

한계상태설계를 위한 단일 쇄석다짐말뚝의 목표신뢰도지수

Target Reliability Index of Single Gravel Compaction Piles for Limit State Design

유 영 권[†] · 임 희 대¹⁾ · 박 준 모²⁾

Youngkwon You · Heuidae Lim · Joonmo Park

Received: September 24th, 2013; Revised: October 8th, 2013; Accepted: January 16th, 2014

ABSTRACT : Target reliability index in the limit state design indicated the safety margin and it is important to determine the partial factor. To determine the target reliability index which is needed in the limit state design, the six design and construction case histories of gravel compaction piles (GCP) were investigated. The limit state functions were defined by bulging failure for the major failure mode of GCP. The reliability analysis were performed using the first order reliability method (FORM) and the reliability index was calculated for each ultimate bearing capacity formulation. The reliability index of GCP tended to be proportional to the safety factor of allowable stress design and average value was $\beta=2.30$. Reliability level that was assessed by reliability analysis and target reliability index for existing structure foundations were compared and analyzed. As a result, The GCP was required a relatively low level of safety compared with deep and shallow foundations and the current reliability level were similar to the target reliability in the reinforced earth retaining-wall and soil-nailing. Therefore the target reliability index of GCP suggested as $\beta_T=2.33$ by various literatures together with the computed reliability level in this study.

Keywords : Gravel compaction piles, Target Reliability Index, Limit state design, Reliability analysis, Probability of failure

요 지 : 목표신뢰도지수는 한계상태설계법에서 안전여유의 지표가 되며, 부분계수를 결정하는데 있어 매우 중요한 역할을 한다. 본 연구에서는 한계상태설계법에서 필요로 하는 목표신뢰도지수의 결정을 위하여 쇄석다짐말뚝이 적용된 6개소의 설계-시공사례를 조사하였다. 쇄석다짐말뚝의 주요 파괴모드인 팽창파괴에 대한 한계상태함수를 정의하고, 일계신뢰성해석법(FORM)을 이용하여 극한지력, 이론식별, 신뢰도수준을 평가하였다. 현행 쇄석다짐말뚝의 신뢰도지수는 허용응력설계법에 의해 산정된 안전율과 비례하는 경향을 보였으며, 평균 신뢰도지수는 $\beta=2.30$ 으로 평가되었다. 신뢰성해석에 의해 평가된 신뢰도 수준과 기존 구조물 기초에 대한 목표신뢰도지수를 비교·분석한바, 쇄석다짐말뚝 기초는 말뚝기초 및 얇은기초에 비하여 비교적 낮은 안정성 수준이 요구되며, 쇄석다짐말뚝의 현재 신뢰도수준은 보강토옹벽, 쓰일네일링에서 제안된 목표신뢰도지수와 유사한 범위를 보이므로 쇄석다짐말뚝의 목표신뢰도지수를 $\beta_T=2.33$ 으로 제안하였다.

주요어 : 쇄석다짐말뚝, 목표신뢰도지수, 한계상태설계법, 신뢰성해석, 파괴확률

1. 서 론

쇄석다짐말뚝은 연약지반에 쇄석재료를 다져 넣어 강성이 큰 원통형의 쇄석말뚝을 형성시킴으로써 상부의 하중을 분담하도록 치환하는 공법으로 성토체, 탱크, 압거와 같이 비교적 작은 하중이 작용하는 기초에 적용한다. 쇄석다짐말뚝은 Stone Column, Gravel Compaction Pile, Aggregate Pier 등으로 시공방법에 따라 다양하게 명명되고 있으며, 진동다짐방식인 경우에 Stone Column으로 표현하고 램머다짐방식인 경우에는 Aggregate Pier로 표현하고 있다. 국내에서는 구조물 기초 용도로 적용되는 경우에는 램머다짐방식을 다

수 적용하고 있으며, 진동다짐방식은 사면의 활동 억제와 연직배수를 병용한 지반개량에 적용되고 있다.

쇄석다짐말뚝공법의 개발 초기에는 시공 전 현장시험에 의한 경험적 방법을 주로 이용하였으나, 1970년대 이후에는 Greenwood(1970), Vesic(1972), Hughes & Withers(1974) 등이 이론적, 실험적으로 다짐말뚝의 유용성을 입증하여 설계에 이용할 수 있는 반 경험적인 이론들이 발표되었다. 다짐말뚝의 지지력 및 침하량, 파괴거동에 대한 연구와 더불어 구조물에 작용하는 설계하중, 원지반 및 다짐말뚝의 강도에 대한 불확실성을 고려하여 보다 합리적인 설계가 될 수 있도록 Matsuo & Suzuki(1983), Kitazume & Nagao(2007),

1) Department of Civil Engineering, Chungnam National University

2) Department of Civil and Environmental Engineering, Dongguk University

† Department of Civil Engineering, Chungnam National University (Corresponding Author : geowater@kwater.or.kr)

Chae & Jung(2009)은 신뢰성설계법을 제시하였다. 이 설계법은 현행 안전율 개념의 허용응력설계법을 보완할 수 있는 최적의 설계법으로 평가되었지만, 일반 설계자들이 신뢰성 해석을 통하여 파괴확률을 산정하기는 매우 어렵기 때문에 실제 설계기준으로 채택되지는 못하였다.

지난 50여 년간 국내·외의 많은 연구자들이 지반공학 분야에 신뢰성이론에 기반한 한계상태설계법을 적용하려는 노력이 있었으며, 최근 기술자들이 쉽게 접근할 수 있도록 북미 지역에서는 하중저항계수설계법(load and resistance factor design, LRFD)을 개발하여 적용하고 있으며, 유럽지역에서는 Eurocode7(CEN, 2004)을 설계기준으로 채택하고 있다. LRFD에서는 설계 계산된 하중과 저항값에 전체 부분계수를 적용하고 Eurocode7(CEN, 2004)에서는 하중과 재료특성에 각각 부분계수를 적용하는 설계법의 원리에서 크게 구분된다. 그러나 한계상태설계법의 부분계수를 보정하는 과정에서 설계의 불확실성을 고려하기 위하여 충분한 데이터를 이용한 통계학적 분석이 이루어지고, 구조물의 안전여유를 목표신뢰도지수로 부여하는 공통적인 특징도 있다. 특히 한계상태설계법에서 목표신뢰도지수는 안전여유의 지표가 되고, 목표신뢰도지수에 의해 보정된 부분계수를 이용한 설계결과의 타당성을 좌우하는 매우 중요한 역할을 한다.

쇄석다짐말뚝으로 개량된 구조물 기초의 목표신뢰도지수는 상부 구조물과 일관된 신뢰도수준을 유지하면서도 과거 설계 및 시공된 기존 구조물의 안정성을 충분히 확보할 수 있어야 하므로 본 연구에서는 국내·외 쇄석다짐말뚝의 팽창파괴에 대한 신뢰성해석을 통하여 신뢰도 수준을 평가하고 기존 연구결과에서 제시하고 있는 구조물 기초에 대한 목표신뢰도지수, 상부 구조물의 목표신뢰도지수 등과 비교·분석하여 합리적인 목표신뢰도지수(β_T)를 선정하는 방안을 제시하였다.

