

풍화암에 시공된 Bar Type 부력앵커의 수평재하시험

Lateral Load Test on the Bar-type Anti-buoyancy Anchors in the Weathered Rock

박 찬 덕* 이 규 환** 유 남 재*** 이 송****

Park, Chan-Duk Lee, Kyu-Hwan Ryu, Nam-Jae Lee, Song

Abstract

This study is about a horizontal load test of buoyance anchor installed in the section where underground water level happens in the depth of 5m under the ground when the ground is excavated, because the section as a excavation section of high speed railway ○○ station is near a rivers and because the section always has a reservoir of full water level on the left. Therefore, in this study we will appraise the long-term stability of the structure permanently being taken buoyance by the underground water level, through the spot test of the buoyance anchor installed in the section where underground water level happens. For that, Bar Type anchor is used, which can get enough pulling-out force by a method to resist buoyance by using friction force against the ground by high strength steel rod or steel wire. Anti-buoyance anchor is installed on the bottom slab of underground structure being taken horizontal force by the braking and accelerating of high speed train. And, It is aimed to analyze and grasp the review result of stability for the horizontal force that happens at the parking and stopping of high speed train, by executing horizontal load test for the grasping of the movements characteristic of buoyance anchor.

요 지

본 연구에서는 고속철도 00역사 공사구간 중 굴착구간에 인접하여 하천이 위치하고 공사구간 좌측에는 항상 만수위 상태의 저수지가 있어 지반 굴착시 지하 5m 깊이에서 지하수위가 존재하는 구간에 설치된 부력앵커의 수평재하시험에 관한 연구이다. 따라서 본 연구에서는 지하수위 면이 발생하는 구간에 설치된 부력앵커의 현장 수평재하시험을 통해 영구적으로 지하수위에 의해 부력을 받는 구조물의 장기적인 안정성을 평가하고자 한다. 이를 위해 고강도 강봉이나 강연선을 사용, 지반과의 마찰력을 이용하여 부력에 저항하는 방법으로 충분한 인발력을 확보할 수 있는 Bar Type 앵커를 사용하였다. 고속철도의 제동과 가속에 의해 수평력을 받는 지하구조물 바닥 슬래브에 부력방지용 앵커를 설치하였다. 이로 인해 Bar Type 부력앵커에 발생하는 거동특성을 파악하기 위해 수평재하시험을 실시하여 고속철도의 주, 정차시 열차의 급제동 및 출발에 의해 발생하는 수평력에 대한 부력앵커의 거동특성을 파악하고자 하였다.

Keywords : Buoyance Anchor, Bar Type Anchor, Lateral Load Test

핵심 용어 : 부력앵커, 바-타입 앵커, 수평재하시험

* 정희원, 강원대학교 토목공학과 박사과정

** 정희원, 건양대학교 토목시스템공학과 조교수

*** 정희원, 강원대학교 토목공학과 교수

**** 정희원, 서울시립대학교 토목공학과 교수

E-mail : chandeok2@hanmail.net 019-209-8433

•본 논문에 대한 토의를 2004년 12월 31일까지 학회로 보내주
시면 2005년 4월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

최근 산업의 발전과 인구 증가로 인하여 교통의 혼잡이 발생하고 대지의 고가화로 인한 지하공간의 활용에 관한 관심이 증가되고 있다. 이에 지하구조물 즉, 지하탱크, 지하철, 고속철도, 발전소등의 대규모 구조물의 건설공사가 도심지 지하에 건설되는 것이 일반화되고 있는 실정이다. 이러한 구조물들의 건설은 공사비가 많이 들고 또한 도시 구조의 고도화로 인하여 사 고시 큰 피해를 유발하므로 설계시 안전율을 높이거나 보다 안전하게 시공할 수 있는 신 공법을 개발하거나 도입하여 시공하는 사례가 많이 발생하고 있다. 1965년경부터 시공기계의 개량과 개발이 진행되어 대형 로터리삭공기나 회전, 타격병용방식으로 스스로 작동할 수 있는 앵커전용기계가 등장하면서 시공재료나 시공법에 많은 변화를 가져와서 앵커의 시공량도 증가하였다. 이후, 앵커공법은 역지공사, 지반 보강 공사 등 여러 가지 목적으로 보급되고 사용되어 왔다. 1980년대 들어 세계 각국에서는 앵커에 관한 기준화가 진행되었다. 특히 영구앵커에 관한 조사, 유지 관리 등에 역점을 두게 되었다(BS 8081). 국내에서도 앵커에 대한 사용 실적이 점차 증가되고 있어 앵커에 대한 정확한 설계법 및 시방서의 제정, 시공기준 마련 등이 시급한 실정이다. 이러한 앵커공법 중 가장 중요한 것은 극한 인발저항력의 평가이다. 이에 대한 많은 실험적, 이론적 연구들이 있으나 각 이론간에 다소의 차이가 존재하며 주로 현장실험 및 실내 모형실험 등을 토대로 이론적인 부분을 보완하고 있다.

