

시공이력을 반영한 고성토 암버력 지반의 침하거동 분석

Settlement Behavior Of High Rock Embankment With Construction Path

배경태¹⁾, Kyung-Tae Bae, 김태훈²⁾, Tae-Hoon Kim, 강인규³⁾, In-Kyu Kang, 이원재⁴⁾, Won-Je Lee, 유남재⁵⁾, Nam-Jae Yu, 이강일⁶⁾, Kang-Il Lee

¹⁾ (주)대우건설 기술연구원 전임연구원, Associate Researcher, Institute of Construction Technology, DAEWOO Engineering & Construction Co. Ltd.

²⁾ (주)대우건설 기술연구원 선임연구원, Researcher, Institute of Construction Technology, DAEWOO Engineering & Construction Co. Ltd.

³⁾ (주)브니엘컨설팅 대표이사, President, VNIEL Consultant Co., Ltd.

⁴⁾ 로드테스트 코리아(주) 대표이사, Managing Director, LOADTEST KOREA Co. Ltd.

⁵⁾ 한국건축자재시험연구원 책임연구원, Senior Researcher, Korea Institute Of Construction Materials

⁶⁾ 대진대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, DAEJIN Univ.

SYNOPSIS : A high embankment is generally constructed by dividing into several sub-embankments. Unlike any soil embankment, a rock embankment is constructed by means of dynamic compaction. Such a sub-embankment and dynamic compaction may induce an increase of pressure at the lower part of embankment and cause a different behavior of ground from initial status. In this study, settlement of a high rock embankment is estimated using a hyperbolic model taking into construction history. The results from prediction are compared with those obtained from field measurements and large plate loading tests.

Keywords : High Rock Embankment, Dynamic Compaction, Construction History, Hyperbolic Model

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(배경태 등, 2009a).

본 연구에서는 암버력을 성토 단계별로 동다짐 할 경우 하부 성토지반의 구속압 증가로 인하여 지반의 변형특성이 초기상태와 차이가 발생할 것으로 예상됨에 따라 시공이력을 반영한 예상 침하량을 평가하기 위하여 사석재료의 시공이력을 반영한 해석모델로 일반적으로 사용하고 있는 Duncan and Chang(1970) 쌍곡선 모델을 적용하여 고성토 암버력 지반의 침하거동을 분석하였다. 또한, 수치해석을 통하여 예측한 시공과정에 따른 암버력 동다짐 지반의 침하량을 실시공시 각 성토 단계별 하중 증가에 의한 지중침하계 계측결과 및 대형평판재하시험 하중-침하 관계와 비교/검토 하였다.



그림 1.1. 변전소 조감도



그림 1.2. 동다짐 시공 전경

2. 성토 단계별 침하량 예측

그림 2.1과 같이 암버력을 성토 단계별로 동다짐 할 경우 하부 성토지반의 구속압 증가로 인하여 지반의 변형특성이 초기상태와 차이가 발생할 것으로 예상됨에 따라 시공이력을 반영한 수치해석(FLAC-2D)을 수행하여 성토 단계별 거동해석을 실시하였다(한국지반공학회, 2008). 단계별 성토에 따른 암버력 동다짐 지반에 대한 거동을 폭 10m의 단위요소로 가정하여 높이 7m 단위로 단계 성토에 따른 거동을 분석하였다. 해석에 사용한 격자요소망은 그림 2.2와 같다.

