

현장타설말뚝에 의한 교량기초의 설계에 관한 연구

A Study on the Design of Bridge Foundation by Cast in Place Pile

안종필¹⁾, Jong-Pil Ahn, 유덕찬²⁾, Deok-Cho, Yu, 이정옥³⁾, Jung-Ug Lee, 임재춘⁴⁾, Jae-Choun Lim

¹⁾ 조선대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Chosun University

²⁾ (주)한양 상무/공학박사, Managing Director, Hanyang Co., Ltd. / Ph.D

³⁾ (주)KLCM 상무/공학박사, Managing Director, KLCM Engineering Co., Ltd. / Ph.D

⁴⁾ 조선대학교 토목공학과 박사과정, Dept. of Civil Eng. Graduate School, Chosun University

SYNOPSIS : The spot where bottom foundation of a marine bridge is constructed is deep in depth of water and a bedrock, bearing stratum, is very deeply distributed. So, I analyzed material of soil profile and then evaluate bearing capacity and safety of settlement when a stake of site construction is designed using a projection cast in place concrete pile and a sacrifice steel cast in place pile. Also, I analyzed and researched practical affairs like a slime processing and plumbing maintenance in supervision of execution.

주요어(Key words) : Projection, Cast in Place Pile, Bearing Capacity, Settlement

1. 서론

최근 대규모 교량과 연약지반, 도심지와 인구밀집지역의 구조물 시공으로 인한 소음과 진동 문제 및 타입말뚝의 시공이 어려운 호박돌과 자갈 등이 혼재되어 있는 지반이나 풍화토 및 기반암까지 천공장비를 이용하여 지반을 굴착한 다음에 내부에 콘크리트 및 철근 등을 삽입하여 말뚝을 형성하는 기초공법으로서 원하는 지지력을 확보할 수 있는 가장 확실한 방법 중의 하나라고 할 수 있다.

본 연구에서는 국내에서 건설되는 해상교량의 가설위치는 수심이나 하부지반의 조건보다는 도로의 선형이나 교량의 연장을 고려하여 경제성에 의하여 결정되며, 가능한 교량의 연장은 짧게 계획된다. 교량의 하부기초가 가설되는 위치는 수심이 깊고 기초의 지지층인 기반암도 상당히 깊게 분포하는 경우가 많다.

따라서 경제성 분석에 의한 검토 및 현장타설 말뚝기초에서 희생강관을 이용한 경우와 돌출형의 경우에 대하여 각 지반이나 토층별로 상이함 및 각종의 지반정수와의 상호관계에 의하여 지지력과 침하량을 연구하였으며, 시공관리에서는 희생강관을 사용할 시 수직도의 유지 및 정위치의 시공방안과 슬라임의 처리 등의 시공부분을 발행된 문헌을 통하여 고찰하며, 실무적인 내용은 인근현장에서 수집한 설계자료를 토대로 해서 분석하여 연구하였다.

2. 현장타설 말뚝기초의 설계조건

2.1 현장타설 말뚝기초의 지지력 결정법

케이싱이 있는 현장타설말뚝은 일반 현장타설말뚝을 시공할 때에 사용하는 공법을 적용한

다. 케이싱을 영구부재로 사용하는 현장타설말뚝의 지지력은 일반 깊은기초의 지지력을 산정하는 방법과 동일하게 구해질 수 있다. 또한 케이싱이 있는 현장타설말뚝에서 강재와 지반의 경계조건의 작용은 강재의 거칠기에 따라 다르다. 이를 토대로 본 연구에서는 도로교표준시방서와 구조물기초설계기준 및 도로교설계기준 등의 공식을 적용하였다.

