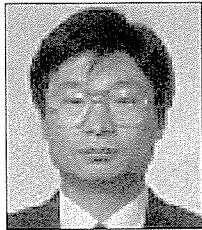
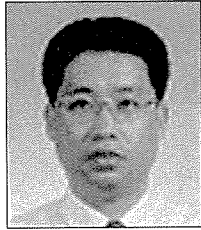




말뚝 시공오차에 대한 허용기준고찰 (말뚝의 시공오차에 따른 반력변화)



극동엔지니어링(주) 전무
토질및기초기술사
박근태



극동엔지니어링(주) 이사
토질및기초기술사
곽창진

1. 개요

말뚝의 시공오차는 수직도와 평면위치이동으로 대별할 수 있고, 말뚝의 향타 및 매입을 위한 천공작업 등의 시공 과정에서 시공오차는 불가피하게 발생된다. 수직도는 말뚝의 축이 연직방향에 대하여 기울어진 정도를 의미하고 평면위치이동은 시공말뚝의 중심이 계획 위치의 중심에서 이동한 정도를 의미한다.

타입 및 매입말뚝에서는 지중 매설물 또는 시공에 지장을 주는 자갈, 전석층 등의 존재, 크레인 리더의 연직오차 등에 따라 위치와 수직성이 변화되고 그 정도에 따라 시공오차가 발생되거나, 인접 말뚝의 근접정도 및 지층상태에 따른 지반의 측방 변형에 따른 기시공 말뚝에서의 변형 등의 시공오차가 발생할 수 있다. 이러한 시공오차는 경우에 따라서 말뚝기초의 구조물에 안정성에 영향을 줄 수 있다.

국내외의 시방 및 규정에서는 말뚝의 수직방향과 수평 방향에 대한 시공오차의 허용한도는 기술하고 있으나 허용기준에 타당성과 허용기준을 초과하였을 경우에 대한 체계적인 보강대책의 기준이 없어 설계 수행 과정에서 실시한 기초설계의 사례를 기준으로 하여 시공오차 발생 정도에 따른 말뚝 반력의 변화를 분석하고 시공오차에 대책 방안을 검토코자 한다.

2. 관련 시방기준 검토

2.1 허용 시공오차

파일시공과정에서 허용기준을 초과하면 말뚝 재설계 또는 허용 값 이내가 되도록 추가 말뚝 시공 등의 대책이 필요하고, 문헌 및 각종 시방서에서 규정하는 시공오차에 대한 허용기준은 다음과 같다.

» » 말뚝 시공오차에 대한 허용기준고찰(말뚝의 시공오차에 따른 반력변화)

표 1. 허용 시공오차 국내시방기준

구 분	시공허용오차	비 고
수 직 도	1/100 이내	
평면위치	D/4 와 100mm 중 큰 값	D : 말뚝직경

참고문헌 : 도로공사표준시방서, 2003, 건설교통부 p. 6-18
고속도로공사 전문시방서, 한국도로공사 p. 7-12

표 2. 허용 시공오차 해외시방기준

관련시방	위치이동	수직도	비고
B.S	8004	75mm	1/75
	해양구조	100mm 75mm	1/100(육상) 1/75(해상)
D.T.U No. 132	60mm(매입) 120mm(현타) 150mm(황타)	3% (Isolated pile) 2% (Group pile)	
New York City Building Code	75mm	4%	
ACI	75mm~150mm	2%~4%	

해외시방기준과 국내시방기준을 비교하면 위치이동에 대한 국내의 허용 기준은 다소 느슨하거나 평균값 정도로 적용하고 있는 것으로 판단되나, 수직도에 대한 국내의 허용기준은 비교적 엄격하게 적용한 것으로 파악된다(표 1, 2 참조).

2.2 허용기준 초과시 대책 기준

현장품질관리 항목에서는 수직도에 대한 기술은 누락되고 손상된 말뚝과 설계도서에 표시된 위치를 이탈한 말뚝에 대한 대책을 구체적인 제안 없이 포괄적인 대책으로 기술한 것으로 조사된다(표 3, 4 참조).

