

LRFD 설계법에 따른 인천대교 현장 타설 말뚝의 지지력 산정

Assessment of Pile Capacity of Incheon Bridge Project by LRFD Method

정성준* · 김정환** · 이현근*** · 김명모****

Jung, Sung Jun · Kim, Jeong Hwan · Lee, Hyun Gun · Kim, Myoung Mo

1. 개 요

인천대교는 인천 송도신도시에서부터 인천항로를 건너 영종도 인천국제공항 접속도로의 북동쪽을 잇는 12km 에 이르는 해상교량 고속도로 공사구간이다. 인천대교 현장에서의 기초는 지층조건에 따라 각각 풍화암, 연암 또는 경암에 선단지지된 RCD 현장타설말뚝으로 구성되어 있고, LRFD 설계법을 따라 Fast track으로 설계를 진행하고 있으며, 기초 설계를 위해 4본의 사전 말뚝재하시험을 계획, O-cell 실물 재하시험을 수행하였다. 또한, 시험말뚝 위치에서의 사전 보링 조사 및 현장시험 결과를 토대로 재하시험 결과를 분석하여 설계 지지력을 제안하였으며 각종 시방 및 문헌 조사를 통해 저항계수를 도출하여, 향후 LRFD 설계법의 국내 적용 및 인근 지역의 기초 설계에 기여하고자 하였다.

2. 지질조건 및 재하시험 계획

말뚝 지지력의 대부분을 부담하는 암반근입부의 상태를 정량적으로 파악하기 위해 암반근입부 공내재하시험, 그리고 채취된 암석 및 콘크리트 시료에 대한 일축압축시험, 접하중 시험을 수행하였으며 시험 말뚝 위치의 평면도 및 지반조사 결과를 그림 1에 도시하였다.

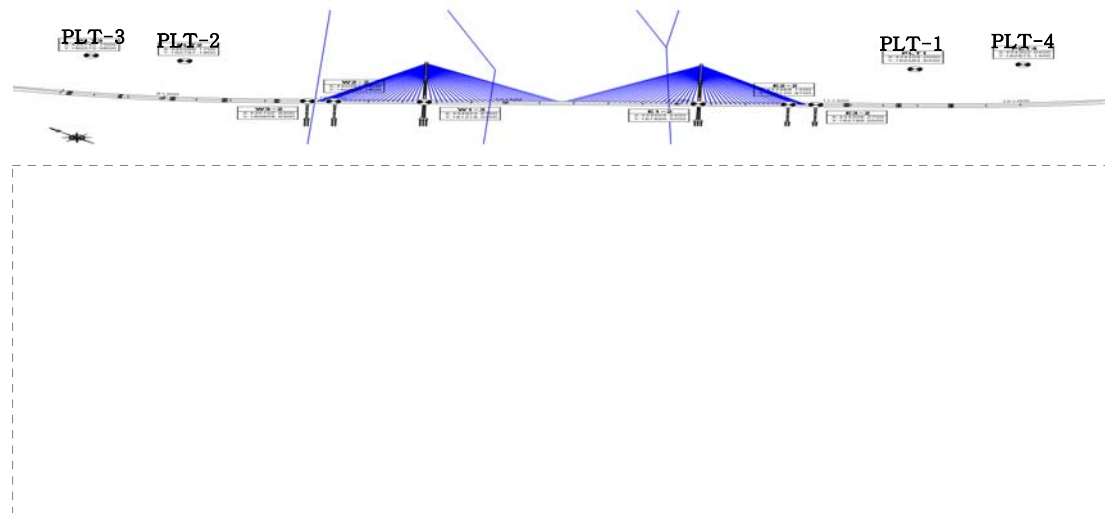


그림 1. 시험말뚝위치의 평면도 및 지반조사 결과

- * 학생회원 · 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 박사과정 · E-mail:brian76@snu.ac.kr
 ** 정회원 · 삼성물산 인천대교 현장 설계팀 · E-mail:jnghwan@samsung.com
 *** 정회원 · 삼성물산 인천대교 현장 설계팀 · E-mail:hyungun.lee@samsung.com
 **** 정회원 · 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 교수 · E-mail:geotech@snu.ac.kr

시험말뚝에서의 O-cell위치, 시험목적, 기타장치, 그리고 특이사항 등을 간략하게 정리하면 표 1과 같다.

