saturated)	175 ~ 700	30 ~ 110
Medium clay (wet)	250 ~ 900	39 ~ 140
Medium clay (saturated)	75 ~ 500	10 ~ 80
Soft clay	10 ~ 250	2 ~ 40

(Joseph E. Bowels(1982))

純각각의방법중에서최소값인K_h = 1.33kg/㎠를적용하였다.

· 특성계수(β)의산정

$$\beta = (K_hB_1/4EI)^{1/4} = \left[\frac{1.33\times 45.72}{4\times 2100000\times 41600}\right]^{1/4} = 0.00363\ cm^{-1}$$

· 소단의영향검토

$B = 6.5m > 2.0/\beta = 2.0/0.00363 = 551cm = 5.5m$ ∴OK

4.4 압성토체의적정성검토결과

말뚝이소단의영향을받지않기위해선 5.5m정도의소단폭을확보해야한다. 당초계획이말뚝최외측에서사면까지최소수평거리가 6.5m정도이므로횡하중작용시지반반력이감소할우려는없는것으로판단된다.

5. 말뚝기초의 안정성 검토

기초는지지, 전도, 활동, 사면활동, 침하등에대하여 안정해야 한다. 다음 [표 9]에서 보는 바와 같이 전도에 관한 검사는 직접기초에서는 필요하지만 케이슨기초, 말뚝기초, 강관널말뚝기초 등에 대해서는 일반적으로불필요하다.

[표9] 기초의안정검사항목

기초형식 \ 검사항목		지지력 연직	지지력 수평	전도	활동	수평 변위량
직접기초		0	(0)	0	0	-
케이슨기초	β1<1	0	0	-	0	-
	1<β1<2	0	0	-	0	0
강관널말뚝기초		0	-	-	-	0
말뚝기초	유한장말뚝	0	-	-	-	0
	반무한장말뚝	0	-	-	-	0

주( ) : 근입부분으로하중을분담하는경우
교대기초로써말뚝기초를적용할경우기초의안정성은연직방향의지지력과수평변위량으로판단한다.

- 연직방향의지지력

말뚝기초에하중이작용하여생기는말뚝머리부의축방향반력이말뚝의 허용지지력을초과하면안된다. 이 경우말뚝의 허용지지력은말뚝머리의지지력을말하며, 지반의지지력또는말뚝머리의변위량으로정해지는값이다.

- 수평변위량

말뚝기초의변위가허용변위량보다작아야한다. 하부구조의조건에따라 정해지는 허용변위량은 말뚝지름의 1%로 하는데, 지름이 1500mm 이하인말뚝은이제까지의실적을고려하여 1.5cm로한다. 다만, 편토압이작용하는경우에는설계지반면의말뚝지름의크고작음에관계없이평상시의수평변위량을 1.5cm까지로억제하는것이좋다.

다음 [표 10]은 축방향 지지력과 수평변위량에 대한 검토결과를나타낸것이며, 검토 결과말뚝기초는 작용하중에대하여안전한것으로판단되었다. 이때, 축방향 지지력에 대한 검토는 축방향하중과 허용지지력에 변화가 없으므로 생략하였고, 수평변위량은 변경된 근입길이(L)와 횡방향 지반반력계수(K_h)를 적용하여추정하였다.

[표10] 반상철육교말뚝기초안정성검토결과

구분	지지력	수평변위량(cm) 두부자유	수평변위량(cm) 두부고정	판정
당초	P_n = 57.6 ton < R_a = 80.7ton	y_0 = 0.43cm < δ = 1.5cm	y_0 = 0.25cm < δ = 1.5cm	안정
변경	P_n = 57.6 ton < R_a = 80.7ton	y_0 = 0.91cm < δ = 1.5cm	y_0 = 0.46cm < δ = 1.5cm	안정

· 말뚝두부의수평변위y_0 계산(Chang의방법)

$H_0 = 7.616ton = 7.616\times 10^3 kg$

$K_h = 1.33kg/cm^2$, $\beta = 0.00363cm^{-1}$, $B = 45.72cm$,

$L = 850cm$, $E_p = 2.1\times 10^6 kg/cm2$, $I_p = 41600\ cm^4$

$3/\beta = 3/0.00363 = 826cm < L = 850cm$ ∴긴말뚝

두부자유

$$y_0 = \frac{H_0}{2E_pI_p\beta} = \frac{7.616\times 10^3}{2\times(2.1\times 10^6)\times 41600\times 0.00363}$$

$= 0.91cm < \delta = 1.5cm$ ∴안정

두부고정

$$y_0 = \frac{H_0}{4E_pI_p\beta} = \frac{7.616\times 10^3}{4\times(2.1\times 10^6)\times 41600\times 0.00363}$$

$= 0.46\ cm < \delta = 1.5cm$ ∴안정

6. 검토결과

· OO 도로현장의 반성철도육교(상,하) 교대 기초는 강관말뚝으로 계획되어 있으나 평균 말뚝 항타 근입길이중 성토층 근입길이가 50%를 초과하고 있는실정이다. 본고에서는교대배면부성토시편토압에의한교대 기초하부 지반의 전단변형 가능성, 압성토체에의한말뚝변형억제효과및말뚝의지지력과수평변위에대한안정성을검토하였다.

· 교대배면 성토시 편토압에 의한 교대 기초하부 지반의전단변형가능성검토결과 Pile하부지반성토 → Pile 항타 →교대시공 →압성토 시공→ 배면지반 단계적 성토시 활동 안전율이 FS = 1.35로써 기준안전율FS = 1.3보다크므로 교대 배면지반의 성토에의한편토압에의해Footing 하부로의원호활동의가능성은작은것으로판단된다. 따라서, 말뚝은 교대에 작용하는 작용력을 지반에 전달하는 주동말뚝의역할을할것으로판단된다.

· 말뚝이소단의영향을받지않기위해서는 5.5m정도의 소단폭을 확보하여야 하는데 당초 계획이 말뚝 최외측으로부터 사면까지의 최소 수평거리가 6.5m정도이므로 횡하중 작용시 지반반력이 감소할우려는없는것으로판단된다.

· 축방향 지지력과 수평변위량에 대한 검토결과 말뚝기초는 작용하중에 대하여 안전한 것으로 판단된다.

참고문헌

- 건설교통부, 2000,“ 도로교설계기준 ”
- 한국지반공학회, 1997,“ 구조물기초설계기준 ”
- 장효완,주성문공역“ 말뚝기초설계편람 ”
- 한국지반공학회외, 1997,“ 개선된 강관말뚝의 설계와 시공 ”, 강관말둑의최적설계 · 시공개선방안연구보고서
- 한국지반공학회, 1997,“ 지반공학시리즈4, 깊은기초”
- 한국도로공사, 1992,“ 도로설계요령제2권, 토공및배수 ”
- 한국도로공사, 1996,“ 도로설계실무편람 ”
- 홍원표, 1994,“ 수동말뚝 ” 중앙대학교공과대학
- 윤충섭외, 1992,“ 토질역학 ”, 건국대학교출판부
-] 김상규, 1991,“ 토질역학 ”, 청문각
-] NAVFAC, 1986, DM -7.1/2/3, Dept. of the NAVY
-] Joseph E. Bowles, 1988,“ Foundation Analysis and Design 4th”, Mc Graw-Hill
-] Braja M, Das, 1998,“ Principles of Foundation Engineering 4th”, PWS Publishing
-] Roy E. Hunt, 1986,“ Geotechnical Engineering Analysis and Evaluation”, Mc Graw-Hill