표 3. 허용기준 초과시 대책기준(국내시방기준)

구 분	관련 기준 내용
도로공사표준시방서 p. 6-18~19	(1) 이미 손상된 말뚝을 뽑아내고 새 것을 다시 시공한다. (2) 손상된 말뚝 옆에 제 2의 말뚝을 시공한다. (3) 말뚝을 이어내거나 기초를 확대시킨다.
고속도로전문시방서 p. 7-12~13	3.8.3 말뚝 내부의 결함이나 부적절한 박기 방법으로 인해 손상된 말뚝과 설계도서에 표시된 위치를 이탈한 말뚝에 대한 수정 방안에 대해서는 전문가기술자의 의견을 첨부하여 감독원의 확인을 받은 후 수정하여야 한다.

표 4. 허용기준 초과시 대책 기준(해외시방기준)

구 분	관련 기준 내용	조 치 내 용
New York City Building Code	계산 하중이 허용지지력을 10% 이상 초과	추가 말뚝시공 또는 하중분포시켜 110% 이하 되도록 조치

3. 시공 사례 분석

말뚝의 반력은 말뚝의 길이 및 상부하중의 규모, 지층 조건에 따라 다양하게 변화되어 일반적인 조건에서 검토하기 곤란하여 당사에서 설계한 고속도로 공사에서 적용한 교량 기초 중 허용지지력 대비 최대 반력의 비가 큰 교량기초를 사례로 시공오차에 따른 반력변화를 검토하고자 한다.

3.1 기초 말뚝설계

고속도로설계에 적용된 교량 기초 중 깊은 기초는 대부분 항타 소음 및 진동 등의 주변영향을 최소화하기 위한 매입말뚝으로 설계되었으며 이론 해석에 의한 말뚝의 허용지지력을 산출하였으며, 적용이론식은 도로교 표준시방서 및 Goodman의 지지력 공식을 사용하였으며, 기초설계에 적용된 지지력비는 그림 1과 같다.

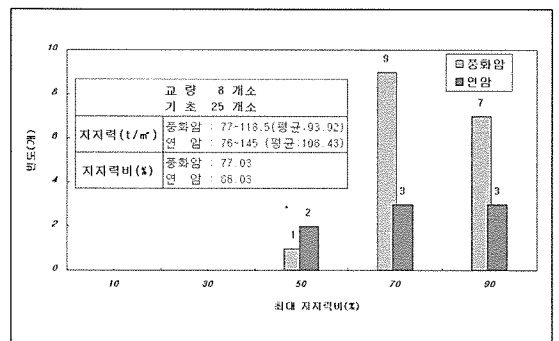


그림 1. 말뚝기초 최대 지지력비

말뚝기초의 배치에 따른 최대반력은 이론식과 경험식에 의한 계산 허용지지력의 약 75% 내외에서 결정한 것

기술기사

로 파악된다. 따라서 상대적으로 허용지지력 대비 최대 반력의 적용 비율이 높은 교량 기초에서의 허용 기준 초과시의 위치 이동과 수직도 변화에 따른 반력의 변화를

검토한다.