표 1. O-cell 시험계획

	시험말뚝-1/(D=3m)	시험말뚝-2/(D=2.4m)	시험말뚝-3/(D=2.4m)	시험말뚝-4/(D=2.4m)
선단 및 오셀위치				
목적	경암 선단 확인 연암 주변마찰 확인 풍화암 주변마찰 확인	풍화암 주변마찰 확인 풍화암 선단 확인	풍화암 주변마찰 확인 연암 주변마찰 확인 연암 선단 확인	풍화암 주변마찰 확인 연암 주변마찰 확인 연암 선단 확인
cell	single-level(1단셀) 경암하단(1개)	single-level(1단셀) 말뚝선단(풍화암 1개)	single-level(1단셀) 말뚝선단(연암 1개)	single-level(1단셀) 말뚝선단(연암 1개)
기타장치	strain gage, sonic tube	strain gage, sonic tube	strain gage, sonic tube	strain gage, sonic tube
특이사항	예상재하하중:21,000톤 적용 실재하하중:29,000톤 O-cell 5개 설치	예상재하하중:9,000톤 적용 실재하하중:17,000톤 O-cell 2개 설치	예상재하하중:17,000톤 적용 실재하하중:16,000톤 O-cell 4개 설치	예상재하하중:12,000톤 적용 실재하하중: 24,000톤 O-cell 3개 설치

3. 재하시험 결과 및 분석

재하시험은 O-cell 상판과 하판에 변형봉을 부착하여 하중에 따른 상, 하단의 변위를 측정하였으며 또한, 하중 재하에 따른 말뚝의 하중전이 거동을 분석하기 위하여 그림 1에 표시된 위치에 strain gage를 부착하여 말뚝의 깊이에 따른 변형률을 측정하였다. O-cell 재하시험은 ASTM D1143에서 규정하고 있는 급속 재하방식을 따라 수행하였다. 그림 2에 오스터버그 시험 결과 하중-변위 곡선을 도시하였다.

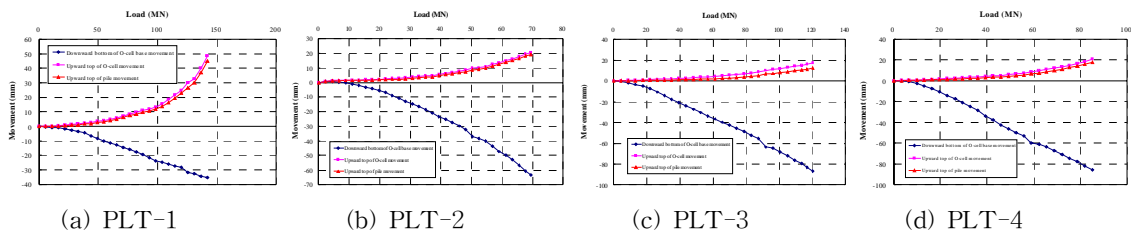


그림 2. 오스터버그 시험 결과 하중-변위 곡선

Davisson 방법과 DeBeer log-log method으로 극한하중을 산정시 시험결과로 얻은 데이터만으로는 극한하중을 얻을 수 가 없어서 외삽법을 사용하였다. 이 때, Davisson 방법에 의하여 극한하중을 결정하는 경우 침하량이 상당히 크게 평가되는 반면 DeBeer 방법에 의하여 극한하중을 결정하는 경우 침하량이 과소하게 산정된다. 본 현장에서는 위의 방법의 결과를 신뢰할 수 없어서 절대 침하량 기준을 적용하였다. FHWA 기준에서의 극한하중은 말뚝직경의 5% 침하발생 시의 하중으로 정의되는데 본 과업현장의 현장타설말뚝은 대구경이고 안전측의 설계를 위하여 말뚝직경의 1%에 해당하는 침하량 크기에서 극한하중을 결정하였다. AASHTO LRFD(2004) 규정에 따르면 암반근입말뚝의 주요 설계절차는 우선 암반근입 말뚝 구간의 탄성침하와 말뚝선단부 아래의 암반의 침하량을 구한 후 이들을 더하여 10mm 미만인 경우 주변저항력만으로 설계하고, 합산된 침하량이 10mm 이상인 경우 선단지지력만으로 설계한다. 이는 말뚝의 상대변위가 10mm 이상 발생되는 경우 주변에서 취성파괴가 발생하며 이 때, 주변에서의 잔류강도가 0이된다는 극단적으로 보수적인 가정에 바탕을 두고 있다. 이 방법은 신선한 암반(sound rock)에 적용될 경우 얼마간의 타당성을 찾을 수 있다. 그러나, 본 현장의 O-cell 시험결과에서 볼 수 있듯이 풍화암과 연암에서 주변저항력-변위 곡선(그림 3)은 변위연화 현상을 보이지 않고 변위가 증가함에 따라 계속적으로 주변저항력이 증가하고 있다.

