

배수재 시공의 최적화를 위한 신뢰성 해석

Reliability Analysis for Optimization of Construction Method of Drain Material

안현민¹, 김문채², 김대현^{3*}

Hyeon-Min Ahn¹, Moon-Chae Kim², Daehyeon Kim^{3*}

¹Member, Graduate Student, Department of Civil Engineering, Chosun Univ., 309, Philmoondae-Ro, Dong-gu, Gwangju, 501-759, Republic of Korea

²Member, Graduate Student, Department of Civil Engineering, Chosun Univ., 309, Philmoondae-Ro, Dong-gu, Gwangju, 501-759, Republic of Korea

³Member, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Chosun Univ., 309, Philmoondae-Ro, Dong-gu, Gwangju, 501-759, Republic of Korea

ABSTRACT

In this paper, reliability analysis was done on the characteristics of consolidation and settlement for the inner temporary dike where a weak ground improvement construction was applied. When the consolidation analysis on the foundation ground was done, the following conclusions were obtained by conducting the stability analysis on the effect of space of drains, the effect of consolidation time, and the residual settlement and differential settlement. When construction was done with a drain space which satisfied 95% probability of reaching a target consolidation in each divided area, the occurrence of a residual settlement was within the range, which did not exceed 10cm. It was shown that there was almost no possibility of the occurrence of differential settlement, which was above the permissible differential settlement slope.

요 지

가 , PVD
10%
95%
10cm 가 가

Keywords : Consolidation, Stability, Drain, Residual Settlement

1. 서 론

우리나라가 고속 경제성장과 더불어 경기부양을 위해 사회간접자본에 대한 투자 확대와 더불어 공업용지 및 주

거용지의 수요가 날로 증가 되고 있고, 대규모 부지를 필요로 하는 신항만, 대규모 공업단지, 공단, 주거단지를 조성할 필요가 있으나, 국토의 면적이 협소하고 또한 최근 산업의 급격한 발전과 인구의 증가로 인해 조건이 양호한 사업지구의 확보가 어려워짐에 따라 토질조건이 불량하고, 개발여건이 열악한 연약지반으로의 전환이 불가피하므로 이에 대한 적극적인 대책방안이 요구되고 있고, 경제적으로

Received 26 Aug. 2014, Revised 28 Nov. 2014, Accepted 1 Dec. 2014

*Corresponding author

Tel: +82-62-230-7607; Fax: +82-62-220-2687

E-mail address: dkimgeo@chosun.ac.kr (D.H. Kim)

수요자의 욕구를 충족시킬 수 있는 해안용지의 개발이 증가되고 있다(Park, 2009).

특히, 항만의 경우 하부 기초 지반 설계과정 중 엔지니어가 접하게 되는 구조물의 안정해석은 현장지반에 대한 불충분한 자료와 파괴 메커니즘의 가변성으로 인하여 그 결과에 불확실성을 내포하고 있다. 안전율(Factor of safety)의 개념을 기초로 하는 확정론적 방법(Deterministic analysis)의 경우 어느 정도의 안전여유를 갖고 있는가를 파악하기 위하여 경험적인 안전계수(Safety factor)를 도입하고 있다. 이 경우 분산(Variability)을 고려하지 않은 채 단일 대표 값만을 이용하여 안전성을 판단하므로 가변성과 불확실성을 효과적으로 정량화하여 해석에 적용할 수 없는 단점이 있다.

이중 신뢰성해석(Reliability analysis)이란 확률론적 접근방법에 의한 해석으로 토질 정수들이 갖고 있는 불확실성을 고려하기 위하여 각 정수들은 분산성을 갖는 확률변수적인 파괴확률(Probability of failure)로서 산정하게 되며, 확률변수의 민감도에 따른 파괴확률의 변화도 알 수 있다. 따라서 불확실성을 정량적으로 나타내는 신뢰성 해석은 기존의 정성적인 개념의 안전계수를 이용하는 확정론적인 해석을 보완할 수 있는 방법이라 할 수 있다.

국외의 경우, 신뢰성이론은 Freudenthal(1947)과 Pugsley(1955)에 의해 발표되면서 유럽과 북미지역을 중심으로 신뢰성에 기반을 둔 구조물 설계기준에 관한 연구가 활발히 진행되었다. 특히 Cornell(1969)이 평균 제1계 2차모멘트 방법을 발표한 이래 신뢰성 방법의 적용에 대한 연구가 빠른 속도로 진행되었다. 그러나 Cornell(1969)의 MFOSM 방법은 확률분포의 범위가 정규분포라야 한다는 제한, 한계상태 함수의 표현 형태에 따른 해의 유일성 결여 등이 문제점으로 지적되어 사용상에 한계가 있었다. 이 때문에 Lind and Hasofer(1974)가 표현 형태에 따른 문제를 해결하였고, Rackwitz and Fiessler(1978)가 비정규분포를 등가정규 분포로 변환하는 알고리즘을 개발하여 확률변수의 분포에 대한 제한문제를 해결하였다. 또한 Sinouzuka(1983)가 이때까지의 연구에 확률변수의 상관관계를 포함시켜 AFOSM방법을 완성하였고, 그 후 구조물의 신뢰성해석에 적용되고 있다.

