

확률론적 방법에 의한 지반조사 자료의 설계정수 산정

Design-Parameter Computation of Subsurface Investigation Profile on Probability Method

신은철¹⁾, Eun-Chul Shin, 김종인²⁾, Jong-In Kim, 이준철³⁾, Jun-Cheol Lee

¹⁾ 인천대학교 공과대학 토목환경시스템공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil and Environmental System Eng., University of Incheon

²⁾ 인천대학교 대학원 토목환경시스템공학과 박사과정, Ph. D. Student, Dept. of Civil and Environmental System Eng., University of Incheon

³⁾ 인천대학교 대학원 토목환경시스템공학과 석사과정, M.S. Student, Dept. of Civil and Environmental System Eng., University of Incheon

SYNOPSIS : The stability of structure, effectiveness of design and construction are very important factors in soil-structure design. The design-parameter is based on the test through laboratory-test and field-test. There are two ways to obtain the design-parameter. One is to through test, and the other is through relative documents and references. Recently, statistics has been used to get reliable data. In this study, Kriging method as Geostatistics and the theory of Bayesian's inference are used and the design-parameters are obtained. As the result of this study to the design-parameter is reliable and information about soil condition and soil properties in design and construction is easily found.

Key words : Geostatistics, Kriging method, theory of Bayesian, Kolmogorov-Smirnov, Quartile

1. 서론

시공현장에서 지반 구조물을 설계할 때 이용되는 설계정수는 구조물의 안정적이고 경제적인 설계와 시공을 위해 중요한 요인이 된다. 이런 설계정수의 산정은 대상지역 토질의 실내시험을 통한 기본물성 시험 및 현장시험등을 기초로 하여 얻어진다. 이렇게 얻어지는 정보는 소요되는 시간과 경제적 문제로 인해 너무나 제한적이며 불확실성을 내포하고 있으므로, 이러한 문제를 해결하고, 신뢰성을 가지는 데이터의 산출을 위해 통계학적 방법이 근래에 많이 사용되고 있다. 통계학적 기법중의 하나로 지구통계학적(Geostatistics) 기법인 Kriging보간법과 통계학적 추정법인 베이지안(Bayesian) 추정이론을 도입하여 설계정수를 산정하였다. Kriging 보간법은 공간상의 미지의 데이터를 보간할 때 사용하며, 공간적으로 상호연관된 데이터를 예측하는데 유용하게 이용되고 있다. 베이지안 추정기법은 연구대상 지역의 설계정수 산정을 위한 실험이나 조사에서 얻어진 결과값 및 기존에 관측되었던 데이터 정보를 결합하여 필요로 하는 설계정수를 산정할 수 있다. 이러한 설계정수 추정방법은 최근들어 많은 시공현장에서 쓰여지고 있고, 모든 분야에서 신뢰성 있는 결과값을 추정해 내는데 목적을 두고 있다. 본 연구는 시추조사 자료를 통하여 Kriging 보간법을 실시하였으며, 결과값을 기준으로 설계지역의 Zoning화를 실시하였다. Zone이 결정되는 구간에서는 그 구간내의 지반조사 자료를 이용하여 Kriging분석을 수행하여 지반정수의 변화가 뚜렷한 경계부를 찾아내어 평면 및 심도에 대하여 지역분할을 하였고, 지역분할의 타당성을 검증하기 위하여 사분위수 분석을 이용하였다. 연구대상 지역의 지반 물성치에 대한 분포를 히스토그램에 정규분포곡선을 중첩시킴으로써, 각 물성치들의 확률분포함수에 대한 가설을 세우고 그 가설에 대한 검정을 위해 Kolmogorov-Smirnov적합도 검정을 수행하였다. Zoning화 된 설계지역에서 점토층의 심도를 기준으로 분류된 지층의 물성치 데이터와 기존의 데이터를 베이지안 추정으로 분석하여 각 구역별

가장 적합한 대표 물성치를 산출하였으며, 여기서 결정된 물성치는 모든 설계정수에 이용되는 값으로 구역별 대표값으로 설정하였다.

