

## 보강토 교대 하부 H-Pile 수평 거동특성 연구

## An Analysis of Horizontal Behaviour of H-Pile under Mechanically Stabilized Earth Wall Abutment

김낙영<sup>†</sup> · 전경수<sup>1)</sup> · 이용준<sup>2)</sup> · 전진택<sup>3)</sup> · 심재원<sup>4)</sup>

Kim, Nagyong · Jeon, Kyungsoo · Lee, Yongjun · Jun, Jintaek · Shim, Jaewon

**ABSTRACT** : Application of mechanically stabilized earth wall (MSEW) abutment has been rapidly increasing in United States of America, Pennsylvania since 2002. MSEW is effective for reducing construction cost and period compared to general concrete reinforced wall. In the paper, theoretical background and conventional criterion of MSEW abutment that is widely used abroad are analyzed. Based on the results, application of suitable MSEW abutment to domestic bridge type is examined. For the application of MSEW abutment in Korea, load interacting with upper shoe in domestic bridge types and structural analyses of beam seat and pile are investigated. As a result, all applications are possible except for PSC BOX Bridge that has heavy self-weight of girder. Through two and three dimensional numerical analyses, horizontal behaviour mechanisms between pile and MSEW were analyzed and field tests are also carried out for seven piles behind earth walls. From results of field tests, it is confirmed that an angle of internal friction of backfill material needs to be greater than 34 degree to use H-Pile as foundation of MSEW.

**Keywords** : Mechanically Stabilized Earth Walls, 3-D numerical analysis, Horizontal behaviour mechanism

**요 지** : 2002년 이후 미국 펜실베이니아를 중심으로 보강토 공법 교대의 적용사례가 급증하고 있는 추세이다. 이러한 보강토 공법 교대는 일반 콘크리트 옹벽 교대에 비하여 공사비 절감 및 공기 단축에 효과적이며 미관이 수려한 장점이 있다. 본 논문은 해외에서 이와같이 널리 활용되고 있는 보강토 교대의 이론적 배경 및 기존의 설계기준을 검토하였으며, 그 결과를 토대로 국내 교량형식에 적합한 보강토 교대의 적용성을 분석하였다. 우리나라에서 보강토교대를 적용하기 위하여 국내교량 형식에 따른 상부슈에 작용하는 하중을 분석한 후 교좌받침보 및 하부말뚝에 대하여 구조 검토한 결과, 거더의 자중이 큰 PSC BOX이외에서는 모두 적용이 가능한 것으로 나타났다. 또한 2차원 수치해석 및 3차원 수치해석을 수행하여 보강토 교대 하부 기초로 적용되는 H-Pile과 보강토 옹벽간의 상호 거동메커니즘을 분석하였으며, 실제 보강토 옹벽현장에서 보강토 옹벽 배면에 H-Pile을 7개소 시험시공을 실시하여 수평거동 특성을 분석하였다. 현장시험시공 분석결과, 보강토 교대의 하부기초로서 H-Pile을 적용하기 위해서는 뒤채움 재료는 내부마찰각이 최소 34°이상인 양질의 뒤채움 재료를 사용하여야 하는 것으로 분석되었다.

**주요어** : 보강토 교대, 3차원 수치해석, 수평거동분석

## 1. 서 론

교량의 교대는 상부구조물에서 작용하는 연직하중과 배면의 토압을 지지하는 구조물로서 국내에서 지금까지는 콘크리트 교대만을 적용하여 왔다. 교대는 교각의 기능에 더하여 배면의 토압에 저항해야하므로 교각에 비하여 크기가 매우 커지고 이로 인하여 공사비는 물론 공사기간도 많이 소요된다. 보강토 교대는 유럽 및 미국에서 일반화된 공법으로 1969년에 프랑스와 1974년 미국에서 각각 처음으로 적용되었다. 보강토 옹벽 교대는 교량의 받침에 작용하는 연직방향의 하중을 말뚝이 저항하고 배면의 토압은

보강토옹벽이 저항하는 혼합형 보강토 교대(Mixed Abutment)와 말뚝을 시공하지 않고 연직방향하중 및 배면의 토압을 모두 보강토 옹벽이 저항하는 순수형 보강토 옹벽(True Abutment)으로 구분된다(김낙영 등, 2007).

해외의 경우, 최근에 보강토 교대의 사용이 급속히 늘어나고 있으며 75%는 혼합형이고, 약 25%는 순수형이 시공되고 있고 두 경우 모두 비신장성 보강재인 철재 보강재만을 사용하고 있다(전경수 등, 2006). 본 논문에서는 미국에 비하여 설계하중이 큰 국내의 설계기준에 적합한 형식이라고 판단되는 혼합형 보강토 옹벽에 대하여 3차원 수치해석을 통하여 말뚝과 보강토 옹벽과의 거동 분석을 실시하였다.

† 정회원, 도로교통기술원 책임연구원(E-mail : ynagkm@ex.co.kr)

1) 비회원, 도로교통기술원 차장

2) 비회원, 포스코건설 차장

3) 비회원, 포스코건설 과장

4) 비회원, 도로교통기술원 책임연구원

또한, 우리나라에서는 보강토 교대 공법의 기초로서 해외에서 널리 사용되고 있는 H-Pile에 대하여 적용사례가 없는데 이는 H-Pile의 경우 약축과 강축으로 구분되는 재료 특성으로 인하여 우리나라에서는 원형 강관말뚝을 선호하는 경향으로 기인한다. 따라서 본 논문에서는 실제로 시공중인 보강토 옹벽부에 7개소의 H-Pile을 설치, 수평재하시험을 실시하여 뒷채움재료의 특성에 따른 수평거동특성을 분석하였다.

## 2. 보강토교대의 종류 및 설계개념

### 2.1 보강토 교대의 종류

고속도로에 사용되는 보강토 교대의 일반도는 그림 1과 같이 복합형(Mixed type)과 순수형(True type)의 두 가지 타입으로 분류할 수 있다. 말뚝을 시공하지 않는 순수형의 경우 보강토체에 과다한 하중이 집중되는 것을 막기 위하여 교좌받침보의 크기는 3 feet 보다 커야하며 지지력은 1.9tf/m<sup>2</sup> 보다 작아야 한다. 기초 지지력은 보강토 옹벽으로 분산되어 상부의 밀도는 촘촘해지게 된다. 혼합형 보강토 교대는 말뚝으로 상부하중을 지지하며, 수평하중으로 발생하는 말뚝의 수평변위를 보강토 옹벽에 전달하는 형식이다.

현재 미국에서는 프리스트레스트 판넬과 철재 보강재를 사용하고 있으며, 혼합형 보강토 옹벽의 경우 강관 말뚝보다는 H말뚝을 주로 사용하고 있다. 순수형 보강토 교대는 상부의 하중이 작은 경우에 적용되며 혼합형의 경우 상부의 하중이 큰 장경간 교량에 대하여 적용하고 있다. 혼합형 보강토 교대는 연직하중을 말뚝이 지지하는 구조로 뒷채움부의 침하가 예상되는 경우 말뚝에 작용하는 부마찰력을 감소시키기 위하여 말뚝 주변에 Sheath관을 씌우고 내부에 모래를 채우기도 하며, 말뚝 주변의 다짐을 위하여 말뚝과 전면판과 약 0.5m의 거리를 두고 있으며,

말뚝 전후에 보강재가 절단되는 것은 허용되지 않고 있어 Mat형 보강재를 사용하는 경우에는 특별한 주의가 요한다. 보강토 교대는 별도의 콘크리트 양생 및 푸팅시공을 위한 대규모의 터파기가 없어 경제적이며, 시공성이 뛰어나고 침하 및 지진에 대한 내구성이 뛰어나다. 또한 뒷채움부의 침하가 콘크리트 교대에 비하여 작게 나타난다.

