

# 쇄석다짐말뚝의 극한지지력 데이터베이스 구축 및 통계학적 분석

## Constructing Database and Probabilistic Analysis for Ultimate Bearing Capacity of Aggregate Pier

박 준 모<sup>1</sup> Park, Joon-Mo  
김 범 주<sup>2</sup> Kim, Bum-Joo  
장 연 수<sup>3</sup> Jang, Yeon-Soo

### Abstract

In load and resistance factor design (LRFD) method, resistance factors are typically calibrated using resistance bias factors obtained from either only the data within  $\pm 2\sigma$  or the data except the tail values of an assumed probability distribution to increase the reliability of the database. However, the data selection approach has a shortcoming that any low-quality data inadvertently included in the database may not be removed. In this study, a data quality evaluation method, developed based on the quality of static load test results, the engineering characteristics of in-situ soil, and the dimension of aggregate piers, is proposed for use in constructing database. For the evaluation of the method, a total 65 static load test results collected from various literatures, including static load test reports, were analyzed. Depending on the quality of the database, the comparison between bias factors, coefficients of variation, and resistance factors showed that uncertainty in estimating bias factors can be reduced by using the proposed data quality evaluation method when constructing database.

### 요 지

국내·외 하중저항계수설계법의 저항계수 보정 시 수집된 데이터베이스의 신뢰성을 향상시키기 위하여 저항편향 계수 산정 단계에서 저항편향치의  $\pm 2\sigma$  범위의 데이터만을 선택하거나 가정된 확률분포 검정을 만족하도록 꼬리(tail) 부분의 데이터를 제거하는 방법을 적용하고 있다. 그러나 이들 방법에서는 데이터베이스 내에 우연히 포함된 저품질의 데이터를 확인할 수 없는 단점이 발견되었다. 본 연구에서는 정재하시험의 품질, 원지반의 공학적 특성, 쇄석다짐말뚝의 제원 등의 품질기준을 이용하여 데이터베이스 구축 단계에서 수행할 수 있는 품질평가법을 제안하였으며, 국내·외 문헌 및 정재하시험 보고서로부터 65개소의 정재하시험 데이터를 수집하여 데이터베이스의 구축 및 품질평가를 수행하였다. 데이터베이스의 품질 평가 상태에 따른 저항편향계수와 변동계수, 저항계수를 비교한 결과, 기존의 데이터베이스 처리과정과 품질평가법을 병행할 경우에 저항편향계수의 불확실성이 감소되며, 신뢰도 높은 LRFD 저항계수 보정에 효과적인 것으로 판단된다.

**Keywords :** Aggregate pier, Database, Quality evaluation, LRFD, Resistance bias factor, Load test

1 정희원, 동국대학교 공과대학 건설환경공학과 전문연구원 (Member, Research Fellow, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Dongguk Univ.)  
2 정희원, 동국대학교 공과대학 건설환경공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil and Environmental Engineering, Dongguk Univ.)  
3 정희원, 동국대학교 공과대학 건설환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engineering, Dongguk Univ., Tel: +82-2-2260-3355, Fax: +82-2-2260-8753, [ysjang@dongguk.edu](mailto:ysjang@dongguk.edu), Corresponding author, 교신저자)  
\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2015년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

경제성장과 더불어 산업단지, 주거단지, 도로, 항만 등의 용지 수요가 증가되고 있으나, 조건이 양호한 사업지구의 확보가 어려워짐에 따라 토질조건이 불량하고, 개발여건이 열악한 연약지반에도 구조물을 축조하여야 할 필요성이 점차 높아지고 있다. 전통적으로 연약지반상에 구조물 기초 용도로 이용되는 연약지반개량공법으로 심층혼합처리공법, 고압분사주입공법, 모래다짐말뚝공법, 쇄석다짐말뚝공법 등이 지반여건과 환경에 따라 다양하게 적용되어 왔다.

심층혼합처리공법과 고압분사주입공법은 시멘트슬러리를 지중에 공급하여 연약지반과 강제적으로 혼합함으로써 견고한 안정처리토를 형성하는 연약지반개량공법으로 개량체의 강성이 크기 때문에 침하방지와 안정성 확보에 장점이 있으나, 개량공사 중 발생하는 시멘트 슬라임 등에 의한 환경오염의 가능성이 있다.

모래다짐말뚝공법과 쇄석다짐말뚝공법은 연약지반에 모래 또는 쇄석을 압입하여 지중에 조립질 재료로 구성된 구근을 형성하는 연약지반개량공법으로 지반의 전단강도 및 지지력의 증가, 압밀침하 저감 등의 효과를 목적으로 한다. 모래다짐말뚝공법은 2000년대 초반까지 항만, 단지, 도로공사에서 다수 적용되었으나, 최근 모래 단가의 상승과 모래채취로 인한 하천 환경파괴 문제점으로 인해 모래보다 경제적이고 큰 강도를 갖는 쇄석다짐말뚝의 적용이 증가하는 추세이다.