2. 지구통계학기법을 활용한 지반정수 평가

2.1 대상지역 지반정수의 수직적 분포

대상지역을 그림 2.1과 같이 종방향으로 육상과 해상의 2개, 횡방향으로 7개의 단면을 선택하여 Kriging 기법을 적용하여 각 물성치의 분포를 파악하였고, 지역분할에 적용하였다. 또한 위·경도의 절대좌표를 사용할 때 육상부와 수상부가 중첩되어 발생하는 왜곡현상을 해소하기 위해 대상지역의 단면을 Y축을 기준으로 20.6° 회전시켜서 변환된 국부 좌표를 사용하였다. 그림 2.2와 2.3은 좌표 변환 전·후의 단면을 나타낸 것이다.

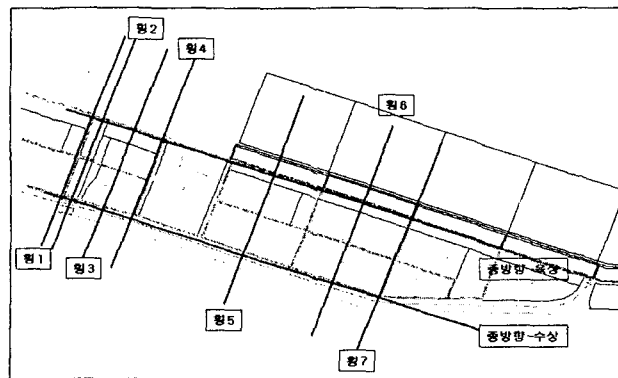


그림 2.1 Kriging 분석에 사용된 단면

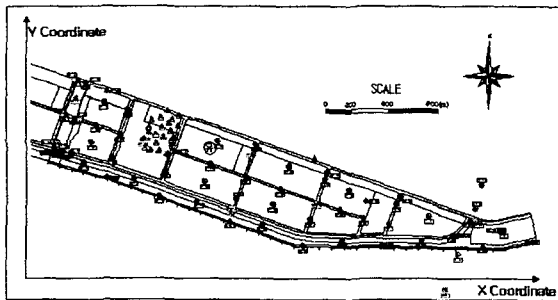


그림 2.2 좌표변환 전의 단면

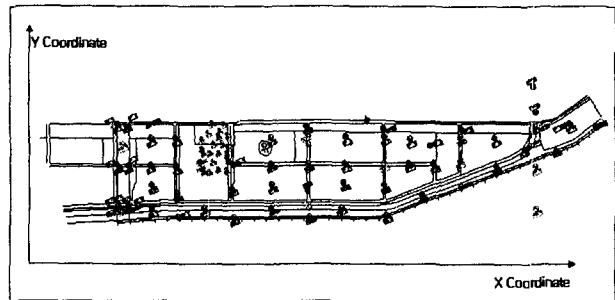


그림 2.3 좌표전환 후의 단면

2.2 물성분포에 따른 지역구분

Kriging 기법을 활용하여 횡방향 분석결과 물성분포는 육상에서 약 60m 떨어진 지점에서 수상과 육상의 구분이 이루어짐을 알 수가 있었으며, 함수비를 비롯한 물성분포를 분석하면, 수상부나 육상부 모두 단면내 모든부분이 간석지선을 기준으로 비슷한 범위내에서 수상부, 육상부 구분이 이루어짐을 알 수 있었다. 그림 2.4는 물성분포에 따른 지역 분할에 관하여 나타내었다.