도로교표준시방서에서는 일본도로교시방서에서 제시한 식을 사용하여 식(1)을 이용하여 허용지지력을 산정하였다.

$$R_U = q_d A + U \sum l_i f_i \quad (1)$$

표 1. 말뚝의 극한선단지지력

지반종류	말뚝 선단의 극한지지력
모래 자갈층 및 모래층(N≥30)	300
단단한 점성토층	3qu

표 2. 말뚝의 주면마찰력

지반종류	말뚝 주면마찰력(t/m ²)
사질토	0.5N(≤20)
점성토	C 또는 N(≤15)

구조물기초 설계기준에서는 식(2)와 같이 표준관입시험에 의한 지지력 산정방법과 식(3)과 식(4)로부터 정적관입시험에 의한 극한지지력을 산정하였다.

$$Q_U = mN_b A_b + nN A_s(t) \quad (2)$$

$$\text{선단지지력} : q_p = \frac{1}{2} q_c \quad (3)$$

$$\text{주면마찰력} : f_s = f_c \quad (4)$$

도로교설계기준에서는 점성토와 사질토 및 암반으로 분류하여 극한지지력을 산정하였다. 점성토는 식(5)과 식(6)으로부터 극한지지력을 산정하였다.

$$\text{선단지지력(점성토)} : Q_b = q_b \cdot A_b = N_c \cdot C_{Ub} \cdot A_b \quad (5)$$

$$\text{주면마찰력(점성토)} : Q_s = \pi D \sum_{i=1}^N a_i \cdot f_{s_i} \cdot \Delta Z_i \quad (6)$$

표 3. 점성토의 a_i 와 f_{s_i} 의 추천값

위 치	a_i	하중전이의 한계값 f_{s_i} (t/m ²)
지표면으로부터 1.5m 깊이까지	0	-
말뚝선단으로부터 1D 이내	0	-
그 외의 말뚝부분	0.55	26.9

사질토는 식(7)과 식(8)로부터 극한지지력을 산정하였다.

$$\text{선단지지력(사질토)} : Q_b = q_b \cdot A_b \quad (7)$$

표 4. 사질토의 q_b 의 추천값

구분	q_b 값(t/m ²)	(Tsf)
0~75	5.9N	1.2N
75이상	440	90

$$\text{주면마찰력(사질토)} : Q_s = \pi D \sum_{i=1}^n (r_i \cdot Z_i) \beta_i \cdot \Delta Z_I \quad (8)$$

암반은 식(9)과 식(10)로부터 극한지지력을 산정하였다.

$$\text{선단지지력(암반)} : Q_{br} = N_{MS} \cdot C_O \cdot A_b \quad (9)$$

$$\text{주면마찰력(암반)} : Q_{SR} = \pi B_r D_r (0.144 qsr) \quad (10)$$

2.2 현장타설 말뚝기초의 침하량 결정법

깊은기초(Deep Foundation) 침하량 산정은 토층단면이 비등방 비균질로 이루어진 지반으로서 하중전달과정이 매우 복잡할 뿐 아니라 하중의 크기에 따라 변화한다. 군말뚝 시공에 따른 깊은기초 상호간의 작용에 따라서 정확한 해석이란 어렵고 복잡해진다. 또한 침하량 산정에 대한 많은 연구가 있어 왔으며 그중에서도 탄성론에 근거한 Poulos 와 Davis에 의한 해석법이 현재에도 많이 사용되어지고 있다.

깊은기초의 탄성침하량은 3가지의 요인에 따른 탄성침하량의 합으로서 다음과 같이 식 11과 주어진다

$$\delta_{te} = \delta_f + \delta_{tt} + \delta_{ts} \quad (11)$$

깊은기초의 전탄성침하량(δ_{te})은 일반적으로 전 침하량의 80%이상을 차지하겠지만, 마찰말뚝의 선단부 지반이 압축성이 큰 경우에는 얕은기초에서의 압밀침하량과 2차압밀침하량 산정 방법과 유사하게 압밀 및 2차압밀침하량을 산정하여야 한다.

2.3 현장타설 말뚝기초의 경제성 분석법

건설공사에서 VE는 “최저의 생애주기비용으로 최상의 가치를 얻기 위한 목적으로 수행되는 건설사업의 기능분석을 통한 대안창출의 노력이며, 여러 전문분야의 협력을 통하여 수행되는 체계적인 프로세스”로 정의되고 있다. 표 5는 가치척도의 상관관계를 나타내었다.