따라서, 암반근입말뚝의 지지력 산정시 주변 또는 선단지지력을 말뚝침하량의 크기에 따라 결정하는 방법

은 암반상태에 따라 선택적으로 적용되어야 한다. 인천대교 현장에서도 경암에서는 취성과괴가 예상되므로 말뚝이 근입되는 경우에는 주면 또는 선단지지력중 하나를 택하고자 하였다. 그러나 풍화암과 연암에 근입된 경우에는 말뚝근입 암반이 절리 또는 국부균열 등 불연속면을 다수 포함하고 있어서 상당량의 상대변위를 일으킬 때까지 말뚝과 암반사이에 전단력이 발휘되기 때문에 전체지지력 산정시에 주면과 선단지지력을 더하여 지지력을 산정하였다. 시험 결과를 본 구간 말뚝설계에 적용하기 위해 우선, 풍화암 주면의 경우 그림 4에 근거하여 표 2와 같이 정리하였다.

표 2, 풍화암의 주면지지력

N	극한주면지지력(tf/m ²)
N < 50/5	60
50/5 ≤ N ≤ 50/10	30
50/10 < N ≤ 50/15	20

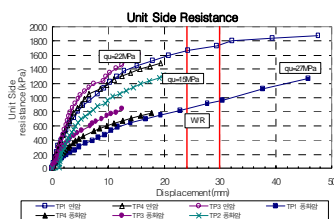


그림 3. 풍화암/연암에서의 주면저항-변위곡선

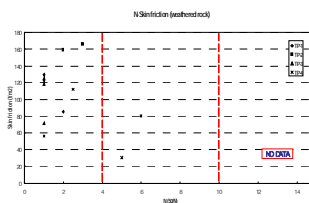


그림 4. 풍화암의 주면마찰력과 N값 관계

풍화암 선단의 경우, O-cell 시험 자료가 부족하여 도로교시방서 기준(300 t/m²)을 적용하였다. 연암의 주면과 선단의 경우 그림 5에 도시한 점하중 강도, 일축압축강도, TCR, 탄성계수와와의 상관성을 이용하여 결정하였으며 표 3에 그 결과를 수록하였다.

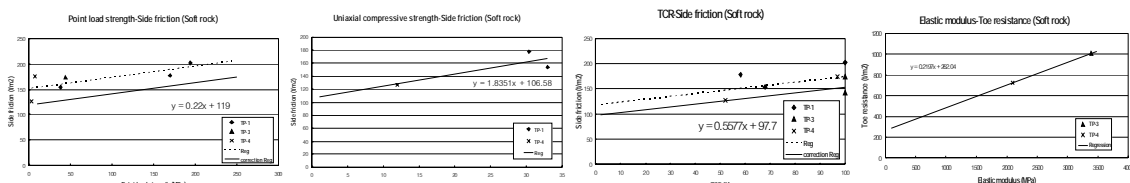


그림 5. 연암의 점하중 강도, 일축압축강도, TCR, 탄성계수와 주면 및 선단지지력 관계

표 3. 연암의 주면 및 선단지지력

점하중 강도(MPa)	일축압축 강도(MPa)	TCR (%)	극한주면지지력(tf/m ²)	일축압축 강도 (MPa)	점하중 강도(MPa)	탄성계수 (MPa)	TCR(%)	극한선단지지력(tf/m ²)
3.5이상	12이상	-	120	12이상	20이상	-	-	700

암반의 일축압축강도 및 점하중강도가 위 표 3에 명기한 기준치를 하회하는 경우 그림 5에 도시한 상관성을 이용하여 지지력을 저감하여 적용한다.

경암의 선단지지력은 그림 6에 도시한 일축압축강도, RQD와의 상관성을 이용하여 결정하였으며 표 4에 그 결과를 수록하였다.

