

장기침하를 고려한 고성토 암버력 동다짐 지반의 설계사례 A Case Study Of Dynamic Compacted Rock Embankment Design Considering Long Term Behavior

배경태¹⁾, Kyung-Tae Bae, 안상익²⁾, Sang-Yik An, 박용만³⁾, Yong-Man Park, 김강규⁴⁾, Kang-Kyu Kim, 김형석⁵⁾, Hyung-Suk Kim, 이우진⁶⁾, Woo-Jin Lee

- 1) (주)대우건설 기술연구원 전임연구원, Associate Researcher, Institute of Construction Technology, DAEWOO Engineering & Construction Co. Ltd.
- 2) (주)대우건설 부장, General Manager, DAEWOO Engineering & Construction Co. Ltd.
- 3) 한국전력 경인건설처 처장, General Manager, Kyungin Transmission & Distribution Construction Office, Korea Electric Power Corporation
- 4) 한국전력 경인건설처 부장, General Manager, Kyungin Transmission & Distribution Construction Office, Korea Electric Power Corporation
- 5) 한국전력 경인건설처 차장, Senior Manager, Kyungin Transmission & Distribution Construction Office, Korea Electric Power Corporation
- 6) 고려대학교 건축·사회환경공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engineering, KOREA Univ.

SYNOPSIS : In order to control differential settlement and to secure the safety of super structure on a high rock embankment the designed static compaction is changed with dynamic compaction and piled raft method. The parameters for dynamic compaction design are obtained from a pilot test. In addition, numerical analyses are also carried out to figure out the length and quantity of piled raft that can restraint the differential settlement within allowance range.

Keywords : High Rock Embankment, Dynamic Compaction, Piled Raft, Pilot Test, Numerical Analysis

1. 서론

국내 ○○변전소 현장의 기초공법은 부지 내 깎기부에서 발생하는 암버력을 최대 63m 롤러 층다짐 성토하여 쌓기부를 형성하고 형성된 성토층에 변전기기를 시공하기 위해 선천공후 강관말뚝 및 고강도 콘크리트말뚝(PHC pile)을 일종의 매입말뚝 공법을 적용하여 시공토록 계획되어 있다(그림 1.1). 그러나 이 같은 기초공법은 시공방법의 효율성 측면과 기초공사의 경제성 측면에서 보다 심도 있는 적정성 검토가 요구되는 상황이며 더욱이 변전기기의 허용부등침하량(5mm)이 매우 엄격하여 과도한 침하발생을 억제할 수 있는 기초공법이 요구되고 있다. 따라서 시공여건을 고려한 고성토(高盛土) 암버력 지반의 부등침하량을 허용범위 이내로 억제하고 변전기기의 안정성을 확보하기 위하여 기존 롤러다짐에 의한 암성토를 성토 단계별 동다짐(dynamic compaction, 그림 1.2) 공법으로 변경하고 장기 creep 침하까지 고려하여 변전기기 기초공법을 말뚝지지 전면기초(piled raft)로 설계 변경하였다.

이에 본 연구에서는 시험 동다짐(pilot test)을 수행하여 동다짐 중추 무게, 낙하고, 타격횟수 및 다짐 간격 등을 산정하여 실 시공에 적용하였으며 동다짐 성토지반의 장기 변형(creep) 예측을 위해 자중 증

가율을 고려한 수치해석을 실시하여 변전기기의 부등침하량을 허용범위 이내로 억제 할 수 있는 piled raft의 말뚝의 길이와 수량을 산정하였다.



그림 1.1. 변전소 조감도



그림 1.2. 동다짐 시공 전경

2. 현 황

당 현장 부지는 산속 계곡부에 계획되어 있어 마을 등의 주요 지장물이 없으며, 지질조사(건화, 2008) 결과 지층조건은 표 2.1과 같다. 변전기기는 대상 부지 암반의 최적 절/성토 토공량을 기준으로 절취 암 버력을 최대 63m까지 성토다짐한 상부로 계획되어 있으며, 변전기기 종류별 당초 기초설계 현황은 표 2.2와 같다.

