

물성치 추정을 통한 성토안정성 예측

A Study on the Safety Prediction of Embankment Using Simple Parameter Estimation Method

박중성¹⁾, Jong-Sung Park, 홍창수²⁾, Chang-Soo Hong, 황대진³⁾, Dae-Jin Hwang, 석정우⁴⁾, Jeong-Woo Seok

¹⁾ 삼성건설 기반기술연구소 주임, Researcher, Institute of Technology, Samsung Construction

²⁾ 삼성건설 기반기술연구소 선임, Senior Researcher, Institute of Technology, Samsung Construction

³⁾ 삼성건설 기반기술연구소 수석, Principal Researcher, Institute of Technology, Samsung Construction

⁴⁾ 삼성건설 기반기술연구소 선임, Senior Researcher, Institute of Technology, Samsung Construction

SYNOPSIS : Compaction is a process of increasing soil density using physical energy. It is intended to improve the strength and stiffness of soil. In embankment, degree of compaction affects the construction time, money, also method of soil improvement. In large scale embankment project, difficulties of embankment should change due to uncertainty of settlement. So it is very important to predict the final settlement and factor of safety induced by embankment.

In many construction site, there are primarily design of high embankment using in-situ soil. Therefore numerical analyses are necessary for valid evaluation of the settlement prediction. But due to the construction cost and schedule, there were lacking in properties of soil and also limited number of in-situ test were performed. So we proposed the method that can easily estimate the proper soil parameters and suggest the proper method of numerical analysis. From this, two-dimensional finite-difference numerical analysis was conducted to investigate the settlement and factor of safety induced by embankment with various case of compaction rate and embankment height.

Keywords : Embankment, Degree of compaction, Factor of safety, FDM, Settlement prediction

1. 서론

최근 전 세계에서는 사회간접시설의 확충 및 도시개발이 활발히 이루어지고 있다. 공항, 항만, 지하차도, 도로 등을 조성하기 위해 대규모 절토 및 성토, 매립 작업 등이 짧은 공사기간 내에 이루어지고 있으며 그에 따라 시공 중 문제점이 발생했을 경우 즉각 대처할 수 있는 합리적이고 간편한 해결책이 요구되고 있다. 연약지반 위에 도로나 시설물을 건설할 경우 부족한 지지력과 많은 침하량으로 인해 문제가 발생할 확률이 높다. 특히 다짐 시 공사기간 및 공사비용의 산정, 다짐공법의 선정 등은 현장에서 원활히 대처하고 결과를 예측하기가 쉽지 않다.

일반적으로 다짐이란 물리적 에너지를 사용하여 흙의 밀도를 향상시키는 것을 의미하며 이는 흙의 침하를 줄이고 강도특성을 증진시키고자 실시하는 것이다(Holtz et al, 1981). 성토 두께와 더불어 다짐도는 성토면의 안정성을 결정짓는 중요한 변수 중 하나로 국내에서는 노체 90% 이상, 노상 하부 90% 이상, 노상 상부 95%이상의 기준으로 관리되고 있다. 다짐도가 정확히 관리되지 않을 경우 공사 중 뿐 아니라 공사 후에도 침하가 발생해, 차후 구조물이나 성토면 자체의 안정성이 저해될 수 있기 때문에 공사의 목적과 지반 상태에 따라 적합한 다짐도와 다짐방법을 결정하는 것은 무엇보다 중요하다.

성토면의 안정성에 영향을 미치는 변수는 무척 다양하다. 다짐방법 및 다짐재료의 특성, 지하수위와 같은 일반적인 변수뿐 아니라, 성토두께 및 다짐효과가 성토안정성에 영향을 미친다는 연구 결과(노한성 외, 2002), 성토체의 강성이 성토 침하량 및 안정성에 큰 영향을 미친다는 연구결과(Nagahara et al., 2004; 배우석 외, 2007)도 존재한다. 흙의 변형 문제를 해석하기 위해서는 일반적으로 Terzaghi 1차원 압밀 이론 뿐 아니라 Biot 다차원 압밀이론 등이 제안되고 사용되어 오고 있지만 계산의 실용성이 떨어지고 현장에서 손쉽게 안정성을 판단하기가 어렵다는 단점을 가지고 있다. 특히 턴키 공사가 많은 토목 현장의 경우 공기와 비용의 문제 때문에 성토가 계획되어 있어도 실내물성시험 및 현장시험이 한정적으로 이루어지는 경우가 많고, 이로 인해 이론적인 계산을 통해 사전에 성토면의 안정성을 파악하기가 무척 힘들다. 따라서 본 논문에서는 실험을 통해 얻어진 흙의 물성치가 한정적인 경우, 그 값을 통해 다른 물성치를 합리적으로 유추하는 방법을 제안하였다. 그리고 이 값을 이용해 2차원 유한차분법 수치해석을 실시하여 그 결과를 검증하고, 다짐도와 성토고에 따른 성토면의 침하량 및 안정성 여부를 판단하였다.