표 5. 가치척도의 상관관계

가치척도	성능(Performance)	가치(Value)	생애주기비용(C=LCC)
V=F/C	과업대상의 성능분석을 통한 대	필요한 성능에 대한 비용의	초기투자비용 뿐만 아니라 시
V : 가치	체안을 도출하며, 원가절감의	상대적 비율로서 가치지수	설물의 생애주기(LCC) 동안의
F : 필요한 성능	사고방식에서 벗어나 성능중심	(P/C)를 높이는 것이 바람직	총비용을 감안하여 산정함
C : 생애주기비용	의 사고를 지님	한 설계방향임	

총 생애주기비용(LCC ; Life Cycle Cost)이란 공사의 계획부터 설계·시공·유지관리·해체 및 폐기처리의 전 단계에서 발생하는 비용의 총합을 말한다. LCC 분석이란 시설물의 설계·시

공·유지관리·해체 및 폐기단계에 이르는 전체 공용년수 동안에 발생하는 총 비용을 산출해 내고, 이에 근거하여 경제성을 평가하는 기법이다.

2.4 현장타설 말뚝기초의 시공관리법

일반적인 현장타설말뚝과 케이싱이 있는 현장타설말뚝에 대한 비교는 각 공법의 장단점을 표 6과 같이 비교하였다.

표 6. 일반 현장타설말뚝과 희생강관을 이용한 현장타설말뚝의 비교

구분	희생강관을 이용한 현장타설말뚝	일반적인 현장타설말뚝
장점	강관삽입 후 인발하지 않는데에 따른 건설비용 증감 공벽붕괴 방지를 위한 벤토나이트 불필요	신뢰성이 크다 깊은 깊이의 굴착이 가능하다.
단점	강관부식으로 콘크리트와 함께 강도저하 기존 사례가 적음 케이싱 단가가 비싸다.	콘크리트 타설량의 증가 공벽붕괴로 인한 necking현상 우려 벤토나이트용액 사용으로 인한 해양오염우려

희생강관을 이용한 현장타설말뚝의 주요 시공순서도는 그림 1과 같이 버림콘크리트의 타설, 희생강관의 근입 및 굴착, 슬라임처리 및 철근망 근입, 콘크리트 타설

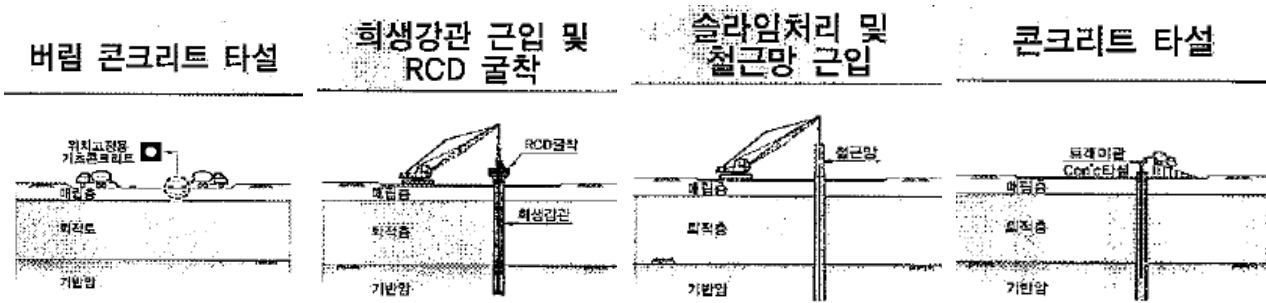


그림 1. 희생강관을 이용한 현장타설말뚝

돌출형 현장타설말뚝의 특징은 가이드 프레임(Jig Jacket)의 설치한 다음 일반 작업선에서 시공하므로써 해상조건의 영향을 최소화할 수 있다. 주요 시공순서도는 그림 2와 같다.

