

확률론적 방법을 이용한 공간적 압밀침하량 평가

Evaluation of Spatial Consolidation Settlement by Probabilistic Method

김동휘¹⁾, Dong-Hee Kim, 최영민²⁾, Young-Min, Choi, 고성권³⁾, Seong-Kwon, Ko, 이우진⁴⁾, Woojin Lee

¹⁾ 고려대학교 건축사회환경공학과 박사과정, Ph.D. Student, Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea University

²⁾ 고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea University

³⁾ 포스코건설 건축사업본부 건축기술그룹 과장, Assistant manager, Architecture Technology & Design Group, Architecture Division, POSCO E&C

⁴⁾ 고려대학교 건축사회환경공학과 교수, Prof., Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea University

SYNOPSIS : For a rational evaluation of the spatial distribution of consolidation settlement, it is necessary to adopt probabilistic method. In this study, mean and standard deviation of consolidation settlement of whole analysis region are evaluated by using the spatial distribution of consolidation layer which is estimated from kriging and statistics of soil properties. Using these results and probabilistic method, the area need to be raised the ground level for balancing the final design ground level are determined.

Keywords : Consolidation settlement, Probabilistic method, Spatial variability

1. 서론

해안이 인접한 국가들은 매립공사를 통하여 신도시 및 항만건설을 시행하고 있다. 이러한 해안매립공사는 대부분 점토 등의 연약지반에서 이루어지므로 시간 경과에 따른 압밀침하 발생은 불가피하다. 또한, 압밀층의 두께 및 매립에 의한 성토높이가 공간적으로 변하기 때문에 압밀침하 및 압밀속도를 공간적으로 평가하는 것은 대규모 해안매립지반에서 매우 중요한 문제이다.

지반정수들은 단일 값이 아니라 불확실성이 내재되어 있는 확률변수로 취급될 수 있으며, 이러한 지반정수들을 이용하여 추정하는 압밀침하 및 압밀속도 또한 확률변수로 다루어져야 한다. 지반정수들의 불확실성이 일차압밀침하량과 압밀도에 미치는 영향에 대한 연구가 지속적으로 수행되어 왔다(Corotis 등, 1975; Freeze, 1977; Athanasiou-Griva와 Harr, 1978; Chang, 1985; Hong과 Shang, 1998; Zhou 등, 1999; 김방식과 김병일, 2007), 본 논문에서는 확률론적 방법으로 공간적인 압밀침하 및 압밀속도 평가방법을 제시하기 위하여 다음과 같은 방법으로 연구를 수행하였다. 먼저 압밀침하 평가에 필요한 지층들의 공간적 분포를 크리깅기법을 이용하여 추정하였다. 지층추정결과를 잭나이프 방법으로 검증하여 가장 신뢰성 높은 추정방법을 선정하였으며, 이 결과를 압밀침하 추정에 직접적으로 활용하였다. 두 번째로 압밀침하 및 압밀속도를 확률론적 방법으로 추정하기 위해서 지반정수들에 대한 통계량 및 확률분포형을 추정하였다. 이러한 지층분포 추정결과와 지반정수들의 통계량 및 확률분포를 이용하여 매립공사 완료 후 시간경과에 따른 공간적인 압밀침하를 확률론적 방법을 이용하여 추정하였으며, 이러한 분석결과를 설계에 활용할 수 있는 방안을 제시하였다.

2. 연구지역 위치 및 분석자료

분석대상인 인천 송도지역은 지표면으로부터 매립층, 퇴적층, 풍화토, 풍화암이 분포하고 있으며, 퇴적층은 실트질 점토층 및 모래층이 번갈아 분포하고 있다. 퇴적층 상부에 분포하는 평균 N값이 5인 실트질 점토층에서 압밀침하가 발생할 것으로 판단되며, 송도지반의 특성분석결과는 김동휘 등(2009a, b; 2010b)에 자세하게 제시되었다. 본 논문에서는 지층분포 추정결과의 검증방법으로 전체 자료 중 값을 알고 있는 위치에서의 값을 크리깅 추정값과 비교하는 잭나이프 검증방법(Jackknife validation method)을 사용하였다. 따라서 총 702개의 시추조사자료를 581개의 분석자료와 121개의 검증자료로 분리하였으며, 각각의 위치는 그림 1과 같다.