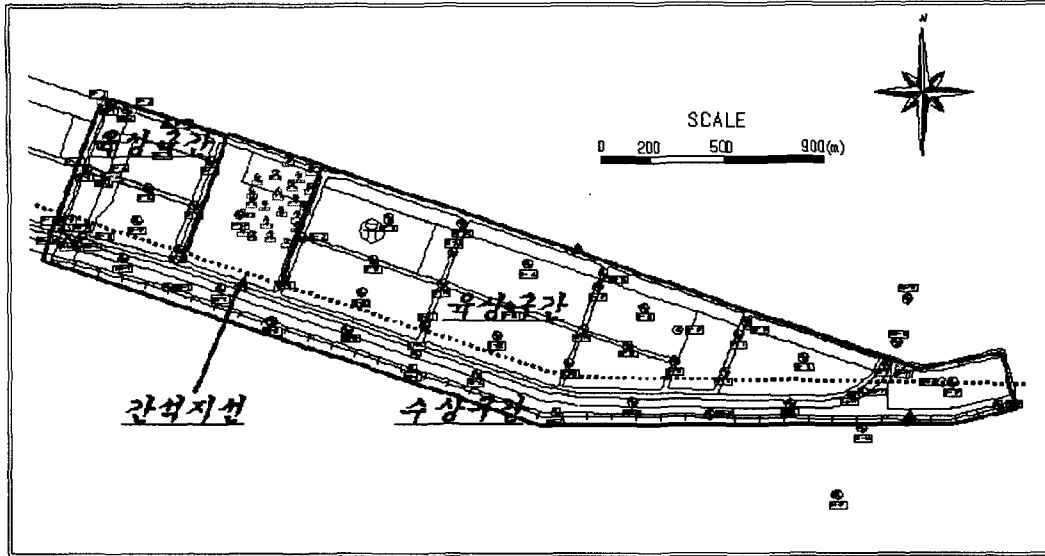
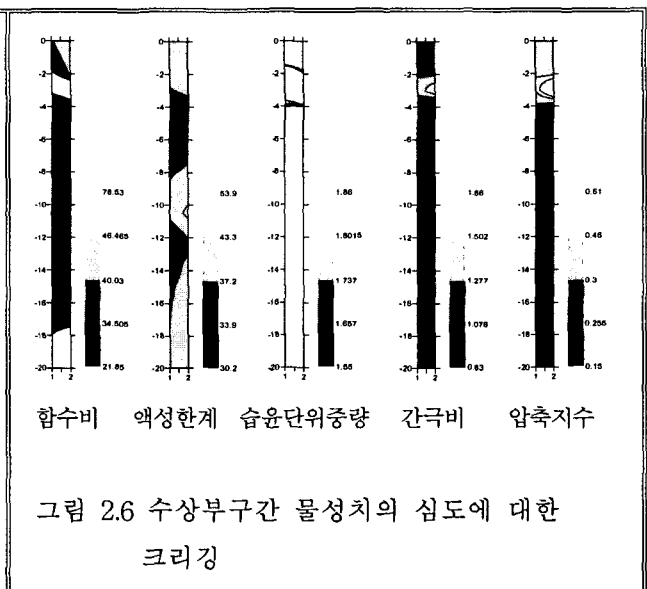
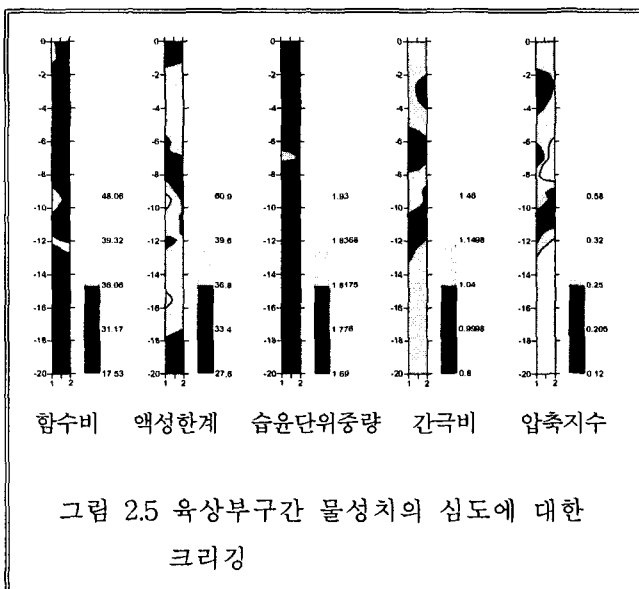