표 2.1. 지층조건

구 분	지층경계 심도
토 사	0.0m ~ 3.0m
풍 화 암	3.0m ~ 8.5m
연 암	8.5m 이상

표 2.2. 변전기기 종류별 당초 기초설계 현황

구 분	765kV M.Tr기초		800kV GIS기초		362kV GIS기초	345kV Sh.R기초		765kV 송전선로인출 POST기초	345kV 송전선로인출 POST기초	OIL PIT
개 소	2 BANK		2 BAY		6 BAY	2 개소		3 기	5 기	2 개소
말뚝 종류	#1 강관	#2 강관	#1 강관	#2 PHC	PHC	#1 강관	#2 PHC	#1:강관 #2,#3:PHC	PHC	#1:강관 #2:PHC
구조물 하중	1,186.4 ton	1,186.4 ton	6447.1 ton	6,510.3 ton	1,018.1 ton	437.0 ton	437.0 ton	모멘트 지배	모멘트 지배	-
말뚝 분당반력	24.5 ton	42.4 ton	29.5 ton	68.8 ton	39.2 ton	36.4 ton	36.4 ton	-	-	-

3. 설계변경

3.1 기존설계 검토

변전기기의 당초 기초설계는 「롤러 층다짐 성토 + 대심도 매입 말뚝기초」 공법으로 제시되었다. 본 공법은 암버력과 토사를 분리하여 60cm 층으로 포설하고 10ton 진동롤러로 다짐하는 것으로 계획되었는데 당 현장에 적용 시 다짐특성 및 시공품질의 저하에 기인한 장기간에 걸친 creep 침하 발생이 매우


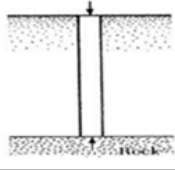

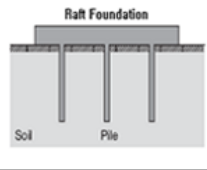
큰 것으로 검토되었다. 또한, 이러한 creep 변형이 유발되는 조건에서 선단지지 말뚝으로 설계된 말뚝기초에는 당초 설계에서는 간과된 부주면 마찰력(downdrag force)의 발생 가능성이 매우 높은 것으로 검토되었으며 이로 인해 말뚝의 설계하중이 감소되거나 말뚝 시공물량이 증가되어야 하는 문제점이 도출되었다(한국지반공학회, 2008).

한편, 최대 63m에 이르는 대심도 암버력 성토구간에 선굴착 매입말뚝공법을 적용할 경우 현실적/실무적으로 적용 가능한 시공 장비의 성능한계, 시공 실적과 경험 부족 및 과도한 시공비와 공사기간이 소요되는 비경제적 기초공법인 것으로 검토되었다. 또한 시공 심도(말뚝길이)와 말뚝직경과의 비인 세장비 증가로 인하여 설계 가능 한 말뚝허용 하중이 급격히 저감되고 이는 과도한 시공물량으로 이어져 비경제적 시공법인 것으로 판단되었다. 이상과 같이 기존 설계의 층 다짐 후 매입말뚝 시공은 기초의 안전성, 시공성 및 경제성 측면 등에서 개선을 필요로 하였으며 보다 합리적 기초공법 방안 검토가 요구되었다.

3.2 설계 대안

앞서 검토된 문제점을 개선하고 보다 합리적인 설계/시공방법으로서 동다짐 공법이 검토되었다(대우건설, 2008). 본 공법은 당초의 암버력/토사 분리 성토다짐 대신 혼합성토를 시행하여 보다 양질의 다짐 품질을 확보할 수 있으며, 기존 동다짐 실적을 참고할 때 다짐효과 및 영향을 고려한 적정 층 두께 선정, 다짐 추의 무게와 낙하고 결정 및 다짐횟수 결정 등의 설계를 시행할 경우 층 구분 없이 시행한 기존 실적에서 보다 월등히 양호한 다짐성능이 예상된다. 또한, 성토 다짐관리 과정에서 확보되는 다짐정도의 정량적 성과(하중-침하거동, 층별 다짐도 등)에 따라서는 깊은 기초인 말뚝기초 시공 대신 얇은 기초형식인 직접기초로 설계/시공이 가능할 수 있다고 기대된다.