특히, 지반의 경우 불확실성에 대한 요소들이 많기 때문에 흙 특성의 변동성은 지반구조물 해석시 불확실성을 발생시키는 주요한 원인이 된다. Phoon and Kulhawy(1999)은 흙이 가지는 공간적인 변동성에 대하여 여러 가지 요소

를 간단한 모델로 표현하였고 Lacasse and Nadim(1996)은 점토에 대한 과압밀 비의 확률밀도 함수가 정규 또는 로그정규 분포하며 모든 종류의 흙에 대한 간극비, 간극률, 초기 간극비는 정규분포 한다는 연구 결과를 제시하였다.

국내에서의 신뢰성 해석기법은 연약지반의 암밀침하 예측에 관하여 연구되어졌고, 실측 침하량과 신뢰성이론을 고려한 예측압밀 침하량의 비교, 신뢰성해석 기법을 이용한 연약지반 설계 등에서 연구되어졌다(Lee(2007); Kim et al.(2006); Jin et al.(2012); Lee(2008)). 또한, Kim and Kim(2007)은 배수재 배치간격의 확률론적 해석을 수행하였고, Lee et al.(2006)은 지반의 불확실성을 고려한 연약지반의 침하해석을 수행하였으며, Lee(2008)은 신뢰성 해석 및 부분안전계수 산정에 대한 연구를 수행하였다.

특히, Lee(2007)은 연약지반의 불확실성 인자들에 대한 영향과 변동계수가 침하량에 미치는 영향을 분석하였으며 그 결과, 압축지수와 하중증분, 모델오차 등의 불확실성에 대한 영향인자를 확인하였으며 불확실성 데이터의 분산정도에 따라 압축지수, 간극비, 선행압밀 하중 순으로 영향을 받는 것을 나타내었다.

Lee(2008)는 연약지반의 많은 불확실성에 따라 이론에 의한 침하량과 실측 침하량의 차이가 있어 이를 해결하기 위해 예기된 불확실성을 고려하는 신뢰분석방법을 도입하였다. Taylor's Series 방법을 적용한 신뢰성 이론 분석결과, 실측 암밀침하량에 잘 부합한다고 나타내었다. 따라서 연약지반에 상재하중에 따른 최종침하량 산정할 경우 신뢰도해석법의 적용이 타당하고 합리적이다 라고 하였다.

따라서 본 연구에서는 연약지반의 지반정수를 산출한 후 토질정수의 불확실성을 고려한 신뢰성 해석법을 도입 해석하여 실제 시공되는 배수재의 타설 간격에 대한 신뢰성 해석을 수행하여 안정성을 높이는데 목적이 있다. 연약지반 개량공법을 적용한 내부가호안의 암밀침하 특성을 신뢰성 해석을 이용하여 분석하였으며, 이를 통해 PVD 최적 타설 간격을 설정하였고, 외곽호안은 암밀기간 변화에 따른 잔류침하에 대해 안정성을 확보하는지를 검토하고자 하였다.

2. 검토대상 및 구간

2.1 검토대상

본 연구는 설치된 연약지반의 침하특성과 PVD간격 결

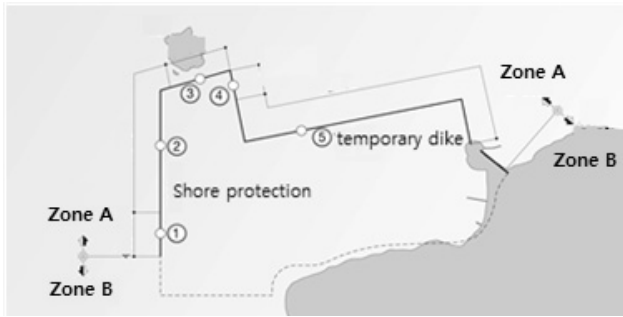


Fig. 1. Site of reclamation of dredged soils

정에 관한 신뢰성해석에 관한 연구로써 항만 부두 준설토 투기장 축조공사를 대상으로 하였다. 신뢰성해석을 위하여 지반의 제반 토질정수 특성을 파악하고, 지반개량공법에 대한 신뢰성해석을 하여 최적의 시설계획 수립을 위한 기초자료를 제공하는데 그 목적이 있다. Fig. 1은 준설토 투기장 축조공사 위치도이다.

Zone A, B 영역은 지구통계학적 기법을 이용하여 2개의 설계지역으로 해석영역을 구분 반영하였고, 토공운영 현황에 따라 Section 5단계로 영역을 구분하였으며, 각 구역별 명칭을 A-1~E-4로 나누었다.

2.2 검토구간

본 연구에서는 연약지반 개량공법을 적용한 내부가호안의 압밀침하 특성을 신뢰성 해석을 이용하여 분석하였

으며, 이를 통해 PVD 최적 타설 간격을 설정하였고 외곽 호안은 압밀기간 변화에 따른 잔류침하에 대해 안정성을 확보하는지를 검토 하였다. 검토대상 및 시설물의 상세단면은 Fig. 2와 같으며, 연구의 범위 및 방법은 하부 기초 지반의 압밀 및 침하해석을 통해 압밀 지반정수를 산정하여 데이터를 평균, 분산, 분포형태로 분석한다. 분석된 데이터를 참고로 배수재 적정 간격 산정과 압밀기간에 따른 허용잔류 침하량을 다양한 적용기법을 통해 신뢰성 해석을 진행하여 최적 타설 간격 및 잔류침하에 대한 안정성을 확보를 목표로 한다.