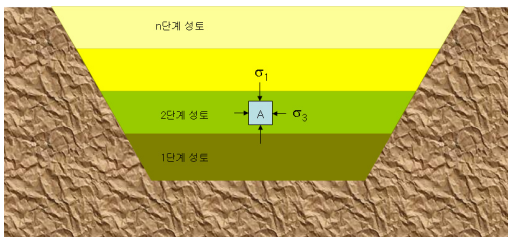


그림 2.1. 단계별 성토 동다짐 개요

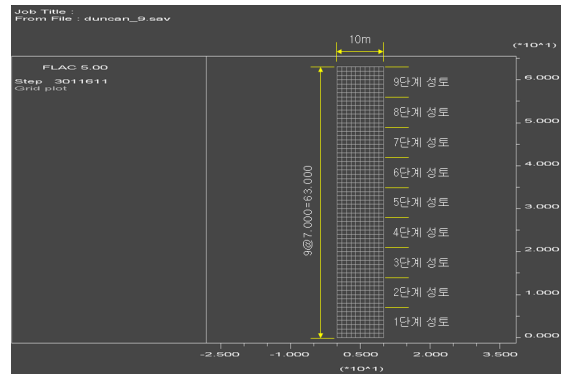


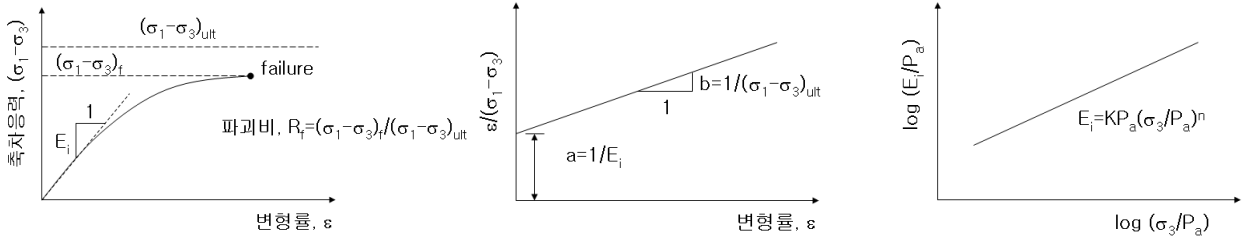
그림 2.2. 해석에 사용한 격자요소망

2.1 해석모델

사석 재료의 시공이력을 반영한 해석모델로 일반적으로 사용하고 있는 Duncan and Chang(1970) 쌍곡선 모델을 적용하였다. 모델의 개요는 그림 2.3(a), (b)와 같으며 구속압의 증가에 따라 탄성계수가 그림 2.3(c)와 같이 증가하는 것을 알 수 있다.

2.2 해석물성치

국내 OO 사력댐 거동해석에 활용된 대형삼축압축시험 결과(한국수자원공사, 2008)로부터 본 검토대상 현장의 암버력 동다짐 지반의 입도분포와 단위중량이 유사한 사력층에 해당하는 Zone-2 구간의 사석재료에 대해 분석된 Duncan and Chang(1970) 쌍곡선 모델 변수를 해석물성치로 적용하였다(그림 2.4). 해석에 사용한 모델 변수는 표 2.1과 같다.