2. 안정성 검토

2.1 해석 개요

본 논문에 사용된 프로그램은 범용 지반해석 프로그램인 FLAC 이다(Itasca Consulting Group, 2005). 2차원 해석의 한계로 인해 실제 현장의 지형을 원활히 모사할 수 없기 때문에 그림 1과 같이 100m 높이의 대표단면을 설정하였고, 이 때 성토면의 경사는 1:2 이다. 이를 토대로 20m 성토, 50m 성토, 100m 성토의 세 가지 상황에 대해 해석을 수행하였다.

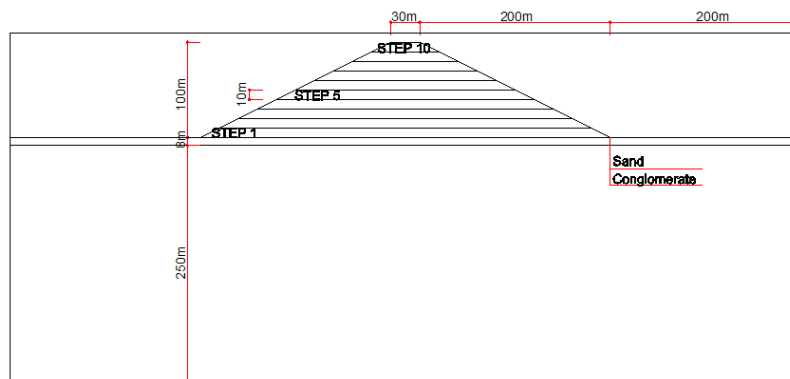


그림 1. 해석단면

원지반은 기반암 위로 약 8m의 모래층이 존재하고, 그 위에 성토를 진행하는 것으로 모사하였다. 시공순서를 간략화 하기 위해 1단계 당 10m를 성토하는 것으로 해석을 진행했다. Burland(1989)는 정적인 문제에 있어서 공용하중 상태에서 지반이 겪게 되는 변형률의 범위는 일반적으로 0.1~1% 이하인 것으로 보고하였고, 이에 따라 성토 후 공용하중은 생략하였다.

2.2 성토재 물성치 산정

성토재료는 일반적으로 사용되는 실트질 사질토로 정하고, 각종 현장데이터를 참고하여 최대건조단위 중량을 1.6 t/m^3 , 최소건조단위중량을 1.2 t/m^3 으로 가정하였다. 성토 다짐도의 경우 국내 지방서에서는 일반적으로 노상, 노체, 보조기층에 따라 90%와 95%를 제안한다. 이를 참조해 본 해석에서는 다짐도 85%, 87%, 90%의 세 가지 상황을 가정하였고, 각각 최종다짐이 발생하는 최상위층의 다짐도는

90%, 92%, 95%로 가정하였다. N치는 침하량의 예측에 가장 큰 영향을 미치는 요소이기 때문에 침하량 예측 시 적절한 N치의 산정이 이루어질 때 예측 침하량의 정확성이 확보된다(김원철 외, 2004). 성토층의 N 값은 표 1과 같이 Terzaghi가 제안한 N 값과 상대밀도와의 상관관계로부터 산정하였다. 다짐도로부터 산정된 건조단위중량과 그에 따른 상대밀도, N치는 표 2 와 같다.