2. 목표신뢰도지수의 현황

2.1 국내·외 구조물 및 기초의 목표신뢰도지수

기존의 허용응력설계법에서 LRFD 및 Eurocode7(CEN, 2004)과 같은 신뢰성 기반의 한계상태설계법으로 설계법이 전환되었다고 현재까지의 허용응력설계법이 오랜 기간 동안 경험적으로 축적된 안전여유를 무시할 수 없으므로 현행 설계법이 가지고 있는 최소한의 안전수준을 확보하는 것이 중요하다.

한계상태설계법에서는 구조물 기초의 부분계수를 결정하기 위한 구조물의 안정성 지표로 목표신뢰도지수(β_T)를 필수적으로 요구하고 있으며, 상부 구조물과의 일관된 신뢰도수준을 확보하여야 하므로 본 절에서는 상부 구조물 및 기초에 대하여 신뢰성 평가기준, 허용파괴확률, 목표파괴확률, 목표신뢰도지수 등으로 다양하게 불리는 목표신뢰도수준을 검토함으로써 하중저항계수설계법에서 목표신뢰도지수를 결정하는데 참고하고자 하였다.

2.1.1 상부 구조물의 목표신뢰도지수

ISO2394(International Standard, 1998)에서는 안전대책에 필요한 비용과 사고의 중요도에 상응하는 목표신뢰도지수를 $\beta=1.3\sim 4.3$ 으로 제시하였다. 이는 구조물의 중요도에 따라 구조가 견뎌야 하는 한계하중에 대한 사회적 합의를 통하여 한계하중의 신뢰도지수를 정하는 것으로 안전대책에 필요한 비용이 낮거나 중요한 구조물 경우에는 목표신뢰도지수를 높게($\beta=2.3\sim 4.3$) 선정하고, 반대로 안전대책에 필요한 비용이 높거나 비교적 중요하지 않은 구조물의 경우 목표신뢰도지수를 낮게($\beta=1.3\sim 3.1$) 선정한다. Eurocode(CEN, 2001)에서는 구조물의 위험도를 고려하여 신뢰도 등급을 3단계로 Table 1과 같이 구분하고, 각 신뢰도 등급별로 1년과 50년 발생확률에 대한 신뢰도지수를 $\beta=3.3\sim 5.2$ 로 추천하

Table 1. Definition of reliability classes and recommended minimum values for reliability index β (CEN, 2001)

Reliability Class	Description	Examples of buildings and civil engineering works	Reliability index β	
			1 year reference period	50 year reference period
RC 1	Low consequences for loss of human life, social and environmental consequences small or negligible	Agricultural buildings, silos, greenhouses	5.2	4.3
RC 2	Medium consequences for loss of human life, economic, social or environmental consequences considerable	Residential and office building, public buildings where consequences of failure are medium	4.7	3.8
RC 3	High Consequences for loss of human life, or economic, social or environmental consequences very great	Grandstands, public buildings where consequences of failure are high	4.2	3.3

고 있다.

Ellingwood & Galambos(1982)는 강구조 및 철근콘크리트구조 등 구조물의 형식과 한계상태 항목에 대한 목표신뢰도지수를 $\beta=1.75\sim 7.5$ 로 다양하게 제안하였으며, 일반적인 구조물 상황에서는 신뢰도지수의 범위가 $\beta=2.5\sim 3.0$ 으로 제안하였다. Madsen et al.(1986)은 북유럽 건축설계기준을 이용하여 빌딩의 파괴 중요도에 따라 목표신뢰도수준을 $\beta_T=3.1\sim 5.2$ 로 제안하였다. 국토해양부(2011)에서는 현존하는 국내 36개 항만 접안시설에 대하여 생애주기비용(LCC) 분석에 의한 목표신뢰도지수를 $\beta_T=2.7$ 로 결정하였으며, 경사식 방파제는 항만구조물의 외곽시설로 인명 피해의 우려가 극히 적으며, 일부 파괴 발생 시 복구가 신속히 이루어질 수 있으므로 다른 구조물에 비하여 비교적 낮은 목표신뢰도지수 $\beta_T=2.4$ 를 제안하고 있다.

2.1.2 기초의 목표신뢰도지수

1990년대 중반까지 제안된 목표신뢰도수준에 관한 연구는 주로 파괴사례 조사에 의한 전문가의 의견이나 과거 허용응력설계에서 적용된 안전율을 이용한 보정을 수행한 결과로 허용파괴확률의 개념으로 제안되었다. 허용응력설계에서 일반적인 안전율은 $F_s=1.5\sim 3.0$ 으로 적용되고 있으며, 제안된 신뢰도수준을 비교하면 거의 비슷한 범위에 있어 두 가지 안전여유를 동일한 개념으로 파악할 수 있다. 그러나 허용응력설계법에서 안전율과 한계상태설계법에서 목표신뢰도수준은 서로 다른 가정을 기반으로 결정되므로 두 안전여유를 단순히 비교할 수는 없다. 1990년대 후반부터는 신뢰성기반 설계법이 보급되면서 요소신뢰성해석과 체계신뢰성해석 등으로부터 신뢰도지수를 산정하고, 말뚝의

균말뚝 효과와 같은 여유성(redundancy)을 고려하여 기존에 제안된 목표신뢰도지수를 수정함으로써 한계상태설계법에 이용하기 위한 목표파괴확률 또는 목표신뢰도지수를 결정하기 시작하였다. 최근에는 생애주기비용을 고려한 최적신뢰도지수 및 목표신뢰도지수를 제안하는 사례가 증가하고 있다.

Barker et al.(1991)은 허용응력설계법에서 이용된 안전율을 이용하여 균말뚝에 적용된 안전율은 목표신뢰도지수 $\beta_T=2.0\sim 2.5(P_f=10^{-2})$ 범위에서 일치하는 것을 발견하였다. Zhang et al.(2001)은 요소신뢰성해석과 체계신뢰성해석을 비교·분석을 수행하여 목표신뢰도지수는 $\beta_T=3.0$ 으로 산정하였으며, 상부 구조물 설계에 이용되는 목표신뢰도지수와 거의 유사한 것으로 결론지었다. Paikowsky et al.(2004)은 균말뚝의 여유성을 고려하여 목표신뢰도지수를 $\beta_T=2.3$ 으로 제안하였으며, 균말뚝 효과는 말뚝 수가 최소 5개 이상일 때 발휘된다고 밝혔다. 단말뚝에 대한 목표신뢰도지수는 $\beta_T=3.0$ 으로 제안하였다. 상기와 같은 말뚝기초에 대하여 여러 연구자들이 제안한 목표신뢰도지수는 Fig. 1과 같이 $\beta_T=1.4\sim 3.6$ 의 범위로 나타났다.