표 4. 경암의 선단지지력

TCR(%)	RQD(%)	일축압축강도 (MPa)	점하중에 의한 일축압축강도(MPa)	선단지지력(t/m ²)
100	74	100	80	1800

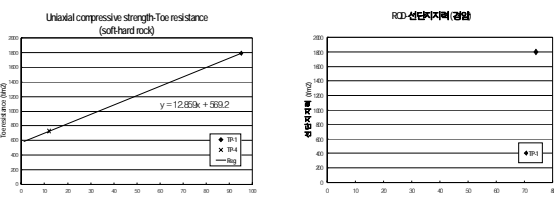


그림 6. 경암의 일축압축강도, RQD와 선단지지력 관계

4. LRFD 설계법 적용시 저항계수의 결정

LRFD 설계법은 신뢰성과 확률이론에 근거하여 부분안전계수의 개념을 도입하여 하중과 지지력에 각각의 부분 안전율을 적용하는 방법이다. 하중계수는 지역에 따라서 큰 차이가 없으나 저항계수는 설계방법, 시공 방법, 지층상황 등에 따라 큰 차이를 나타낸다. 따라서, 현장에 적용되어진 저항계수의 산출근거는 다음과 같다. 지반의 변동성이 크다고 가정하고(보수적), 말뚝재하시험 데이터 수에 따라 저항계수 값을 차등 적용하는 NCHRP 507(2004)에 따라 저항계수값을 산정하였고, 본 현장에서 수행한 O-cell 시험은 신뢰도 면에서 정재하시험보다는 다소 낮고 동재하시험보다는 높은 것으로 평가되므로 NCHRP 507(2004) 기준에서 일률적으로 0.05를 감하여 설계에 적용하였다. 본 현장의 풍화암, 연암, 경암의 주면과 선단에 적용한 저항계수는 표 5와 같다.

표 5. 풍화암, 연암, 경암에 적용된 저항계수

저항계수	풍화암		연암				경암	
	주면	선단	주면		선단		선단	
	0.75	시험회수>4	0.5	0.7	시험회수=3	0.6	시험회수=2	0.5
0.60	시험회수=2							
0.50	도로교설계기준							

상기의 저항계수를 적용하여 설계를 수행한 결과는 LRFD Service limit State 하중을 기준으로 허용응력 설계법을 적용한 경우 최소 안전율 2 이상이 확보됨을 확인하였다.

5. 결 론

- O-cell을 이용한 4본의 실물 재하시험 및 지반조사 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.
- 1. 풍화암과 연암에 근입된 말뚝의 경우 암반이 절리 또는 국부균열 등 불연속면을 다수 포함하고 있어서 상당량의 상대변위를 일으킬 때까지 주면 저항력이 발휘되므로 전체지지력 산정시 주면과 선단지지력을 함께 고려하여 지지력을 산정하였고 재하시험을 통해 이를 확인하였다. 다만, 말뚝주면에서 취성과 파괴 예상되는 경암의 경우 암반 소켓부 침하량에 따라 주면 또는 선단지지력을 택일하여 산정하였다.
- 2. O-cell 재하시험 결과로부터 경암선단, 연암 주면 및 선단, 풍화암 주면의 지지력값을 결정하였고, 풍화암 선단의 경우 자료가 부족하여 도로교시방서 기준을 적용하였다.
- 3. 본 연구에서는 NCHRP 507(2004)에 의거하여 재하시험 횟수 및 지반 변동성을 감안한 차등 저항계수를 적용하였고, 정재하시험에 가까운 O-cell 재하시험이 신뢰도 면에서 정재하시험보다는 다소 낮고 동재하시험보다는 다소 높은 것으로 평가하여 중간값의 저항계수를 적용하였다.

참고문헌

1. AASHTO. (2004). LRFD Bridge Design Specification, 3rd Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
2. NCHRP REPORT 507 (2004). Load and Resistance Factor Design(LRFD) for Deep Foundations, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board of the National Academics
3. Osterberg, J. O. The Osterberg Load Test method for Drilled Shafts and Driven Piles-the First Ten Years. *Proceedings 7th International Conference on Deep Foundations*, Vienna, Austria., June 15-17, Deep Foundation Institute, Englewood Cliffs, N.J., 1998, 1.28.1-1.28.11.