본 연구에서는 고속철도 ○○역사의 기초 구조물 보호를 위해 시공된 부력저항용 영구 앵커에서 고속철도의 출발 및 제동시에 발생하는 수평력에 대한 거동을 파악하고자 하였다. 이를 위해 부력저항용 영구앵커에 대해 말뚝에 적용되는 수평재하시험을 수행하였다. 그리고 부력앵커가 설계서에 제시된 요구조건을 만족하는지를 파악하고 시험시 부력앵커에 나타나는 거동특성을 파악하였다. 또한, 수평방향 재하과정에서 부력앵커가 당초 구조계산에 의한 조건에 도달하는지의 여부를 확인, 조사하여 영구구조물로서 부력앵커의 타당성을 확신하고자 하였다.

2. 횡방향 지지력 이론

Bar Type 앵커의 수평재하시험 해석을 위해 말뚝의 수평재하시험에 사용된 이론을 적용하였다. 강봉 형식의 Bar Type 앵커는 직경이 작은 소형말뚝으로 가정하여 해석을 하였다.

2.1 말뚝의 횡방향 거동 예측이론

말뚝의 횡방향 지지력을 구하는 이론은 토압론에 근거하여 말뚝의 극한지지력을 구할 수 있는 Brinch Hansen의 방법(1961) 및 Broms의 방법(1964) 등이 있으며 작용하중에 대한 말뚝의 변위관계를 구할 수 있는 지반반력법 및 탄성법 등이 있다. Brinch Hansen의 방법은 단말뚝에 대하여만 적용할 수 있다는 단점이 있으나 층상의 지반에 대해 내부마찰각과 점착력을 모두 고려할 수 있다는 장점도 있다. Broms의 방법은 사질토 및 점성토에 대하여만 적용할 수 있으며 장말뚝 및 단말뚝에 대하여 극한 하중을 구할 수 있다. 대표적인 지반반력법으로는 p-y해석법을 들 수 있는데 이 방법은 지반 각 층에 대한 성질을 고려할 수 있고 지반에 비선형성도 고려할 수 있다. 탄성법은 지반반력법에서 고려할 수 없는 지반의 연속성을 고려하여 지반을 탄성연속체로 가정하고 말뚝의 거동을 해석하는 방법이다.

2.2 횡방향 지지력

말뚝의 횡방향 지지력 계산을 위해서는 말뚝의 길이 그리고 지반조건에 따라 파괴양상이 상이하여 다음의 4가지 조건으로 구분한다. 자유두부 및 짧은 말뚝(free head, short pile), 자유두부 및 긴 말뚝(free head, long pile), 고정두부 및 짧은 말뚝(fixed head, short pile), 고정두부 및 긴 말뚝(fixed head, long pile)으로 구분한다. 그러나 실제적으로 위의 4가지 조건에 사질토 지반, 점성토 지반의 경우가 추가되어 8가지의 상이한 조건이 고려된다. 실제 각 경우의 지지력 계산에 앞서 각 개념들을 정리할 필요가 있다. 짧은 말뚝이라 함은 다시 짧고 견고한 말뚝(short

rigid pile)으로 표시하는데 여기서 견고함이란 말뚝 재질과 흙의 강성을 비교하여 나타내며, 즉, 횡방향 하중에 의하여 말뚝이 파괴되기 전에 흙 자체의 파괴가 발생함을 뜻하고 두부의 고정조건에 따라 자유두부와 고정두부 조건으로 구분 할 수가 있다.

자유두부의 경우에는 횡방향 하중에 의하여 지반이 변형, 선단부 근처의 회전중심으로 회전파괴가 일어난다. 고정두부의 경우에는 회전파괴 대신 말뚝전체가 수평방향으로 이동하는 형태의 파괴가 발생한다.

짧은 말뚝에 비하여 긴 말뚝은 다시 긴 유연말뚝이라고 하는데 흙의 강성에 비하여 말뚝의 강성이 낮은 경우이다. 이 경우에는 흙의 강성이 말뚝 재질에 비하여 상대적으로 높아 파괴는 말뚝 단면에서 일어나게 된다. 이러한 파괴양상은 지반내의 깊은 곳에서는 흙의 수동저항이 높게 되어 흙의 변형이 발생하기 전에 말뚝재질의 파괴가 발생하는 것으로 해석되기 때문이다. 따라서 말뚝의 횡방향 지지력은 짧은 말뚝일 경우에는 흙의 파괴강도의 함수인 반면 긴 말뚝의 경우에는 말뚝 자체의 재질강도의 함수가 된다.

3. 부력앵커의 수평재하시험

3.1 지반조건

본 시험 지역의 기반암은 화강편마암으로 지층구성은 매립토층, 퇴적토층, 풍화토층, 풍화암층으로 구성되어 있으며 앵커의 인발시험은 풍화 암과 풍화토 지반에서 수행하였다. 풍화대(풍화토, 풍화암반)는 공사 지역의 원 지반으로 실트질 모래로 구성되어 있으며

기반암은 풍화대로 전반적으로 상부에는 풍화토로 분포하며 일부구간에서는 풍화암상으로 채취된다. 풍화 정도는 풍화가 많이 진전된 완전풍화(Completely Weathered)에 해당되며 색은 황갈, 암갈, 회갈색을 띠고 있다. 수분함량은 풍화토에서 젖은(Wet)상태이며, 풍화암반에서는 습한(Moist)상태이다. 모암조직은 암편이 혼재되어 있으며 차별 풍화로 인한 경영대가 교호한 상태이다. 한편, 본 층은 심한풍화(Highly Weathered)로 인한 절리 및 단층의 발달로 세편 내지 단주상 코어가 채취된다. 풍화암의 단위중량은 2.1~2.2t/m³, 내부마찰각은 35°이었으며 암석과 그라우트체의 마찰 저항치는 현장여건을 고려하여 4.0kg/cm²를 적용하였다. Table 1은 각 지층의 대표적인 물성치를 나타내고 있다.