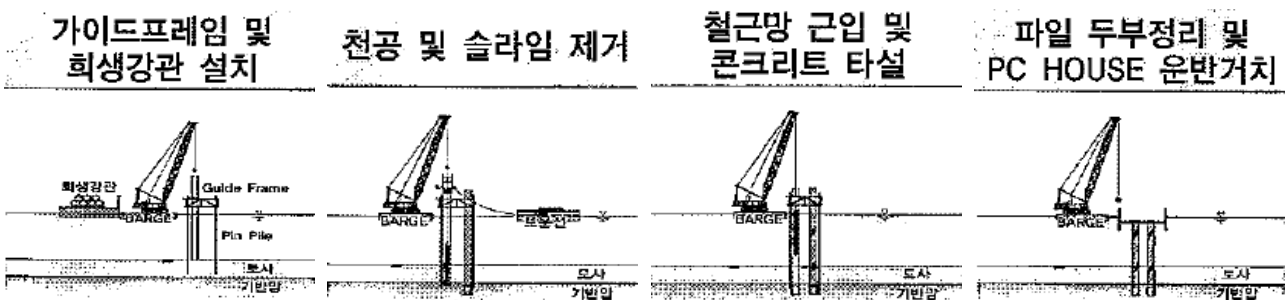


그림 2. 일반적인 돌출형 현장타설말뚝

3. 사례분석에 의한 대구경 현장타설 말뚝기초

3.1 지반정수의 결정

본 조사지역은 충청도와 전라도를 연결하는 관문교량으로서, 상부는 구조적인 안정성의 확보와 유지

관리의 최소화 및 관광자원의 극대화를 고려하였으며, 지질조건은 기저 역암의 분포와 엽리의 방향성에 대한 분석결과 향사구조의 습곡으로 판단된다.

본 조사구역에서의 SS 및 SH의 물리적 특성을 구하기 위해서 표 7과 같이 실내토질시험을 실시하였으며, 그 결과 단위중량은 17.7~21kn/m³, 점착력은 0~34kPa, 액성한계는 28.4~74.5%, 점착력은 0~34kPa, 내부마찰각은 0~35°, 변형계수는 4.5~1200MPa, 포아송비는 0.28~0.38을 나타내었다.

표 7. 토사 및 풍화암의 설계지반정수의 분석값

구 분	SS	SH	분석값
단위중량(kn/m ³)	18~21	17.7~21	17.7~21
점착력(kPa)	0~30	0~34	0~34
함수비(%)	14.6~85.4	5.1~53.5	5.1~85.4
액성한계(%)	28.4~74.5	33.6~70.2	28.4~74.5
내부마찰각(°)	22~31	0~35	0~35
변형계수(MPa)	4.5~310	5~1200	4.5~1200
포아송비	0.30~0.38	0.28~0.35	0.28~0.38

기반암의 공학적 특성을 결정하기위하여 표 8과 같이 실내암석시험을 실시하였으며, 그 결과 단위중량은 23~26kn/m³, 점착력은 0.17~1940kPa, 내부마찰각은 33~42°, 변형계수는 13.2~6,960MPa, 포아송비는 0.20~0.27, 일축압축강도는 23~111.9MPa의 결과값을 나타냈다.

표 8. 기반암의 실내암석시험의 분석값

구 분	SS	SH	분석값
단위중량(kn/m ³)	23~25	24~26	23~26
점착력(KPa)	118~1,940	0.17~0.25	0.17~1940
내부마찰각(°)	33~42	35~40	33~42
변형계수(MPa)	1,210~6,960	13.2~100	13.2~6,960
포아송비	0.23~0.27	0.20~0.25	0.20~0.27
일축압축(MPa)	26.3~111.9	23~100	23~111.9

3.2 VE/LCC 기법을 이용한 기초형식의 결정

표 9과 같이 SS와 SH의 지반조건·환경조건·시공조건 및 경제성의 분석결과 성능점수/상대LCC/가치점수에서 현장타설말뚝이 우수한 것으로 분석되었다.

표 9. VE/LCC 분석결과에 대한 비교

구 분	강관말뚝	현장타설말뚝	우물통+ 현장타설말뚝
VE/LCC (SH)	기능: 394	기능: 467	기능: 281
	비용: 233	비용: 200	비용: 242
	가치: 1.7	가치: 4.7	가치: 1.2
VE/LCC (SS)	기능: 90.0	기능: 93.7	기능: 90.4
	비용: 1.00	비용: 0.96	비용: 1.15
	가치: 90.0	가치: 97.6	가치: 78.6

3.3 지지력 및 침하량의 결정

표 12와 표 14과 같이 SH와 SS의 돌출형 현장타설말뚝과 희생강관을 이용한 현장타설말뚝의 지지

력 분석결과 돌출형 현장타설말뚝에서의 적용지지력이 SH는 26,338kN~29,768kN, SS는 28.86kN~31.31kN으로 산정되었으며, 희생강관을 이용한 현장타설말뚝에서는 적용지지력이 SH는 27,949kN~30,760kN SS는 11.19kN~28.86kN으로 산정되어 설계하중인 7.46kN~22,760kN에 만족하여 안정된 것으로 분석되었으며, 표 13와 표 15의 침하량의 산정에서는 돌출형 현장타설말뚝의 적용침하량이 SH는 9.85mm~16.27mm, SS는 4.2mm~8.73mm로 산정되며, 희생강관을 이용한 현장타설말뚝 적용침하량이 SH는 6.32mm~6.91mm, SS는 3.50mm~4.22mm로 산정되어 허용침하량 25mm에 만족하여 안정된 것으로 분석되었다.