(a) 응력-변형 관계곡선 (b) 비선형 변수의 결정 (c) 응력의존성 변수의 결정

그림 2.3. Duncan and Chang(1970) 쌍곡선 모델의 개요

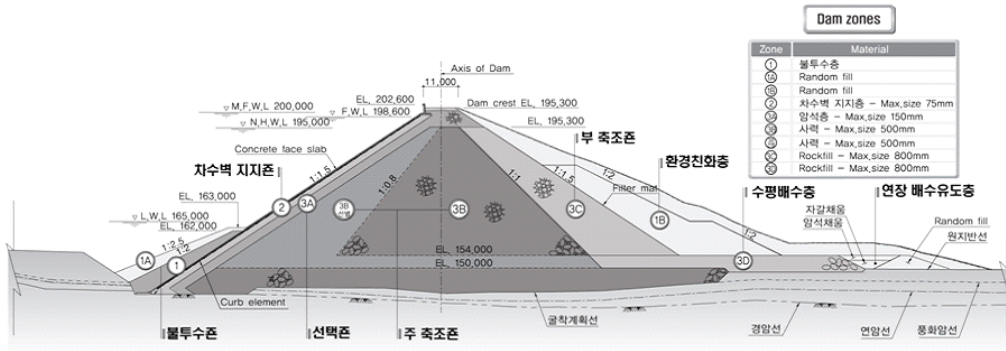


그림 2.4. 해석에 사용된 사력댐의 대표 단면도

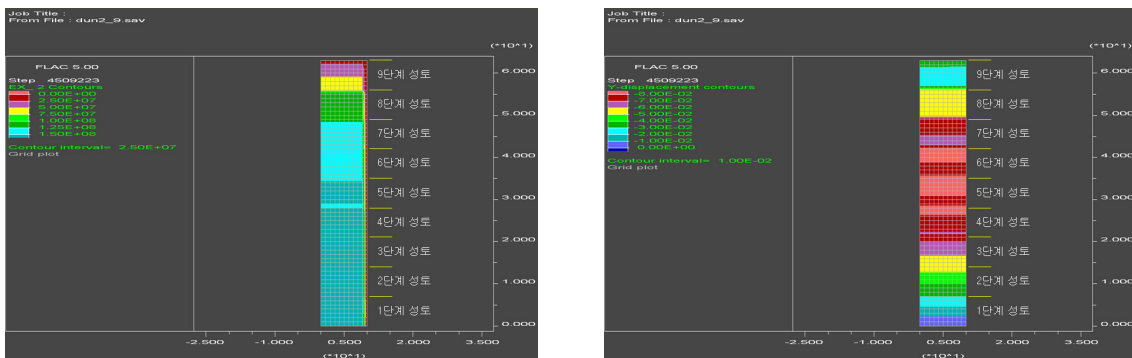
표 2.1. 해석에 사용한 Duncan and Chang(1970) 쌍곡선 모델 변수

구분	K	n	R _f	K _n	m	비고
Zone-2	1037.6	0.37	0.75	3065.0	-0.37	

2.3 해석결과

당 현장의 시공이력을 반영하여 암버력을 단계별 성토 한 결과 하부 성토지반은 구속압 증가로 인하여 지반의 변형특성이 초기상태와 차이가 발생하여 그림 2.5(a) 및 표 2.2에서와 같이 2단계 이상 성토 시 초기 탄성계수 값의 2.3~3.4배 정도 증가하는 것으로 나타났으며, 이에 따라 9단계 성토 시 최대 침하량은 그림 2.5(b) 및 표 2.3에서와 같이 성토층 중앙부에서 86.1mm 정도 발생하는 것으로 나타났다.

이를 시공단계별 각 층의 상단에 설치한 지중침하계로부터 측정한 침하량과 비교하기 위하여 계측기 설치 위치에서의 수치해석에 의한 예상침하량을 표 2.4에 나타내었다. 분석결과 최대 침하량은 5단 성토 상부에 설치한 계측기에서 9단 성토 다짐 후 72.2mm 발생하는 것으로 분석되었다.



(a) 탄성계수 분포도

(b) 침하량 분포도

그림 2.5. 수치해석결과(9단계 최종 성토 시, Zone-2의 경우)

표 2.2. 단계별 성토에 따른 탄성계수의 변화(Zone-2의 경우)

구 분	단계별 성토에 따른 탄성계수의 변화 (단위: tf/m ²)									평 균 탄성계수 (tf/m ²)	비율
	1단계	2단계	3단계	4단계	5단계	6단계	7단계	8단계	9단계		
표층부 ↑	4,820	4,810	4,810	4,820	4,810	4,820	4,820	4,820	4,810	4,820	1.0
		11,130	11,130	11,120	11,130	11,120	11,120	11,130	11,130	11,130	2.3
			13,210	13,210	13,210	13,210	13,210	13,210	13,210	13,210	2.7
				14,390	14,380	14,380	14,380	14,380	14,380	14,380	3.0
					15,150	15,140	15,140	15,140	15,140	15,140	3.1
↓ 바닥부						15,670	15,670	15,660	15,670	15,670	3.3
							16,050	16,050	16,050	16,050	3.3
								16,320	16,320	16,320	3.4
								16,530	16,530	3.4	

표 2.3. 단계별 성토에 따른 침하량의 변화(Zone-2의 경우)

구 분	단계별 성토에 따른 침하량의 변화 (단위: mm)								
	1단계	2단계	3단계	4단계	5단계	6단계	7단계	8단계	9단계
표층부 ↑	1.4	3.4	6.6	10.9	13.9	17.8	21.8	25.9	30.1
		3.1	8.3	15.0	22.3	29.9	37.9	46.0	54.2
			5.9	14.6	25.0	36.2	47.9	59.9	72.2
				8.9	21.4	35.7	50.9	66.7	82.9
					12.2	28.5	46.9	66.2	86.1
↓ 바닥부						15.5	35.9	58.3	81.8
							19.0	43.4	70.1
								22.5	51.1
									26.1