Becker(1996)는 얇은기초의 일반적인 하중조합에 대하여 허용응력설계법의 안전율을 이용한 보정으로부터 목표신뢰도지수를 $\beta_T=3.0\sim 4.0$ 으로 언급하였으며, Kulicki et al.(2007)은 교량 12개소에 대한 신뢰성해석을 수행한 결과 신뢰도지수가 $\beta_T=3.0\sim 4.0$ 으로 동일한 범위의 신뢰도지수를 나타내었다. Phoon & Kulhawy(2002)는 근입 비율(embedment depth ratio)이 1~3이며, 50년 빈도 풍하중의 50%, 인발저항력의 33%가 작용하는 사각형 얇은기초의 인발저항력에 대한 목표신뢰도수준을 3.2로 결정하였다. NCHRP Report343

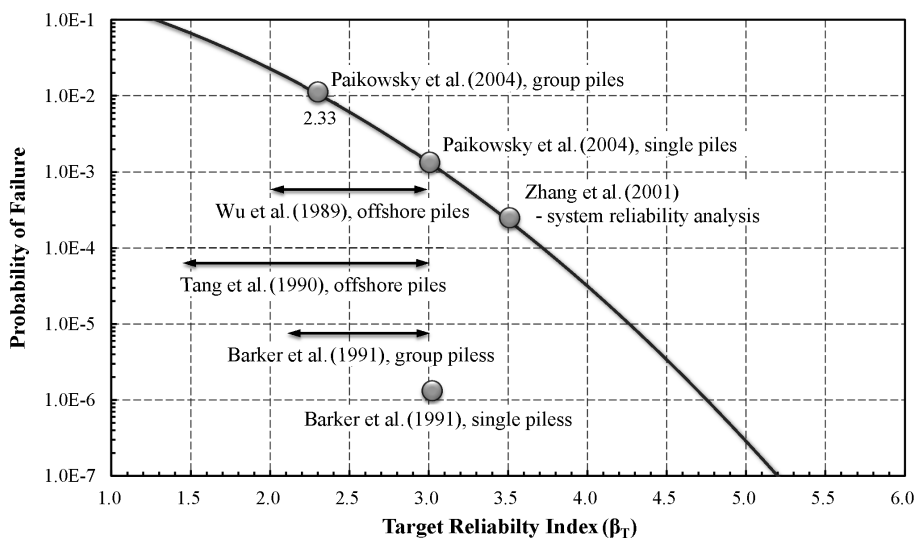


Fig. 1. Target reliability levels for deep foundations

(Barker et al., 1991)에서는 모래지반에서 얇은기초의 지지력에 대한 신뢰도지수를 $\beta_T=1.3\sim 4.5$, 점성토 지반에서 $\beta_T=2.7\sim 5.7$ 을 얻었으나, 문헌자료, 하중조합 효과를 고려한 등가 안전율, 하중비에 따른 신뢰도지수의 영향 등을 고려하여 목표신뢰도지수를 3.5로 결정하였다. Paikowsky et al. (2010)은 문헌연구를 통한 목표신뢰도지수의 범위($\beta_T=3.0\sim 3.5$) 내에서 최소-최대 저항계수 사이에 약 20%의 비용 차이가 발생함을 밝히고, 얇은기초의 목표신뢰도지수를 $\beta_T=3.0$

으로 결정하였다. 얇은기초의 목표신뢰도지수의 범위는 $\beta_T=3.2\sim 4.0$ 으로 말뚝기초의 목표신뢰도지수의 범위($\beta_T=1.4\sim 3.6$)보다는 좁게 분포하며, 목표신뢰도지수는 유사한 것으로 평가되었다(Fig. 2).

D'Appolonia(1999)는 보강토 용벽의 Geogrid 인발에 관한 저항계수를 산정하면서, Geogrid의 수직간격이 1.0~1.5m로 설치된 다중 보강토의 적용성을 고려하여 목표신뢰도지수를 $\beta_T=2.5$ 로 제안하였다. Allen et al.(2001)은 보강토 용

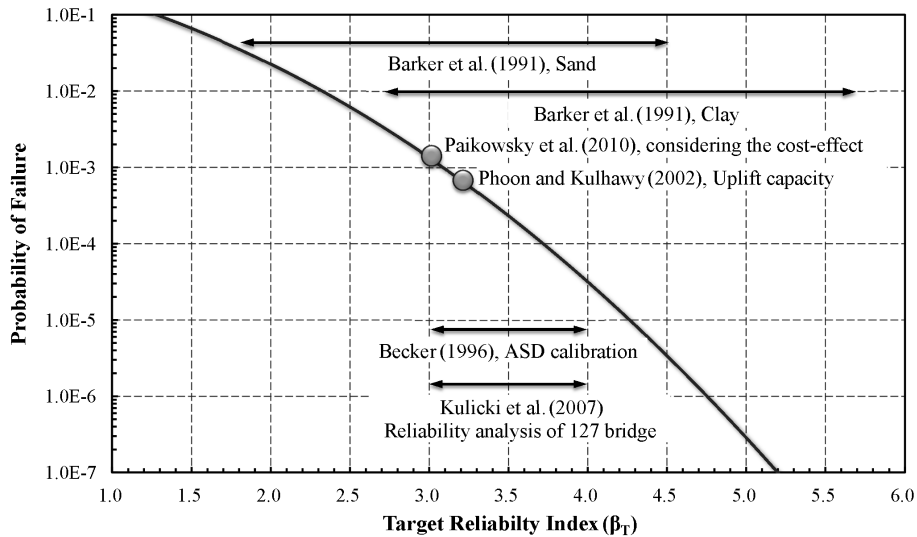


Fig. 2. Target reliability levels for shallow foundations

Table 2. The examples of target reliability indices from various literatures

Type	Reference	Target reliability index (β_T)	Remark
Deep foundations	Meyerhof (1970)	2.3	Offshore foundation ($P_f=1\%$)
		3.1	Earthwork ($P_f=0.1\%$)
		3.6	Retaining structures ($P_f=0.01\%$)
	Wu et al. (1989)	2.0~3.0	Offshore piles
	Tang et al. (1990)	1.4~3.0	Offshore piles
	Barker et al. (1991)	2.0~2.5	Group piles
		3.0	Single piles
	Zhang et al. (2001)	3.0	Single piles System reliability analysis
Paikowsky et al. (2004)	2.3 / 3.0	Group piles / Single piles	
Shallow foundations	Barker et al. (1991)	3.5	Reliability analysis Sand ($\beta=1.3\sim 4.5$), Clay ($\beta=2.7\sim 5.7$)
	Becker (1996)	3.0~4.0	ASD calibration
	Phoon and Kulhawy (2002)	3.2	Uplift capacity
	Kulicki et al. (2007)	3.0~4.0	Reliability analysis of 124 cases of bridge design
	Paikowsky et al. (2010)	3.0	Considering the cost efficiency
Retaining wall	D'Appolonia (1999)	2.5	Considering the pullout resistance and the redundancy of the multiple reinforcement materials
	Allen et al. (2001)	2.33	Internal Stability
	Huang (2010)	2.33	Target probability failure ($P_f=1\%$)
Soil-nailing	Lazarte (2011)	2.33	Target probability failure ($P_f=1\%$)

벽의 내적 안정에 관한 LRFD 설계법에서 인발 저항계수 산정 시 목표신뢰도지수를 $\beta_T=2.33$ 으로 제안하였으며, Huang (2010) 또한 보강토 옹벽에 대하여 목표파괴확률 $P_f=1\%$ ($\beta_T=2.33$)를 적용하여 LRFD의 저항계수 보정을 수행한 바 있다. Lazarte(2011)는 Soil-Nailing에 대한 하중저항계수설계법을 제안하면서, 보강토 옹벽(MSE)의 인발 저항계수에 대한 보정과정을 인용하여 목표신뢰도지수를 $\beta_T=2.33(P_f=1\%)$ 으로 적용하였다(Table 2).