표 3.1. 기존설계와 변경설계의 비교

구분	기존 설계		변경 설계	
	부지지지 다짐공법	변전기기 기초공법	부지지지 다짐공법	변전기기 기초공법
공법				
	롤러다짐 (Roller Compaction)	선단지지 말뚝기초 (Pile Foundation)	동다짐 (Dynamic Compaction)	말뚝전면기초 (Piled Raft Foundation)
특징	<ul style="list-style-type: none"> · 동다짐에 비해 상대적으로 지반개량효과 미흡 · 공사비 저렴 	<ul style="list-style-type: none"> · 암버력 고성토(60m) 구간 장대말뚝 시공 시 횡방향력 취약 및 말뚝이음부, 좌굴 등의 문제 · 암버력 천공, 장대말뚝 시공성 문제 및 이에 따른 공기증가 · 암버력 천공 및 말뚝재료증가 등 비용요소 발생 	<ul style="list-style-type: none"> · 단시간 내 개량효과가 가장 우수한 지반개량공법 · 층별 롤러다짐에 비해 공기 단축가능 · 롤러다짐에 비해 동다짐이 고가이나 말뚝전면기초와의 조합에 의한 비용절감으로 전체적으로는 경제적임 	<ul style="list-style-type: none"> · 전면기초와 말뚝기초가 동시에 하중을 분담하므로 침하 안정성에 우수 · 선단지지기 아니므로 고성토 구간의 시공성에 유리 · 동다짐에 의한 물성을 고려한 최적의 말뚝배치를 적용하여 선단지지 말뚝기초 대비 60~72% 비용절감 가능

그러나, 다짐성능에 따라 직접기초만으로는 장기적인 creep 변형이나 허용부등침하량을 충족시키지 못할 것으로 평가되는 경우에는 당초 설계에서 제시된 대심도 장대 말뚝기초 대신 층별 동다짐에 의해 매우 견고하게 다져져 충분한 지반변형계수가 확보된 다짐 층 내부에 시공 본수와 길이가 감소된 말뚝공법을 보완/시공하여 지반지지력 증가와 침하량을 억제할 수 있는 말뚝지지 전면기초(piled raft)를 설계함으로써 당초설계보다 시공성과 경제성에서 유리한 공법으로 유도할 수 있다고 판단된다(표 3.1 참조).

4. 동다짐 설계

예상 개랑심도를 7m로 가정(한국지반공학회, 2008)하여 당 현장의 최대성토고가 63m이므로 동다짐을 층당 7m씩 총 9층으로 단계별 성토하는 것으로 계획하였다. 동다짐 시공면적은 최상부 다짐면적이 57,668m² 이므로 총 다짐면적은 계곡부 형태의 당 현장의 상황을 고려하면 259,506m² (평균다짐면적 (57,668m²/2) × 9층)가 된다. 중추 무게는 국내 수급여건을 고려하여 16ton으로 하였으며, 타격에너지를 고려하여 3 series(단계)로 중추 낙하높이와 다짐간격 및 타격횟수를 설계하였다.

4.1 예비 설계

(1) 단위체적당 타격에너지(E_v)산정

동다짐 전/후 N치가 30에서 40으로 약 10증가된 시험시공 사례결과(대우건설, 1999)를 활용하여 동다짐에 의한 증가 N치를 10으로 가정한 후 표 4.1의 쇄석 및 사력의 단위체적당 타격에너지 범위 20~ 40 t·m/m³와 그림 4.1에서 조립토의 증가 N치가 10에 해당하는 단위체적당 타격에너지(E_v) 약 40 t·m/m³를 참조하여 E_v=40 t·m/m³으로 가정하였다.