3.2 시험방법

본 시험은 부력저항을 방지하기 위한 기초 구조물 보호를 위해 시공된 부력저항용 영구 앵커가 수평방향 재하과정에서 설계서에 제시한 요구조건을 만족하는지를 확인하고자 하였다. 또한, 부력저항 영구 앵커의 전동차 출발시 또는 급정지시에 대한 응력 분석 자료를 파악하여 수평방향 재하 과정에서 당초 구조계산에 의한 성능을 지니며 주어진 조건을 만족하는지의 여부를 조사, 확인 및 검토하여 안전한 시공이 될 수 있도록 자료를 제공하고자 하였다. 현장시험은 2개소에 대하여 실시하였으며 콘크리트 면이 있는 것과 콘크리트 면이 없는 것에 대해 현장 수평재하시험을 실시하였다. 현장시험에 관한 내용은 Table 2와 같다.

Table 1 각 지층의 대표적 물성치

물성 지층	γ_s (t/m ³)	$\gamma_{s, sat}$ (t/m ³)	실측 N	보정 N	Φ (deg.)	C (t/m ²)	E_s (t/m ²)	k_s (t/m ²)	v
매립토층	1.8	1.9	19~ 3	16~ 7	30	0	2000	1500	0.25
퇴적토층	1.7	1.8	29	25	28	0.5	3000	2500	0.30
풍화토층	1.8	1.9	30~ 3	30	30	1	7000	4000	0.25
풍화암층	2.1	2.2	50+	40+	35	2	20000	10000	0.20
뒷채움흙	1.9	2.0	-	30	30	0	5000	3000	0.25

Table 2 시험앵커 규격

시험 앵커	시험 구분	세부시험 항목	롯드	앵커의 규격(m)			
				Total Length	Bond Length	Free Length	Jacking Length
L1	Lean-concrete 있음	4 -기 표준반복 재하시험	Acalloy Bar Dia.50mm	11.0	8.6	1.0	1.4
L2	Lean-concrete 없음						

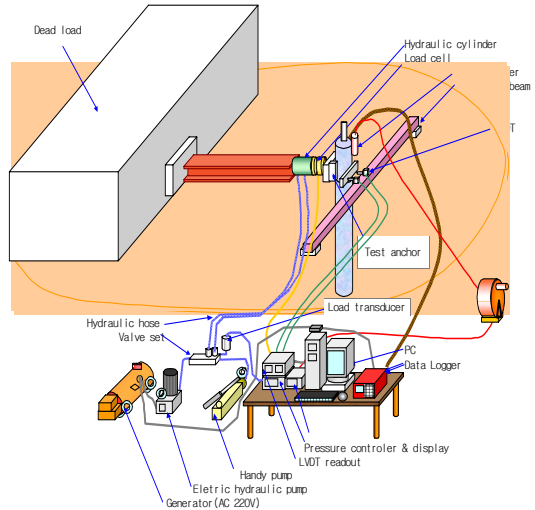


Fig. 1 앵커체의 수평재하시험

앵커의 수평재하시험은 반력 방식에 따라 구조물 벽체의 반력을 이용하여 시험하는 방식을 채택하였다. 그리고 ASTM 3966-90의 6.3항 반복표준재하 방법에 준하여 시험을 실시하였다. 수평재하시험은 설계 수평력의 200%를 최대시험하중으로 계획(ASTM 3966-90 참조)하며 시험중 시간당 변위발생속도가 1/100인치를 넘으면 시험을 종료하도록 권장하고 있다. 본 시험에서는 1분당 최대시험하중을 4ton으로 시험하도록 제안되어 있으므로 이를 적용하여 표준재하시험(Cyclic Loading Test)을 실시하였다. 시험방법은 시공앵커 설계하중의 10%(15ton)을 예비 하중으로 하여 각 단계마다 하중을 증가시켰고 하중재하직후, 1분, 3분, 5분 경과 시에 대해 각각 변위를 측정하였다. 기타 시험방법은 ASTM 3966-90의 표준방법에 준하였다. Fig. 1은 앵커체의 수평재하 시험 장면을 보여 주고 있다.

3.3 Lean-Concrete 상부의 수평재하시험

본 시험은 Lean-Concrete위에서 수행된 횡방향 시험으로 두부자유 상태에서 시험을 수행하였다. 본 시험에 사용된 Bar-Type 앵커는 직경에 비해 항복모멘트가 큰 앵커로 풍화정도가 극심한 풍화암에 관입되어 있으며 대표적인 시험 결과는 Fig. 2 및 3과 같다.