### 2.2 설계개념

철재 비신장성 보강재를 사용하는 보강토 교대는 중요 구조물이므로 설계수명을 100년으로 가정하여야 하며 외적 안정성 및 내적 안정성검토를 수행하여야 한다. 외적안정성 검토는 저면활동, 전도, 침하 및 전반활동에 대한 검토를 수행하여야 하며 특히 혼합형 보강토 교대의 경우 말뚝의 안정성에 대한 검토를 수행하여야 한다. 교좌 받침에 대하여는 교좌에 작용력 및 배면의 토압에 대하여 교좌받침보의 안정성검토를 수행하여야 한다. 내적안정성의 경우 보강재의 파단, 인발 및 연결부 안정성에 대한 검토를 수행하여야 한다. 전면판으로 콘크리트 판넬을 이용하는 철재 보강재의 경우 보강재의 허용응력은 식 (1)과 같이 구하며, 도장 또는 재질보완을 통하여 설계수명 동안 내구성이 확보될 수 있도록 하여야 한다.

$$T_a = 0.55 \frac{F_y A_c}{b} \quad (1)$$

여기서  $F_y$  : 철의 항복응력  
 $A_c$  : 단면적  
 $b$  : strip의 순폭

내진설계는 Mononobe-Okabe의 방법에 의해 외적안정성 및 내적안정성에 대한 검토를 수행한다. 외적안정성에 대한 검토를 하는 경우 전면판에서 0.5H깊이의 토괴에 대한 관성력을 고려하고 있으며, 내적 안정성에 대한 내진검

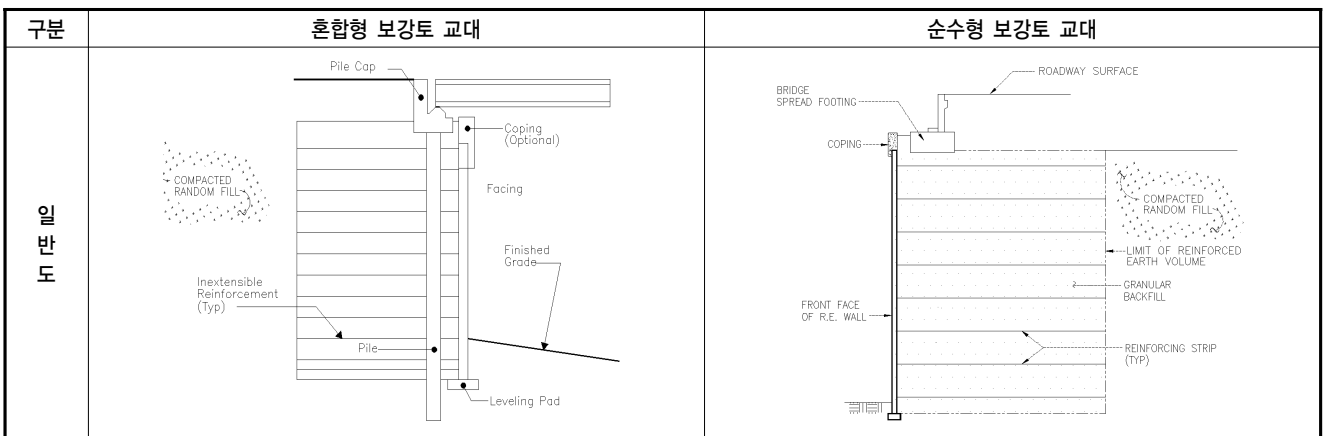


그림 1. 보강토 옹벽 교대의 일반도

토에서는 전면판에서 0.3H의 깊이의 토괴에 대하여 관성력을 고려한다. 안전율 적용은 상시의 75%를 적용하고 있으며 재료의 강도는 허용강도는 133% 증가시켜 안정성 검토를 한다. 말뚝의 횡방향 거동은 보강토 옹벽으로 인하여 수평인 경우와 경계조건이 다르게 되므로 정확한 거동 예측을 위해서는 이를 고려한 해석방법이 정립되어야 하나 현재 이에 대한 연구부족으로 인하여 설계기준이 미비한 실정이다.

### 2.3 시공방법

말뚝을 시공하는 혼합형 보강토 교대는 전면 및 날개벽이 보강토 옹벽으로 시공되므로 말뚝과 보강재와의 접촉을 피하여 시공되어야 한다. 보강재 배치시 보강재를 중간에 절곡시키거나 말뚝 전후에 절단하고 연결하는 것은 금

지되어 있다. 그림 2는 보강재와 말뚝이 배치된 평면도를 보여주고 있다. 미국의 경우 교량의 Skew를 통상 30°까지 허용하고 있다. 전면판과 말뚝과의 거리는 시공성을 고려하여 50cm 또는 1.5D정도의 이격거리를 두고 있다(NCHRP report, 2006). 시공순서는 그림 3에서와 같이 말뚝을 먼저 시공하고 보강토 옹벽을 교좌 받침 높이까지 시공한 후 교좌받침 시공 및 배면 성토를 한다.

## 3. 고속도로 주요 교량 적용 하중 분석

### 3.1 교량종류별 작용 하중

고속도로에서 주로 사용되는 교량은 상부 거더의 형식에 따라 표 1과 같이 분류할 수 있다. 고속도로의 교량은 PSC 거더교 또는 IPC 거더교가 70% 이상을 차지하며, 장

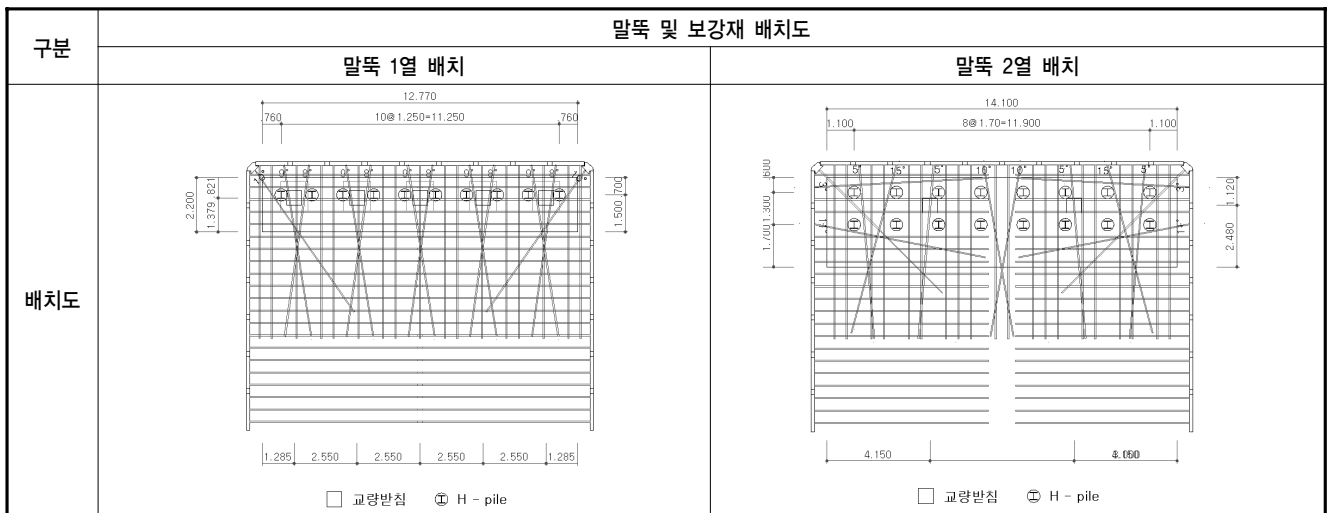


그림 2. 보강토 교대의 말뚝 및 보강재 배치도

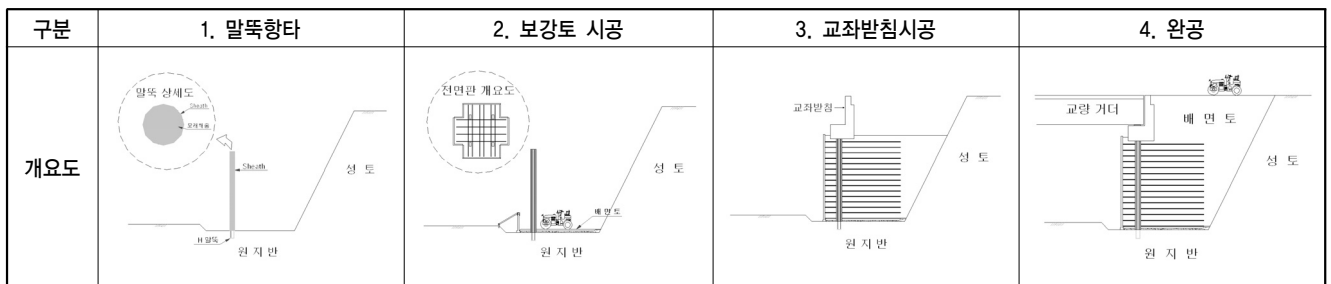


그림 3. 보강토 교대의 시공순서도

표 1. 대표적인 고속도로 교량 형식

재질	거더형식	거더모양	경간장(m)
콘크리트	PSC(Prestressed Concrete) 거더교	I형	약 30~35
	IPC(Incrementally Prestressed Concrete) 거더교	I형	약 35~40
	PSC(Prestressed Concrete) 박스교(단, FCM 등 일부공법 제외)	□형	약 50~60
강교	Steel 박스교	□형	약 45~60
	Steel Plate 거더교	I형	약 45~50