표 1. 토사지반에서의 N치와 상대밀도의 관계(Terzaghi & Peck & Lambe and Whitman)

N Value(blows/ft or 305mm)	Relative Density	Dr(%)
0 to 4	very loose	0 to 15
4 to 10	loose	15 to 35
10 to 30	medium	35 to 65
30 to 50	dense	65 to 85
>50	very dense	85 to 100

표 2. 다짐도의 변화에 따른 입력변수

다짐도(%)	건조단위중량(t/m ³)	Dr(%)	N
95%	1.52	84	49
92%	1.472	74	39
90%	1.44	67	31
87%	1.392	55	24
85%	1.36	47	18

2.3 성토시 물성치 증가

다짐이 진행되면 상재하중과 다짐하중으로 인해 성토면 하부가 압밀 개량되고, 이는 토질 및 상재하중의 정도, 다짐도에 따라 정도 차이가 발생한다. 본 논문에서는 각종 현장 조사자료 및 논문(Yi Zhu et al, 2005; 박진우, 2005; 이봉직, 2000, 김종국, 2001)을 바탕으로 다짐도 95%시 1m당 N값이 2씩 증가하는 것으로, 다짐도 90%시 N값이 1.6씩, 다짐도 85%시 N값이 1.2씩 증가하는 것으로 가정하였다. 성토층(Embankment layer)은 10m로서 자체의 침하는 없다고 가정하였으며, N값의 증가는 그림2와 같이 하부 20m로 가정하고 그 아래는 N값이 50을 초과하지 않는다는 전제하에, 해석을 수행하였다. 단위중량 역시 증가된 N값을 감안하여 표 1을 참고하여 적용하였다. 물성치 증가 모식도는 그림 2와 같다.

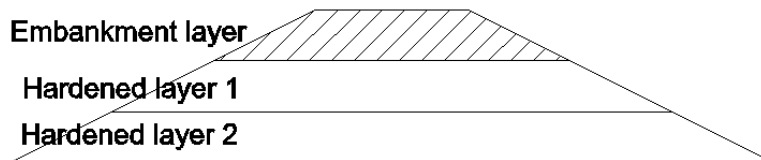


그림 2. 물성치 증가 모식도

2.3.1 탄성계수

Schmertmann(1978)은 N값과 지반의 탄성계수와의 관계를 표 3과 같이 정의하였다.

표 3. 흙의 종류와 변형계수 (Schmertmann, 1978)

흙의 종류	E_s (kg/cm ²)
silt, sandy silt	4N
fine to medium sand	7N
coarse sand	10N
sandy gravel, gravel	12N - 15N

성토재로 실트질 사질토를 결정하였으므로 표 3에 따라 아래 표 4와 같이 N값에 따른 탄성계수를 산정하였다.

표 4. 각 층의 탄성계수

구 분	Embankment		Hardened 1		Hardened 2	
	N	E	N	E	N	E
다짐도 95%	49	196	50	200	50	200
다짐도 92%	39	156	50	200	50	200
다짐도 90%	30	120	46	184	50	200
다짐도 87%	24	96	38	152	50	200
다짐도 85%	18	72	30	120	42	168

2.3.2 내부마찰각

Peck (1974) & Meyerhof (1956)는 N 값과 내부마찰각과의 관계를 표 5와 같이 정의하였다.

표 5. N값과 내부마찰각과의 관계(Peck & Meyerhof)

N value	Relative Density	Approximate ϕ (degrees)	
		(a)	(b)
0 to 4	Very loose	< 28	< 30
4 to 10	Loose	28 to 30	30 to 35
10 to 30	Medium	30 to 36	35 to 40
30 to 50	Dense	36 to 41	40 to 45
> 50	Very dense	> 41	> 45

(a source) : Peck, Hanson, Thorburn

(b source) : Meyerhof

4 to 10	loose	28 t
10 to 30	medium	30 t
30 to 50	dense	36 t

Dunham(1954)도 N값과 내부마찰각 사이의 관계를 아래의 표 6과 같은 식으로 제안한 바 있다.

표 6. N값과 내부마찰각과의 관계(Dunham)

모래 상태	내부마찰각
입자가 둥글고 입도분포가 균일한 모래	$\phi = \sqrt{12N} + 15$
입자가 둥글고 입도분포가 좋은 모래	$\phi = \sqrt{12N} + 20$
입자가 모나고 입도분포가 균일한 모래	$\phi = \sqrt{12N} + 20$
입자가 모나고 입도분포가 좋은 모래	$\phi = \sqrt{12N} + 25$

위의 관계를 바탕으로 본 해석에서는 표 7과 같이 내부마찰각을 정의하였다.