본 시험에서 극한 수평 저항력은 2가지로 분류되었다. 즉, 파괴시의 극한 하중을 안전율로 나누어 허용수평하중을 산정 하는 방법 또는 말뚝의 허용수평 변위에 대응하는 하중을 허용 수평하중으로 산정 하는 방법으로 구분하였다. 파괴시의 극한 하중을 p-y곡선법, Logp-Logy 곡선법, y-Logt 곡선법, dy/d(Logt) 곡선법에 의해 검토 한 결과 4톤에서는 변형이 다소 있었으나 파괴에 도달하지는 않았다.

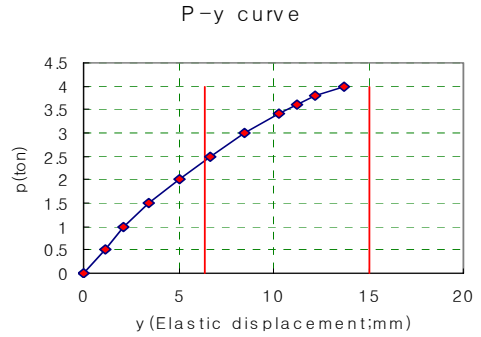
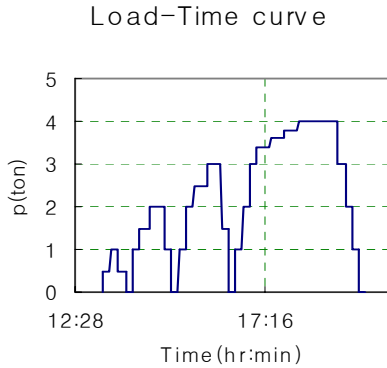


Fig. 3 (6.4mm 15.0mm)

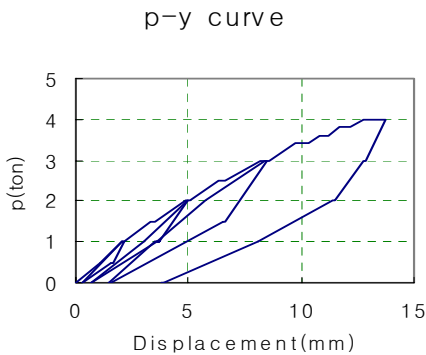


Fig. 2 - 변위 그래프

전동차의 정차 또는 발차시 발생하는 충격에 따른 수평력에 대한 앵커의 수평변위 기준은 도로교에서 적용하는 한계 변위 및 극한 변위를 적용하여 전동차의 장기적인 안전운행이 확보 될 수 있도록 하였다. Fig. 3에서와 같이 변위를 기준으로 하여 횡방향 지지력을 확인한 결과, 6.4mm와 15mm변위를 기준으로 구한 횡방향 지지력은 각각 2.4톤과 4.0톤 이상의 값을 갖는 것으로 나타났다. Fig. 3에서 말뚝의 횡방향 지지력은 McNulty (1956)의 변위기준과 도로교 표준시방서(1996)의 15mm 변위기준을 사용하여 말뚝의 거동을 분석하였다.

Table 3 Lean-concrete ㅓ 있는 경우의 시험결과

Test cycle		1 Test cycle		2 Test cycle		3 Test cycle		4 Test cycle	
		loading	Rebound	loading	Rebound	loading	Rebound	loading	Rebound
Load(ton)		1.0	0.0	2.0	0.0	3.0	0.0	4.0	0.0
Displacement (mm)	Lateral	2.11	0.14	5.01	0.68	8.52	1.46	13.75	4.84
	Elastic(Yo)	1.97		4.33		7.06		8.91	
Angle of Tendon(°)	change	0.51	0.06	1.19	0.21	2.01	0.46	3.35	1.06
	Recovery	0.44		0.98		1.56		2.29	
Depth of deflection(m)	L=0.20m	0.26		0.25		0.26		0.22	
	모멘트(ton·)	0.3		0.5		0.8		0.9	
결과 검토	하중(f=f+0.17m)	1.1		2.3		3.4		4.6	
	변형량(mm) l=0.17m	1.81		3.97		6.49		8.07	
	l=0.19m	141.1		127.4		119.9		110.4	
	접지면적(m²)	0.011		0.011		0.012		0.005	
	접지압력(t/m²)	416.6		896.8		1097.2		8496.2	
	반력계수(t/m³)	230223.1		225667.9		168957.0		1052415.2	

지반 반력계수는 앵커두부의 변위 및 앵커두부의 각도 변화를 검토하여 Table 3과 같은 시험결과를 얻었다. 시험결과 Lean-Concrete의 상부 17cm지점에서의 변위량은 8.07mm, 하중 4.6톤으로 나타났다.

이때 탠덤이 절곡되는 지점이 0.02m로 지반 반력계수(K_h)는 300ton/m³이상으로 케이싱에 고정된 상부에서 변형이 종료됨을 알 수 있었다. 실험결과 Lean-Concrete와 함께 시공된 두부구속상태의 부력앵커에서는 대부분 하중을 Lean-Concrete에서 지지하고 있음을 알 수 있었다.

이상의 시험 결과 본 현장의 시험 말뚝은 두부가 매트에 구속되어 적용되므로 본 시험의 결과 적용 시에는 이점에 유의하여 적용해야 할 것으로 판단되었다.