경간이 필요한 경우 PSC 박스교를 적용하고 있다. 곡선교에서는 비틀림에 대하여 저항성이 우수한 Steel Box가 많이 적용되고 있다. 표 1은 교량 종류별 대표적인 경간장을 나타내는 것으로 PSC Box교량의 경우 시공방법에 따라 60m 이상의 다양한 경간장 시공이 가능하나 Incremental Launching Method (ILM)와 같이 일반적으로 사용되는 경우를 고려하였다. 표 2는 교좌장치별로 작용되는 하중을 명시한 것으로 연직방향은 상시에 대하여, 횡방향은 지진시에 대하여 각각 기술하였다.

각 교량에 대하여 기존의 콘크리트 교대 대신에 보강토 교대를 대체하는 것으로 가정하여, 설계 검토를 실시한 결과, H 말뚝을 1열 또는 2열 배치하면 대부분 적용이 가능한 것으로 나타났다. 표 3은 보강토 교대를 적용한 경우 말뚝의 두부에 작용하는 하중을 나타낸 것이다.

표 2. 교좌장치에 작용하는 하중

재질	명 칭	교좌장치 작용 하중 (ton)	
		연직방향	수평방향 (지진시)
콘크리트교	PSC(Prestressed Concrete) 거터교	약 129.8~150.0	약 10.4~18.3
	IPC(Incrementally Prestressed Concrete) 거터교	약 109.6~151.4	약 11.7~21.5
	PSC(Prestressed Concrete) 박스교 (단, FCM 등 일부공법 제외)	약 233.9~1177	약 10.7~39.1
강교	Steel Box 교	약 137.3~303.5	약 8.5~28.1

표 3. 보강토 교대 적용시 대표교량 말뚝두부에 작용하는 하중

재질	거터형식	경간장 (m)	말뚝두부 작용력			비고
			연직방향 (ton)	수평방향 (ton)	모멘트 (tm)	
콘크리트	PSC(Prestressed Concrete) 거터교	35	74.9	13.9	7.12	말뚝 1열 배치
	IPC(Incrementally Prestressed Concrete) 거터교	40	84.2	14.5	6.86	말뚝 1열 배치
	PSC(Prestressed Concrete) 박스교 (단, FCM 등 일부공법 제외)	60	85.9	12.6	7.78	말뚝 2열 배치
강교	Steel 박스교	55	78.4	10.5	8.86	말뚝 2열 배치

표 4. 지반 물성치

구 분	단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	C (kN/m <sup>2</sup> )	φ (deg)	ε <sub>50</sub>	Shaft (kN/m <sup>2</sup> )	Base (kN/m <sup>2</sup> )	RQD (%)
성토층	18	0	30*	0.005	147	2058	0
풍화암	20	40	33	0.005	196	3430	0
연 암	23	400	35	0.0005	196	3430	25

표 5. 말뚝제원 및 지층현황

H 말뚝 제원	지층 구분	kh (kN/m <sup>3</sup> )	
		상시	지진시
H 250	성토층	105,033	225,143
	풍화암	351,689	753,861
	연 암	2,217,465	93,473,875
H 300	성토층	93,145	199,660
	풍화암	311,883	668,535
	연 암	1,966,482	82,894,062
H 350	성토층	82,954	177,816
	풍화암	277,760	595,393
	연 암	1,751,334	73,824,825

### 3.2 교량 종류별 보강토 교대 파일 적용시 지지력 분석

기존 교량 형식에 교대 기초부를 보강토 교대로 대체하였을 경우에 기초부에 작용하는 지지력 분석을 위하여 Ensoft사의 Group 프로그램에 의한 해석을 실시하였으며, IPC 거터교, STEEL BOX교, PSC BOX 거터교에 대하여 검토하였다.

상기의 교량수에 분포되는 하중, 교대자중 및 교대의 배면토압 등에 의한 하중을 교좌받침보의 중심작용외력으로 환산하여 해석하였으며, 말뚝 1열배치와 2열배치에 대하여 검토하였다.

#### 3.2.1 IPC거터교(용산교)

본 검토대상인 IPC거터교(용산교)는 장흥-광양간 고속도로에 위치하고 있으며 일반현황은 표 6과 같다.

표 6. 용산교의 일반현황

구 분	현 황
상부형식	IPC거더교
구조형식	역 T형 교대
총연장	280.976m(7경간교)
경간	40.160(최대경간)
교량등급	DB-24, 이-24(1등교)
교대총폭	12.600m+12.770m