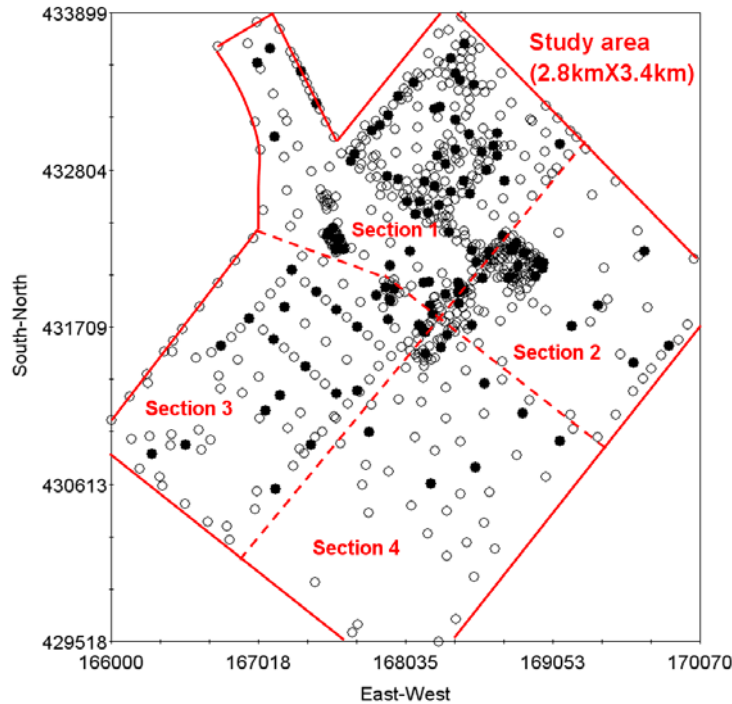


그림 1. 분석자료(원)와 검증자료(점) 분포

3. 지반정수

압밀침하 및 압밀속도의 확률분포를 추정하기 위해서는 매립 전 지반정수에 대한 확률분포를 알아야 한다. 본 논문에서는 매립층의 포화단위중량, 유효단위중량, 매립 전 압밀층의 포화단위중량, 유효단위중량, 압축지수와 재압축지수를 간극비로 정규화한 $C_c/(1+e_0)$ 와 $C_r/(1+e_0)$, 압밀계수에 대한 통계량 및 확률분포형을 추정하였으며, 그 결과를 표 1에 요약하였다. 본 논문에서는 확률분포형의 매개변수 추정 방법으로 모멘트법을 사용하였으며, 확률분포형에 대한 적합성은 Kolmogorov-Smirnov(K-S) 방법으로 검정하였다(Benjamin과 Cornell, 1970; Ang과 Tang, 2007). 확률분포형 분석결과 압밀계수는 왼쪽으로 치우친 분포경향을 보이므로 정규분포보다는 대수정규분포가 적합한 것으로 나타났으며, 다른 지반정수들의 분포는 거의 대칭인 경향을 보이므로 정규분포를 사용해도 문제없을 것으로 판단된다. 실트질 모래로 구성되어 있는 매립층의 포화단위중량과 유효단위중량의 변동계수는 Duncan(2000)과 Phoon과 Kulhawy(1999)를 참고하여 각각 5%, 7%로 하였으며, 정규분포로 가정하였다.

표 1. 지층별 지반정수의 통계량 및 확률분포

구분	지반정수	단위	평균	표준편차	변동계수	확률분포
매립층 (실트질 모래)	포화 단위중량,	kN/m^3	19.0	0.95	0.05	정규분포
	유효단위중량,	kN/m^3	9.2	0.64	0.07	정규분포
압밀층 (실트질 점토)	포화단위중량,	kN/m^3	18.3	0.54	0.03	정규분포
	유효단위중량,	kN/m^3	8.5	0.54	0.06	정규분포
	$C_c/(1+e_0)$	-	0.122	0.036	0.30	정규분포
	$C_r/(1+e_0)$	-	0.030	0.007	0.22	정규분포
	압밀계수	cm^2/sec	6.22×10^{-3}	2.76×10^{-3}	0.44	대수정규분포
	OCR(G.L.0~-4.0m)	-	3.1	0.7	0.23	정규분포

4. 압밀침하량의 공간적 분포 평가

매립지반에서 과도한 침하가 발생하면 추가 성토를 수행하여 계획높이를 유지해야 한다. 따라서 침하가 과도하게 발생하는 구간에서는 추가로 성토해야 할 토사가 많이 필요하게 되므로 계획단계에서 이러한 영역과 추가 성토량을 예측하는 것은 공사기간 및 공사비의 예측에 있어 중요한 문제이다. 따라서 본 절에서는 결정론적인 방법과 확률론적인 방법을 사용하여 추가성토를 수행해야 할 영역을 분석하는 예를 제시하고자 한다.