2.3 검토대상에 대한 PVD 간격결정 및 기본물성

배수재 타설 간격(2.0×2.0m)에 따른 최종침하량에 도달하는 압밀기간 및 시간경과에 따른 압밀도의 변화를 확정적 방법으로 분석을 실시한 결과 모두 목표 기간 내에 목표 압밀도인 99%에 도달하는 것으로 분석되었다. 따라서 안정성 측면과 경제성 측면을 모두 고려해 볼 때 배수재를 2.0×2.0m 간격으로 타설할 경우 모든 구역에서 목표 압밀도 99%에 달하는 것으로 분석되어 안정성 측면과 경제성 측면을 모두 만족할 수 있는 것으로 판단하여 배수재 타설 간격을 2.0×2.0m로 결정하였다.

본 연구에 사용된 기본물성 및 토층특성은 다음 Table 1과 같다.

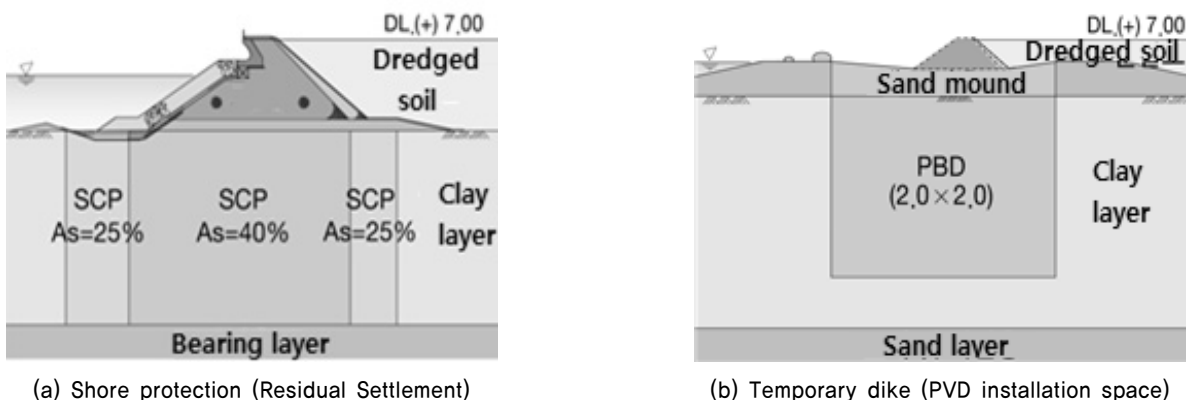


Fig. 2. Detailed drawing of facilities

Table 1. Properties of soil layers

Dept (m) (GL)	GS	e0	γ_{sat} (tf/m ³)	Cc	Cs	Settlement reduction coefficient
0~30	2.72	1.95	1.64	0.91	0.129	0.556
30 more	2.72	1.51	1.51	0.70	0.129	0.556

Table 2. Classification according to level of reliability design method

Level	Stability	Parameter
Level 1	$R_d \geq S_d$	Design
Level 2	$\beta \geq \beta_T$	Stability
Level 3	$P_f \leq P_{fa}$	Probability of failure

3. 신뢰성 설계 방법

3.1 신뢰성의 개념

신뢰성 해석은 파괴의 가능성을 정량적인 파괴확률로서 표현한다. 신뢰성 해석에 따른 설계는 다음의 3단계 Level이 있다.

Level 1의 방법은 구조물이 한계상태를 넘는 확률이 허용치 이하로 되도록 각 변수의 변동계수를 고려한 특성치와 안전율을 정해서 안정성을 조사한다.

$$\mu_R(1 - \beta T \alpha \delta R) \geq \mu_L(1 + \beta T \alpha \delta L) \quad (1)$$

여기서, δR 과 δL : 각각 저항성분과 하중성분의 분산계수(C.O.V : Coefficient of variation)

설계단계에서 수행되는 구조 안전성을 평가에서는 각 설계변수의 평균값보다는 평균값으로부터 적절하게 편차를 준 공칭 값(Nominal value)을 이용하는 것이 일반적이므로, 저항성분과 하중성분의 공칭 값을 각각 R_n, L_n 으로 표시하고 R_n 과 L_n 의 계수를 각각 Φ 와 Υ 로 두면 식 (2)와 같다.

$$\Phi R_n \geq \Upsilon L_n \quad (2)$$

여기서, Φ : 저항감소계수 / Υ : 하중증가계수, 부분안전계수로 통칭

Level 2의 방법은 각 변수의 확률분포를 자료의 분석이나 추론에 의거하여 정규분포 등 적절한 분포로 가정하여, 내력 및 하중의 평균치와 표준편차로부터 구해지는 안정성 지표인 신뢰성지수(Reliability index)가 목표치를 상회하는 것을 확인한다.

신뢰성지수와 파괴확률을 구하면 다음과 같이 최종적인 신뢰성지수와 파괴확률을 산정할 수 있다.

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} \quad (3)$$

$$P_f = 1 - \phi(\beta) \quad (4)$$

여기서, $\phi(\cdot)$ = 표준정규분포(평균=1.0, 표준편차=0)에 대한 누적확률밀도함수

Level 3은 구조물의 파괴에 관계된 모든 확률변수들의 평균과 분산 및 결합 확률밀도함수를 이용하여 한계상태식이 0보다 작을 확률, 즉 파괴확률을 상대적으로 정확하게 산정하는 방법이다.