표 7. 해석에 사용한 성토부의 내부마찰각

구 분	Embankment		Hardened 1		Hardened 2	
	N	ϕ	N	ϕ	N	ϕ
다짐도 95%	49	39	50	40	50	40
다짐도 92%	39	37	50	40	50	40
다짐도 90%	30	34	46	38	50	40
다짐도 87%	24	32	38	36	50	40
다짐도 85%	18	30	30	34	42	37

2.4 원지반 물성치

본 논문에서는 과거 성토를 진행했던 몇몇 현장의 지반조사 자료와 Braja M.Das(2000)의 제안을 참조하여 Conglomerate층과 Sand층의 물성치를 산정하였다. 그 결과 Conglomerate층의 탄성계수는 25,000 t/m², 점착력은 5 t/m²로, Sand층은 탄성계수는 2,200 t/m², 점착력은 1 t/m²로 결정하였다.

2.5 해석 결과

2.3절에서 산정된 물성치를 바탕으로 그림 3과 같이 각각 20m, 50m, 100m 성토를 모사하였다.

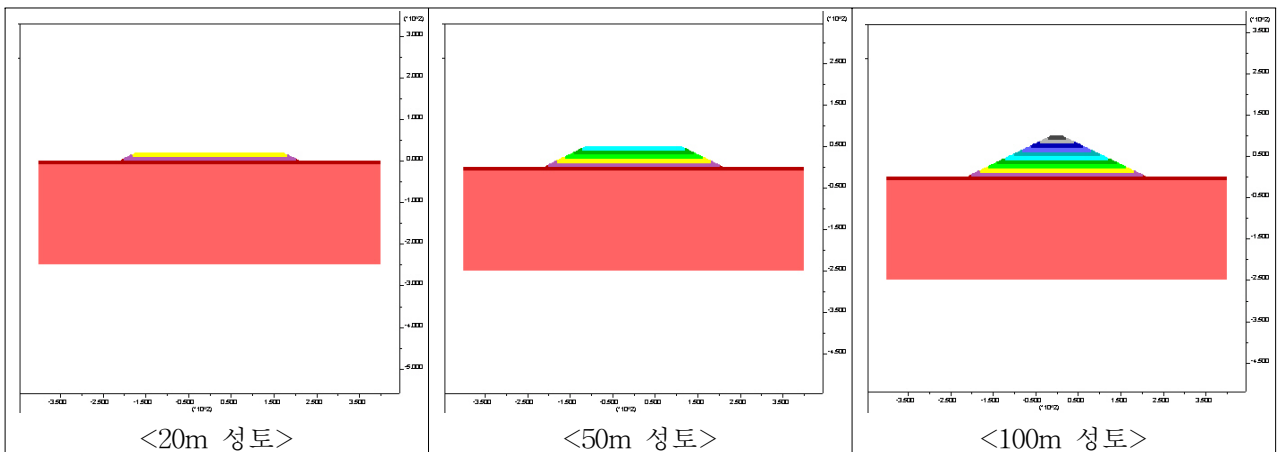


그림 3. 성토 모사

현장 시공 시 중요한 점은 성토가 진행되는 과정에서 발생하는 침하량과 성토 안정성이므로 그 결과를 확인해보았다. 대표적인 해석 케이스로 100m 높이로 성토했을 경우 결과는 아래와 같다.

그림 4에 표시한 것처럼 원 지반, 원 지반 상부 30m 지점, 원 지반 상부 50m 지점에서 성토단계별 침하량 변화를 확인하였고, 그 결과는 그림 5와 같다.