3.4 Lean-Concrete 제거 상태에서 수평 재하시험

Lean-Concrete 제거 후 수행한 횡방향 시험도 3.3 절의 Lean-Concrete 상부의 수평재하시험에서와 같이 두부자유 상태에서 말뚝 직경에 비해 말뚝전장이 길고

항복 모멘트가 최대 모멘트 보다 큰 앵커를 사용하여 시험을 수행하였다. 지반 조건은 점성토 보다는 사질토에 근접하는 풍화 정도가 극심한 풍화암에 관입되어 있는 앵커로 다음과 같은 결과를 얻었다. 각 단계별 하중 재하표는 Table 4와 같다.

극한 수평저항력은 본 시험의 결과 2가지방법에 따라 검토되었으며, 즉 파괴시의 극한 하중을 안전율로 나누어 허용수평하중을 산정하는 방법. 또는 말뚝의 허용수평변위에 대응하는 하중을 허용수평하중으로 산정하는 방법으로 분류되었으며, 파괴시의 극한 하중을 p-y곡선법, Logp-Logy법, y-Logt법 dy/d(Logt)법에 의한 검토 결과 Fig. 5와 같은 결과를 얻었다. 따라서 2ton 이후 변형이 발생하여 3.4ton에서 더 이상 시험을 진행할 수 없었다. 따라서 본 시험의 한계 하중은 2ton으로 하였다.

Fig. 5와 같이 허용수평변위에 대한 극한 하중은 전동차의 정차 시 또는 발차 시에 앵커에 대한 충격으로 수평력에 관하여 앵커의 수평변위는 도로교에서 적용하는 한계변위 및 극한변위를 적용하였다.

Table 4 각 단계별 하중 재하표

1 기		2 기		3 기		4 기	
하중(ton)	관측시간()	하중(ton)	관측시간()	하중(ton)	관측시간()	하중(ton)	관측시간()
0.0	10	0.0	10	0.0	10	0.0	10
0.5	10						
1.0	10	1.0	10	1.0	10	1.0	10
		1.5	15				
		2.0	20	2.0	10	2.0	10
				2.5	20	3.0	10
				3.0	20	3.0	10
						3.4	20
						3.6	20
						3.8	20
						4.0	60
						3.0	10
						2.0	10
				1.5	10		
		1.0	10	1.0	10	1.0	10
0.5	10						
						0.0	10

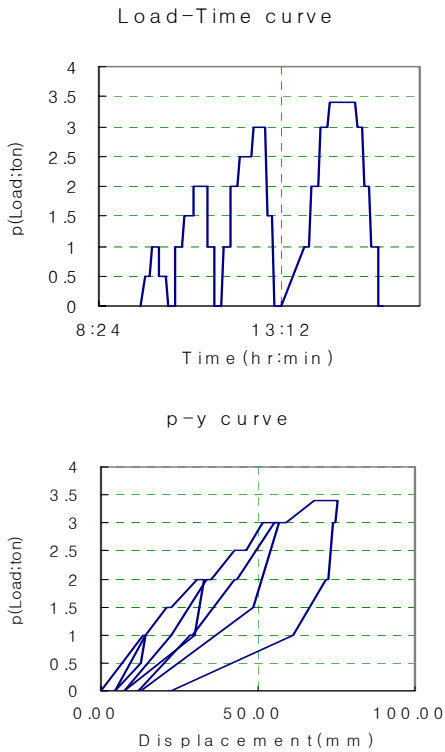


Fig. 4 - 변위 그래프

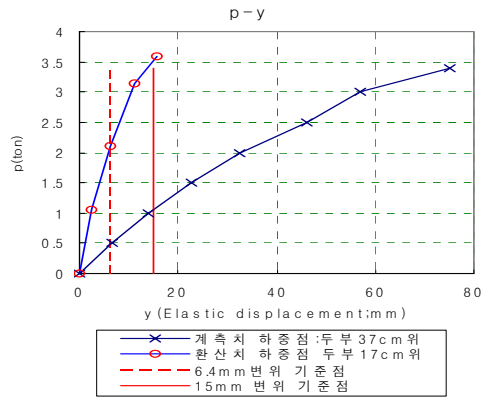


Fig. 5 한계 변위 및 극한 하중

Fig. 5는 6.4mm와 15.0mm 변위를 기준으로 나타난 횡방향 지지력에 대한 시험결과이다. 시험결과 계측치 하중점을 기준으로 두부 37cm 지점에서 측정된 결과 6.4mm와 15mm 변위 기준에 대한 횡방향 지지력은 0.5톤과 1.1톤으로 나타났다. 환산치 하중점 기준으로 두부 17cm 지반에서 6.4mm와 15mm 변위기준으로 횡방향 지지력은 2.1톤과 3.5톤으로 나타났다. 지반 반력 계수는 앵커두부의 변위 및 앵커두부의 각도 변화를 검토하여 Table 5와 같은 시험결과를 얻었다.