표 2.4. 수치해석결과에 의한 계측기 설치위치에서의 예상침하량 분석

성토층 상부		단계별 시공과정에 따른 예상침하량 (단위 : mm)							
Series No.	설치위치	2단 성토 다짐 후	3단 성토 다짐 후	4단 성토 다짐 후	5단 성토 다짐 후	6단 성토 다짐 후	7단 성토 다짐 후	8단 성토 다짐 후	9단 성토 다짐 후
1	1단성토 상부	1.7	4.5	7.5	10.8	14.1	17.6	21.1	24.7
2	2단성토 상부	-	4.9	11.2	18.0	25.1	32.5	40.0	47.7
3	3단성토 상부	-	-	8.4	18.4	29.1	40.3	51.7	63.5
4	4단성토 상부	-	-	-	11.4	25.3	40.0	55.3	70.9
5	5단성토 상부	-	-	-	-	16.0	34.0	52.8	72.2
6	6단성토 상부	-	-	-	-	-	20.1	42.1	65.1
7	7단성토 상부	-	-	-	-	-	-	24.2	50.4
8	8단성토 상부	-	-	-	-	-	-	-	28.3

3. 단계별 시공과정에 따른 침하량 비교분석

3.1 분석개요

기 수행된 고성토 암버력 지반의 시공품질 및 계측관리 사례연구(배경태 등, 2009b)에서 각 층의 상단에 설치한 지중침하계로부터 계측한 성토 단계별 침하량 및 평판재하시험의 하중 증가에 따른 침하량을 수치해석으로 도출한 예측 침하량과 비교하였다. 이를 위하여 예측 침하량은 표 2.4와 같이 전철에서 수행한 수치해석 결과를 이용하였으며, 지중침하계에 의한 계측 값은 표 3.1과 같이 동다짐 타격점 상부에 설치한 한 값을 적용하고 평판재하시험에 의한 침하량은 표 3.2와 같이 각 단계별로 2회 수행한 평균값을 사용하였다(대우건설, 2009).

표 3.1. 계측결과에 의한 각각의 성토단계별 침하량 분석

성토층 상부		단계별 시공과정에 따른 계측결과에서의 침하량 (단위 : mm)							
Series No.	설치위치	2단 성토 다짐 후	3단 성토 다짐 후	4단 성토 다짐 후	5단 성토 다짐 후	6단 성토 다짐 후	7단 성토 다짐 후	8단 성토 다짐 후	9단 성토 다짐 후
1	1단 성토상부	0.37	0.06	0.20	0.13	0.13	0.00		
2	2단 성토상부	-	1.68	2.18	3.56	4.46	8.61		
3	3단 성토상부	-	-	0.28	0.61	1.30	1.79		
4	4단 성토상부	-	-	-	3.48	4.18	4.38		
5	5단 성토상부	-	-	-	-	0.59	3.34		
6	6단 성토상부	-	-	-	-	-	2.89		
7	7단 성토상부	-	-	-	-	-	-		
8	8단 성토상부	-	-	-	-	-	-	-	