그림 2.4 설계지역 분할결과

2.3 점토층 두께에 대한 Zone별 층구분

2.3.1 육상부, 수상부 지반 정수의 특성

육상부와 수상부 각각의 물성치 데이터에 대한심도별 Kriging작업을 통해 연구대상 지역 전체에 대한 심도분할 검증을 하였으며 지역내 물성치들은 통계분석을 통해 사분위수 범위의 값들을 도출해 내었다. 육상부와 수상부의 함수비, 습윤단위 중량, 간극비, 압축지수등 물리적 특성을 사용하여 육상부 점토층 두께에 대한 Kriging추정은 아래의 그림 2.5와 2.6에 나타내었고, 그림에서 우측 하단에 있는 bar에서는 최하단부터 최소값, 1사분위수, 2사분위수, 3사분위수, 4사분위수를 나타내어 주고 있다.



2.3.2 육상부와 수상부의 비배수 전단강도

비배수전단강도의 Kriging 추정결과 육상부 전단강도의 경우 지표면을 중심으로 0~4m구간과 4m~10m구간, 10m이상의 3구간에서 각각 최소값~2사분위수, 1사분위수~3사분위수, 3사분위수~최대값으로

경계가 나누어지고 있음을 알수가 있으며, 점토층 두께에 따라 증가하는 경향을 보이고 있다. 수상부의 전단강도의 경우 지표면을 중심으로 0~3m구간과 3m이상의 구간으로 점토층 구분을 하였으며, 경계의 조건은 3m까지는 전체적인 사분위수 범위에 의해 최소값~1사분위수와 1사분위수~최대값까지의 분포가 나타남을 알 수가 있다. 심도 3m를 기준으로 경계가 나누어지며, 심도 증가에 따라 수상부의 비배수전단강도는 증가하는 경향을 보임을 알 수가 있다. 비배수전단강도의 심도에 대한 Kriging의 결과는 아래 그림 2.7과 같다.

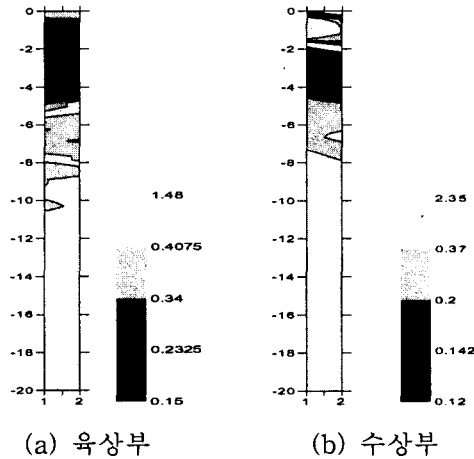


그림 2.7 전단강도의 심도에 대한 크리깅

3. 지반물성치들의 확률분포 함수 및 검정

확률이론에서는 자료의 분산성 및 시험시 오차에 대한 불확실성을 확률변수로서 표현하며 이들 값들은 일정한 수치로 표현되는 것이 아닌 어떤 가능한 영역내의 값에서 변화하는 함수식으로 표현한다. 확률변수의 분포함수를 합리적으로 결정하는 것은 확률변수의 분포특성을 파악할 수있는데 도움이 된다. 1970년도부터 흙에 대한 물성치들의 확률분포에 관한 연구가 많이 진행되어 왔다. 이들 결과에 의하면 밀도, 점착력, 간극비, 함수비, 포화도, 액성한계, 소성한계, 소성지수, 압밀계수, 전단저항각등의 물성치들은 정규분포를 나타내는 것으로 조사되었다. 이러한 이론을 바탕으로 연구대상지역의 지반 물성치에 대한 분포형태를 히스토그램으로 나타내어 그 위에 정규분포 곡선을 중첩시킴으로써 결과의 분포형태를 확률변수 분포와 정규분포 형태의 유사성이나 차이점으로 도출해 낼수가 있으며, 이러한 결과에 신뢰성을 부여하기 위해 Kolmogorov-Smirnov test를 이용하여 정규성에 대한적합도를 검정하여 신뢰성을 높였다.