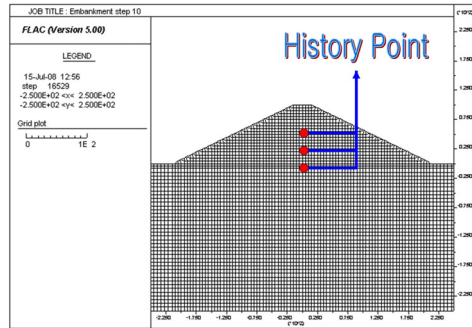


그림 4. 침하량 이력 확인점

	원지반 상단부 0m 지점 침하량 (단위 :m)	원지반 상단부 30m 지점 침하량 (단위 :m)	원지반 상단부 60m 지점 침하량 (단위 :m)
다짐도 90% 가정시			
다짐도 87% 가정시			
다짐도 85% 가정시			

그림 5. 침하량 이력

해석결과 다짐도에 관계없이 최대 침하는 원지반 상단 40~50m 지점에서 발생하였고, 대표적인 케이스로 다짐도 85% 가정 시 침하량을 그림 6에 나타냈다. 최대 침하량은 다짐도 90% 가정 시 약 1.740m, 다짐도 87% 가정 시 약 1.771m, 다짐도 85% 가정 시 약 1.980m 정도로 나타났다. 수평변위는 다짐도 90% 가정 시 약 0.618m, 다짐도 87% 가정 시 약 0.626m, 다짐도 85% 가정 시 약 0.741m 정도 발생했고, 사면 하단부분에 소성영역이 일부 발생했지만 성토면 파괴는 일어나지 않았다.

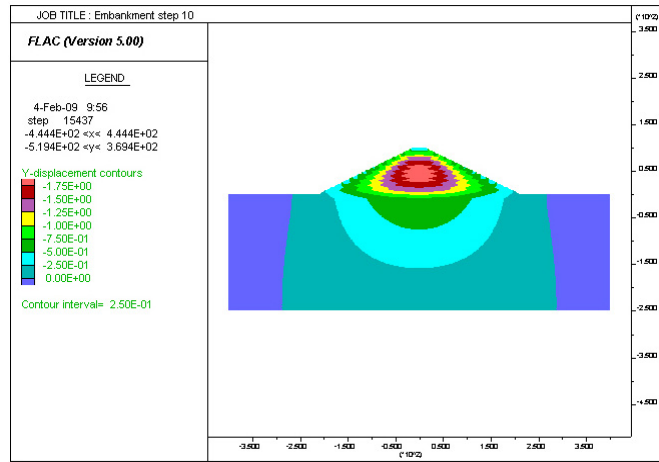


그림 6. 다짐도 85% 가정 시 성토완료 후 침하정도

위와 동일한 방법으로 20m 성토 시, 50m 성토 시 해석도 수행하였고, 그 결과 최대 침하량은 그림 7과 같이 나타났다. 다음으로 성토면 안정성을 파악하기 위해 강도강소법을 이용하여 성토 최종단계에서의 안전율을 산정하였고, 그 결과는 그림 8과 같다.