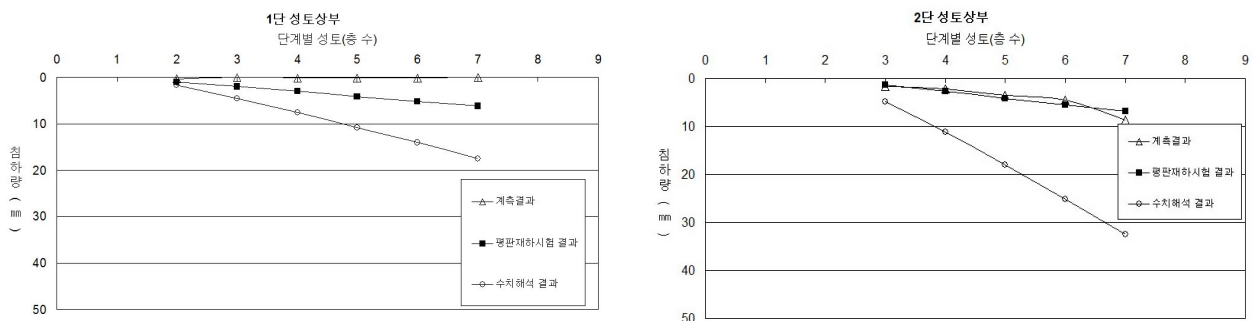
표 3.2. 평판시험결과에 의한 각각의 성토단계별 침하량 분석

성토층 상부		단계별 시공과정에 따른 평판재하시험에서의 침하량 (단위 : mm)							
Series No.	설치위치	2단 성토 다짐 후	3단 성토 다짐 후	4단 성토 다짐 후	5단 성토 다짐 후	6단 성토 다짐 후	7단 성토 다짐 후	8단 성토 다짐 후	9단 성토 다짐 후
1	1단 성토상부	1.03	2.06	3.09	4.12	5.15	6.18		
2	2단 성토상부	-	1.36	2.73	4.09	5.45	6.81		
3	3단 성토상부	-	-	0.87	1.75	2.62	3.50		
4	4단 성토상부	-	-	-	0.78	1.55	2.33		
5	5단 성토상부	-	-	-	-	0.69	1.38		
6	6단 성토상부	-	-	-	-	-	0.91		
7	7단 성토상부	-	-	-	-	-	-		
8	8단 성토상부	-	-	-	-	-	-	-	

3.2 분석결과

현재 동다짐 6단까지 성토 완료 후 지표면에 지중침하계를 설치하고 평판재하시험을 실시한 상태이다. 이후 상부로 7단 성토가 완료된 시점에서 단계별 성토에 따른 계측침하량 및 평판재하시험에 의한 하중-침하관계를 수치해석에 의한 예상침하량과 비교하여 그림 3.1(a)~(f)에 나타내었다. 전반적으로 수치해석으로 예측한 침하량에 비해 지중침하계에 의한 계측침하량과 평판재하시험에 의한 침하량은 유사한 경향을 보이며 상대적으로 적은 값을 나타내고 있어 안정성인 시공관리가 이루어진 것으로 사료된다.

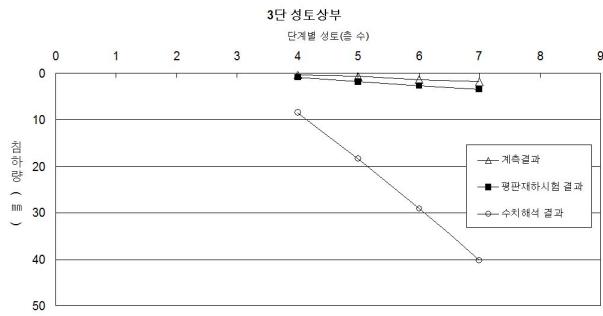
예측침하량과 계측치의 차이는 해석에 적용한 Duncan and Chang(1970) 쌍곡선 모델 변수가 현장 압력 재료로부터 결정된 변수 값이 아니라 국내 OO 사력대 거동해석에 활용된 대형삼축압축시험 결과로부터 결정된 유사 변수 값을 사용하여 차이가 발생한 것으로 판단되며, 동다짐 특성에 따라 타점부와 비타점부간의 다짐에너지 차이로 침하량의 차이가 크게 발생한 것으로 판단된다.



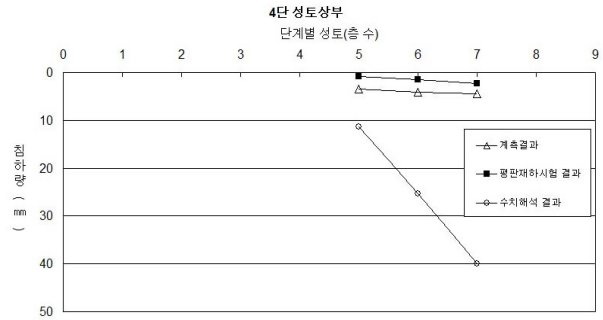
(a) 1단 성토상부(2단 성토다짐후)