2.2 목표신뢰도지수와 부분계수의 관계

하중저항계수설계법에서 부분계수(저항계수 ϕ)는 Eq. (1)과 같이 하중 및 저항의 편향계수와 변동계수, 하중비, 목표신뢰도지수를 이용하여 보정되며, 부분안전계수설계법에서 확률변수(설계변수) X에 대한 부분계수(γ_X)는 목표신뢰도지수와 각 확률변수의 민감도지수에 기초하여 Eq. (2)와 같이 산정한다.

$$\phi = \frac{\lambda_R \left(\gamma_{QD} \frac{Q_D}{Q_L} + \gamma_{QL} \right) \sqrt{\frac{1 + COV_{QD}^2 + COV_{QL}^2}{1 + COV_R^2}}}{\left(\lambda_{QD} \frac{Q_D}{Q_L} + \lambda_{QL} \right) \exp\left(\beta_T \sqrt{\ln\left[(1 + COV_R^2)(1 + COV_{QD}^2 + COV_{QL}^2) \right]} \right)} \quad (1)$$

- 여기서 ϕ : 저항계수
 Q_D, Q_L : 사하중과 활하중
 γ_{QD}, γ_{QL} : 사하중과 활하중의 하중계수
 Q_D/Q_L : 사하중과 활하중의 비
 β_T : 목표 신뢰지수
 λ_R : 저항편향계수
 COV_R : 저항의 분산계수
 COV_Q : 하중의 분산계수

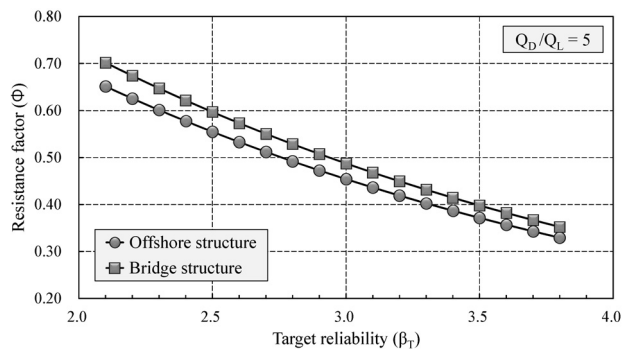


Fig. 3. Resistance factors for different load ratio and reliability indices (Park, 2012)

$$\gamma_X = (1 - \alpha_X \cdot \beta_T \cdot COV_X) \mu_X / X_K \quad (2)$$

- 여기서 γ_X : 확률변수 X의 부분안전계수
 α_X : 확률변수 X의 민감도 계수
 β_T : 목표신뢰도지수
 COV_X : 확률변수 X의 변동계수
 μ_X : 확률변수 X의 평균치
 X_K : 확률변수 X의 특성치

LRFD와 Eurocode7(CEN, 2004)의 부분계수 산정식으로부터 목표신뢰도지수가 증가할수록 부분계수는 감소하는 것을 직관적으로 알 수 있다. 이는 심층혼합처리지반의 내부안정에 대한 부분계수 연구(Park, 2012)에서 Fig. 3과 같이 신뢰도지수가 $\beta=2.1$ 에서 $\beta=3.8$ 로 증가하는 동안 부분계수는 $\phi=0.65$ 에서 $\phi=0.33$ 으로 거의 50% 수준으로 감소한 연구결과와 일치하고 있으며, 저항에 대한 부분계수는 신뢰도지수에 대하여 매우 민감한 것으로 평가된다.

3. 설계사례를 이용한 신뢰성해석

본 절에서는 쇄석다짐말뚝공법의 적용 사례를 수집하여 쇄석다짐말뚝의 팽창파괴에 대한 지지력 이론식별로 일계신뢰성해석(FORM, First-Order Reliability Method)을 수행함으로써 현재 실무에서 적용되고 있는 쇄석다짐말뚝의 신뢰도 수준을 평가하고, 허용응력설계법에 의한 안전율과 신뢰도지수의 관계를 분석하였다.

3.1 파괴모드와 지지력 이론식

연약지반 상에 시공된 쇄석다짐말뚝은 구성 재료의 입자들이 구속되어 있는 상태가 아니므로 일반 콘크리트 말뚝과는 다른 파괴양상을 보이며, 파괴형태는 Fig. 4와 같이 팽창파괴(Bulging failure), 전반전단파괴(General Shear failure), 편칭파괴(Punching failure)로 구분할 수 있다. Kim et al.(1997)은 말뚝의 길이가 짧을수록 국부전단파괴 및 전반전단파괴가 일반적인 파괴형태이며, 말뚝의 길이가 길수록 팽창파괴가 일반적인 파괴형태로 나타난다고 하였다. Huges et al.(1975)은 전단파괴와 팽창파괴에 대한 지지력이 서로 동일해지는 한계깊이(critical length, L_c)와 말뚝 지름(D)의 관계에 대한 연구에서 일반적인 L/D 는 4.1 정도이며, Rao & Ranjan (1988)은 L/D 를 4~5로 적용하여 지지력을 산정한 바 있다. 즉 쇄석다짐말뚝의 길이가 한계깊이 이내인 경우에는 전단파괴가 발생하며, 한계깊이 이상일 경우에는 팽창파괴

가 발생한다고 할 수 있으며, 한계깊이는 4~5D로 추정할 수 있다.

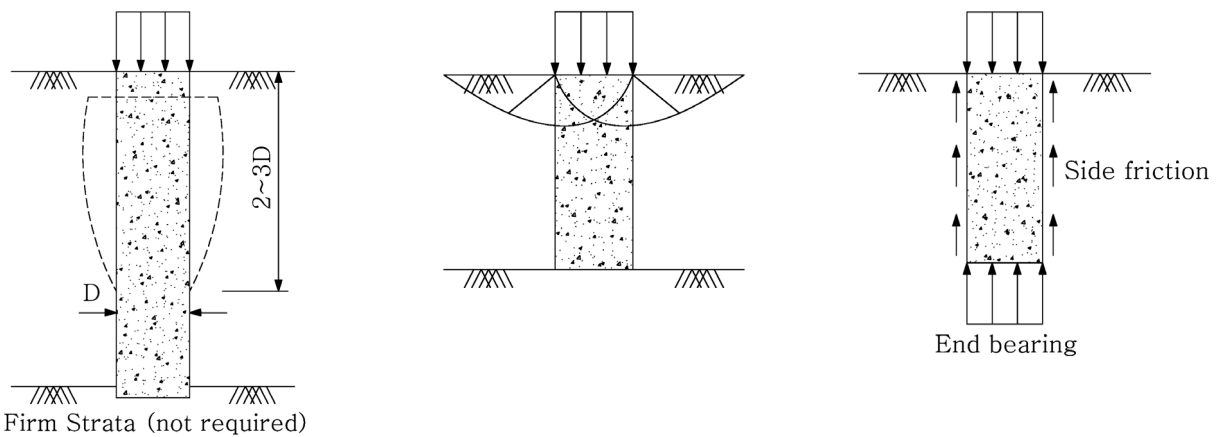
흙과 쇠석다짐말뚝 간의 상호작용은 주로 다짐말뚝의 팽창을 억제하기 위한 원지반의 횡방향 구속압력의 증가에 지배되며, 횡방향 구속압력이 충분하게 발휘되지 않는 지반에서의 적용은 불가능하다(Barksdale & Bachus, 1983; Juran & Guermazi, 1988). 문헌에서 조사된 일반적인 쇠석다짐말뚝의 직경은 0.7~0.8 m이고, 길이는 3.5 m 이상으로 대부분 팽창파괴가 지배적인 파괴유형이므로 본 연구에서는 팽창파괴에 대한 목표신뢰도지수를 분석하였다.