3.1 육상부 · 수상부 비배수전단강도 확률분포함수 및 검정

연구대상 지역에서 실시한 시험의 결과를 분석하여 대상구간의 비배수전단강도 확률분포를 알아보기 위하여 그림 3.1과 3.2에서와 같이 히스토그램을 이용하여 나타내었다. 가설검정이론에서 Kolmogorov-Smirnov 검정 통계량 D를 보게되면, D값에 의해서 가설이 채택되거나 기각되기도 함을 알 수가 있는데, 이는 통계프로그램을 이용하여 구할 수가 있으며, 표 3.1과 3.2에서는 통계프로그램을 이용하여 육상부와 수상부 전단강도의 정규성 검정결과를 나타내었다.

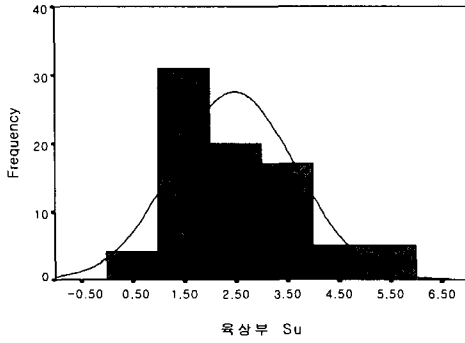


그림 3.1 육상부 비배수전단강도

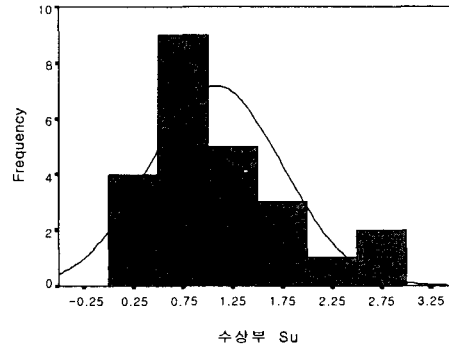


그림 3.2 수상부 비배수전단강도

표 3.1 육상부 전단강도의 정규성 검정결과

귀무가설	왜도	첨도	Kolmogorov D
정규분포	0.864	0.579	0.102
D=0.102 < d(α=0.05)=0.150 정규분포채택			

표 3.2 수상부 전단강도의 정규성 검정결과

귀무가설	왜도	첨도	Kolmogorov D
정규분포	1.109	0.517	0.154
D=0.154 < d(α=0.05)=0.278 정규분포채택			

3.2 육상부 · 수상부 구간의 물성치 확률분포함수 및 검정

다음의 표 3.3과 3.4는 육상부와 수상부 구간의 물성치에 대한 정규성 검정을 실시한 것이다.

표 3.3 육상부 구간 물성치 정규성 검정결과

함수비	귀무가설	왜도	첨도	Kolmogorov D
	정규분포	-0.165	-0.387	0.070
D=0.070 < d(α=0.05)=0.122 정규분포채택				
간극비	귀무가설	왜도	첨도	Kolmogorov D
	정규분포	0.725	0.998	0.120
D=0.120 < d(α=0.05)=0.190 정규분포채택				
압축지수	귀무가설	왜도	첨도	Kolmogorov D
	정규분포	1.017	1.063	0.150
D=0.150 < d(α=0.05)=0.192 정규분포채택				

표 3.4 수상부 구간 물성치 정규성 검정결과

함수비	귀무가설	왜도	첨도	Kolmogorov D
	정규분포	0.330	0.115	0.049
D=0.049 < d(α=0.05)=0.200 정규분포채택				
간극비	귀무가설	왜도	첨도	Kolmogorov D
	정규분포	-0.745	0.684	0.222
D=0.222 < d(α=0.05)=0.375 정규분포채택				
압축지수	귀무가설	왜도	첨도	Kolmogorov D
	정규분포	1.456	2.285	0.259
D=0.259 < d(α=0.05)=0.863 정규분포채택				