표 4.1. 지반종류에 따른 타격에너지와 타격단계(김명모 등, 2004)

지반 종류	단위면적당타격에너지 (E _A , t·m/m ²)	단위체적당타격에너지 (E _v , t·m/m ³)	타격 단계수
쇄석, 사력	200 ~ 400	20 ~ 40	2 ~ 3
사질토	100 ~ 300	20 ~ 40	2 ~ 3
폐기물	200 ~ 460	80	2 ~ 3
점성토	400 ~ 500	50 ~ 60	3 ~ 8
유기질토	300 ~ 500	50 ~ 60	3 ~ 5

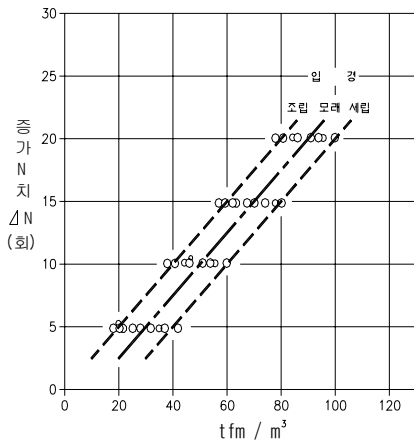


그림 4.1. 증가 N치와 E_v와의 관계(한국지반공학회, 2005)

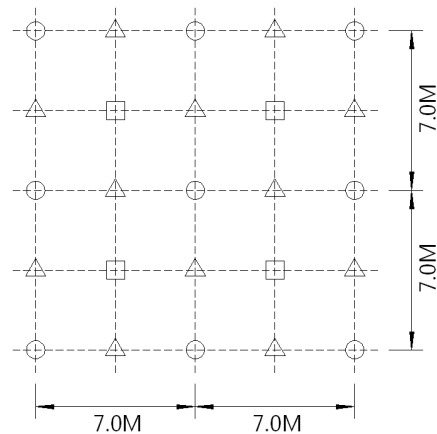


그림 4.2. 타격 위치도

(2) 한 타격점에 대한 타격횟수 산정(FHWA, 1995 ; 김명모 등, 2004)

$$E_{vn} = \frac{E_v}{n} = \frac{40}{3} = 13.3$$

$$B_n = \frac{E_{vn} L_n^2 D}{WH} = \frac{13.3 \times 7^2 \times 7}{16 \times 20} = 14.3 \approx 15 (\text{타/타격점}) (t \cdot m/m^3) : \text{series 1} \sim 2$$

$$B_n = \frac{E_{vn} L_n^2 D}{WH} = \frac{13.3 \times 4.95^2 \times 7}{16 \times 15} = 9.5 \approx 10 (\text{타/타격점}) (t \cdot m/m^3) : \text{series 3}$$

- 여기서, B_n : n 단계에서 한 타격점에 대한 타격횟수(타/타격점)
 E_v : $1m^3$ 당 필요한 타격에너지($t \cdot m/m^3$), $40t \cdot m/m^3$
 L_n : n 단계의 정방형 배치 시 타격점간 간격(m), 7m
 D : 개량심도(m), 7m
 W : 중추무게(ton), 16ton
 H : 중추낙하고(m), 20m(series 1~2), 15m(series 3)
 n : 동다짐단계, 3 : series 1~3 만 고려

(3) 단위면적당 타격에너지 적정성 평가

E_A (단위면적당 타격에너지)산정

$$E_A = E_v \cdot D = 40.0t \cdot m/m^3 \cdot 7m = 280 t \cdot m/m^2$$

E_A 적정성 평가(전성기, 1998)

$$\sum E_A = \frac{WHB_n}{L_n^2} = 294 > 280t \cdot m/m^2 \quad \text{O.K.}$$

(4) 종합

당 현장 상황을 고려하여 그림 4.2와 같이 3 series(단계)로 동다짐을 시공하는 것으로 계획하였으며, 타격에너지를 고려하여 표 4.2와 같이 중추 무게, 중추 낙하고, 다짐간격 및 n 단계에서 한 타격점에 대한 타격횟수를 산정하였다.