Table 5 Lean-concrete ㅏ 없는 경우의 수평재하 시험결과

Test cycle	1Test cycle		2Test cycle		3Test cycle		4Test cycle		
	loading	Rebound	loading	Rebound	loading	Rebound	loading	Rebound	
Load(ton)	1.0	0.00	2.0	0.0	3.0	0.0	3.4	0.0	
Displacement (mm)	Lateral	139.1	4.18	32.48	7.15	56.92	12.01	75.05	21.62
	Elastic(Yo)	9.73		25.33		44.91		53.43	
Angle of Tendon(°)	change	1.31	0.16	3.46	0.59	6.08	1.48	8.38	2.61
	Recovery	1.15		2.87		4.61		5.77	
Depth of deflection(m)	L=0.37m	0.49		0.51		0.56		0.53	
결과 검토	모멘트(ton ·)	0.5		1.0		1.7		18	
	하중(f=f+0.17m)	1.7		3.3		4.7		5.5	
	변형량(mm) l=0.17m	5.72		15.32		28.79		33.21	
	l=0.19m	84.9		66.1		58.1		54.1	
	접지면적(m ²)	0.023		0.027		0.037		0.032	
	접지압력(t/m ²)	181.8		273.7		238.5		358.0	
	반력계수(t/m ³)	31775.4		17868.5		8283.7		10782.3	

Table 6 수평제하 시험 결과의 비교

현장 시험 구분			Lean-Concrete 있음				Lean-Concrete 없음			
극한 수평저항력 ($l=0.17m$)	과괴시극한하중(ton)		4.0ton				2.0ton			
	허용수평 변위(mm)	6.4mm	2.4ton				2.1ton			
		15.0mm	4.0ton				3.5ton			
Cycle			1st	2nd	3rd	4th	1st	2nd	3rd	4th
하중($l=0.17m$, ton)			1.1	2.3	3.4	4.6	1.7	3.3	4.7	5.5
집지압력(ton/m ²)			417	897	1097	8496	182	274	239	358
수평변위($l=0.17m$, mm)			1.81	3.97	6.49	8.07	5.72	15.32	28.79	33.21
각도변위(θ°)			0.44	0.98	1.56	2.29	1.15	2.87	4.61	5.77
변위점(f, m)			0.06	0.05	0.06	0.02	9.12	0.14	0.19	0.16
반력계수($k_b=p/y$, ton/m ³)			100 이상				100 이상			

시험결과 앵커 상부 17cm지점에서의 1st 사이클에서의 변위량은 5.72mm, 하중은 1.7톤으로 나타났는데 Lean Concrete가 없는 경우에는 1st이후에는 규정상 변위가 1/2인치를 초과하기 때문에 그 값을 채택하지 않았다. 이때 Tendon이 절곡되는 지점은 0.1m로 지반 반력계수(K_b)는 300ton/m³ 이상으로 케이싱에 고정된 지점에서 변형이 종료됨을 알 수 있었다. 본 시험의 결과를 통하여 부력방지용 Bar Type 앵커는 풍화암에서 지지되며 스틸 케이싱 부분에서 강력히 저항하고 있는 것으로 판단되었다.

4. 부력방지용 Bar Type 앵커의 구조검토

4.1 기차의 제동과 가속에 의한 수평력 분석

지하구조물의 전 운영기간에 걸쳐 기차의 정지와 출발시 발생하는 제동과 견인력 때문에 부력앵커에 지속적인 벤딩 모멘트를 발생시킨다. 따라서 이러한 부력 앵커에 작용하는 벤딩의 영향에 대응하기 위해 스틸 바 재료의 피로강도를 고려하여 설계되어야 한다. 본 연구에서는 고속철도의 제동과 가속에 따라 발생하는 수평력을 받는 부력앵커의 구조적인 안정성을 검토 분석하여 지하 구조물의 구조적 안정을 평가하고자 하였다. 운행 중인 열차의 수직축 하중에 의한 부력 앵커

의 응력은 상대적으로 매우 작게 작용할 수 있다. 피로응력의 관점에서 보았을 때 역사의 지붕지역에 위치한 앵커들이 벤딩에 의한 응력의 영향을 가장 적게 받는 것으로 나타났다. 그러나 방수연결에 의해 부력 앵커의 단면이 줄어들기 때문에 바닥 슬래브의 하단면에 위치한 앵커의 가장 취약부에서도 허용응력을 충족시킬 수 있는 것으로 나타났다. 허용응력의 관점에서 보았을 때 지하구조물 구간에 시공된 부력앵커가 벤딩에 의해 가장 심한 과다응력을 받는다. 구조 검토결과에 의하면 지하구조물의 구간 방수연결부위에 설치될 앵커에 대해서도 케이싱의 높이를 조절하면 안정된 구조물이 되는 것으로 판정되었다. 앵커 바닥슬래브의 연결을 향상시키기 위해 스틸케이싱을 연장하여 바닥 슬래브에 18cm정도 매립하거나 스틸케이싱을 18cm위쪽으로 올려도 안정적인 구조물이 되는 것으로 나타났다. 앵커와 방수연결부위의 품질과 작업성 향상을 위해 버림 콘크리트 상단 표면의 스틸 케이싱에 플랜지를 용접하였으며 피로에 대한 저항력을 향상시키기 위해 케이싱을 215×8mm 강관으로 시공하였다. 강관으로 시공되므로 매우 효과적으로 앵커의 지지력을 향상시키는데 효과가 있는 것으로 나타났다.