이상에서 언급한 3개의 신뢰성 설계법의 Level의 안전성 조사 식 등을 Table 2에 나타내었다.

3.2 민감도 측정

First order reliability method의 장점은 신뢰성지수와 기본 변수에 대하여 기대되는 파괴확률과 신뢰성지수에 대한 민감도를 측정할 수 있게 해준다. 가장 기본적인 민감도 측정은 표준공간에서 Design point의 좌표에 대해서 신뢰성지수, β 의 편미분이고 이것은 식 (5)와 같다.

$$\nabla_y \cdot \beta = \alpha(y^*)T \quad (5)$$

여기서, $\alpha(y^*)T = \frac{\nabla G(y^*)}{|\nabla G(Y^*)|}$, y_i^* : design point

표준공간에서의 Design point의 좌표에 대한 신뢰성지수, β 의 민감도는 연쇄법칙(Chain rule)에 의해서 표준편차의 행렬과 단위 벡터를 곱하여 Gradient vector의 크기를 다음과 같이 측정하여 상관도를 고려한 순수한 변수의 민감도 벡터 ‘ γ ’를 식 (6)과 같이 정의하였다.

$$\gamma(x) = \frac{D \cdot \alpha(y)^T J_{yx}}{|D \cdot \alpha(y)^T J_{yx}|} \quad (6)$$

여기서 D는 y의 표준편차의 Diagonal matrix이고 Jxy는 Jacobian 변환 값이다. 민감도 벡터는 Limit state function(g(x))에서의 Deterministic parameter에 대하여도 구할 수 있다. ‘η’는 Deterministic parameter의 벡터이고, g(x) = (x, η)라면 β의 η에 대한 민감도는 식 (7)과 같은 벡터로 나타낼 수 있다.

$$\nabla_{\eta}\beta = \frac{1}{|\nabla G(y^*)|} \nabla_{\eta}g(x^*,\eta) \quad (7)$$

x의 분포함수를 정의하는 계수, θ에 관한 신뢰성지수, β의 민감도는 식 (8)과 같다.

$$\nabla_{\eta}\beta = \alpha^* \frac{\alpha y^*(x^*,\theta)}{\alpha\theta} \quad (8)$$

여기서, $\frac{\alpha y^*(x^*,\theta)}{\alpha\theta}$ 는 분포계수 θ의 변화에 관한 파괴점에서 표준공간에서의 확률변수의 변화를 나타낸다. 신뢰성지수 β의 확정론적 변수 η나 확률변수 θ에 대한 민감도로부터 일계파괴확률의 민감도는 식 (9), 식 (10)과 같은 관계로 표현된다.

$$\nabla_{\eta}Pfl = \varphi(-\beta)\nabla_{\eta}\beta \quad (9)$$

$$\nabla_{\theta}Pfl = \varphi(-\beta)\nabla_{\theta}\beta \quad (10)$$

여기서, $\varphi(\beta)$: 표준 정규 확률 분포밀도함수

이러한 민감도 값들은 파괴확률에 가장 많은 영향을 주는 변수들을 확인하는데 사용할 수 있고, 문제의 복잡성을 이해할 수 있다.

3.3 입력정수

신뢰성해석기법을 이용하여 압밀침하에 대한 해석을 시행하였는바, 확정론적 해석의 경우 지반정수의 평균값을 적용하게 되지만, 본 신뢰성해석시에는 압밀 지반정수를 확률변수로 하여 평균, 분산값, 분포를 입력변수로 입력하였다.

해석에 이용된 확률변수는 Terzaghi의 1차원 압밀식에 입력되는 압축지수(Cc), 초기간극비(e₀), 단위중량(γ), 원지반과 준설토의 두께(H)와 Hansbo 식에 입력되는 준설토층의 압밀계수(Ch), 교란지역 투수계수(Ks), 수평투수

계수(Kh), 교란지역 직경비(S)이며, 비교적 분산성이 적은 연직 배수재 투수계수(Kw), 연직 배수재 반경(rw), 영향원 반경(re)등은 확정론적 설계정수로 적용하였다.

압축지수(Cc), 초기 간극비(e₀), 단위중량(r)은 베이지안 기법에 의하여 구해진 사후 값(Posterior value)를 이용하였고, 준설토층의 압밀계수(Ch), 교란지역 투수계수(Ks), 수평투수계수(Kh), 등은 현장 지반 조사 자료에 의거하여 계산 산출하였다. 준설토와 원지반 두께는 대상 부지를 구역분할한 후 구역의 점토평균두께를 계산하여 이용하였고, 교란지역의 직경비(S)는 관련 자료의 부족으로 적합하다고 생각되는 문헌 값을 이용하였다. 수평방향 압밀계수(Ch)의 분산 계수는 지반 자료조사 사례가 많고 안전측이라고 사료되는 압밀계수(Cv)의 분산값을 적용하였다.