표 4.2. 동다짐 예비설계

Series (n)	Symbol	중추무게 (W, ton)	중추낙하고 (H, m)	다짐간격 (L, m)	1타점 당 다짐횟수 (B_n , 타)	$E_A = \frac{WHB_n}{L_n^2}$ ($t \cdot m/m^2$)	비 고
1	○	16	20	7×7	15	98	
2	□	16	20	7×7	15	98	
3	△	16	15	4.95×4.95	10	98	
계						294	
Ironing		16	10	2×2	2		

4.2 시험동다짐

시험동다짐은 예비설계가 개량대상 지반조건에 적절한지 확인하기 위하여 본 다짐 시공 이전에 특정 지역을 선정하여 최적 타격횟수, 다짐효율 및 동다짐 시공 전, 후 지반의 지반상태를 파악하기 위한 목적으로 시행한다. 최적의 낙하 추무게 및 타격횟수를 산정하기 위하여 그림 4.3 및 4.4와 같이 Pounder (다짐추)에 따른 관입량 분석을 실시하였다.

시험 결과 16ton추와 20ton추 모두 30회 타격 시까지 일정하게 수렴되는 경향을 보이진 않았으나 관입깊이 1.3m 이후부터는 관입율이 일정하게 감소하는 경향을 나타내었다. 당 현장의 경우 암버력에 동다짐 적용 시 최대 침하율이 15%이므로 성토높이 8m의 15%에 해당하는 관입깊이 1.3m시의 Pounder와 타격횟수를 최적의 설계조건으로 결정하였다. 이 경우 16ton추는 타격횟수 25타로 공사비와 공기 모두에 비경제적이므로 20ton추로 설계 변경하여 15타를 최적의 타격횟수로 산정하였다. 시험동다짐 결과에 따라 중추무게를 16ton추에서 20ton추로 변경하여 최종 동다짐 설계를 표 4.3에 나타내었다.



그림 4.3. 시험동다짐 전경

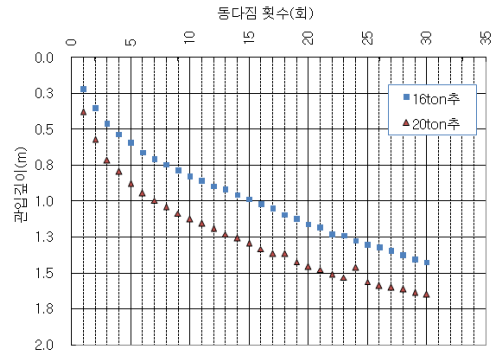


그림 4.4. 동다짐 횟수와 관입깊이와의 관계

표 4.3. 동다짐 최종설계

Series (n)	Symbol	중추무게 (W, ton)	중추낙하고 (H, m)	다짐간격 (L, m)	1타점 당 다짐횟수 (B _n , 타)	$E_A = \frac{WHB_n}{L_n^2}$ (t · m/m ²)	비고
1	○	20	20	7×7	15	122.4	
2	□	20	20	7×7	15	122.4	
3	△	20	15	4.95×4.95	10	122.4	
계						367.2	
Ironing		20	10	2×2	2		

5. 말뚝지지 전면기초(piled raft) 설계

향후 건설될 변전소의 안전운행을 위하여 변전기기 기초지반의 장기적인 creep 변형에 의한 허용부등침하량(5mm) 기준을 만족하는 말뚝지지 전면기초를 설계하였다. 그림 5.1은 말뚝지지 전면기초의 설계흐름도이다.