3.2 검토대상 기초

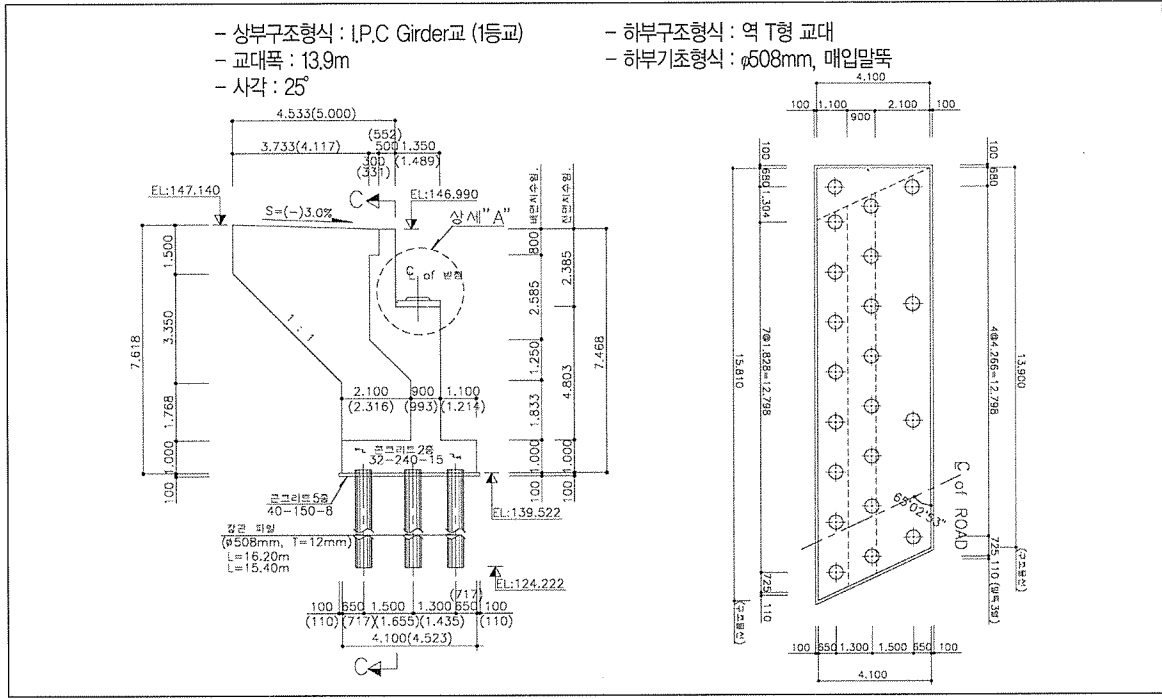


그림 2. 검토대상 기초

표 5. 지층조건 단위 : m

지반표고	지하수위	토층상태(두께)			비고
		봉적층	풍화토	풍화암	
131.9	GL(-)4.3	2.8	7.3	15.0	성토부기초설치

표 6. 말뚝지지력 계산결과 단위 : t/본

구분	말뚝허용지지력	수평허용지지력	최대연직반력	최대수평반력	비고
상시	93.4	29,225	87,231	14.75	
지진시	140.1	-	86,151	-	

표 7. 말뚝제원

외경 (mm)	두께 (mm)	부식두께 (mm)	강재 단면적 (cm ²)	부식대공제 (cm ²)	말뚝단면계수 (cm ²)	말뚝탄성계수 (kg/cm ²)	비고
508	12	2	187.0	155.2	1879.4	2100000	1/β 부근의 N값 = 20

표 8. 말뚝 작용하중

구분	편심거리	수지력	수평력	비고
활하중 재하시	1.508	90,371	21,219	단위 m 당 하중

시공 및 고정하중, 활하중, 지진시 등의 조건이 있으나 최대반력이 계산되는 조건인 활하중 재하조건으로 검토한다.

3.3 평면 시공오차 발생영향 분석

1) 평면위치 이동에 대한 검토 Case

표 9. 평면위치 이동에 대한 검토 Case 단위 : m

구 분	허용기준 이내	허용기준 2배	허용기준 4배
제 1열 위치이동	± 0.127	± 0.254	± 0.508
제 2열 위치이동	± 0.127	± 0.254	± 0.508
제 3열 위치이동	± 0.127	± 0.254	± 0.508

시방기준 : D/4와 100mm 중 큰 값 : 0.127m 적용(0.508/4 = 0.127)

2) 최대반력의 변화

표 10. 최대반력의 변화 단위 : tf

구 분		허용기준이내 (0.127m)	허용기준 2배 이동 (0.254m)	허용기준 4배 이동 (0.508m)
제 1열 이동	+	84,516	81,791	76,453
	-	89,883	92,405	96,678
제 2열 이동	+	83,997	80,811	74,806
	-	90,458	93,627	99,618
제 3열 이동	+	86,917	86,525	85,464
	-	87,477	87,665	87,898

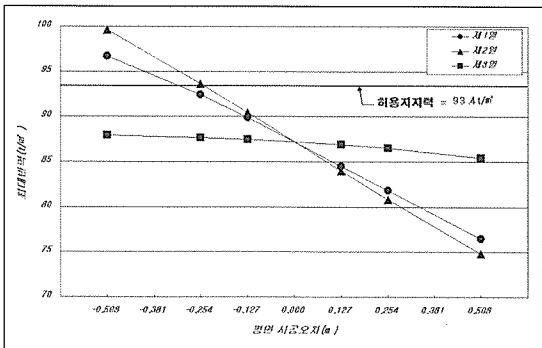


그림 3. 최대반력의 변화

최대반력은 교량 하중의 특성상 편심에 의한 하중 영향이 큰 가장 앞열의 말뚝에서 발생된다. 따라서 제 1열에서 최대

반력이 발생되고 위치이동에 따른 최대반력의 변화가 발생되며 위치이동에 대한 최대반력의 변화는 다음과 같다.