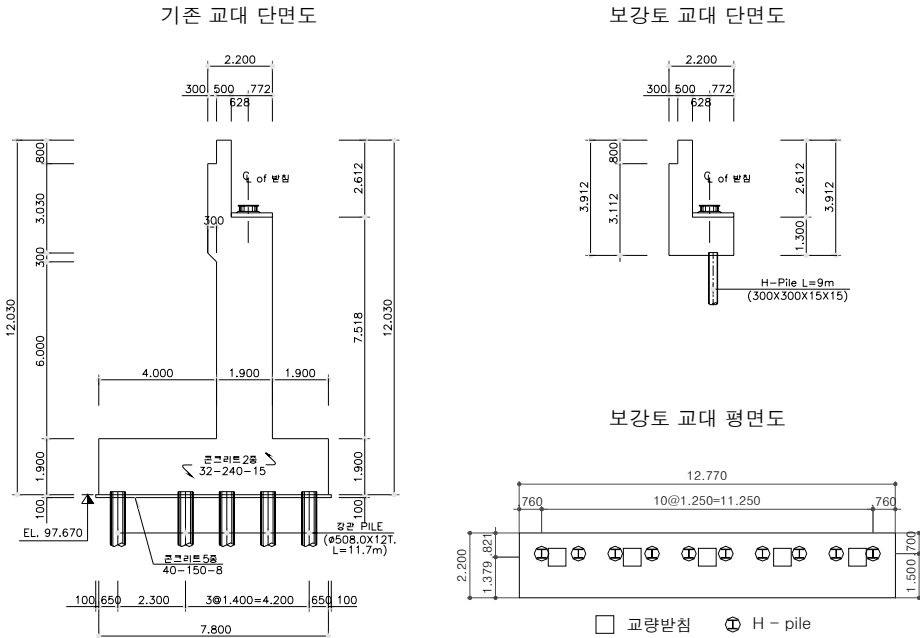


그림 4. 단면도

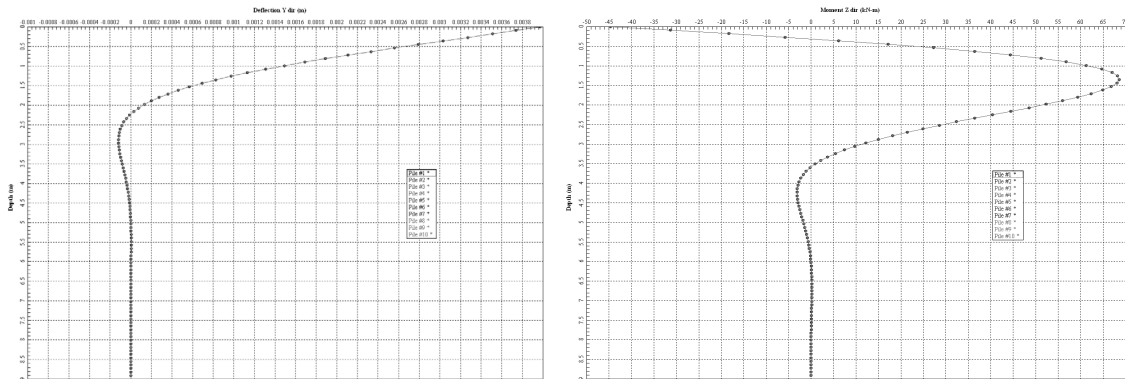


그림 5. 상시하중 작용시 수평변위 및 작용모멘트

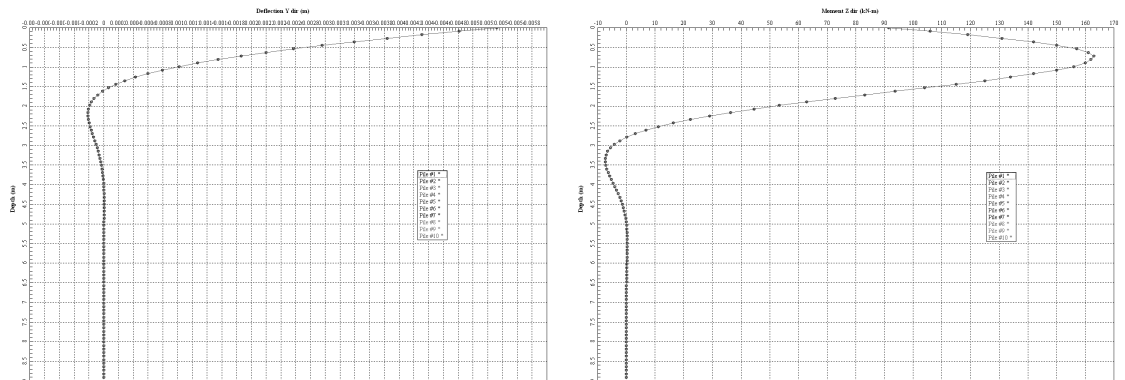


그림 6. 지진하중 작용시 수평변위 및 작용모멘트

표 7. 결과 집계표 (H-300×300×15×15)

구 분			1열 (10EA)					
			연직력 (tonf)	연직변위 (cm)	수평력 (tonf)	수평변위 (cm)	최대모멘트 (tf-m)	응력 (kgf/cm <sup>2</sup> )
성토 7m	상시	사용하중	84.2	1.45	14.5	0.40	6.86	1,100
	지진시	지진하중	61.7	0.93	15.4	0.53	16.3	1,590
말뚝길이 9m	허용값(상시)		167.7	2.50	-	1.50	-	1,400
	검토		OK	OK	-	OK	-	OK

3.2.2 PSC BOX 거더교(인천대교-3공구)

본 검토대상인 인천대교 연결도로에 위치하고 있으며 일반현황은 표 8과 같다.

3.2.3 STEEL BOX 거더교(현경교)

본 검토대상인 현경교는 무안-광주 고속도로에 위치하고 있으며 일반현황은 표 10과 같다.

표 8. 인천대교 일반현황

구분	현황
상부형식	PSC 거더교
구조형식	역 T형 교대
총연장	360.0m(6경간교)
경간	40.160(최대경간)
교량등급	DB-24, 이-24(1등교)
교대총폭	12.600m+12.770m

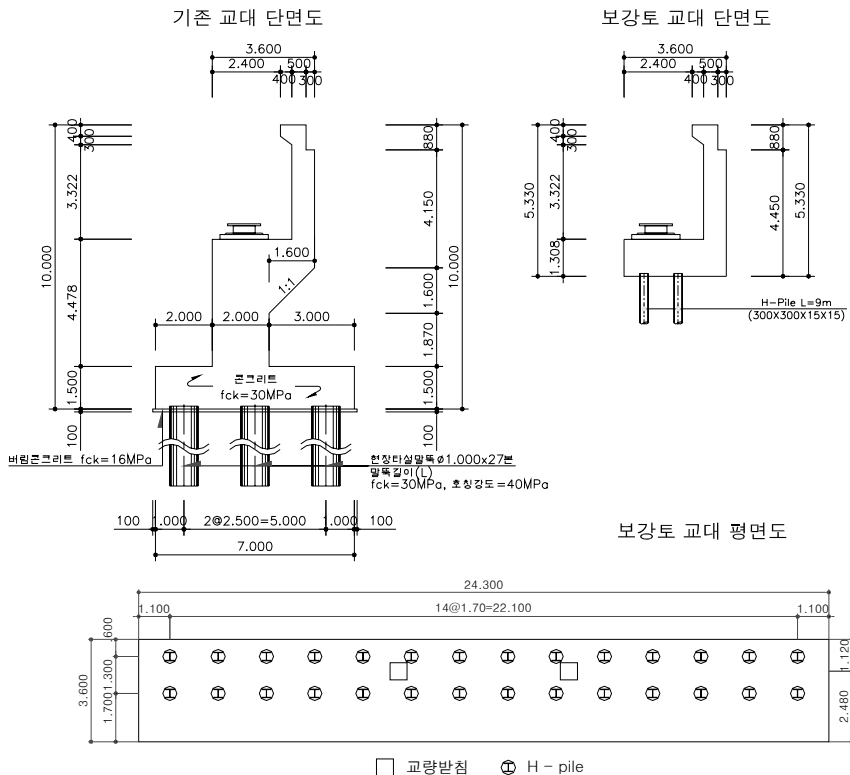
3.2.4 해석결과

보강토교대의 파일 배치를 위하여 Group 프로그램에 의한 해석을 실시하였으며, IPC 거더교, Steel Box교, Psc Box 거더교에 대한 분석결과는 다음과 같다.

교량수에 분포되는 하중과 교대자중, 교대의 배면토압 등에 의한 하중을 교좌받침보의 중심작용외력으로 환산하여 해석하였으며, 말뚝 1열배치와 2열배치에 대하여 검토하였다.

1) IPC 거더교의 경우, 말뚝의 1열배치시 안정한 것으로 분석되었다.

2) Steel BOX교의 경우, 교좌받침보의 높이가 크므로 교대배면토압에 의한 상시 및 지진시의 수평력 및 모멘트가 크게 작용한다. 따라서, 1열 배치가 불가능하나, 교좌받침보에 스트립의 연결로 배면 토압을 상쇄시 1열배치가 가능할 것으로 분석되었다.



□ 교량받침 ⊕ H - pile

그림 7. 단면도

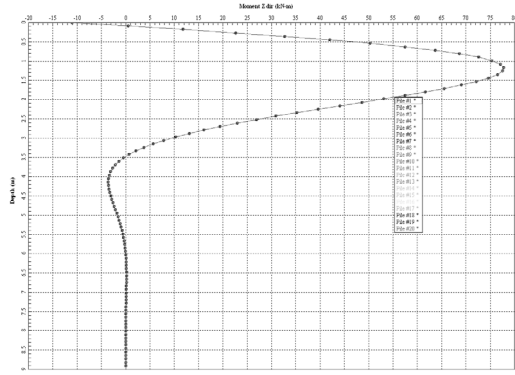
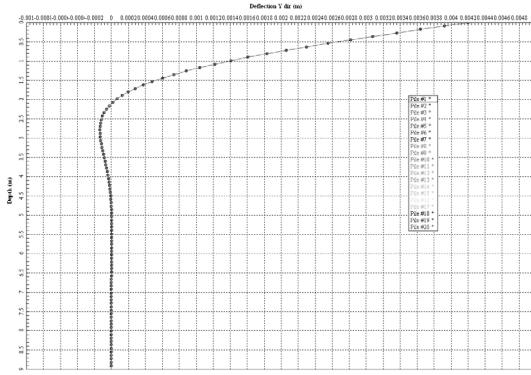