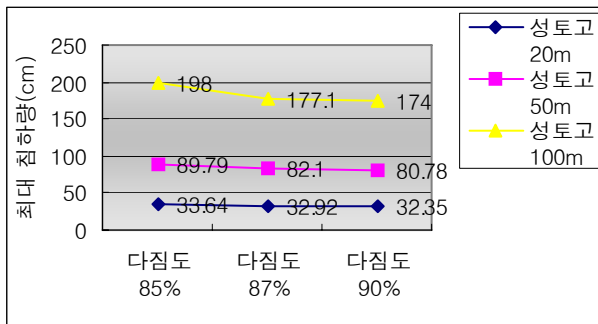


그림 7. 성토고에 따른 성토지반의 최대 침하량

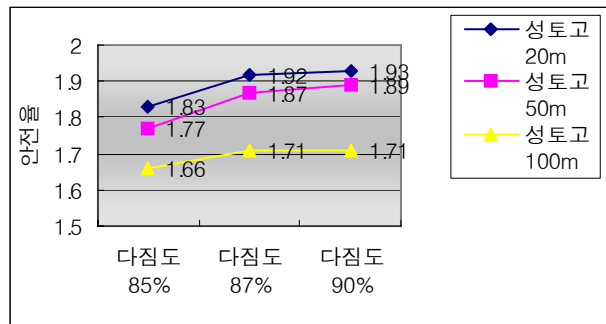


그림 8. 강도강소법에 의한 안전율

수치해석 결과 성토면의 변위는 모두 수렴하는 것으로 나타났으며, 파괴는 발생하지 않았다. 침하량의 경우 일반적으로 현장에서 충분히 예측 및 제어 가능한 정도 수준으로 나타났다. 하지만 고성토 구간인 경우 저성토 구간에 비해 침하량이 다소 크게 나타났기 때문에 고성토시에는 현장 계측 및 다짐도 관리를 좀 더 신중히 해야 할 것으로 판단된다. 다짐도 85%, 87%, 90% 모두 성토고에 관계없이 안전율이 1.5 이상으로 분석되었다. 하지만 다짐도 87%와 다짐도 90%에 비해 다짐도 85%인 경우는 안전율 감소가 상대적으로 크게 나타났기 때문에 성토 시 신중한 관리가 필요하다고 사료된다.

3. 결론

최근 토목공사는 대형화와 정밀시공이라는 어려운 시공조건과 더불어 비용절감과 공기단축이라는 문제를 극복해야 하는 등 과거보다 더욱 엄밀한 조건이 요구되고 있다. 특히 설계시공 병행 진행방법(Fast Track Method)과 같이 시공사의 현장 관리능력이 중요한 상황에서는 신속하게 시공가능성 여부를 타진할 수 있는 정량적인 평가방법을 구축하는 것이 무엇보다 중요하다.

본 연구에서는 성토 계획 시, 현장에서 간편히 얻을 수 있는 물성치를 토대로 성토면 안정성 해석에 필요한 다른 물성치를 추정하는 방법을 제안하였다. 물성치 추정은 각종 참고 문헌 및 시공사례 분석을 통해 이루어졌으며, 추정 결과를 수치해석(Flac 2D 프로그램)에 반영하여 검증해보았다. 수치해석 시 다짐도의 변화와 성토고의 변화에 따른 성토면의 침하량 및 안정성 여부를 분석하였고, 이를 통해 합리적인 결과 값을 얻어냈다. 제안된 방법은 시공 중 신속하고 용이하게 적용될 수 있을 것이고, 실제 현장에 사용될만한 훌륭한 접근방법으로 판단된다.

참고문헌

1. 김원철, 안창윤(2004), “사질지반에서 탄성론에 의한 침하량 산정 적용성에 관한 연구”, 한국지반환경공학회논문집, 제 5권, 제 3호, pp.61~70.
2. 김종국, 이강운, 김영웅, 채영수(2001), “인천 국제공항 준설매립 지반 - 지반진동에 따른 액상화 연구사례”, 한국지반공학회지, 제 17권, 제 2호, pp. 36~51.
3. 노한성, 백종은(2002), “성토두께 변화가 다짐효과에 미치는 영향”, 대한토목학회지, 제 22권, 제 3호, pp.319~330.
4. 박진우(2005), “풍화잔적토 사면의 안정성에 영향을 끼치는 인자연구”, 영남대 산업대학원, 석사논문.
5. 배우석, 김종우, 권영철(2007), “성토체 및 모래매트의 강성이 하부지반의 변형과 성토체의 안전에 미치는 영향에 대한 유한요소해석”, 한국안전학회지, 제 22권, 제 4호, pp.57~65.
6. 이봉직, 배우석, 이준대(2000), “매립지반에 적용된 쇄석말뚝의 보강효과”, 한국산업안전학회지, 제 15권, 제 2호, pp.97~102.
7. Braja, M. Das(2004), “Fundamentals of Geotechnical Engineering, Second edition”.
8. Burland, J. B.(1989), “Ninth Lauritis Bjerrum Memorial Lecture : Small is Beautiful -The Stiffness of Soils at Small Strains”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol 26, pp.52-65.
9. FLAC manual ver.5.0(2005), Itasca Consulting Group.
10. Holtz R. D., Kovacs, W. D.(1981), “An Introduction to Geotechnical Engineering”.
11. Nagahara, H., Fujiyama, T., Ishiguro, T., and Ohta, H.(2004), “FEM analysis of high airport embankment with horizontal drains”, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 22, pp.49~62.
12. Schmertmann, J.H.(1978), “Guidelines for Cone Penetration Test”, Performance and Design, Report No. FHWA-TS-78-209.
13. Yi Zhu, Kuantsai Lee, and Gary H. Collison(2005), “A 2D Seismic Stability and Deformation Analysis”, 2005 ASCE Geo-Frontiers.