4. 베이저안 기법에 의한 설계정수 추정

베이저안 기법은 미지의 확률변수에 대한 현재의 정보를 새롭게 하기 위하여 사전 및 표본정보를 결합하여 사용하는 통계기법이다. 추정 대상 현장의 표본정보는 기초조사 자료 및 연구대상 지역에서 실시된 자료로 우도확률(likelihood probability)을 통해 도입되고, 사전정보는 이전에 조사된 지반조사자료를 사전확률(prior probability)로 적용하여 분석함으로써 그 결과 이용할 수 있는 모든 정보를 포함하는

사후확률(posterior probability)로부터 설계 정수를 추정하게 된다. 베이시 정리를 이용한 추정법을 베이시안 추정이라고 하고, 베이시안 추정값은 확률변수의 불확실성을 최소화하는 추정법으로, 최량 추정의 선택기준인 불편성(unbiasedness), 효율성(eficiency), 일치성(cocistency), 충분성(sufficiency)을 만족시키는 추정값이 된다. 본 연구 보고서에서 추정하고자 하는 설계정수는 함수비, 액성한계, 습윤단위중량, 압축지수, 간극비, 비배수전단강도등이 있으며, 베이시안 기법을 이용한 사후확률 분포로부터 점추정 및 95% 신뢰구간의 구간 추정값을 추정하였다.

4.1 육상부와 수상부 지역에 대한 설계정수의 베이시안 추정

육상부와 수상부 지역에서의 점토층은 심도에 따라 물성치의 변화와 분포범위가 크지 않아 육상부와 수상부 전체에 대해서 같은 설계정수를 적용하였으며, 비배수전단강도는 물성치들과는 달리 심도에 따라 전단강도의 증가율이 발생해 심도별로 구간을 설정해 베이시안 기법을 이용해 사후확률 분포를 추정하였다. 각각의 설계정수들을 통계 프로그램을 이용하여 심도별 사전정보와 표본정보의 표준편차, 표준오차를 구할 수가 있었으며, 아래의 식을 통해 확률 분포를 구할 수 있다.

$$N\left(\frac{\hat{x}\tau^2 + u\sigma^2}{\tau^2 + \sigma^2}, \frac{\sigma^2\tau^2}{\sigma^2 + \tau^2}\right) \quad (1)$$

일반적인 평균값으로 널리 이용되고 있는 점추정은 실험결과를 잘 설명해 줄 수 있는 추정량이지만 항상 그것이 만족한 결론을 제시해주는 것은 아니며, 어느정도의 오차가 발생하게 된다. 구간 추정은 이러한 문제점을 보완하여 추정값을 신뢰구간으로 표현하여 추정값을 결정하게 된다. 구간 추정의 개념으로 이용되는 신뢰구간은 추정값이 일정한 확률을 갖고 확률분포에서 계산된 구간에 속하도록 상한치와 하한치를 정하는 것으로 아래의 식에 의해 정의되며, 육상부와 수상부 모두 설계정수들은 95%신뢰구간으로 구간 추정을 실시 하였다.

$$P(\bar{X} - k\sigma' \leq \mu \leq \bar{X} + k\sigma') = 1 - \alpha \quad (2)$$

여기서, \bar{X} 와 σ' 는 각각 베이시안 추정값 및 표준편차이다. 추정값이 포함되기를 기대한 구간을 $(1 - \alpha) \times 100\%$ 의 신뢰구간이라고 하고, 이 구간의 상한치와 하한치를 $\bar{X} \pm k\sigma'$ 로 표현하며 이를 신뢰한계라고 한다. 아래 표 4.1~표 4.4는 육상구간과 수상구간 설계정수에 관한 베이시안 추정값 및 구간 추정값을 나타내었다.