쇠석다짐말뚝의 팽창파괴에 대한 지지력 이론식은 공동확장이론을 이용한 Gibson & Anderson(1961), Vesic(1972), Huges & Withers(1974), Hansbo(1994)의 제안식과 소성평형론에 의한 수동토압 접근법을 이용한 Greenwood(1970),

Brauns(1978)의 제안식 등이 있으나, 본 연구에서는 실제 지지력을 비교적 정확히 예측하는 것으로 알려진 지지력 이론식(Table 3)으로 신뢰성해석을 수행하였다.

3.2 쇠석다짐말뚝 시공 사례

국내·외에서 쇠석다짐말뚝공법이 적용된 설계 및 시공 사례를 Table 4와 같이 수집하여 신뢰성해석을 수행하였다. 쇠석다짐말뚝은 하수, 우수, 구조물 등의 프리캐스트 박스 기초와 빌딩, 도로의 기초로 이용되었으며, 국내 4개 현장 5개소와 해외 1개소 구성되었다(Fig. 5). 쇠석다짐말뚝의 직경은 대부분 0.76 m로 램머다짐방식을 이용하고 있으며, 말뚝간격은 1.30~2.20 m, 말뚝 길이는 3.00~11.48 m로 다양하였다.



(a) Long stone column with firm or floating support : bulging failure (b) Short column with rigid base : shear failure (c) Short floating column : punching failure

Fig. 4. Failure mechanisms of single gravel compaction pile in a homogeneous soft layer (Barksdale and Bachus, 1983)

Table 3. Estimation of ultimate bearing capacity of single gravel compaction pile for bulging failure

Reference	Derived Formula	Theory
Vesic (1972)	$q_u = (c_u F_c' + q_{avg} F_q') \frac{1 + \sin \phi_s}{1 - \sin \phi_s}$ $c_u : \text{Undrained shear strength of surrounding ground (kN/m}^2\text{)}$ $F_c', F_q' : \text{Cavity expansion factors}$ $q_{avg} : \text{Average stress at the depth of failure } (= (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3) \text{ (kN/m}^2\text{)}$ $\phi_s : \text{Internal friction angle of gravel compaction pile (}^\circ\text{)}$	Cavity expansion theory
Hughes & Withers (1974)	$q_u = (\sigma_{ro} + 4c_u) \frac{1 + \sin \phi_s}{1 - \sin \phi_s}$ $\sigma_{ro} : \text{Initial in-situ lateral stress (kN/m}^2\text{)}$	
Hansbo (1994)	$q_u = (\sigma_{ro} + 5c_u) \frac{1 + \sin \phi_s}{1 - \sin \phi_s}$	
Brauns (1978)	$q_u = \left[\sigma_{ro} + \left(1 + \ln \frac{E_c}{3 \cdot c_u} \right) \cdot c_u \right] \frac{1 + \sin \phi_s}{1 - \sin \phi_s}$ $E_c : \text{Elastic modulus of surrounding ground (kN/m}^2\text{)}$	Passive pressure at plastic equilibrium

Table 4. Design data used for reliability analysis

Site	Project	Type of structures	Diameter (m)	Spacing (m)	Replacement ratio (%)	Length (m)																					
A	Pohang - Housing area (E)	Waste water box	0.76	1.50	20.16	4.60																					
B	Pohang - Housing area (F)	Waste water box	0.76	1.30	26.84	7.80																					
C	Ansan - Connecting road	Structural box	0.76	1.80	14.00	7.60 <tr> <td>D</td> <td>Paju - Jugong apartment</td> <td>Rain water box</td> <td>0.76</td> <td>2.00</td> <td>11.34</td> <td>11.48</td> </tr> <tr> <td>E</td> <td>Seoul - Neighborhood building</td> <td>Building</td> <td>0.76</td> <td>2.20</td> <td>9.37</td> <td>3.00</td> </tr> <tr> <td>F</td> <td>FHWA-RD-83-027</td> <td>Road</td> <td>1.07</td> <td>2.13</td> <td>19.82</td> <td>10.06</td> </tr>	D	Paju - Jugong apartment	Rain water box	0.76	2.00	11.34	11.48	E	Seoul - Neighborhood building	Building	0.76	2.20	9.37	3.00	F	FHWA-RD-83-027	Road	1.07	2.13	19.82	10.06
D	Paju - Jugong apartment	Rain water box	0.76	2.00	11.34	11.48																					
E	Seoul - Neighborhood building	Building	0.76	2.20	9.37	3.00																					
F	FHWA-RD-83-027	Road	1.07	2.13	19.82	10.06																					