◎ 제 1 열

기초 외측으로의 시공오차 발생에 의한 평면 이동시에는 제 2열에 하중이 분담되면서 최대반력이 축소되나 기초 내측으로의 시공오차 발생시에는 최대 반력이 증가하여 위치이동 규모에 따라 계산 허용지지력을 초과하는 현상이 나타난다.

◎ 제 2 열

기초 외측으로의 이동 발생시에는 최대 반력이 발생되는 1열의 반력이 1열 이동시 보다 더 크게 축소되고, 기초 중심 쪽으로 이동시에도 1열의 최대 반력 영향이 더 크게 발생되어 시공오차의 영향이 가장 크다.

◎ 제 3 열

위치이동에 대한 영향은 발생하나 근접한 2열에서 대부분의 영향을 흡수하여 1열에서는 최대 반력의 약 2% 미만의 변화로 미미하게 나타난다.

3) 평면 시공오차에 대한 검토결과

◎ 이론식에 의한 허용지지력 93.4tf/본 에 대한 최대 설계 반력은 87,231tf/본 으로 허용지지력의 약 93% 이다. 국내 깊은 기초 설계 실정에 비해 다소 큰 반력으로 설계된 것으로 파악되나 말뚝 본체의 재질(Φ 508, $t=12\text{mm}$)을 감안하면 이론식에 의한 계산 허용 지지력은 다소 낮은 수치이다.

◎ 허용지지력을 초과하는 경우는 허용기준(D/4 이하)을 2배정도 초과하는 경우에서 나타나며 제 1열(최대반력발생)과 제 2열과의 간격이 넓어질 경우 영향이 크게 발생되며, 시공오차에 의한 평면이동이 말

기술기사

뚝의 직경(0.508m)정도의 시공오차(허용기준의 4 배)에서도 허용지지력의 약 107%(최대)로 나타난다.

◎ 말뚝이 1열 및 2열이 각각 9본, 8본씩 시공되고 동시에 모든 말뚝에서 시공오차가 발생하기는 어려울 것으로 사료되므로 국내의 허용 기준(100mm 또는 D/4 중 큰 값)을 초과하는 오차가 발생하는 경우에도 본 검토와 유사한 조건에서는 큰 영향이 발생하지는 않을 것으로 파악되었음.

3.4 수직도 변화 영향 분석

말뚝 경사도 변화에 의한 응력의 변화는 지층 조건 및 길이 등의 조건에 따라 다양하게 변화되어 정량적인 조건으로 파악이 곤란하여 현재 설계 조건으로 이에 대한 수치해석을 수행하여 개략적인 말뚝본체의 응력에 대한 변화 경향을 파악하고자 한다.

1) Case별 지층조건 및 적용 물성치

표 11 참조

2) 수치 해석

말뚝의 수직도 변화에 따른 말뚝 최대 응력 변화를 알아보기 위해 3차원 수치해석을 실시하였다. 3차원 수치해석 프로그램은 국내에서 통상적으로 널리 사용되는 3차원

유한요소해석 프로그램인 Pentagon-3D를 이용하였다 (표 12 참조).

3) 수직도 변화에 따른 말뚝 최대 응력 해석결과

표 13~14, 그림 4~5 참조

4) 수직도 변화에 따른 응력 변화 검토 결과

◎ 수치해석결과 수직도 변화에 따른 축력의 변화는 거의 발생하지 않으나 말뚝 본체의 전단력 및 모멘트는 증가하는 것으로 해석된다.