확정론적 설계정수로 사용된 연직배수재의 환산직경과 영향 직경은 Hansbo에 의해 제안된 식을 적용하였고, 연직배수재의 투수계수는 통수능 실험에 의해 나타난 값을 사용하였다. 확률변수들의 분포형태는 Kolmogorov-Smirnov을 통하여 분포특성을 파악한 후 적용하였고 이러한 자료가 확보하지 않은 경우는 문헌조사에 의하여 관련된 파라미터 분포에 연구 자료를 기초로 결정하였다. 이 경우 로그분포를 나타낸 투수계수를 제외한 확률변수들은 모두 정규분포를 갖는 것으로 파악되었으며, Monte Carlo Simulation 기법을 시스템화하여 Palisade Corporation의 @RISK 4.5 프로그램을 활용하여 해석하였다.

압밀해석에 사용된 확률변수 및 설계정수는 다음의 Table 3과 Table 4와 같다.

4. 신뢰성 해석결과

4.1 압밀기간에 따른 허용잔류침하량 신뢰성 해석

본 신뢰성해석에서는 허용잔류 침하량 10cm를 만족하기 위한 목표압밀도를 각각의 영역에 정하여, 1계 및 2계 신뢰성 분석법 및 몬테카를로 시뮬레이션 등에 의한 파괴 확률 및 신뢰성지수를 분석하였다. 각 구간별 압밀기간에 따른 허용잔류침하량 이상이 될 파괴확률을 분석한 데이터이며 통상 토목구조물이 가지는 신뢰성지수 값은 대략 1.5~4.0 범위 안에 있다. 구분된 영역에 압밀기간의 변화에 따른 잔류침하량이 10cm이상이 될 파괴확률은 Table 5에 정리하였다.

그 결과, 잔류침하 발생량이 허용잔류침하량(10cm)이

Table 3. Input integer of ground

Parameter			Probability variable value			Distributional form
			Average (μ)	Standard deviation (σ)	COV	
e_0	Zone A	0~10 m	1.78	0.344	0.1	Normal
		10 m more	1.78	0.344	"	"
	Zone B	0~15 m	1.51	0.213	"	"
		15 m more	1.67	0.199	"	"
γ_{sat} , tf/m ³ [rw = 1.03]	Zone A	0~10 m	1.62	-	0.1	"
		10 m more	1.60	-	"	"
	Zone B	0~15 m	1.67	-	"	"
		15 m more	1.64	-	"	"
C_c	Zone A	0~10 m	0.820	-	0.2	"
		10 m more	0.990	-	"	"
	Zone B	0~15 m	0.660	-	"	"
		15 m more	0.940	-	"	"
C_v , cm ² /s	Zone A	0~15 m	0.45×10^{-3}	-	0.2	"
		15 m more	0.35×10^{-3}	-	0.2	"
	Zone B	0~15 m	0.60×10^{-3}	-	"	"
		15 m more	0.45×10^{-3}	-	0.2	"
C_h , cm ² /s	Zone A	0~15 m	0.80×10^{-3}	-	0.2	"
		15 m more	0.60×10^{-3}	-	-	-
	Zone B	0~15 m	1.00×10^{-3}	-	"	Normal
		15 m more	0.70×10^{-3}	-	-	-
kh , cm/s	Zone A	0~15 m	0.5×10^{-7}	-	0.1	Log
		15 m more	0.4×10^{-7}	-	-	-
	Zone B	0~15 m	0.7×10^{-7}	-	"	"
		15 m more	0.5×10^{-7}	-	-	-
$\eta=kh/ks$	-	-	2.0	-	0.3	Normal

Table 4. Design parameter of Drainages

Parameter	Probability variable value			Distributional form
	Average (μ)	Standard deviation (σ)	COV	
k_w , cm/s	0.1	-	0.05	Normal
$S = ds/dw$	4.4	-	0.1	"
r_w , cm	5.0	-	0.4 (max : 6.0 cm)	"
Note	re = 1.13×r, Conversion factor = 1.13, COV = 0.05 (re : Influence circle, r : PVD Installation space)			

하가 될 때의 기준을 만족하는 압밀기간을 각각의 구역별로 나타내었고, 허용잔류침하량을 초과할 파괴확률이 10%이내인 기간을 압밀기간으로 산정하였으며, 각 구간의 압밀도 산정에 대한 결과는 Table 5에 나타내었다.

4.2 잔류침하로 인한 부등침하 신뢰성 해석

압밀기간 종료 후 발생하는 잔류침하로 인하여 발생하

는 부등침하에 대한 신뢰성 해석을 실시하였다. 부등침하의 안정성 검토는 블록별 부등침하량의 차이를 부등침하량으로 산정하였고, 부등침하량과 블록의 중심사이의 거리의 비로 부등침하 경사로 산정하였으며, 부등침하의 경사가 허용경사(1/600)을 초과할 경우의 파괴확률을 산출하였다.