표 12. SH의 허용지지력 판정

교량명	기초 종류	직경 (mm)	단말뚝의 허용지지력(KN/ea)				설계 하중	군말뚝의 안정성 평가(KN)			판정
			구조물	도로 공사	재료허용응력	설계 적용		균효율	저면 저항력	전체 하중	
주경간	다주식	Ø2500	32,241	27,641	35,111	27,641	14,335	0.78	776,159	111,874	적합
	다주식	Ø2500	40,438	29,768		29,768	20,751	0.64	1371,709	241,176	적합
접속b교	다주식	Ø2500	36,979	26,589		26,589	22,760	0.75	358,938	44,658	적합
	다주식	Ø2500	37,318	26,338		26,338	22,760	0.75	355,563	0.75	적합
1-A	단일식	Ø2500	32,621	27,949		27,949	8,376	0.92	-	-	적합
	단일식	Ø2500	32,621	27,949		27,949	8,376	-	-	-	적합
1-B	단일식	Ø2500	30,760	30,760		30,760	8,376	-	-	-	적합
	단일식	Ø2500	30,760	29,460		29,460	8,376	-	-	-	적합

표 13. SH의 침하량 산정

교량명	위치	말뚝길이 (m)	단말뚝의 침하량(mm)				군말뚝 침하량	허용기준 (mm)	판정
			반경험적	Pells&Turner	도로교	적용			
주경간부	MP1	19.2	9.85	1.48	0.88	9.85	2.01	25.0	적합
	MP2	39.3	15.26	2.69	2.61	15.26	3.84	25.0	적합
접속b교	BP1	45.7	16.27	2.95	6.10	16.27	1.69	25.0	적합
	BP2	45.5	15.11	2.95	6.17	15.11	1.69	25.0	적합
1-A	R-P1	20.8	6.53	1.13	0.81	6.53	0.75	25.0	적합
	RAP1	30.3	6.32	1.13	1.03	6.32	-	25.0	적합
1-B	RBP1	34.0	6.91	1.13	0.69	6.91	-	25.0	적합
	RBP2	25.6	6.52	1.13	0.42	6.52	-	25.0	적합

표 14. SS의 허용지지력 판정

교량명	교대/교가	재료지지력 (kN/ea)	구조물기초 (kN/ea)	CFEM (kN/ea)	Goodman (kN/ea)	허용지지력 (kN/ea)	최대말뚝 (kN/ea)	판정
주경간부	MP1	31.31	47.69	35.35	66.75	31.31	14.21	적합
접속b교	BP1	28.86	62.81	45.93	88.87	28.86	21.16	적합
	BP2	28.86	62.81	45.93	88.87	28.86	13.50	적합
1-A	AP8	11.19	24.23	17.67	36.56	11.19	10.23	적합
	AP9	28.86	67.32	49.09	10.15	28.86	13.71	적합
1-B	RA-P3	11.19	24.23	17.67	36.56	11.19	7.46	적합

표 15. SS의 침하량 판정

교량명	교대/교각	발생침하량(mm)	허용침하량(mm)	판정
주경간부	MP1	5.75	25	적합
접속b교	BP1	8.73	25	적합
	BP2	4.21	25	적합
1-A	AP8	4.22	25	적합
	AP9	4.01	25	적합
1-B	RA-P3	3.50	25	적합

3.4 현장타설말뚝의 공종별 시공방안

3.4.1 현장타설말뚝의 공벽붕괴 방지의 시공방안

희생강관 미적용시의 예상문제점으로는 해상 및 육상구간은 상부 연약점성토가 분포하여 공벽유지가 곤란할 것으로 예상되며, 시공방안으로는 희생강관을 풍화암 1m까지 근입하여 현장타설말뚝의 품질향상을 기대한다.