(b) 2단 성토상부(3단 성토다짐후)

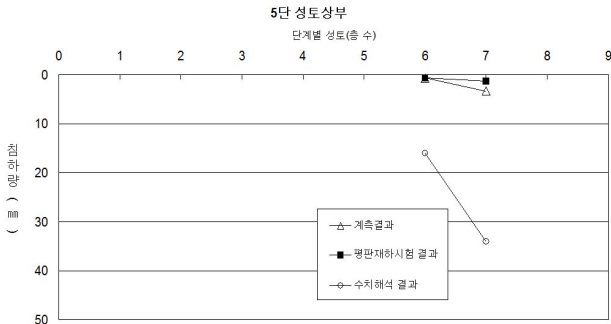
그림 3.1. 예상침하량과 계측침하량의 비교(계속)



(c) 3단 성토상부(4단 성토다짐후)



(d) 4단 성토상부(5단 성토다짐후)



(e) 5단 성토상부(6단 성토다짐후)



(f) 6단 성토상부(7단 성토다짐후)

그림 3.1. 예상침하량과 계측침하량의 비교

4. 결론

암버력을 단계별로 성토 동다짐할 경우 하부 성토지반의 구속압 증가로 지반의 변형특성이 초기상태와 차이가 발생할 것으로 예상됨에 따라 시공이력을 반영한 수치해석을 실시하여 각 층의 상단에 설치한 지중침하계로부터 계측한 성토 단계별 침하량 및 각 층의 상단에서 수행한 평판재하시험으로부터 도출한 하중 증가에 따른 침하량과 비교, 고찰하였다.

- (1) 2단계 이상 성토시 하부지반은 구속압의 증가로 초기 탄성계수 값의 2.3~3.4배 정도 증가하는 것으로 나타났으며, 9단계 성토시 최대 침하량은 성토층 중앙부에서 발생하며 86.1mm 정도 발생하는 것으로 나타났다. 이를 시공단계별 각 층의 상단에 설치한 지중침하계로부터 계측한 침하량과 비교하기 위하여 계측기 설치위치에서의 예상침하량을 분석한 결과 최대 침하량은 5단 성토 상부에 설치한 계측기에서 9단 성토 다짐 후 72.2mm 발생하는 것으로 분석되었다.
- (2) 수치해석에 의한 예측침하량에 비해 지중침하계에 의한 계측침하량과 평판재하시험에 의한 침하량은 유사한 경향을 보이며 상대적으로 적은 값을 나타내고 있어 안정성인 시공관리가 이루어진 것으로 사료된다.
- (3) 예측침하량과 계측치의 차이는 해석에 적용한 Duncan and Chang(1970) 쌍곡선 모델 변수가 현장 암버력 재료로부터 결정된 변수 값이 아니라 국내 OO 사력뎀 거동해석에 활용된 대형삼축압축시험 결과로부터 결정된 유사 변수 값을 사용하여 차이가 발생한 것으로 판단되며, 동다짐 특성에 따라 타점부와 비타점부간의 다짐에너지 차이로 침하량의 차이가 크게 발생한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 대우건설 (2009), 765kV 북경남변전소 동다짐공사 현장시험 및 계측관리 보고서, 한국전력공사 경인건설처
2. 배경태, 안상익, 박용만, 김강규, 김형석, 이우진 (2009a), “장기침하를 고려한 고성토 암버력 동다짐 지반의 설계사례”, 한국지반공학회 가을 학술발표회 논문집
3. 배경태, 차경섭, 박용만, 김강규, 김형석, 이장덕 (2009b), “고성토 암버력 지반의 시공품질 및 계측관리 사례”, 한국지반공학회 가을 학술발표회 논문집
4. 한국수자원공사 (2008), 부항댐 축조재료의 강도 및 변형특성 연구결과보고서, pp. 11-73.
5. 한국지반공학회 (2008), 765kV 북경남변전소 변전기기의 안정성확보를 위한 지반안정화방안 최종보고서, 한국전력공사 경인건설처
6. Duncan J. M. and Chang C. Y. (1970), “Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils”, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 96, No. SM5, pp. 1629-1653.