해석결과 허용부등침하경사(1/600의 경우 8cm)를 초과할 확률은 모두 0%로 배수재 간격에 따라 압밀을 실시할

Table 5. Probability exceedance of allowable residual settlement (10 cm) according to consolidation time

Section	Consolidation time (Month)	Generation probability (%)	Confidence indicator (β)	Section	Consolidation time (Month)	Generation probability (%)	Confidence indicator (β)
I-A-1	14	7.63	1,5308	III-E-3	24.9	6.08	1,5481
I-A-2	14	5.95	1,5596	IV-C-1	19.3	6.81	1,5902
I-A-3	14	7.51	1,5394	IV-C-2	19.3	7.99	1,5061
I-A-4	14	7.83	1,4171	IV-E-1	19.3	9.15	1,532
I-C-1	14	8.03	1,5031	IV-E-2	19.3	5.93	1,5612
I-C-2	14	8.71	1,5589	IV-E-3	18.3	5.24	1,6225
I-C-3	14	8.03	1,5031	IV-E-4	18.3	6.58	1,508
I-C-4	14	9.26	1,525	V-A-1	22.8	5.19	1,6271
I-C-5	21.1	13.63	1,0969	V-C-1-1	22.8	8.83	1,5513
I-C-6	23.1	5.53	1,5962	V-C-1-2	22.8	7.99	1,5057
I-C-7	23.6	5.85	1,5678	V-C-2	22	5.91	1,563
I-C-8	23.6	6.15	1,543				
II-C-1	23	5	1,4613				
II-C-2	23	6.76	1,4939				
II-C-3	22.5	6.6	1,5064				
II-C-4	22.5	6.94	1,4803				
III-C-1	23.8	4.78	1,6665				
III-C-2	23.8	5.31	1,6162				
III-C-3	23.8	5.32	1,6146				
III-E-1	24.9	6.99	1,5769				
III-E-2	24.9	4.81	1,6636				

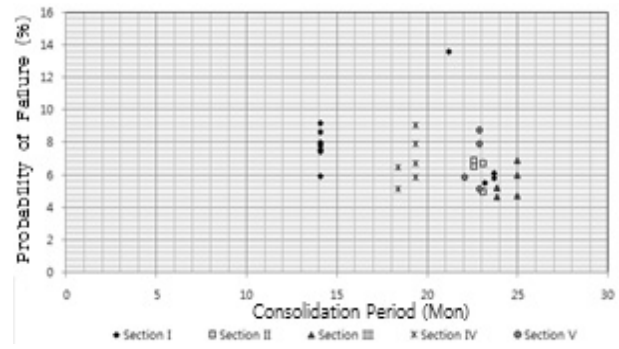


Table 6. Reliability analysis results of differential settlement

Section		Probability exceedance of allowable settlement (%)	Confidence indicator (β)	Section		Probability exceedance of allowable settlement (%)	Confidence indicator (β)
I-A-1	I-C-1	1.8000000×10^{-4}	3,5679	IV-E-3	IV-E-4	8.6980000×10^{-2}	1,3598
I-A-2	I-C-2	9.9999997×10^{-6}	4,2648	IV-C-1	IV-C-2	1.1000000×10^{-4}	3,6949
I-A-3	I-C-3	1.4000000×10^{-4}	3,6332	V-A-1	V-C-1	0	10
I-A-4	I-C-4	7.0000002×10^{-5}	3,8082	V-C-1	V-C-2	7.5240001×10^{-2}	1,4381
I-C-1	I-C-2	4.9999999×10^{-5}	3,8906	Occurrence probability of differential settlement			
I-C-2	II-C-2	1.4900001×10^{-3}	2,9701				
I-C-3	I-C-4	9.9999997×10^{-6}	4,2648				
I-C-4	II-C-4	3.1390000×10^{-2}	1,8612				
II-C-1	III-C-1	4.1000001×10^{-4}	3,3461				
II-C-2	III-C-3	3.7829999×10^{-2}	1,7768				
II-C-3	IV-C-1	3.7470002×10^{-2}	1,7812				
II-C-4	IV-C-2	2.0730000×10^{-2}	2,0393				
III-C-1	III-E-3	4.9000001×10^{-4}	3,2964				
III-C-2	III-E-1	1.5200000×10^{-3}	2,9638				
III-C-3	IV-C-1	0	10				
III-E-1	III-E-3	1.7000000×10^{-3}	2,9294				
IV-E-1	IV-C-1	4.8439998×10^{-2}	1,6605				
IV-E-2	IV-E-3	0	10				

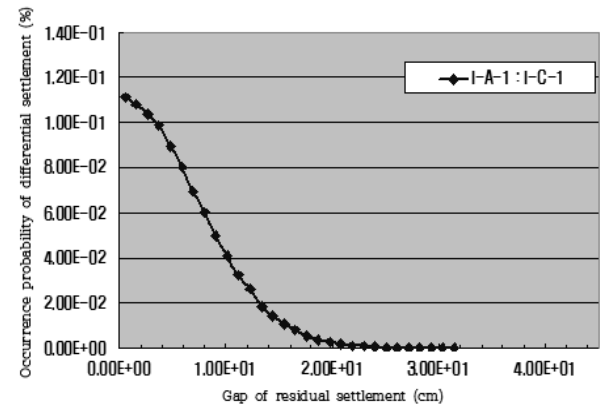


Table 7. Reliability analysis results of differential settlement (Bottom of RMGC)

Substructure differential settlement of RMGC		Probability exceedance of allowable settlement (%)	Confidence indicator (β)
I-C-3	I-C-7	4.760001×10^{-2}	1,6317
I-C-5	II-C-1	7.384000×10^{-2}	1,5043