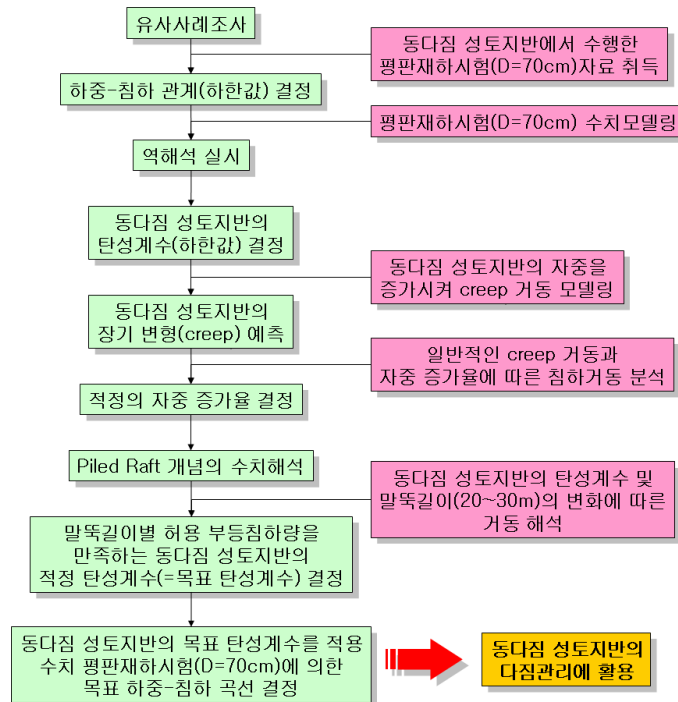


그림 5.1. 말뚝지지 전면기초 설계흐름도

5.1 역해석에 의한 동다짐 성토지반의 물성치 산정

당 현장 조건과 유사한 동다짐 성토지반에서 수행한 평판재하시험 자료(대우건설, 1999)를 분석하여 가장 불리한 조건에 해당하는 그림 5.2의 곡선 C를 당 현장 동다짐 성토지반의 하중-침하 관계곡선(하한값)으로 결정하여 역해석에 활용하였다. 그림 5.3과 같이 수치해석 프로그램(FLAC-2D)을 이용하여 동다짐 성토지반의 하중-침하 관계곡선(하한값)에 해당하는 탄성계수 값을 역해석을 통해 결정(그림 5.4)하였으며, 역해석에 의해 결정된 동다짐 성토지반의 지반물성값을 표 5.1에 나타내었다.

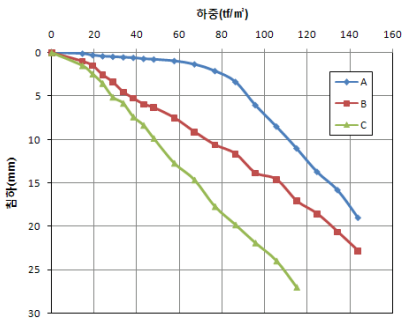


그림 5.2. 평판재하시험 결과

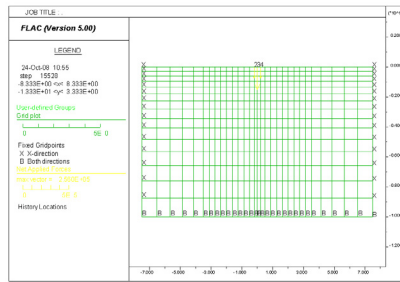


그림 5.3. 수치해석 격자요소망

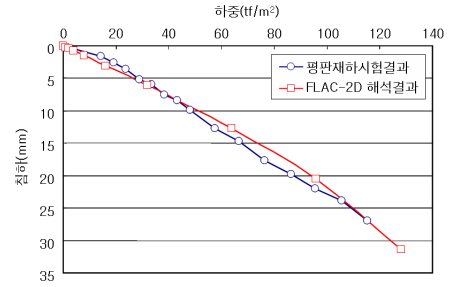


그림 5.4. 역해석 결과

표 5.1. 역해석에 의해 결정된 동다짐 성토지반의 지반물성값

단위중량 (tf/m^3)	내부마찰각 ($^\circ$)	점착력 (tf/m^2)	탄성계수 (tf/m^2)	포와송비
2.0	40	3.0	5,000	0.3

5.2 동다짐 성토지반의 장기변형 예측

일반적인 장기변형(creep) 양상은 그림 5.5와 같이 초기에는 시간에 따라 creep 침하량이 점차 증가하다가 일정 시간 이상부터는 creep에 의한 침하량의 변화가 일정해지는 경향을 나타낸다. 이와 같은 creep 변형 양상을 참고하여 동다짐 성토지반의 creep 변형 예측을 위한 모델링에 활용하였다. 그림 5.6과 같이 당 현장 변전기기 중 765kV GIS 기초(F12) mat를 모델링하고 단위중량을 점차 증가시켜(즉 자중을 증가시켜) 장기 변형에 의한 침하량을 예측한 결과 그림 5.7과 같이 자중 증가율이 증가하면서 부등침하량이 점차 증가하다가 일정 값 이상부터는 부등침하량의 증가량이 거의 수렴하는 경향을 나타냈다. 단위중량 증가율 25%(즉 단위중량=2.0*1.25=2.5 tf/m^3) 이상부터는 creep에 의한 침하량의 변화가 거의 일정해지는 경향에 따라 자중증가 방법에 의한 creep 침하량 예측 모델에 대한 적정 자중 증가율을 25%로 결정하였다.