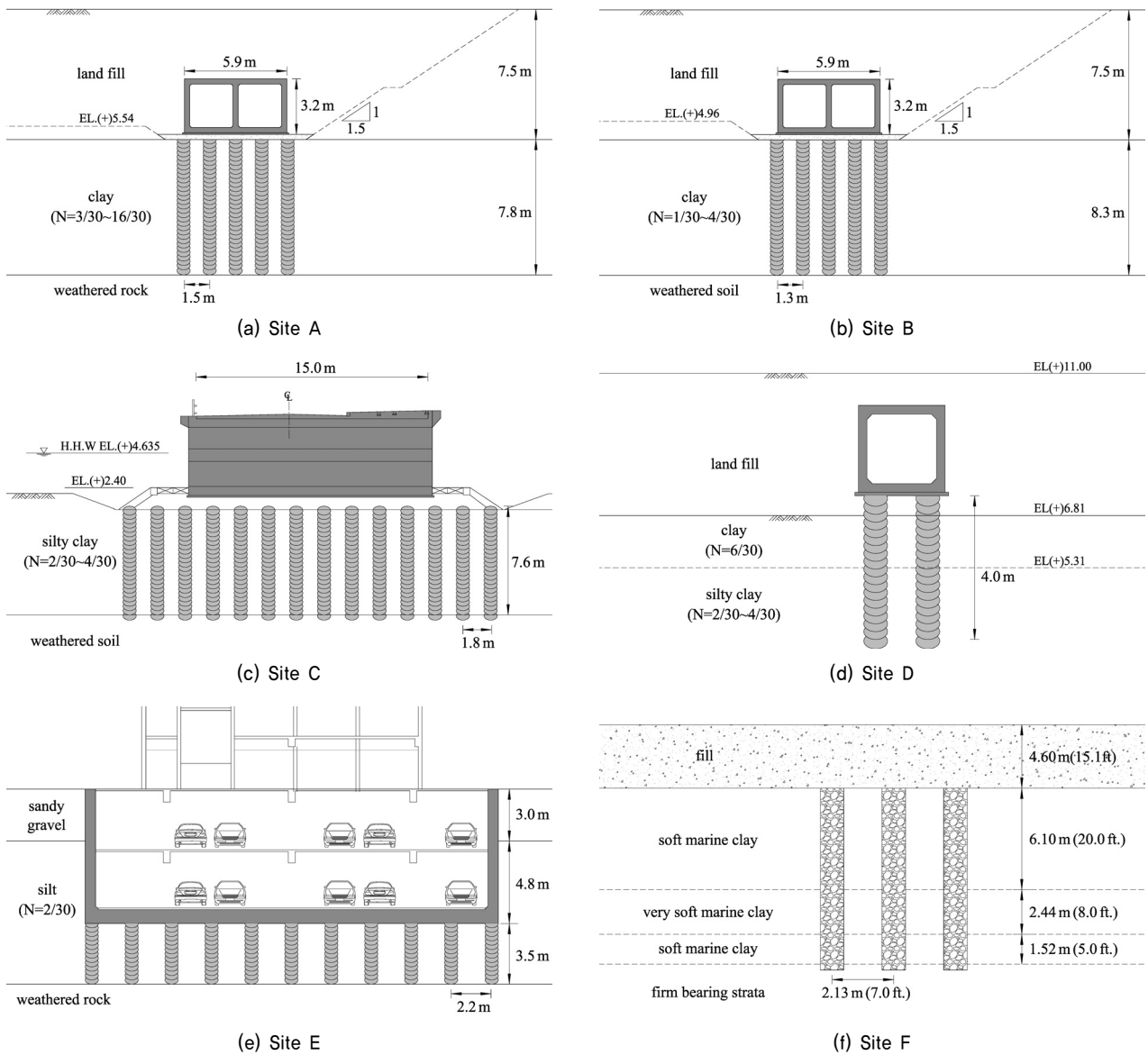


Fig. 5. Section of GCP constructions used for reliability analysis

3.3 한계상태함수와 확률변수의 통계학적 특성

신뢰성해석에서 쇄석다짐말뚝의 파괴영역을 정의하는 한계상태함수의 기본식을 Eq. (3)과 같이 정의하였다. 쇄석다짐말뚝에는 사하중과 활하중이 작용되며, 쇄석다짐말뚝이 이론식에 의해 산정된 극한지지력으로 팽창파괴에 대하여

저항한다. Eq. (3)을 기본으로 각 지지력 이론식에 따른 쇄석다짐말뚝의 팽창파괴에 대한 한계상태함수는 Table 5와 같이 정의하였다.

$$g(X) = R - Q = q_u \cdot A - (Q_D + Q_L) \quad (3)$$

한계상태함수를 구성하는 설계변수는 확률변수로 취급되며, 저항력과 관련된 확률변수는 원지반의 단위중량, 비배수전단강도, 탄성계수와 쇄석의 내부마찰각이다. 확률변수의 평균값은 설계 및 시공 자료로부터 분석하여 Table 6에 나타내었으며, 통계학적 자료는 설계기준이나 설계지침서에 명확하게 제안된 바가 없어 확률변수의 변동계수는 Table 7과 같이 문헌연구 결과를 인용하여 결정하였다. 쇄석의 내부마찰각은 국내 대형직접전단시험 및 현장 전단시험 결과를 분석하여 적용하였고, 하중은 AASHTO(2010) 시방서를 인용하였다.

Paikowsky et al.(2010)은 공학적인 관점에서 하중과 저항이 음의 값이 되는 문제를 방지하기 위하여 로그정규분포로 가정하는 것을 추천하고 있으며, 상대적으로 변동계수가 큰 확률변수를 로그정규분포로 변경함으로써 적절한 부분안전계수를 얻을 수 있다는 연구결과(Kitazume & Nagao, 2007)

를 고려하여 원지반의 비배수전단강도(COV=0.40), 탄성계수(COV=0.20) 및 하중의 사하중(COV=0.10), 활하중(COV=0.25)의 확률분포를 로그정규분포로 적용하여 신뢰성해석을 수행하였다.

3.4 신뢰도지수와 안전율의 관계

국내에서 쇄석다짐말뚝의 설계는 허용응력설계법으로 설계되어 왔으며, 팽창파괴에 대한 기준안전율은 $F_s=2.0$ 으로 적용되어왔다. 신뢰성해석으로 산정된 신뢰도지수(β)와 허용응력설계법에서 검토된 안전율(F_s) 간의 상관성을 조사하고, 신뢰도지수와 안전율의 관계를 Table 8과 Fig. 6에 나타내었다.

국내·외 쇄석다짐말뚝 대표 단면 6개소에 대한 4가지 극한지력 이론식을 이용하여 산정된 안전율과 신뢰도지수의 범위는 $F_s=1.50\sim 3.91$, $\beta=0.93\sim 3.75$ ($P_f=0.01\sim 17.5\%$)로

Table 5. Limit state function for bulging failure of GCP

Reference	Limit state function
Vesic (1972)	$g(X) = [(c_u F'_c + q_{avg} F'_q) \frac{1 + \sin \phi_s}{1 - \sin \phi_s}] A - (Q_D + Q_L)$
Hughes and Withers (1974)	$g(X) = [(\sigma_{ro} + 4c_u) \frac{1 + \sin \phi_s}{1 - \sin \phi_s}] A - (Q_D + Q_L)$
Brauns (1978)	$g(X) = [(\sigma_{ro} + 1 + \ln \frac{E_c}{3 c_u}) \frac{1 + \sin \phi_s}{1 - \sin \phi_s}] A - (Q_D + Q_L)$
Hansbo (1994)	$g(X) = \sigma_{ro} + c_u [1 + \ln \frac{E_c}{2 c_u (1 + \nu_c)}] A - (Q_D + Q_L)$

Table 6. Mean values of random variable parameters from interpretation data of GCP construction cases

Site	Soil type	SPT N-value	In-situ clay			GCP
			γ (kN/m ³)	c_u (kN/m ²)	E_c (kN/m ²)	ϕ_s (deg.)
A	Clay	3/30~16/30	16.70	62.00	15,500	50.00
B	Clay	1/30~4/30	16.70	32.00	8,000	50.00
C	Silty Clay	2/30~4/30	17.52	42.00	10,500	50.00
D	Clay	2/30~3/30	17.20	24.00	6,000	50.00
E	Clayey Silt	2/30	15.70	14.70	3,675	50.00
F	Clay	-	15.71	21.55	5,388	42.00

Table 7. Statistical distribution model and random variable parameters form various literatures and interpretation data

Random variables		Coefficient of variance	Probability density function	Reference
In-situ clay	Unit weight	0.10	Normal	Phoon & Kulhawy (1996) Lacasse & Nadim (1996)
	Undrained shear strength	0.40	Lognormal	
	Elastic modulus	0.20	Lognormal	
GCP	Internal friction angle	0.10	Normal	대형직접전단시험 (건설교통부, 2008) Bergado et al. (1987) Duncan et al. (2007)
Loads	Dead load	0.10	Lognormal	AASHTO (2010)
	Live load	0.25	Lognormal	

Table 8. Reliability indices versus safety factors for external safety

Section	Vesic (1972)		Hughes & Withers (1974)		Brauns (1978)		Hansbo (1994)	
	F_s	β	F_s	β	F_s	β	F_s	β
A	3.857	3.144	2.914	2.493	3.813	3.504	3.545	2.951
B	2.988	2.692	2.322	2.082	2.955	2.965	2.767	2.509
C	3.907	3.391	3.004	2.768	3.865	3.747	3.612	3.205
D	1.890	1.520	1.503	0.933	1.880	1.661	1.769	1.342
E	1.860	1.570	1.521	1.035	1.854	1.701	1.756	1.411
F	2.144	2.267	1.749	1.677	2.144	2.485	2.025	2.090

검토되었으며, 평균 안전율은 2.57, 평균 신뢰도지수는 2.30으로 분석되었다. 안전율과 신뢰도지수는 선형 비례하는 경향을 나타내었다. 설계 실무에서는 본 연구에서 적용된 모든 지지력 이론식에 대하여 검토하지 않으므로 해석대상 지역 또는 이론식에 따라 기준안전율($F_s=2.0$)을 만족하지 못하는 경우가 있는 것으로 판단된다.