결정론적 방법을 사용하여 압밀침하분포를 평가하기 위해서 표 1에서 제시한 지반정수들의 평균값을 사용한다. 확률론적 방법을 사용하여 압밀침하 분포를 평가하기 위해서는 먼저 공간적인 압밀침하의 평균과 표준편차를 산정해야 한다. 본 논문에서는 압밀침하의 평균과 표준편차를 구하기 위하여 테일러급수방법(Taylor series method)을 사용하였다(Wolff, 1994; U.S. Army Corps of Engineers, 1997, 1998; Duncan, 2000). 송도지역은 최종 매립부지의 높이를 표고 E.L+7m로 계획하고 있어 압밀침하를 고려하여 약 E.L+8m까지 성토를 수행하고 있다. 그림 2(a)는 E.L+8m까지 성토를 수행하였을 경우 지반정수들의 평균을 사용하여 분석영역에서 압밀침하의 평균을 산정한 것이며, 그림 2(b)는 지반정수들의 변동성을 고려하여 산정한 압밀침하의 표준편차이다. 표 1에서 볼 수 있듯이 압밀침하량 추정에 사용되는 지반정수들은 모두 정규분포이므로 압밀침하 역시 정규분포를 따를 것으로 판단된다. 이러한 압밀침하량의 평균과 표준편차를 이용하여 특정 위치에서 특정 압밀침하 이상 발생할 가능성을 산정할 수 있다.

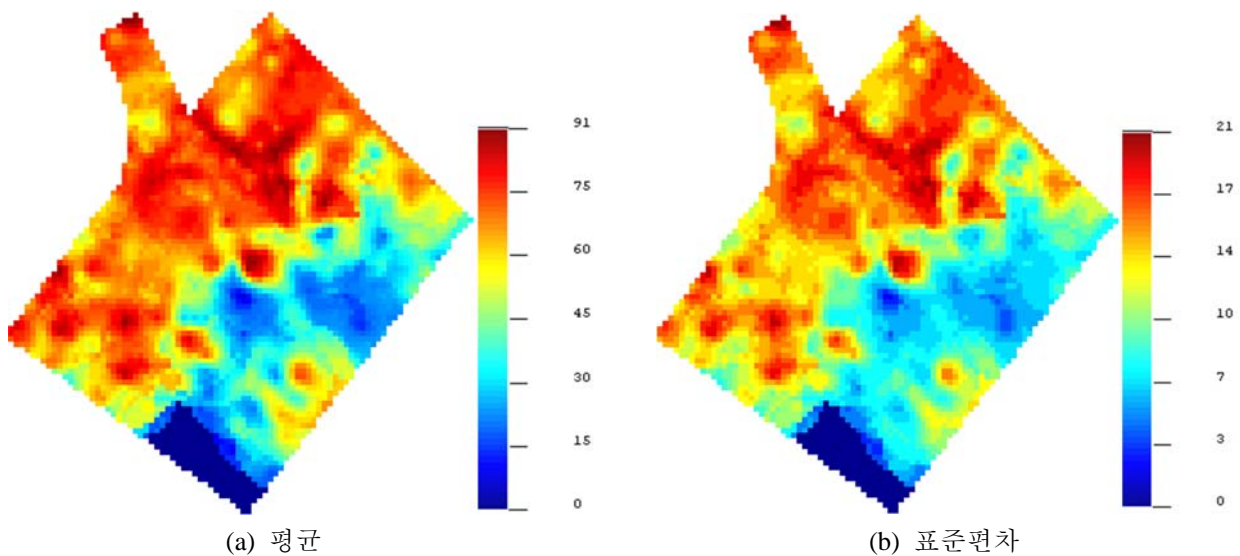


그림 2. 압밀침하량의 평균과 표준편차

결정론적인 방법을 사용할 경우에는 그림 2(a)의 압밀침하 평균의 공간적인 분포만을 이용하여 추가성토계획을 수립할 수 있다. 즉, 압밀침하가 100cm 이상 발생할 경우에는 최종계획 높이인 E.L+7m 아래로 지표면이 내려가 추가성토가 필요하다. 그림 2(a)에서 볼 수 있듯이 송도매립지반에서는 표고 E.L+8m까지 성토를 수행하였을 경우 최대 91cm의 압밀침하가 발생하여 추가성토는 필요 없는 것으로 나타났다. 그러나 확률론적 방법에 의하면, 그림 3에서 볼 수 있듯이 일부 구간에서는 100cm 이상 압밀침하가 발생할 확률이 최대 0.33 정도된다. 이와 같이 확률론적 방법에서는 분석대상 지역의 압밀침하가 특정 압밀침하 이상 발생할 가능성 즉, 위험도를 평가할 수 있으며, 이러한 위험도 평가결과를 추가성토 계획에 반영할 수 있을 것으로 판단된다. 이와 같이 해안매립지반의 지층분포를 공간적으로 추정할 경우 압밀침하량을 공간적으로 평가할 수 있어 각 위치마다의 압밀층 분포특성을 고려하여 성토계획을 수립할 수 있을 것으로 판단된다.