표 4.1 육상부지역 점토층의 비배수전단강도에 대한 베이시안 추정 및 구간추정값

깊이/통계량		구분		베이시안추정(t/m')	구간추정(t/m')
		사전정보(t/m')	표본정보(t/m')		
상부층 (0~4m)	추정값	2.39	2.15	2.20	1.30~3.10
	표준편차	1.05	0.51	0.46	
중간층 (4m~10m)	추정값	2.39	3.8	3.03	1.34~4.72
	표준편차	1.17	1.28	0.86	
하부층 (10m이상)	추정값	3.21	5.41	4.33	2.33~6.33
	표준편차	1.45	1.43	1.02	

표 4.2 수상부지역 점토층의 비배수전단강도에 대한 베이지안 추정 및 구간추정값

구 분		사전정보(t/m ²)	표본정보(t/m ²)	베이지안추정(t/m ²)	구간추정(t/m ²)
깊이/통계량					
상부층 (0~3m)	추정값	1.68	1.72	1.71	1.38~2.04
	표준편차	0.47	0.18	0.17	
하부층 (3m이상)	추정값	2.05	2.82	2.13	1.27~3.0
	표준편차	0.47	1.34	0.44	

표 4.3 육상부 지역 점토층의 물성치에 대한 베이지안 추정 및 구간추정값

함수비 (%)		사전정보	표본정보	베이지안 추정	구간 추정
	추정값	38.75	35.84	36.66	27.80~45.52
표준편차	8.50	5.33	4.52		
액성한계 (%)		사전정보	표본정보	베이지안 추정	구간 추정
	추정값	35.34	37.25	36.47	27.55~45.39
표준편차	7.14	5.91	4.55		
습윤단위중량 (tonf/m ³)		사전정보	표본정보	베이지안 추정	구간 추정
	추정값	1.86	1.81	1.84	1.78~1.90
표준편차	0.04	0.05	0.03		
간극비		사전정보	표본정보	베이지안 추정	구간 추정
	추정값	1.86	1.81	1.84	1.78~1.90
표준편차	0.04	0.05	0.03		
압축지수		사전정보	표본정보	베이지안 추정	구간 추정
	추정값	0.31	0.28	0.31	0.21~0.41
표준편차	0.06	0.1	0.05		

표 4.4 수상부 지역 점토층의 물성치에 대한 베이지안 추정 및 구간추정값

함수비 (%)		사전정보	표본정보	베이지안 추정	구간 추정
	추정값	38.78	42.73	39.41	28.92~49.90
표준편차	5.84	13.42	5.35		
액성한계 (%)		사전정보	표본정보	베이지안 추정	구간 추정
	추정값	39.73	39.32	39.71	36.73~42.69
표준편차	1.56	6.66	1.52		
습윤단위중량 (tonf/m ³)		사전정보	표본정보	베이지안 추정	구간 추정
	추정값	1.62	1.73	1.72	1.52~1.92
표준편차	0.31	0.1	0.1		
간극비		사전정보	표본정보	베이지안 추정	구간 추정
	추정값	1.19	1.29	1.21	0.96~1.46
표준편차	0.15	0.28	0.13		
압축지수		사전정보	표본정보	베이지안 추정	구간 추정
	추정값	0.39	0.35	0.38	0.24~0.52
표준편차	0.09	0.13	0.07		

5. 결론

지반공학에서 구조물 설계시 사용되는 설계정수는 지반조사와 실내시험, 현장시험, 문헌자료를 통해 산정된다. 그러나 지반조사시의 샘플링, 실내시험 결과의 산포, 현장시험의 외적요인, 문헌자료의 대표성 문제 등으로 인해 설계정수들은 불확실성을 내포하고 있다. 이러한 설계정수의 불확실성을 극복하고, 통계적 추정기법을 사용하여 보다 신뢰성 높은 설계정수를 얻기 위해 Kriging 기법을 통한 지역구분, 베이지안 추정기법을 이용한 설계정수 산정을 통해 합리적인 설계와 시공을 도모할 수 있게 하였으며, 세부 결론은 다음과 같다.