Table 8. Comparison review of installation space set-up of section

Definite analysis	Reliability analysis				
	PVD space	Section	PVD installation space	Section	PVD installation space
All section 2.0 × 2.0		I-A-1	1,2×1,2	III-C-1	1,5×1,5
		I-A-2	1,2×1,2	III-C-2	1,5×1,5
		I-A-3	1,2×1,2	III-C-3	1,5×1,5
		I-A-4	1,2×1,2	III-E-1	1,2×1,2
		I-C-1	1,2×1,2	III-E-3	1,2×1,2
		I-C-2	1,2×1,2	III-E-2	1,5×1,5
		I-C-3	1,2×1,2	IV-E-2	1,2×1,2
		I-C-4	1,2×1,2	IV-E-4	1,2×1,2
		I-C-5	1,5×1,5	IV-E-1	1,5×1,5
		I-C-6	1,5×1,5	IV-E-3	1,5×1,5
		I-C-7	1,5×1,5	IV-C-1	1,5×1,5
		I-C-8	1,5×1,5	IV-C-2	1,5×1,5
		II-C-1	1,5×1,5	V-A-1	1,2×1,2
		II-C-2	1,5×1,5	V-C-1-1	1,2×1,2
		II-C-3	1,5×1,5	V-C-1-2	1,2×1,2
		II-C-4	1,5×1,5	V-C-2	1,5×1,5

경우 일차압밀에 의하여 허용부등침하경사 이상의 부등침하가 발생할 가능성은 거의 없는 것으로 나타나고 있으며, Table 6에 허용부등침하경사(1/600)를 초과하여 부등침하가 발생할 확률이 0%가 아닌 각 구역별 신뢰성해석을 나타내었으며, 모든 구역의 발생확률이 1%를 초과하지 않는 것을 알 수 있다.

또한, Table 7은 기초가 움직이는 영역을 선정한 후 레일 위에 고정되어 있는 크레인 RMGC(Rail-Mounted Grantry Crane)가 경계구역의 좌우 30m 이격거리에 레일이 움직이며 상재하중이 발생한다고 가정하여 부등침하를 검토하였다. 부등침하에 대한 신뢰성 해석한 결과, 허용부등침하경사(1/600)를 초과하여 부등침하가 발생할 확률은 평균 0.04%와 0.07%로 나타났다.

4.3 확정적 해석 및 신뢰성 해석 비교 검토

확정론적 해석의 경우 원지반을 포함한 준설매립지반 지반조사 개수의 제한과 압밀침하 기간에 영향을 미치는 압밀계수(Ch), 수평방향 투수계수(Kh), 교란지역 투수계

수(Ks) 등의 분산성을 고려할 수 없기 때문에 연약지반의 기간 내 침하정도를 파악하는데 여러 가지 불안요소들을 지니고 있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 여러 가지 불확실한 분산특성을 지닌 지반정수들을 확률변수로 적용하여 신뢰성 해석을 병행하였다.

확정적 해석의 경우 배수재 타설 간격(2.0m×2.0m)에 따른 최종침하량에 도달하는 압밀기간 및 시간경과에 따른 압밀도의 변화를 확정적 방법으로 분석을 실시한 결과 모두 목표기간내에 목표 압밀도인 99%에 도달하는 것으로 분석되었다. 따라서 모든 구역에서 목표 압밀도 99%에 도달하는 배수재 타설간격을 2.0×2.0m로 결정함으로써 지반정수의 불확실성과 안정성을 만족할 수 있는 것으로 판단되었다.

본 신뢰성 해석에는 확률론적 해석에서 허용잔류 침하량 10cm를 만족한 압밀도 98.6%를 목표 압밀도로 정하고, 목표 압밀도에 대한 도달 확률이 95%이상일 때 안정성을 확보하는 동시에 경제적인 연약지반 개량공법의 형식으로 선정하였다.

분석대상 구역을 토공운영현황에 따라 5단계로 영역을

구분하였으며, 이에 따라 배수재의 타설간격을 1.0×1.0m, 1.2×1.2m, 1.5×1.5m를 적용하여 목표압밀도에 도달할 확률을 해석하였고, 배수재 간격의 신뢰도를 검토하였다. 일반적으로 설계(확정적 해석)의 경우 2.0m 배수재 간격을 일괄적용 하였으나, 신뢰성 해석 분석 결과, 각 구간별 적정 배수재 간격을 다음 Table 8과 같이 현장적용 방법을 제시하였다.

배수재 간격 1.0m를 적용하였을 경우 모든 지역에서 목표압밀도 도달 확률이 99.9%~100%로 나타나 이는 과도한 설계로 나타 제외하였으며, 배수재 간격 1.2m를 적용하였을 경우 거의 모든 지역에서 95%이상의 신뢰성을 확보할 수 있어 비교적 안정된 설계로 나타났다.

배수재 간격 1.5m를 적용하였을 경우 1단계 시공구간인 I-A-1에서 I-C-4구간은 목표압밀도에 도달할 확률이 80.22~84.52%로 나타났으며, III-E-1구간과 III-E-3구간, IV-E-2구간, IV-E-4구간, V-A-1구간, V-C-1-1구간에서는 목표압밀도에 도달할 확률이 50.26%~71.32%로 나타나 비교적 신뢰도가 낮게 나타남을 알 수 있다. 따라서 배수재 간격을 1.5m로 적용하였을 때 목표압밀도에 도달할 확률이 95%이하인 지역에서는 1.2m 배수재 간격을 적용하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

신뢰성 해석을 통해 지반정수의 불확실성을 고려해 과다 적용된 배수재 타설간격을 각 구간별로 구분하여 적용함으로써 지반정수의 불확실성과 안정성을 모두 모두 만족할 수 있는 동시에 확보하는 동시에 공사비 측면에서도 경제적인 연약지반 개량공법의 형식으로 검토되었다.