설계 규정에 의해 수평제동 및 가속력의 50%는 앵커에 전달되며 기차의 제동력은 2.0t/m, 속력은 3.3t/m로 앵커 천단의 수평 변형은 0.5cm를 기준으로 하였다. 앵커 천단의 수평 변위가 2mm이하 (dowel bar의 허용오차)일 경우 팽창 조인트로 둘러싸여 있는 바닥슬래브

는 개별적으로 움직이고 있다고 볼 수 있으며, 각각의 바닥 슬래브에는 하나의 선로에서만 하중이 부과되어야 한다. 왜냐하면 종방향 87.4m(폭)의 거리를 5블록으로 나누었으며 횡방향 600m를 15m간격으로 구분하였다. 조인트 부분에는 Dowel Bar 및 Shear Key로 시공토록 되어있으므로 슬래브는 개별적으로 움직이고 있다고 볼 수 있다. 모든 부력 앵커가 동일한 수평저항력을 가지고 있고 지붕의 전동 차량의 축하중 17ton을 감안하여 하중을 계산하면 선로 부력 앵커의 수직정적 장력은 $V_1=39.22$ ton으로 계산되었다.

바닥 슬래브에는 두 개의 선로가 놓여지며 이중 하나의 선로에만 기차의 제동 및 가속에 의한 하중이 부과될 수 있다. 바닥 슬래브에 부과되는 제동 또는 가속에 의한 수평력을 표시하면 다음과 같이 분석할 수 있다. 기차의 제동과 가속에 의해 부력 앵커에 부과되는 힘은 수평 제동 및 가속력의 50%는 파일에 전달되며, 기차의 제동력은 2.0t/m, 가속력은 3.3t/m로 파일 천단의 수평 변형 정도는 0.5cm를 넘어서는 안 될 것으로 판단되며 파일 천단의 수평변위가 2mm 이하(dowel bar의 허용오차) 일 경우 expansion joint로 둘러싸여 있는 바닥 슬래브는 개별적으로 움직이고 있다고 볼 수 있으며, 각각의 바닥 슬래브는 하나의 선로에서만 하중이 부과되어야 하며 모든 부력 앵커는 동일한 수평저항력을 가지고 있는바, 기차의 제동과 가속으로 부력 앵커의 배열에 작용하는 힘은 각각 제동 : $H=0.5 \times 2.0t/m \times 8.0m=18.0t$, 견인 : $H=0.5 \times 3.3t/m \times 8.0m=29.7t$ 으로 지반에 매입되는 앵커의 길이는 8.70m, 기차의 제동과 가속으로 부력 앵커의 배열에 작용하는 힘은 각각 18.0ton과 29.7ton으로 계산되었다. 부력 앵커에 부과되는 응력의 수평력에 의한 파일의 최대 휨 모멘트는 바닥 슬래브에 의해 역지가 되는 파일의 천단에 가해지는데 Fig. 6에서 파일의 총 단면 D-D가 가장 취약한 부분이다. 역사 내에서 기차의 제동과 가속에 의해 생기는 수평력은 내구연한인 100년 동안 전 기간에 걸쳐 지속적으로 발생하는 것으로 간주해야 한다. 큰 응력을 받고 있는 앵커의 상단 부를 강화하기 위해 케이싱을 연장하거나 위로 이동시켜 콘크리트 슬래브에 스틸 케이싱을 매립하여 보강하는데 이 방법이 가격도 저렴하고 효과 면에서도 우수

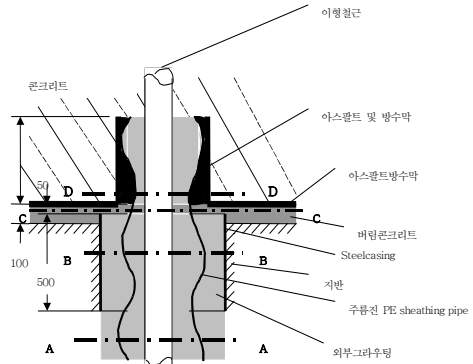


Fig. 6 Bar Type 앵커의 시공 단면

하다고 할 수 있다. 아스팔트 방수 시트와의 연결력을 증가시키기 위해 버림 콘크리트 상단 바닥면의 스틸 케이싱에 스틸 플랜지를 용접할 수 있다. 본 현장에서는 Fig. 6에서 그라우팅된 단면 A-A가 될 수 있으면 바닥 슬래브의 역지력으로 부터 이격될 수 있도록 스틸 케이싱을 연장하는 방법으로 보강하였다.

4.2 양압력에 의해 부력앵커에 작용하는 허용피로응력

지하구조물에 설치된 부력 앵커는 열차의 정지와 출발시 수시로 변하는 수평력에 의해 응력을 받게 된다. 만약, 기차가 15분 간격으로 운행되면 내용연한 100년간 하루 24시간 동안 양방향에 작용하는 수평 앵커의 응력 빈도 N은 371 사이클이며 부력 앵커의 면이 매끄러운 고강도 원형철봉의 경우 2×10^6 하중 이상인 앵커의 피로응력 $\Delta \sigma = 2100$ kg/cm²이다. 부력 앵커의 강봉이 인장을 받는 경우(독일 승인증서(Z-12.4-59), 피로응력은 6,695kg/cm² 이하로 정적하중을 받으면 D=50mm의 고강도 원형 강봉으로 적용이 가능하다고 판단되었다.