1. 토질 물성치분포를 검토한 결과 종방향에 대해서는 지역에 따라 존재하는 양상을 보여 특별한 경계부를 찾기 어렵고 그 분포범위가 매우 좁아 종방향에 대해서는 지역구분을 할 필요가 없었으며, 횡방향에 대해서는 수상부와 육상부의 경계부에서 토질 물성치의 변화가 보여 수상부와 육상부로 지역구분을 하였다.
2. 평면적 구역분할을 실시한 후 각 구역, 육상부와 수상부에서의 심도에 대한 물성치 변화를 통해 심도에 대한 구역분할을 위해 사용한 토질 물성치는 평면구역분할에 사용한 물성치와 동일하게 사용하였다. 육상부에 대한 심도별 토질 물성치 분포를 살펴보면 심도 20m에 대해 1m~2m의 두께로 2~3층의 얇게 물성치의 변화가 나타났다. 물성치를 종합하여 볼 때 특별한 심도에서의 토질 물성치의 변화는 나타나지 않아 육상부에서 심도에 대한 구역구분은 필요하지 않았다. 수상부의 경우 또한 육상부와 유사한 분포범위를 보이며 물성치의 변화가 발견되지 않았다. 따라서, 연구대상지역의 심도에 대한 구역분할은 필요하지 않았다.
3. 분할된 구역별 토질 물성치의 대표값을 산정하기 위해 베이지안 추정법을 사용하였다. 추정에 사용되는 사전정보는 기존 조사를 통해 얻은 물성치를 사용하였고, 표본정보는 금회에 실시한 지반조사 자료를 사용하였다. 베이지안 추정을 이용한 토질 물성치는 육상부 지역에서 함수비는 36.66%, 액성한계는 36.47%, 습윤단위중량은 1.84tonf/m³, 간극비는 1.07, 압축지수는 0.31로 추정되었다. 수상부의 경우 함수비는 42.73%, 액성한계는 39.32%, 습윤단위중량은 1.72tonf/m³, 간극비는 1.29, 압축지수는 0.38로 나타났다.
4. 베이지안 추정값은 표본의 평균과 비교해 2%~33%의 차이가 있고, 표준오차는 8%~38%정도 감소되었다. 표준오차의 감소는 베이지안 추정값이 표본만으로 얻은 값보다 불확실성이 감소된 값이라는 것을 의미한다. 따라서, 베이지안 추정값은 신뢰성 있는 값으로 판단된다.

참고문헌

1. 배도선, 김성인 (1993), 베르누이 시행의 통계적 분석, 민음사
2. 원태연, 정성원 (1998), 통계조사분석, SPSS아카데미
3. 배영주 (2001), SPSS활용 현대통계학의 이해와 응용, 교우사
4. 이의숙, 임용빈, 성내경, 소병수(2000), 통계학입문, 京文社.
5. 이필영, 이해용 (1996), 통계학입문, 자유아카데미
6. 김병희, 백호유, 박태룡, 오현숙, 장인홍 (2001), 베이지안 통계계산, 자유아카데미
7. 차영준, 송채기, 김종태, 이우동, 이재만, 김달호 (2001), 비모수검정, 자유아카데미
8. Kitanidis, P. K. (1997), Introduction to Geostatistics : Applications to Hydrology, The Press Syndicate of the University of Cambridge.
9. John C. Davis (2002), Statistics and Data Analysis in Geology, John Wiley & Sons
10. Shahrokh Rouhani, R, Mohan Srivastava, Alexander J. Desbarats, Marc V. Cromer, and A. Ivan Johnson editars(1996), Geostatistics for Environmental and Grotechnical Applications, ASTM
11. Olea, R. A. (1999), Geostatistics for engineers and earth scientists, Kluwer Academic Publishers.
12. Smith, G. N. (1986), Probability Statistics in Civil Engineering : An Introduction, Collins Professional and Technical Books.