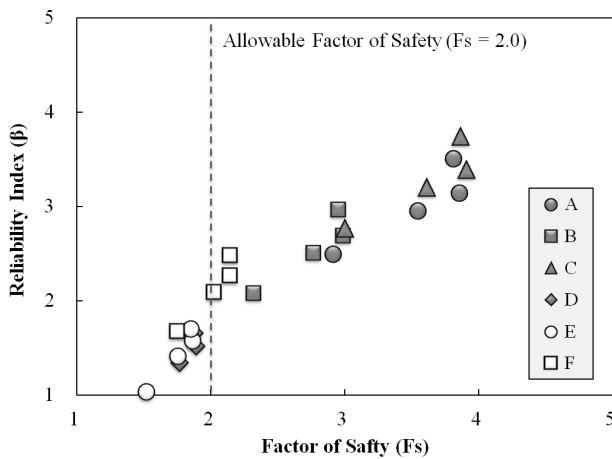


Fig. 6. Relationship of reliability indices versus safety factors for external stability

4. 쇄석다짐말뚝의 목표신뢰도수준 분석

신뢰성이론을 이용한 한계상태설계법의 부분계수 보정 방법에서 안전수준은 목표신뢰도지수에 의해 결정되기 때문에 합리적이고 적절한 목표신뢰도지수의 선택이 중요하다. 하중저항계수설계법의 도입시기에는 주로 전문가의 의견, 허용응력설계법의 안전율을 이용한 경험적 목표신뢰도수준이 제안되었기 때문에 비교적 높은 수준의 목표신뢰도지수가 적용되어 왔다. 이후 하중 및 저항의 데이터베이스가 축적되고, 구조물 기초에 대한 많은 신뢰성해석 결과가 도출되면서 초기에 제안된 목표신뢰도지수의 수정이 이루어져 왔다.

특히 기초시스템 중에서 하나의 말뚝이 파괴되는데 필요한 하중보다 구조물 기초 전체 시스템을 붕괴시키기 위해서는 더 큰 하중이 필요하기 때문에 나타나는 내부적인 안전 여유로 설명되는 여유성(redundancy)은 강관 군말뚝으로 지지된 기초시스템의 목표신뢰도지수가 $\beta_T=3.0(P_f=0.1\%)$ 에서 $\beta_T=2.33(P_f=1.0\%)$ 으로 하향 조정되는 근거가 되었다. 또한 하나의 보강재가 파괴되어도 나머지 보강재와 내부 지

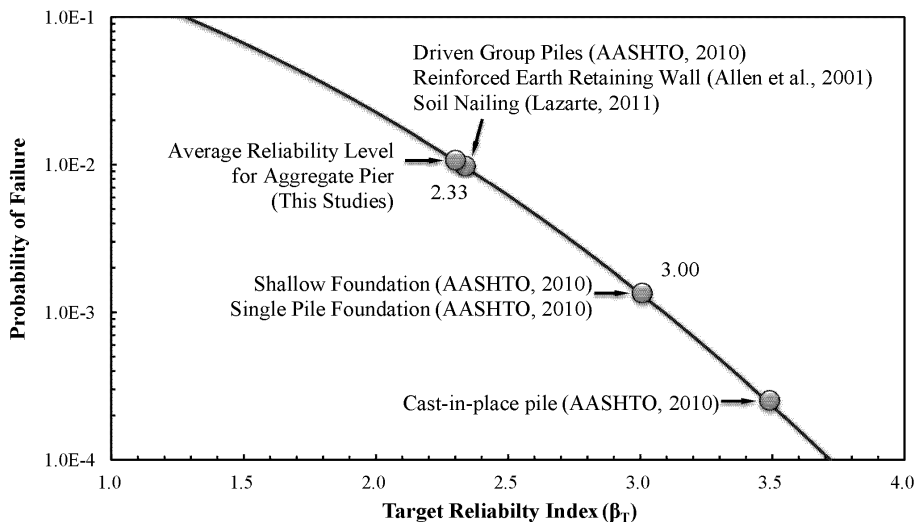


Fig. 7. Target reliability levels for gravel compaction pile

만이 분배된 하중을 공유하여 전체적인 파괴가 발생하지 않는 보강토옹벽에 대해서도 고려된 바 있다.

현재 쇄석다짐말뚝 적용 사례를 보면 대부분의 쇄석다짐말뚝은 상부 구조물을 균말뚝 형식으로 지지하고 있으므로 여유성을 적용할 수 있으며, 이러한 여유성으로 인해 현재 일반적인 기초의 신뢰도수준보다 목표신뢰도지수는 낮게 결정될 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서 수행된 신뢰성해석으로부터 쇄석다짐말뚝의 팽창파괴에 대한 신뢰도 수준은 $\beta=0.933\sim 3.747$ 의 범위로 분석되었으며, 평균 신뢰도지수는 $\beta=2.30$ 으로 산정되었다. 현재 쇄석다짐말뚝의 신뢰도 수준은 Fig. 1, Fig. 2에서 기술된 기초에 대한 목표신뢰도수준 $\beta_T=2.3\sim 3.5$ 와 비교하여 하한값에 해당하는 것으로 평가된다. 허용응력설계법의 팽창파괴에 대한 기준안전율($F_s=2.0$)이 보강토옹벽과 쏘일네일링과 유사한 안정성 수준을 요구하고 있는 점과 여유성을 고려하면, 쇄석다짐말뚝의 목표신뢰도지수는 Fig. 7과 같이 기초의 파괴확률 $P_f=1\%$ 에 해당하는 $\beta_T=2.33$ 으로 제안할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 국내·외 6개소에서 수집된 쇄석다짐말뚝에 대한 설계-시공자료를 수집하여 팽창파괴에 대한 극한지력 이론식별로 신뢰성해석을 수행하고, 기존 구조물 기초의 목표신뢰도지수와 비교함으로써 쇄석다짐말뚝의 한계상태설계법을 위한 목표신뢰도수준을 평가하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

실제 쇄석다짐말뚝을 설계할 경우 모든 극한지력 이론식을 이용하여 안정성을 검토하지 않으므로 해석대상 지역과 극한지력 이론식에 따라 허용응력설계법의 기준안전율($F_s=2.0$)을 만족하지 못하는 경우가 있음을 발견하였으며, 안전율과 신뢰성해석에 의한 신뢰도지수는 비례하는 경향을 나타내었다.

쇄석다짐말뚝의 팽창파괴에 대한 평균 신뢰도지수는 $\beta=2.30$ 으로 평가되었으며, 쇄석다짐말뚝 기초는 말뚝기초 및 얕은기초에 비하여 비교적 낮은 안정성 수준이 요구되고, 쇄석다짐말뚝의 현재 신뢰도수준은 보강토옹벽, 쏘일네일링에서 제안된 목표신뢰도지수와 유사한 범위를 보이므로 쇄석다짐말뚝의 목표신뢰도지수는 $\beta_T=2.33$ 으로 제안할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 건설교통R&D정책·인프라사업, “표준화를 위한 구조물기초설계기준 정비” 과제 연구결과의 일부입니다.