그림 8. 상시하중 작용시 수평변위 및 작용모멘트

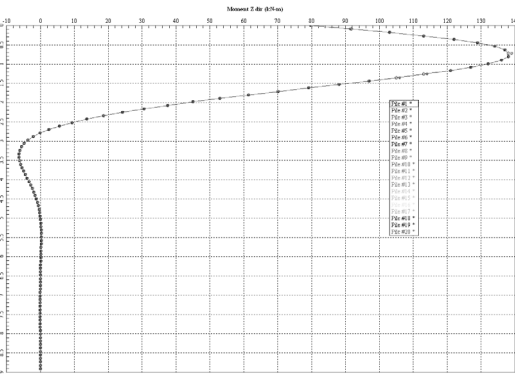
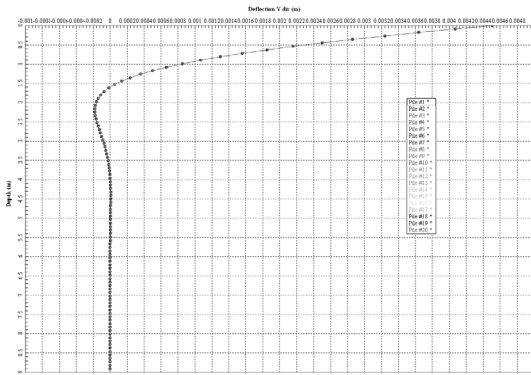


그림 9. 지진하중 작용시 수평변위 및 작용모멘트

표 9. 결과 집계표 (H-300×300×15×15)

구 분			1열 (10EA)					
			연직력 (tonf)	연직변위 (cm)	수평력 (tonf)	수평변위 (cm)	최대모멘트 (tf-m)	응력 (kgf/cm <sup>2</sup> )
성토 7m	사용하중	1열	85.9	1.67	12.6	0.42	7.78	1,180
		2열	76.7	1.26	12.6	0.42	7.78	1,110
	지진하중	1열	74.9	1.22	12.8	0.45	13.9	1,520
		2열	45.4	0.58	12.9	0.45	13.8	1,300
말뚝길이 9m	허용값(상시)		167.7	2.50	-	1.50	-	1,400
	검토		OK	OK	-	OK	-	지진시:2,100

표 10. 현경교 일반현황

구 분	현 황
상부형식	Steel BOX 거터교
구조형식	역 T형 교대
총연장	55.0m
경간	55.0m
교량등급	DB-24, 아-24(1등급)
교대총폭	12.150m+12.150m

3) PSC BOX교의 경우, 거터의 자중이 크므로 연직하중이 다른 교량보다 크게 작용한다. 교대 작용하중을 12m 교대폭으로 환산했을시 1600tonf 이상의 연직하중이 작용하면 1열 배치시 불안정한 것으로 분석되었다.

그러나 지지력의 확보가 필요할 시 파일의 근입장을 늘리거나 350X350X16X16의 H-pile을 적용을 고려할 수 있는 것으로 판단된다.

## 4. H-Pile 수평거동 분석을 위한 현장 시험시공

### 4.1 현장 시험시공 개요

보강토 교대의 기초로 널리 사용되는 H-Pile의 거동특성 분석을 위하여 현재 건설중인 현장에서 보강토 옹벽 배면에 그림 13, 14와 같이 H-Pile 7개소 시공하여 시험을 실시하였다. 본 시험말뚝에 뒤채움 토사는 내부마찰각이 24°이며 통일분류상 SM으로 분류되었고 쉬스관에 넣은 뒤채움 재료는 내부마찰각이 34°이며 통일분류상 SW으로 분류되었다.

보강재 규격은 그림 13과 같고 뒤채움 토사 및 Sheath 관과 H말뚝사이에 채워진 모래의 시험결과는 표 12와 같다.

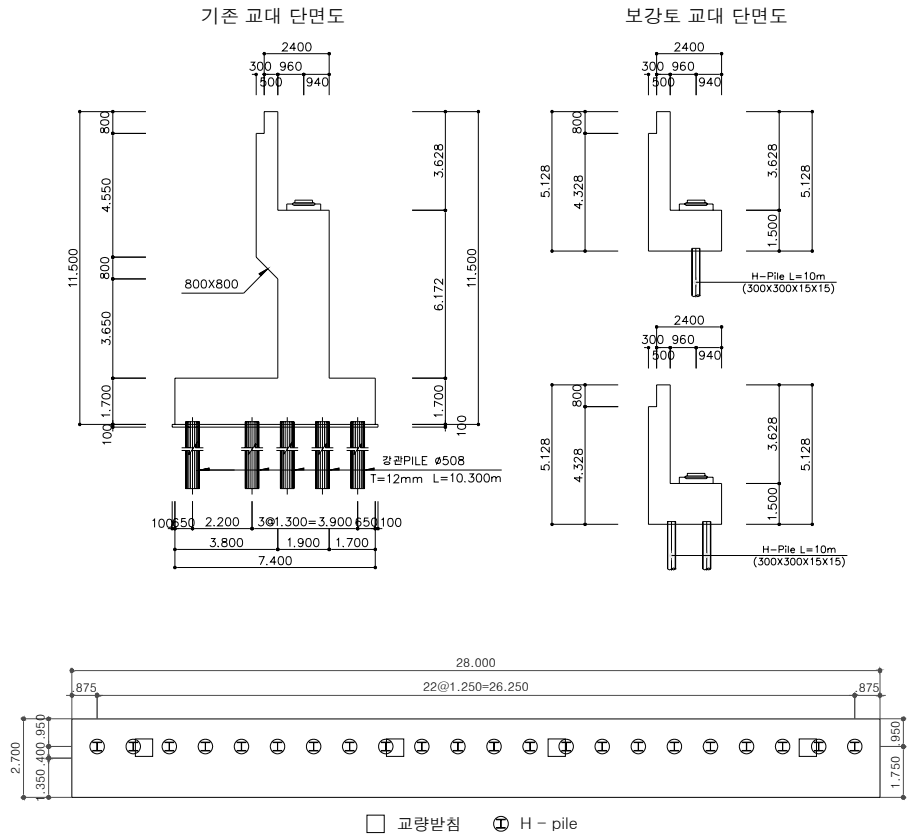


그림 10. 단면도

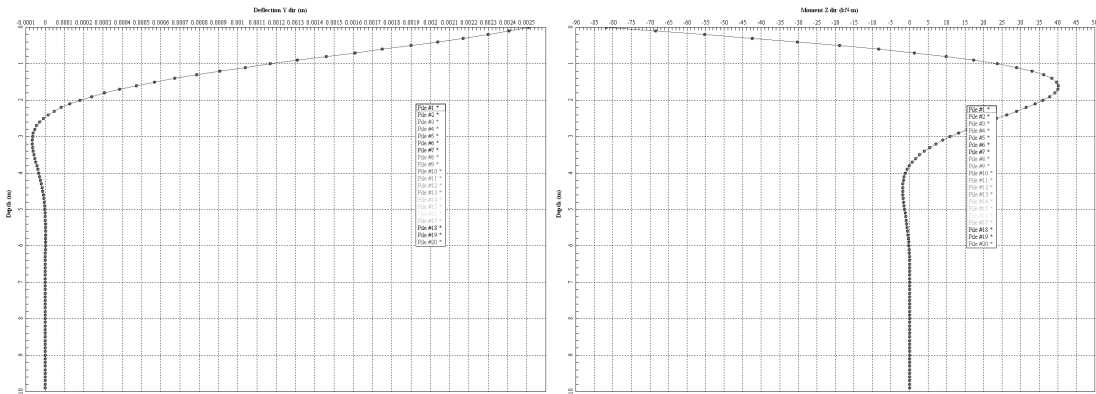


그림 11. 상시하중 작용시 수평변위 및 작용모멘트

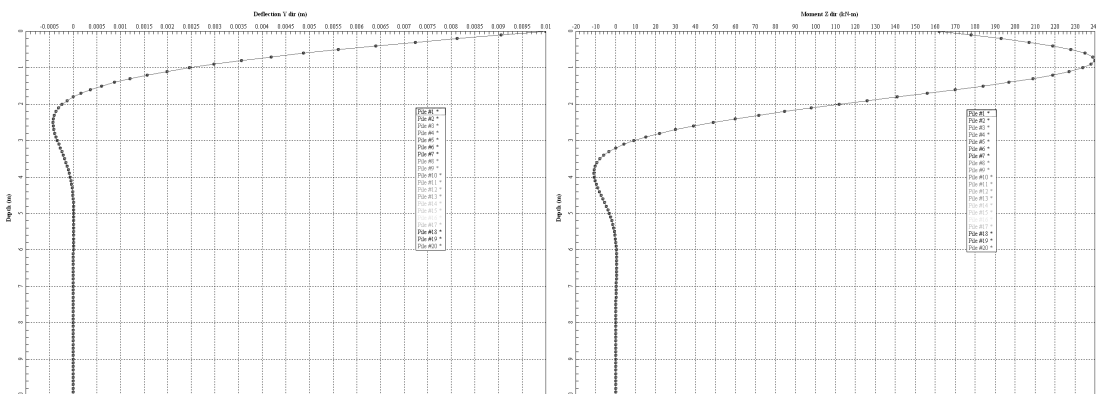


그림 12. 지진하중 작용시 수평변위 및 작용모멘트



표 11. 결과집계표(H-300×300×15×15)