표 12. 수치해석 단계 및 모델링

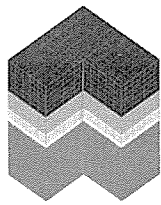
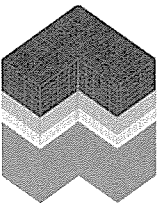
Construction_Stage1 성토 단계 - 원지반 상부에 성토 층 생성 - 성토층 하중 재하	
Construction_Stage2 기초공사 단계 - 말뚝 시공 및 상부 구조물하중재하 수직 : 87,231ton 수평 : 14,75 ton - 축력, 전단력 및 모멘트 파악	

표 11. Case별 지층조건 및 적용 물성치

지층 조건	층두께 (m)		점착력 (t/m ²)	내부마찰각 α (°)	탄성계수 E(t/m ²)
	Case 1	Case 2			
성토층	8.00	4.00	1.5	25	1,500
붕적층	4.50	2.25	0.0	30	2,000
풍화토	2.50	1.25	1.5	30	3,000
풍화암	1.00	0.50	3.0	33	20,000
연암	F.L. (-)16.0m이하	F.L. (-)8.0m이하	5.0	35	100,000
말뚝 길이	L = 16.0m	L = 8.0m			

** 말뚝 재하 하중 : 수직 87,231ton, 수평 14,75ton

** 길이 : Case 1 = 16.0m, Case 2 = 8.0m (각 토층 두께의 50% 적용)

표 13. Case 1

구 분			수 직	수직도 변화					비 고
				1%	2%	3%	4%	5%	
말뚝 (L=16.0m)	축 력	두부	72.9	72.8	72.7	72.6	72.5	72.5	
		선단	5.41	5.59	5.64	5.64	5.61	5.52	
	전단력		2.14	2.27	2.40	2.52	2.67	2.79	
	모멘트		2.85	3.03	3.20	3.36	3.56	3.73	

표 14. Case 2

구 분			수 직	수직도 변화					비 고
				1%	2%	3%	4%	5%	
말뚝 (L=8.0m)	축 력	두부	73.0	72.9	72.8	72.7	72.7	72.6	
		선단	23.0	23.4	23.5	23.5	23.4	23.1	
	전단력		1.82	1.94	2.07	2.20	2.27	2.41	
	모멘트		2.08	2.22	2.36	2.51	2.60	2.75	

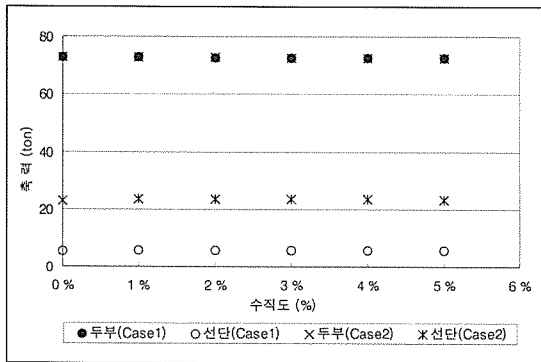


그림 4. 수직도 변화에 따른 축력 변화

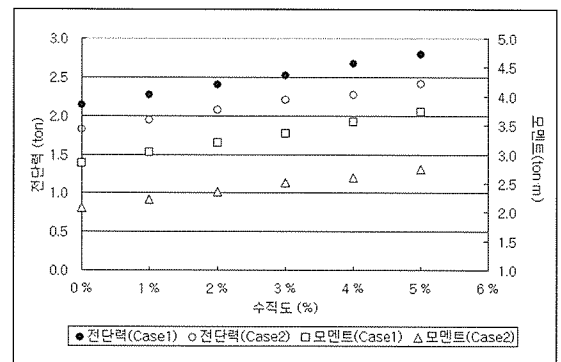


그림 5. 수직도 변화에 따른 전단력과 모멘트 변화

◎ 말뚝 길이를 8.0m와 16.0m로 구분하고 토층조건을 동일 비율로 상사시켜 계산을 실시한 결과 유사한 경향을 나타내어 말뚝 길이의 영향은 크지 않으나 모멘트의 변화는 직선적으로 증가하여 5% 경사 경우에 수직의 경우보다 약 30%~32% 증가한다.

◎ 모멘트의 증가율은 크나 본 검토 대상 지층에서는 응력의 변화가 허용 기준에 큰 영향을 주지 않는 것으로 파악되었다.