5. 결론

본 연구에서는 기초 지반의 압밀해석에 대한 압밀 해석 시 배수재의 간격에 대한 영향, 압밀시간에 대한 영향과 잔류침하와 부등침하에 대해 신뢰성해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 각 영역에서 압밀기간의 변화에 따라서 발생하는 잔류침하량의 발생량이 허용잔류침하량(10cm)을 초과할 확률을 해석하였으며, 허용잔류 침하량을 초과할 확률이 10%이내에 해당하는 압밀기간을 적용하여 잔류침하에 대한 안정성을 확보하는 것이 바람직하다.
- (2) 인접하는 영역과의 부등침하에 대한 신뢰성 해석한 결과 허용부등침하경사(1/600)를 초과하여 부등침하

가 발생될 확률은 거의 0%에 가깝게 나타났다. 각각의 분할된 영역에서 목표 압밀도에 도달할 확률이 95%를 만족하는 배수재 간격으로 시공하고 잔류침하량의 발생량이 10cm를 초과하지 않은 범위일 때는 허용부등침하경사 이상의 부등침하가 발생할 가능성은 거의 없는 것으로 나타났다.

- (3) RMGC 기초가 움직이는 영역을 선정한 후 경계구역의 좌우 30m 이격거리에 레일이 움직인다고 가정하여 부등침하에 대한 신뢰성 해석한 결과, 허용부등침하경사(1/600)를 초과하여 부등침하가 발생될 확률은 평균 0.04%와 0.07%로 나타났다. 즉, RMGC의 상부하중으로 인하여 발생하는 부등침하에 대한 영향은 무시할 정도로 판단된다. 따라서 설계된 배수재의 타설 간격과 재하기간은 부등침하의 발생에 영향을 미치는 제한조건이 되지 않는 것으로 나타났다.

References

1. Cornell, C.A.(1969), "A Probability-Based Structural Code", *Proceeding of The American Concrete Institute*, Vol.66, No.12, pp.974-985.
2. Freudenthal, A.M. (1947), "The Safety of Structures", *Electrical Transmission and Substation Structures*, Vol.112, pp.125-180.
3. Jin, K.N., Park, Y.B. and Hong, E.S. (2012), "Improvement of Soft Ground Design Criteria using In-situ DB", *Land & Housing Institute Research Report*, pp.1-19.
4. Kim, B.S. and Kim, B.I. (2007), "Probabilistic Analysis and Design of the Spacing of Prefabricated Vertical Drains Considering Uncertainties in Geotechnical Property", *Journal of the Korean Geotechnical Society Engineering*, Vol.23, No.4, pp.125-132.
5. Kim, Y.S., Jeong, W.S., Jeong, H.C. and Im, A.S. (2006), "Prediction of Various Properties of Soft Ground Soils using Artificial Neural Network", *Journal of Korea Society Civil Engineering*, Vol.26, No.2, pp.81-88.
6. Lacasse, S. and Nadim, F. (1996), "Uncertainties in Characterizing Soil Properties." *Uncertainty in the Geologic Environment*, Madison ASCE, pp.49-75.
7. Lee, C.E. (2008), "Reliability Analysis and Evaluation of Partial Safety Factors for Wave Run-up", *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineering*,

- Vol.20, No.4, pp.355-362.
8. Lee, K.H., Jung, D.S. and Park, C.D. (2006), "Settlement Estimation of Soft Ground considering Uncertainty in Geotechnical Properties", *Journal of the Korean Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol.10, No.1, pp.477-482.
 9. Lee, K.H. (2007), "Analysis of Consolidation Considering Uncertainties of Geotechnical Parameters and Reliability Method", *Journal of the Korean Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol.11, No.4, pp.138-146.
 10. Lee, T.S. (2008), *A Study of the Comparison between Actual Consolidation Settlement and Prediction Settlement considering Reliability Theory Method on the Soft Ground*, Master's Thesis, Daejeon University, pp.1-10.
 11. Lind, N.C. and Hasofer, A.M. (1974), "Exact and Invariant Second-Moment Code Format", *Journal of the Engineering Mechanics*, Vol.100, No.1, pp.11-121.
 12. Park, C.H. (2009), *A Study on the Prediction of Consolidation Settlement in Soft Clays*, Master's Thesis, Pukyong National University, Korea, pp.1-10.
 13. Phoon, K. K., and Kulhawy, F.H. (1999), "Characterization of Geotechnical Variability," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.36, pp.612-624.
 14. Pugsley, A. (1995), "Report on Structural Safety", *Journal of Structural Engineering*, Vol.33, No.5, pp.141-149.
 15. Sinozuka. M (1983), "Basic analysis of Structural Safety", *Journal of Structural Engineering*, Vol.109, No.3, pp.721-740.
 16. Rackwitz, R. and Fiessler, B. (1978), "Structural Reliability under Combined Random Load Sequences", *Computer and Structures*, Vol.9, pp.484-494.