구 분			1열 (10EA)					
			연직력 (tonf)	연직변위 (cm)	수평력 (tonf)	수평변위 (cm)	최대모멘트 (tf-m)	응력 (kgf/cm <sup>2</sup> )
성토 7m	상시	사용하중	84.4	1.25	13.3	0.25	8.18	1,200
	지진시	지진하중	63.0	0.83	15.5	1.00	24.0	2,140
말뚝길이 10m	허용값(상시)		167.7	2.50	-	1.50	-	1,400
	검토		OK	OK	-	OK	-	N.G

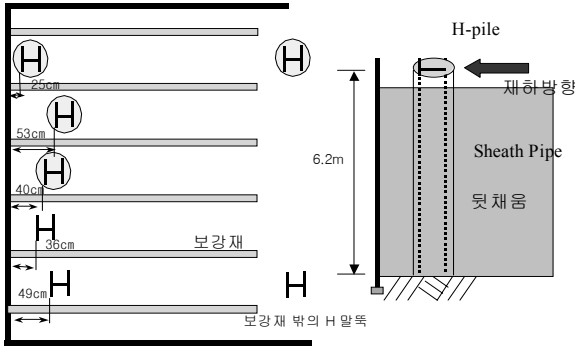


그림 13. Sheath 관이 설치된 H-pile 시공



그림 14. Sheath 관이 설치된 H-pile 시공 전경 사진

표 12. 뒷채움 토사와 속채움 모래의 시험결과

구분	G <sub>s</sub>	C (kg/cm <sup>2</sup> )	φ (degree)	통일분류
뒷채움	2.68	0.13	24	SM
속채움모래	2.64	0	34	SW

○○ 고속도로 현장의 철재 보강토 옹벽 배면에 이격거리를 30cm~70cm로 달리하여 시공하였다. 표 13과 같이 부마찰력을 줄이기 위하여 Sheath 관을 설치하고 모래를 채운 경우와 H 말뚝만을 시공한 경우와 보강재 밖에 시공된 H 말뚝에 대하여 수평방향 재하시험을 수행하여 보강토 옹벽이 H 말뚝의 횡방향 거동에 미치는 영향과 뒷채움 재료의 적정성을 파악하였다.

시험말뚝 7개중 쉬스관이 있는 것과 쉬스관이 없는 것 각각 1개의 말뚝에 다음 그림과 같이 변형률계를 180°방향으로 6단 설치하고 말뚝 전체에는 지중수평변위를 측정할 수 있도록 경사케이스를 설치하였다. 또한 보강재에도 변형률계를 설치하여 시공시 시험말뚝의 옆에 설치하여 수평시험시 보강재에 발생하는 변형률을 측정하였다.

표 13. 시험 H말뚝

구분	1번 말뚝	2번 말뚝	3번 말뚝	4번 말뚝	5번 말뚝	6번 말뚝	7번 말뚝
전면판과의 거리	20cm	40cm	60cm	36cm	49cm	보강재 밖	
재하방향	외측 <sup>1)</sup>	외측	외측	외측	외측내측 <sup>2)</sup>	외측	외측
Sheath관 사용여부	사용	사용	사용	미사용	미사용	사용	미사용

<sup>1)</sup>외측 : 전면판 방향, <sup>2)</sup>내측 : 전면판 반대방향

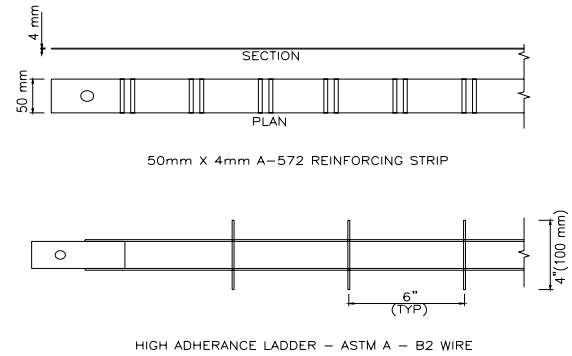


그림 15. 보강재의 단면

## 4.2 시험시공 결과

그림 18에서와 같이 보강재 밖에서 수행한 재하시험 결과 Sheath관을 사용한 경우와 사용하지 않은 경우의 재하시험결과가 유사하게 나타나 Sheath관은 말뚝의 횡방향 저항력에 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 또한 보강토 옹벽의 전면판에서 1.5~2.0m까지는 소형램머로 다지므로

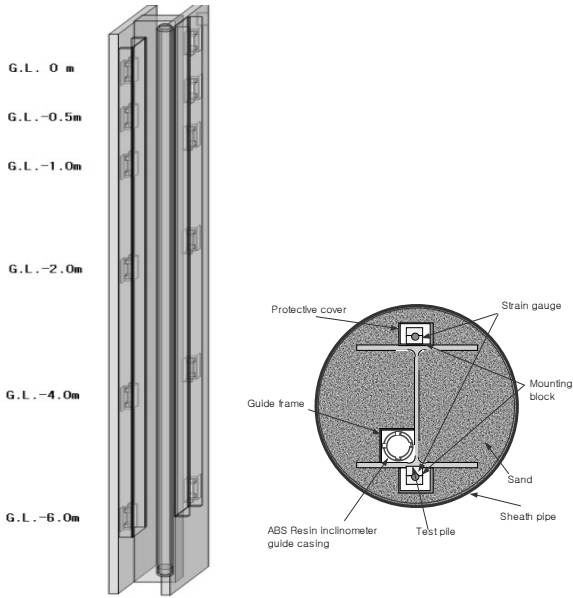


그림 16. 시험말뚝의 게이지 설치도

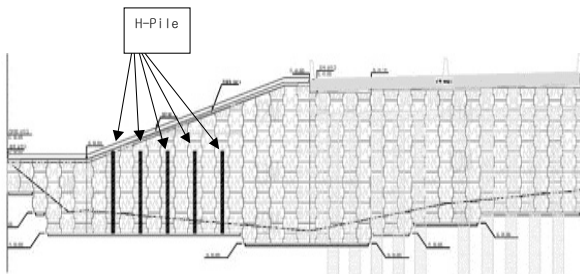


그림 17. 시험말뚝 설치 정면도

전면판에 근접하여 시공된 H 말뚝은 보강재 밖에 시공된 말뚝에 비하여 횡방향 저항력이 작게 나타나는 것으로 나타났다. 그림 18과 그림 19의 그림은 뒷채움 흙의 내부마찰각을 24°와 34°로 각 각에 대하여 H말뚝의 횡방향 두부 변위를 p-y방법으로 예측한 것이다. 그림 20은 보강재 바로 뒤편에 시공된 7번 말뚝과 뒷채움 흙의 내부마찰각을 24°로 가정하고 예측한 말뚝의 두부 변위를 비교한 것으로 두부가 자유인 조건에서 시험한 결과가 예측결과보다 횡방향 저항력이 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있으며, 이것은 대형다짐 장비로 충분한 다짐이 가능하여 이로 인해 지반의 내부마찰각 및 탄성계수가 크게 나타나기 때문인 것으로 판단된다.