4.3 부력 앵커의 성능향상

응력분석결과, U-type ramp 구간에 설치된 파일의 이형철근은 바닥 슬래브가 역지하고 있는 파일의 상단 부 끝부분(PE sheathing pipe와 연결되는 아스팔트 방

수로 인해 파일의 단면부가 줄어들게 되는 부분)에 과다 응력이 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 역사의 내구연한 전 기간에 걸쳐 앵커의 안전을 도모하기 위해 다음과 같은 방안들에 대해 고려하였다. 기차의 제동을 제한함으로써 교통량을 억제 ($\ll 2 \times 10^6$ cycle)하는 방안은 비경제적이고 현실적인 방안이 될 수 없는 것으로 조사되었다. 기차의 제동과 가속에 의해 형성되는 수평력을 흡수하기 위해 궤도를 따라 크리프 커플러를 설치하는 방안은 궤도의 수평력을 구조물의 전단기로 전이 시켜 경비가 많이 소요될 뿐더러 구조물의 움직임과 크리프 커플러의 허용오차에 따라 기대효과가 크지 않은 수 있다.

심하게 응력을 받고 있는 앵커의 상단부를 강화하기 위해 케이싱을 연장하거나 위로 이동시켜 지하 2층의 콘크리트 슬래브에 스틸 케이싱을 매립하는 방법은 가격도 저렴하고 효과면에서도 우수한 것으로 나타났다. 아스팔트 방수 시트와의 연결력을 향상시키기 위해 버림 콘크리트 상단 바닥면의 스틸 케이싱에 스틸 플랜지를 용접하여 보강하고 PE 파이프와 스틸 월 케이싱 사이의 공간을 바닥면의 방수면과 연결하기 위해 뜨거운 아스팔트로 채워 보강하면 효과가 있는 것으로 나타났다. 본 대상 현장에서는 언급한 여러 가지 방안 중 간편한 시공과 긴 내구수명이 보장되는 마지막 안을 채택하였다.

5. 결 론

- 1) 기차가 15분 간격으로 운행되면 내용연한 100여 년 간 하루 24시간 동안 양방향에 작용하는 수평 앵커의 응력 빈도는 수평 제동 및 가속력의 50%는 파일에 전달되며 기차의 제동력은 2.0t/m, 속력은 3.3t/m로 파일 천단의 수평 변형 정도는 0.5cm를 넘어서는 안 될 것으로 분석되었다.
- 2) 파일 천단의 수평변위가 2mm이하(dowel bar의 허용오차)일 경우 expansion 조인트로 둘러싸여 있는 바닥슬래브는 개별적으로 움직이고 있음을 분석되었다.
- 3) 스틸 케이싱을 18cm 위쪽으로 올려 안정적인 구조물이 될 것이며, 스틸케이싱에 플랜지 535×35×10을

용접 인접부 고정으로 Bar Type 부력 앵커가 안정적인 역할을 할 수 있는 것으로 판단되었다.

- 4) Lean-concrete가 있는 상태의 시험결과는 17cm에서 변위량은 8.07mm로 이때 하중 4.6t에서 Tendon이 절곡되는 지점이 $f=0.02m$ 로 지반 반력계수 K_b 산정 결과 300ton/m³ 이상으로 케이싱에 고정된 상부에서 변형이 종료되었다. 본 시험의 결과 Lean-concrete에서 대부분 지지되고 있음을 알 수 있었다.
- 5) Lean-Concrete 제거 상태에 파괴시의 극한 하중을 p-y곡선법, Logp-Logy법, y-Logt 법 dy/d (Logt)법에 의해 검토한 결과 2ton 이후 변형이 발생하여 3.4ton 에서 더 이상 시험을 진행할 수 없었다. 따라서 본 시험의 한계하중은 2ton으로 하였다.
- 6) 변위각은 Tendon의 구성이 상부 Bar에 비해 하부 케이싱 부분과 지반의 지지력이 상대적으로 강하여 변형이 케이싱 상부에 집중 적으로 작용하는 것으로 파악되었다. 본 앵커는 상부가 매트에 고정되어 시공되는 것이 대부분으로 작용하므로 변형은 실제로 앵커의 거동과 상이하며 두부 자유 상태에서 시험한 결과 매트에 두부구속 상태로 적용되어야 하는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 건설교통부(1997) “구조물 기초설계기준”, pp. 224~232.
2. 건설교통부(1996) “도로교 표준시방서”, pp. 30~225.
3. Brinch Hansen, J.(1961), "The Ultimate Resistance of Rigid Piles Against Transversal Forces, "Geoteknisk Institut. Bull. No. 12, Copenhagen.
4. Broms, B.B.(1964), "Lateral resistance of piles in cohesionless soils." Proc. ASCE. Vol. 90, SM3, pp.123-156.
5. BSI, "Ground Anchorages BS 8081-1979".
6. DIN 4125 (1990), "Ground Anchorages Design, construction and testing".
7. France SYSTRA"s Design manuai para 1.8.2.6 (2002), SYSTRA"s design manuai para 1.4.3.4.1.
8. McNulty, J.F. 1956. "Thrust Loading on Piles." J.S.M.F.D., ASCE, Vol.82, no. SM4, paper 1081.

(접수일자 : 2004년 5월 21일) (급행)