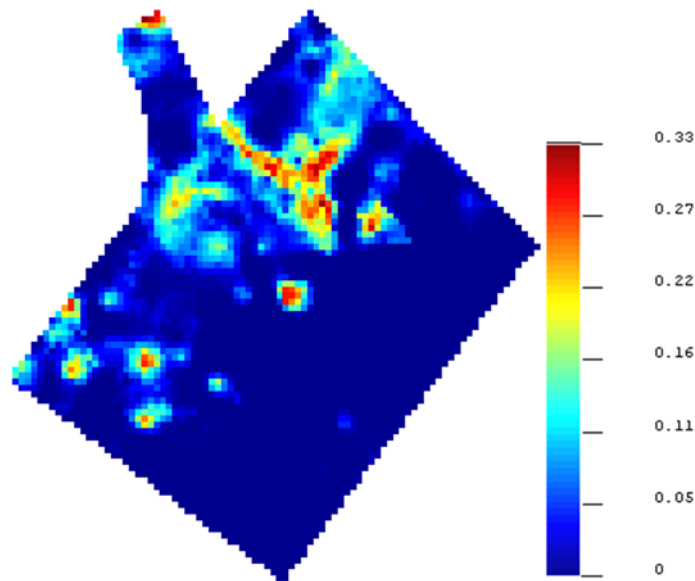


Fig.3. 압밀침하량 100cm 이상 발생확률

5. 결론

본 논문에서는 정규크리깅으로 추정된 지층분포와 지반정수들의 통계량을 이용하여 공간적인 압밀침하의 평균과 표준편차를 분석대상 지반인 인천 송도신도시에 대하여 산정하였다. 지반정수들의 평균과 공간적인 지층분포를 이용하여 산정한 공간적인 압밀침하량을 이용하여 추가성토를 수행해야 하는 영역을 결정하는 데 활용할 수 있었다. 또한, 지반정수들의 변동성을 고려한 확률론적 방법을 이용할 경우에는 압밀침하량이 설계기준을 초과할 가능성 즉, 위험도를 평가할 수 있었으며, 이러한 위험도 평가결과를 연약지반 설계에 반영할 수 있는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 포스코건설의 “송도 매립지반 지반조사자료 DATABASE 구축 및 압밀침하량 평가” 연구과제의 일부분으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Ang, A. H-S., and Tang, W. H. (2007), Probability Concepts in Engineering, Emphasis on Applications to Civil and Environmental Engineering, 2nd Edition, New York, John Wiley & Sons, pp.278-305
2. Benjamin, J. R., and Cornell, C. A. (1970), Probability, Statistics, and Decision for Civil engineers, McGraw-Hill Book Company, New York
3. Baise, L. G., Higgins, R. B., and Brankman, C. M. (2006), "Liquefaction hazard mapping-Statistical and spatial characterization of susceptible units", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 132, No. 6, pp.705-715.
4. Chiasson, P., Lafleur, J., Soulie, M., and Law, K.T.(1994), "Characterizing spatial variability of a clay by geostatistics", Canadian Geotechnical Journal, 32, pp.1-10.
5. Duncan, J. (2000), "Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol.126, No.4, pp.307-316
6. U.S. Army Corps of Engineers. (1997), Engineering and design introduction to probability and reliability methods for use in geotechnical engineering, Engr. Tech. Letter No. 1110-2-547, Department of the Army, Washington, D.C., www.usace.army.mil/usace-docs(30Sept.1997)
7. U.S. Army Corps of Engineers. (1998), Risk-based analysis in geotechnical engineering for support of planning studies, Engr. Tech. Letter No. 1110-2-554, Department of the Army, Washington, D.C., www.usace.army.mil/usace-docs(27Feb.1998)
8. Wolff, T. F. (1994), Evaluating the reliability of existing levees, Rep., Res. Proj.: Reliability of existing levees, prepared for U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station Geotechnical Laboratory, Vicksburg, Miss.