4. 결론 및 제안

사례로 적용한 말뚝은 매입 말뚝으로 현장 시공 여건에

따라 발생할 수 있는 말뚝기초의 위치이동 및 수직도를 검토 Case에 대한 말뚝 시공오차 영향을 검토한 결과는 다음과 같다.

사례분석 결과 말뚝기초의 허용지지력은 관련 지지력 공식 검토 결과 풍화암과 연암을 선단지지층으로 할 경우 76t/본 ~ 145t/본으로 나타났고, 반력과 허용지지력의 비는 평균 68% ~ 77% 정도로 적용하였음.

- 1) 검토대상 기초의 이론식에 의한 허용지지력 93.4tf/본에 대한 최대설계반력은 87.231tf/본으로 지지력 비는 93%이며, 평면 시공오차에 있어 설계하중에 대한 최대반력의 변화는 허용기준을 2배정도 초과하는

기술기사

경우에서 나타나며 제 1열과 제 2열의 간격이 넓어질 경우 영향이 큰 것으로 나타나고 좁아진 경우에는 허용지지력 이하로 계산된다.

- 2) 말뚝의 평면 시공오차가 직경(허용기준의 4배) 정도 오차 발생시 허용 지지력의 약 107%로 나타나 각 열의 말뚝 시공본수(8본)를 감안하면 1~2개소의 평면 시공오차는 기초안정성에 큰 영향을 발생시키지는 않을 것으로 판단된다.
- 3) 수직도 변화에 따른 축력의 변화는 거의 없으며 가장 큰 변화는 수평력에 의한 모멘트의 증가가 나타나는 것으로 해석되고, 말뚝길이에 대한 영향은 크지 않은 것으로 파악된다.
- 4) 검토조건과 같은 토층 및 하중조건에서는 허용기준을 약 2배정도 초과하더라도 지지력 및 응력상의 문제가 없는 것으로 해석되어 시공 오차에 대한 별도의 대책이 불필요한 것으로 판단되나 설계 사례 검토조

건 상에서의 해석 결과이므로 지층 및 말뚝배치, 시공상태 등의 조건에 따라 상이한 결과가 발생할 수 있으므로 제반조건에 대한 검토가 필요하다.

- 5) 본 검토조건이 지지력에 대한 허용지지력비가 약 93%로 높은 조건이므로 지지력비가 평균적인 75% 정도로 낮은 경우에는 허용기준을 엄격하게 적용하지 않고 시공 상태에 대한 계산을 실시하여 문제 여부를 판단하고 시공토록 하는 것이 시공성과 경제성을 가질 수 있을 것으로 사료된다.
- 6) 이론적인 허용지지력은 현장재하시험(동재하 또는 정재하) 결과와 비교토록하고, 말뚝시공과정에서 불가피하게 허용기준을 초과할 경우에는 지층 및 반력의 규모 등의 조건과 현장 시공성과 보완시공시의 상태를 시공성 및 경제성, 안정성 등을 종합적으로 고려하여적용하는 것이 적정할 것으로 판단된다.

가을기술발표회(가칭) 일정공고

(사)한국토질및기초기술사회와 (사)한국지반공학회가 공동으로 아래와 같은 일정으로 가을기술발표회(가칭)를 개최하오니, 많은 참석 바랍니다.

- 장소 : 한국시설안전공단
- 일시 : 2005년 10월 7일(금) ~ 8일(토)

회원가입 및 회비납부 안내

토기회 구성원은 토질및기초기술사로서 30만원의 입회금을 납입하고 소정의 회원명부(입회원서)를 제출함으로써 정회원 자격을 얻게 됩니다. 정회원이 되시면 당회 임원과 전문위원 피선거권과 선거권, 각종 기술관련위원 피촉기회가 주어지게 되며, 입회비를 내지 않은 상태에서는 준회원으로 호칭하고 대우합니다.

입회절차는 홈페이지를 방문하여 확인하시거나, 사무국에 전화하여 상세한 내용을 안내받으시기 바랍니다.

1. 입 회 비 : 30만원
2. 종신회비 : 130만원(입회비 납부후 추가납부시 100만원)
3. 회비납부통장 : 국민은행 515537-01-007656

예금주 : (사)한국토질및기초기술사회