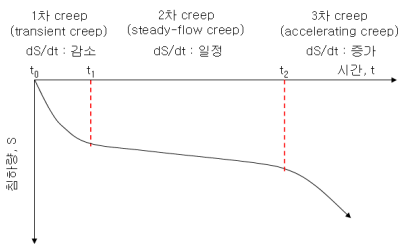


그림 5.5. 일반적인 creep 거동

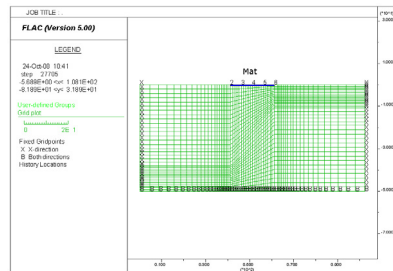


그림 5.6. Mat를 모델링

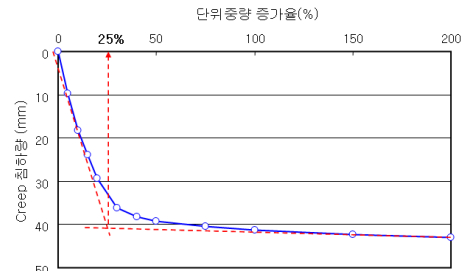


그림 5.7. 동다짐지반 creep 거동

지지 전면기초」 공법으로 설계 변경하였다.

- (1) 당초 설계인 몰러 층다짐 성토의 경우 장기간에 걸친 creep 침하 발생이 매우 큰 것으로 검토되었으며, 대심도 매입 말뚝기초의 경우 세장비 증가 및 부주면 마찰력 가능성으로 인하여 설계하중 감소 또는 말뚝 시공물량의 증가를 유발시키는 문제점이 도출되었다.
- (2) 이에 대한 대안으로 성토 단계별 동다짐 공법으로 설계 변경하여 층당 개량심도 7m씩 총 9층 단계별 성토하는 것으로 계획하여 낙하추 20ton, 낙하높이 20m, 다짐간격 7m, 1타점당 다짐횟수 15타씩 3series(단계)로 타격하는 것으로 시험동다짐을 실시하여 산정하였다.
- (3) 또한, 장기 변형(creep)에 따른 동다짐 성토지반의 부등침하량을 허용범위(5mm) 이내로 억제하기 위한 말뚝지지 전면기초(piled raft)의 설계를 위하여 자중 증가율을 고려한 수치해석을 실시하였으며, 해석결과 설계조건을 만족하는 동다짐 성토지반의 탄성계수는 $25,000 \text{ tf/m}^2$ 이상, 말뚝길이는 25m로 산정되었다.

참고문헌

1. 건화 (2008), 비탈면 안정해석 및 지질조사 보고서, 한국전력공사 경인건설처
2. 김명모 등 (2004), 지반개량공법 설계, 도서출판 새론
3. 대우건설 (1999), 김해시 읍, 면 통합 상수도 시설공사 명동정수장 동다짐공사 최종보고서
4. 대우건설 (2008), 765kV 북경남변전소 동다짐 시험 및 계측관리 계획서, 한국전력공사 경인건설처
5. 전성기 (1998), 연약지반 설계실무편람, 도서출판 과학기술.
6. 한국지반공학회 (2005), 연약지반, 개정판 지반공학시리즈, 구미서관.
7. 한국지반공학회 (2008), 765kV 북경남변전소 변전기기의 안정성확보를 위한 지반안정화방안 최종보고서, 한국전력공사 경인건설처
8. FHWA (1995), Geotechnical Engineering Circular No.1, Dynamic Compaction, FHWA-SA-95-037.