해외에서 보강토 교대의 기초로서 널리 활용되고 있는 H-Pile을 실제 보강토 용벽부에 설치하여 수평재하시험을 실시한 결과, 기존 국내교량에 보강토 교대를 적용시 말뚝의 두부에 작용하는 횡방향 하중은 약 15ton으로 분석되었다. 그림 8과 같이 일반 토사를 이용한 경우 변위가 과다하게 발행하여 설계기준을 만족시킬 수 없는 경우가 발생할 수 있으며, 미연방도로청의 규정과 같이 내부마찰각을 최소 34°이상인 뒷채움 재료를 사용하는 경우 그림 19와 같이 변위가 설계기준을 만족시킬 수 있음을 알 수 있다. 그

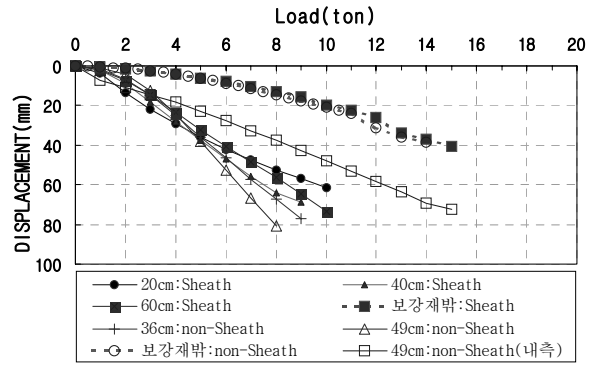
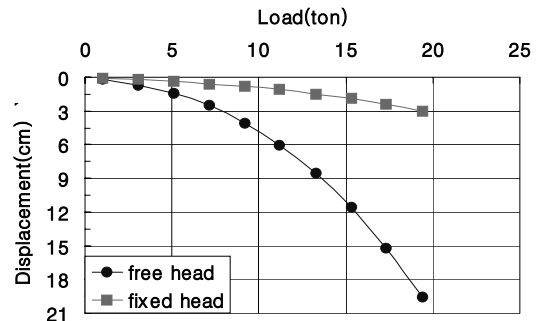
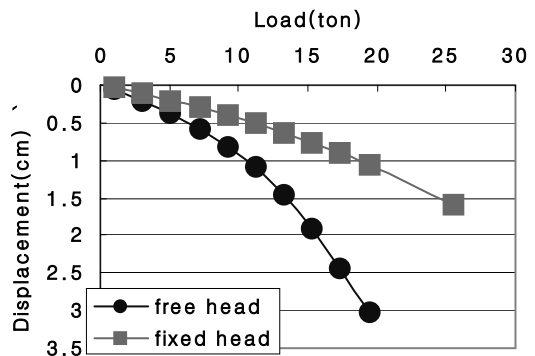


그림 18. 현장 재하시험 결과



a.  $\phi=24^\circ$



b.  $\phi=34^\circ$

그림 19. 뒷채움재료 적용시 p-y해석 결과

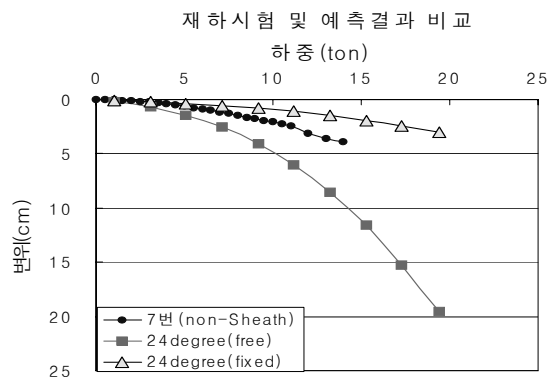


그림 20. 실험결과와 p-y해석 결과 비교

리므로 보강토 교대의 뒷채움 재료는 일반토사가 아닌 골재가 혼합된 토사를 사용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

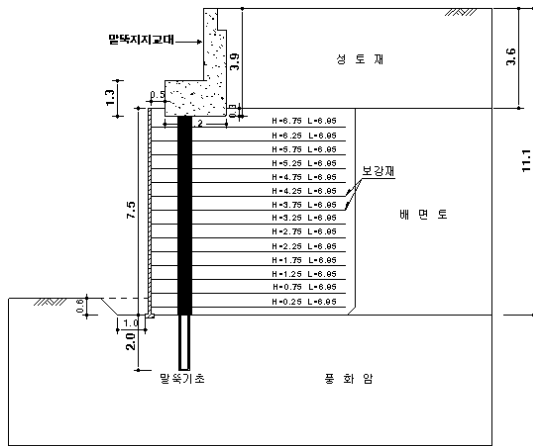
### 5. 수치해석 분석

말뚝지지된 교대기초에 적용된 보강토 옹벽의 안정검

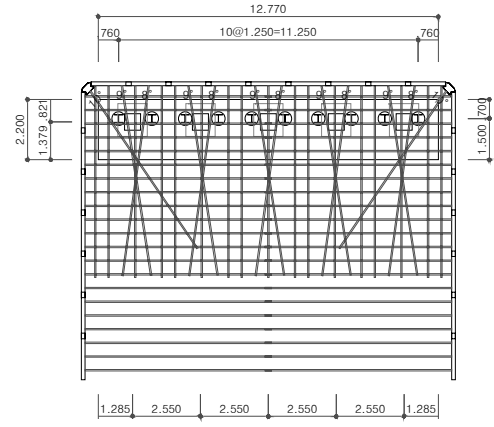
토를 실시하기 위하여 유한요소해석을 이용, 적용된 말뚝의 안정성 및 보강재의 안정성을 각각 분석하였다.

안정검토는 2차원 해석의 경우, 유한요소해석 프로그램인 Plaxis 2D를 사용하였으며, 3차원 해석의 경우, FLAC 3D를 사용하여 설계에 대한 검증을 실시하였다.

2차원 해석의 경우, 말뚝과 보강재가 절점으로 연결되



단면도



평면도

그림 21. 보강토교대 수치해석 모델링

표 14. 지반물성치

구분	단위중량 (r, kN/m <sup>3</sup> )	점착력 (c, kPa)	내부마찰각 (°)	변형계수 (E, kPa)	포아송비 (ν)
성토재	18.0	15.0	30	52,941	0.32
보강토재	18.0	0.0	30	52,941	0.32
배면토	18.0	15.0	30	52,941	0.32
기초지반	20.0	40.0	33	399,891	0.30

표 15. 말뚝기초 설계정수

구분	제원	단면적 (cm <sup>2</sup> /m)	단위중량 (kg/m <sup>2</sup> )	단면2차모멘트 (I, cm <sup>4</sup> /m)	단면계수 (Z, /m)
말뚝기초 (H-Pile)	300×300×15×15	134.8	106	21,500	1,440

표 16. Metal Strip의 설계정수

구분	제원 (B×H×L, mm)	탄성계수 (E, kPa)	단면적 (A, mm <sup>2</sup> /m)	수직간격 (Sv, m)	수평간격 (Sh, m)
Metal Strip	50×4×6950	2.1 × 10 <sup>8</sup>	200 (부식고려 107.6)	0.5	0.5

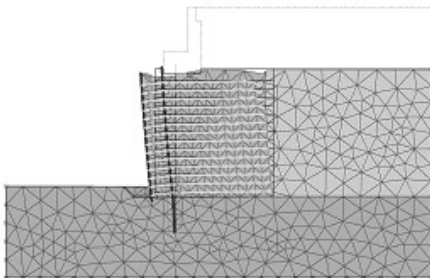


그림 22. 보강토 교대 시공완료후 변위(2차원 해석, 높이 11.1m)

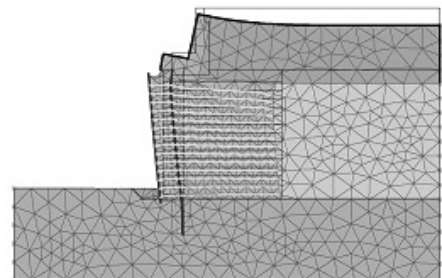


그림 23. 보강토 교대 상부하중 재하후 변위(2차원 해석, 높이 11.1m)