References

1. 건설교통부 (2008), 고강도 지오그리드 보강 Stone Column 공법의 실용화 연구, pp. 17~37.
2. 국토해양부 (2011), 안벽 신뢰성 설계 표준서(최종안)-중력식 및 잔교식, 국토해양부 항만정책관리실, pp. 197~188.
3. AASHTO (2010), AASHTO LRFD bridge design specifications, Fifth Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C., p. 3~13.
4. Allen, T. M., Christopher, B. R., Elias, V. and DiMaggio, J. (2001), Development of the simplified method for internal stability of mechanically stabilized earth(MSE) walls, Washington State Department of Transportation, Report WA-RD 513, Washington, 108 p.
5. Barker, R. M., Duncan, J. M., Rojiani, K. B., Ooi, P. S. K., Tan, C. K. and Kim, S. G. (1991), NCHRP Report 343: Manuals for the design of bridge foundations, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, p. A~51.
6. Barksdale, R. D. and Bachus, R. C. (1983), Design and construction of stone columns, Federal Highway Administration, Report No. FHWA/RD 83/026, Vol. 1, U.S. NTIS, Virginia, p. 28.
7. Becker, D. E. (1996), Eighteenth canadian geotechnical colloquium: limit state design for foundations, Part II, Development for the National Building Code of Canada, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 33, No. 6, pp. 984~1007.
8. Bergado, D. T. and Lam, F. L. (1987), Full scale load test of granular piles with different densities and different proportions of gravel and sand in the soft Bangkok clay, Soils and Foundations Journal, Vol. 27, No. 1, pp. 86~93.
9. Brauns, J. (1978), Initial bearing capacity of stone columns and sand piles, Symposium on Soil Reinforcing and Stabilizing Technique, Sydney, pp. 477~496.
10. CEN (2001), EN1990 Eurocode 0-Basis of structural design, p. 88.
11. CEN (2004), Eurocode7-geotechnical design, European Committee for Standardization, TC250, p. 9.
12. Chae, J. G. and Jung, M. S. (2009), Reliability analysis of final settlement using Terzaghi's consolidation theory, Journal of Korean Society of Civil Engineering, Vol. 28, No. 6C, pp. 349~358 (in Korean).
13. D'Appolonia (1999), Developing new AASHTO LRFD specification for retaining walls, Final Report, NCHRP Project 20-7, Task 88, Ground Technology, Inc., Monroeville, PA. p. 50.
14. Duncan, J. M., Brandon, T., Jian, W., Park, Y., Griffith, T., Corton, J. and Ryan, Esther. (2007), Densities and friction angles of granular materials with standard gradations 21b and #57, Report CPGR #45, Center for Geotechnical Practice and Research, Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg, VA., p. 100.
15. Ellingwood, B. R. and Galambos, T. (1982), Probability-based load criteria for structural design, Structural Safety, Vol. 1, pp. 15~26.
16. Gibson, R. E. and Anderson, W. F. (1961), In-situ measurement of soil properties with the pressuremeter, Civil Engineering, London, Vol. 56, pp. 615~620.
17. Greenwood, D. A. (1970), Mechanical improvement of soils below ground surface, Proceedings of Conference on Ground Engineering, Institution of Civil Engineers, London, UK., pp. 11~22.

18. Hansbo, S. (1994), Foundation engineering, developments in geotechnical engineering, No. 75, Elsevier Press, New York, pp. 450~455.
19. Huang, B. Q. (2010), Numerical study and load resistance factor design(LRFD) Calibration for Reinforced Soil Retaining Walls, Ph. D. dissertation, Queen's University, Canada, 276 p.
20. Hughes, J. M. O. and Withers, N. J. (1974), Reinforcing of soft cohesive soils with stone columns, Ground Engineering, Vol. 7, No. 3, pp. 42~49.
21. Hughes, J. M. O., Withers, N. J. and Greenwood, D. A. (1975), A field trial of the reinforcing effect of a stone column in soil, Geotechnique, Vol. 25, No. 1, pp. 31~44.
22. International Standard (1998), General principles on reliability for structures, ISO 2394:1998(E), pp. 1~73.
23. Juran, I. and Guermazi, A. (1988), Settlement response of soft soils reinforced by compacted sand columns, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 114, Issue 8, pp. 930~943.
24. Kim, H. T., Koh, Y. I., Kang, I. K. and Kim, J. H. (1997), Estimation of ultimate bearing capacity for bulging failure of granular group piles, KGS Fall '97 National Conference, Seoul, pp. 73~80 (in Korean).
25. Kitazume, M. and Nagao, T. (2007), Studies of reliability based design on deep mixing improved ground, Report of Port and Airport Research Institute, Japan, Vol. 46, No. 1, pp. 3~44 (in Japanese).
26. Kulicki, J. M., Prucz, A., Clancy, C. M., Mertz, D. R. and Nowak, A. S. (2007), Updating the calibration report for the AASHTO LRFD code, Final Report for NCHRP Project 20-07/186, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington, DC., p. 11.
27. Lacasse, S. and Nadim, F. (1996), Uncertainties in characterizing soil properties, Proceedings of Uncertainty in the Geologic Environment: From Theory to Practice, Vol. 1, ASCE, pp. 49~75.
28. Lazarte, C. A. (2011), NCHRP Report 701: Proposed specifications for LRFD soil-nailing design and construction, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington, D. C., p. 14.
29. Madsen, H. O., Krenk, S. and Lind, N. C. (1986), Methods of structural safety, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 342 p.
30. Matsuo, M. and Suzuki, H. (1983), Study on reliability-based design of improvement of clay layer by sand compaction piles, Soils and Foundations, Japanese Geotechnical Society, Vol. 23, No. 3, pp. 112~122.
31. Meyerhof, G. (1970), Safety factors in soil mechanics, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 7, No. 4, pp. 349~355.
32. Paikowsky, S., Birgisson, G., McVay, M., Nguyen, T., Kuo, C., Baecher, G., Ayyub, B., Stenerson, K., O'Mally, K., Chernauskas, L. and O'Neill, M. (2004), NCHRP Report 507: Load and resistance factor design (LRFD) for deep foundations, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington, D. C., pp. 29~30.
33. Paikowsky, S. G., Canniff, M. C., Lesny, K., Kisse, A., Amatya, S. and Muganga, R. (2010), NCHRP Report 651: LRFD design and construction of shallow foundations for highway bridge structures, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington, D. C., 106 p.
34. Park, J. M. (2012), Analysis of LRFD resistance factors for internal stability of deep mixing improved ground, Ph D. dissertation, Dongguk University, pp. 184~185 (in Korean).
35. Phoon, K. K. and Kulhawy, F. H. (1996), Practical reliability based design approach for foundation engineering, Research Record 1546, Transportation Research Board, Washington, pp. 94~99.
36. Phoon, K. K. and Kulhawy, F. H. (2002), EPRI study on LRFD and MRFD for transmission line structure foundations, In Foundation Design Codes and Soil Investigation in View of International Harmonization and Performance, Swets and Zeitlinger, Lisse, Netherlands, pp. 253~261.
37. Rao, B. G. and Ranjan, G. (1988), Settlement analysis of skirted granular piles, Journal of Geotechnical Engineering Division, Vol. 114, No. 1, pp. 729~736.
38. Tang, W., Woodford, D. and Pelletier, J. (1990), Performance reliability of offshore piles, Proceedings of the 22nd Annual Off-shore Technology Conference, May 7-10, Houston, TX, Paper No. OTC 6379, Offshore Technology Conference, Richardson, TX, Vol. 3, pp. 299~308.
39. Vesic, A. S. (1972), Expansion of cavities in infinite soil mass, Journal of Soil Mechanics and Foundation, Vol. 98, No. SM 3, pp. 265~290.
40. Wu, T., Tang, W., Sangrey, D. and Baecher, G. (1989), Reliability of offshore foundations-state of the art, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 115, No. 2, pp. 157~178.
41. Zhang, L., Tang, W. and Ng, C. (2001), Reliability of axially loaded driven pile groups, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 127, No. 12, pp. 1051~1060.