3.4.2 희생강관의 근입방법

전석 및 자갈층이 분포하지 않은 곳은 그림 3과 같이 바이브로 해머에 의한 희생강관을 적용하며, 바이브로 해머에 의한 강관근입이 불가능한 경우 그림 4와 같이 오실레이터에 의하여 희생강관의 근입을 한다.

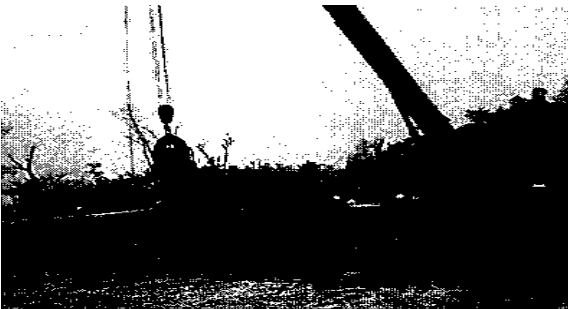


그림 3. 바이브로 해머에 의한 희생강관 근입



그림 4. 오실레이터에 의한 희생강관 근입

3.4.3 잔존 슬라임의 처리방안

굴착후 부유토사 등의 슬라임이 존재시 예상 문제점은 콘크리트의 단면성능 저하 및 과대침하의 발생으로 구조본체에 치명적인 결함을 초래 또한 대구경인 경우 에어 리프트 방법만으로 슬라임 제거의 어려움이 발생되며, 설계 및 시공 적용시 잔존 슬라임의 제거는 RCD 공회전에 의한 흡입제거 방법과 석션펌프 방식을 병용하여 슬라임 배출수 탁도 확인 및 콘크리트 타설전 CCTV를 통하여 제거상태를 확인한다.

3.4.4 철근망 부상의 방지대책

콘크리트를 타설시 철근망이 부상할 우려가 예상되면 철근망의 하부에 철판을 부착하여 철근망의 부상방지를 한다.

4. 결론

본 연구에서는 지반물성치 및 사례분석을 이용하여 희생강관 및 돌출형 현장타설말뚝의 지지력 및 침하량 산정결과와 시공관리에 필요한 문헌자료를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 설계 및 시공시 공벽의 붕괴방지 및 슬라임 처리대책 방안으로는 희생강관을 풍화암 1m까지 근입하며, 콘크리트 타설전에 CCTV를 통하여 제거상태를 확인하여 현장타설말뚝의 결함이 최소화되고, 지지력이 증대된 것을 알 수 있었다.
2. VE/LCC의 검토결과 현장타설말뚝에 의한 가치점수가 SS는 4.7, SH는 97.6, 강관말뚝에서는 SS는 90, SH는 1.7, 우물통기초에서는 SS는 78.6, SH는 1.2로 나타나 우물통기초나 말뚝기초에 비해 시공성과 경제성 및 환경성이 우수한 것으로 분석되었다.
3. 돌출형 현장타설말뚝에서 지지력의 적용값은 26,338kN~31.31kN 이며, 희생강관을 이용한 현장타설말뚝의 지지력은 11.19kN~30,760kN로 분석되어 돌출형과 희생강관을 이용한 현장타설말뚝에서는 지지력이 큰 차이를 보이지 않으며, 침하량에서는 돌출형은 4.2mm~16.27mm, 희생강관은 3.50mm~6.91mm로 산출되어 허용침하량 25mm에 비하여 안정된 것을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 서보국·손창희·최영수·김명학(2005), “과형희생 강관을 사용한 현장타설 말뚝의 주변마찰응력 산정에 관한 연구”, **대한토목학회**, 2005 학술발표회 논문집, pp. 4253~4256.
2. 조성민·전병섭·정일환·최고일(2006), “재하시험을 활용한 인천대교 국고구간 현장타설말뚝의 설계와 시공”, **한국지반공학학회**, 2006 가을 학술발표회 논문집, pp. 562~573.
3. AASHTO(1998, 2003), LRFD Bridge Design Specifications : 2nd Edition(Intern version 2003), AASHTO, Washington D.C.
4. AASHTO(2004), LRFD Bridge Design Specifications : 3rd Edition, AASHTO, Washington D.C.