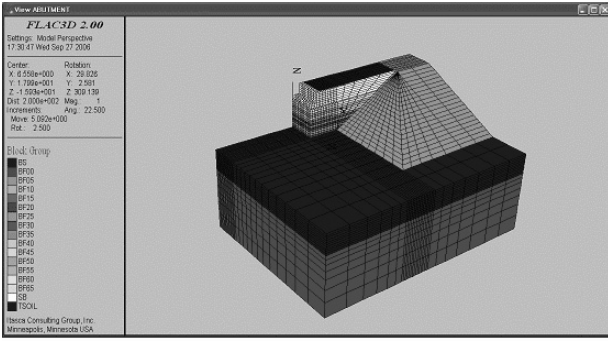


그림 24. 보강토 교대 3차원 해석 단면도

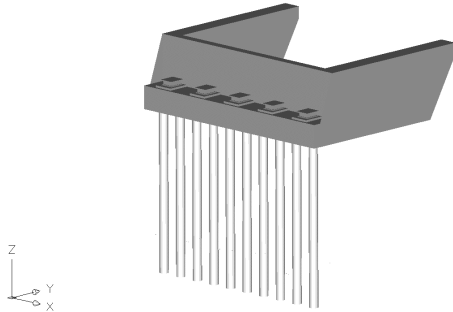


그림 25. 교좌받침보 하부 말뚝 배치도

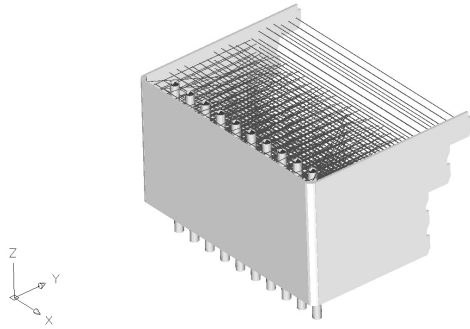


그림 26. 말뚝 및 보강토 교대 배치도

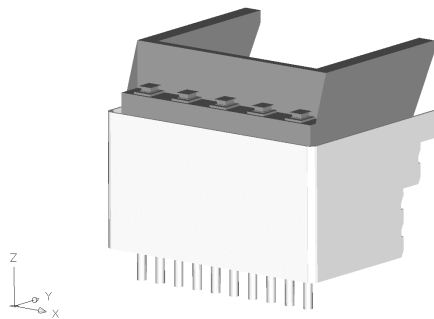


그림 27. 완성된 보강토 교대

표 17. 2차원 해석 및 3차원 해석 결과 비교

구 분		수평변위(mm)	연직변위(mm)	말뚝축력(kN)	비고
2차원해석	보강토 옹벽 시공시	4.19	1.84	79.16	
	교대 시공완료시	8.48	10.15	288.65	
	상부하중재하시	10.38	10.79	766.18	
3차원해석	보강토 옹벽 시공시	1.62	2.7	439.0	
	교대 시공완료시	4.58	9.46	837.0	
	상부하중재하시	8.72	19.59	947.0	

어 있기 때문에 상호 간섭효과로 인하여 실제적인 거동과 다소 차이가 있을 수 있을 것으로 판단되며, 특히 말뚝의 연직 변위와 보강토옹벽의 수평변위에 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다.

따라서, 2차원 해석의 결과는 말뚝과 보강재가 연결되지 않아 실제 형상을 모사한 3차원 해석 결과를 검증하며, 전체적인 거동특성을 파악하는데 중점을 두었다.

해석 결과를 비교한 결과 2차원 해석의 경우 수평변위가 3차원 해석 결과보다 크게 산정되었다. 이는 2차원으로 무한하게 연결되어 Z축(2차원 평면의 법선방향)의 변위가 고려되지 않기 때문인 것으로 사료되며, 이에 따라 연직 변위도 2차원해석 결과가 작게 산정된 것으로 판단된다.

교대를 지지하는 말뚝 축력의 경우, Group 해석결과에 의한 842kN이 산정되었으며 이는 2차원해석이나 3차원해석결과와 유사한 것으로 판단된다. 말뚝의 연직변위의 경우 2차원 해석은 최대 4.24mm, 3차원 해석의 경우 최대 19.6mm로 기준값 (25.4mm) 이하로 안전한 것으로 판단된다.

## 6. 결 론

보강토 교대의 기초로서 해외에서 널리 활용되고 있는 H-Pile의 뒤편에 대한 수평거동 특성을 분석하기 위하여 보강토 옹벽에서 실제 H-Pile을 설치하여 수평재하시험을 실시하였고 2차원 수치해석 및 3차원 수치해석을 수행하여 말뚝과 보강토 옹벽간의 거동메커니즘을 분석하였다.

- (1) 복합형 보강토교대를 적용하기 위하여 국내교량 형식에 따른 상부수에 작용하는 하중을 분석한 후 교좌받침보 및 하부말뚝을 검토한 결과, 거더의 자중이 큰 PSC BOX이외에서는 모두 적용이 가능한 것으로 나타났다.
- (2) H-Pile을 실제 보강토 옹벽부에 설치하여 수평재하시험을 실시한 결과, 기존 국내교량에 보강토 교대를 적용시 말뚝의 두부에 작용하는 횡방향 하중은 약 15ton으로 분석되었다. 또한, 본 시험시공의 분석결과, 뒤편 재료로서 일반 토사를 이용한 경우 변위가 과다하

게 발행하여 설계기준을 만족시킬 수 없는 경우가 발생할 수 있으므로 미연방도로청의 규정과 같이 내부 마찰각 최소 34°이상인 뒷채움 재료를 사용하여야 하는 것으로 분석되었다. 그러므로 보강토 교대의 뒷채움 재료는 일반토사가 아닌 골재가 혼합된 토사를 사용해야 하는 것으로 분석되었다.

- (3) 교량형식에 따른 보강토 교대의 H-Pile의 배치를 검토하기 위하여 Group해석을 실시한 결과, IPC거더교, STEEL BOX거더교, PSC BOX거더교의 교좌받침보에 H-Pile의 배치는 IPC거더교, STEEL BOX거더교의 경우 1열 배치가 가능하였다. 그러나 PSC BOX교의 경우, 거더의 자중이 크므로 연직하중이 다른 교량보다 크게 작용하므로 교대 작용하중을 12m교대폭으로 환산했을시 1600tonf 이상의 연직하중이 작용하면 1열 배치시 불안정한 것으로 분석되었다.
- (4) 수치해석 결과에 의하면 교대를 지지하는 말뚝 축력의 경우, 842kN이 산정되었으며 이는 2차원해석이나 3차원해석결과와 유사한 것으로 판단된다. 말뚝의 연직변위의 경우, 2차원 해석은 최대 4.24mm, 3차원 해석의 경우 최대 19.6mm로 기준값 (25.4mm) 이하로 안전한 것으로 분석되었다.

## 감사의 글

본 연구는 포스코건설 기술연구소와 공동으로 수행한 “보강토 교대 기술개발” 연구사업의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. 김낙영(2007), 경제적인 보강토공법 교대 기술개발, 한국도로교통협회, 통권 제 108호, pp. 38~945.
2. 전경수(2006), 한국과 미국의 지반분야 기술분석 및 개선방향, 한국도로공사, 도로교통기술원 제22회 연구성과발표회 논문집, pp. 92~97.
3. 포스코 건설 기술연구소(2006), 보강토 공법 교대 기술개발 (중간보고서), MD-000-DC313.
4. National Cooperative Highway Research Program(2006), Design and Construction Guidelines for Geosynthetic-Reinforced Soil Bridge Abutments with a Flexible Facing *NCHRP report 556*.
5. Victor Elias, Barry R. Christopher and Ryan R. Berg(2001), Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes Design and Construction Guidelines, *National Highway Institute, FHWA-NHI-00-043*, pp. 171~192.
6. Design of MSE Walls At Pile-Supported Abutments, Technical Bulletin(2002) : MSE-3, *The Reinforced Earth Company*.

(접수일: 2007. 9. 27 심사일: 2007. 11. 19 심사완료일: 2008. 1. 10)