현재 쇄석다짐말뚝의 설계는 기준안전율에 근거한 허용응력설계법으로 시행되고 있다. 그러나 안전율은 지반특성 및 하중 등 설계변수의 불확실성(uncertainty)이 정량적으로 반영되지 않은 경험적인 계수이기 때문에 신뢰도(reliability)를 가늠하는 좋은 척도가 될 수 없으며, 기준안전율로부터 산정된 허용지지력에 대한 정량적인 신뢰도를 명확히 규정할 수 없다. 따라서 설계정수의 불확실성이 통계학적 분석에 의해 반영되고, 일정한 신뢰도를 확보할 수 있도록 보정(calibration)된 부분 안전계수를 사용하는 한계상태설계법(Limit State Design)이 필요한 실정이다.

최근 20여 년 동안 이러한 현상을 반영하듯이 쇄석다짐말뚝의 거동과 보강효과를 확인하기 위한 정재하시험에 관한 연구가 활발하게 진행되었다. Han and Ye (1991)는 중국의 점성토 지반에 진동다짐방식으로 시공된 단일쇄석다짐말뚝 1개소 및 복합지반 개념의 단일쇄

석다짐말뚝 2개소에 대한 정재하시험을 실시하였으며, 쇄석다짐말뚝은 극한 지지력에 도달할 때까지 시간에 따라 응력집중율이 증가하는 것을 관찰하였다. Pitt et al.(2003)은 미국의 Iowa지역에서 3개의 단일쇄석다짐말뚝에 대한 정재하시험을 이용하여 심도별 하중-변위 거동을 분석한 결과, 쇄석다짐말뚝의 응력 전이 거동은 처음에 적용된 하중의 대부분은 쇄석다짐말뚝의 두부에 따라 분산되지만 적용된 하중이 증가함에 따라 말뚝의 선단을 통해 증가된 하중을 전이시키고, 주변지반으로 균등하게 분산됨을 나타내었다.

Lawton and Warner(2004)은 미국 Utah지역에서 램머다짐방식으로 보강된 단일쇄석다짐말뚝 1개소, 복합지반 개념의 단일쇄석말뚝 1개소, 무리쇄석다짐말뚝 1개소에 대하여 정재하시험을 실시한 결과, 쇄석으로 “강화된 매트릭스 영역을 통한 전단”으로 평가되는 팽창파괴가 발생하는 것을 확인하였으며, 작용된 응력 범위 내에서 무리쇄석말뚝에서의 무리말뚝효과는 없는 것으로 평가하였다.

Maurya et al.(2005)는 인도에서 4개의 복합지반 개념의 단일쇄석다짐말뚝에 대한 정재하시험으로부터 초기 하중-침하의 거동이 관찰되었으며, 하중 증가에 따라 소성적 연화~경화 거동까지의 범위로 불규칙한 거동을 확인하였다. Stuedlein(2008)은 미국 Texas지역의 점토지반에서 램머다짐 방식으로 보강된 4개의 쇄석다짐말뚝과 진동다짐 방식으로 보강된 6개의 쇄석다짐말뚝에 대한 정재하시험을 수행하였으며, 비배수 전단강도가 49~123kN/m<sup>3</sup>인 수준에서 최대 응력집중계수가 4.6~8.1임을 밝혔다.

이러한 연구 성과는 지반공학 설계분야의 큰 변화를 가져올 것으로 예상되는 한계상태설계법에 관한 연구를 연약지반개량공법으로 확장할 수 있는 계기가 되었다. 이미 한계상태설계법을 의무적으로 시행하고 있는 유럽과 북미지역에서도 비교적 저항력의 실측이 손쉬운 얇은기초, 깊은기초, 앵커 또는 보강재가 설치된 옹벽 등에 국한되어 연구가 수행된 점을 감안하면, 쇄석다짐말뚝의 정재하시험 사례의 증가는 한계상태설계법이 본격적으로 도입될 수 있는 가능성을 나타낸다.

하중저항계수설계법 도입 초기에는 통계학적 분석을 위한 실측 저항력 자료가 부족하여 Barker et al.(1991)의 연구에서와 같이 저항계수를 허용응력설계법의 안전율에 맞추는 보정방법을 주로 이용하였으나, 최근에는 재하시험 및 지반특성 자료를 체계적으로 수집하여 저항계수를 신뢰성이론을 도입하여 보정하고자 노력하

고 있다. 이에 대한 대표적인 연구로는 옹벽 구조물 (D'Appolonia, 1999), 보강토 옹벽(Allen et al., 2001; Chen, 2000a; 2000b), 깊은기초(Paikowsky et al., 2004), 얇은 기초(Paikowsky et al., 2010), Soil-Nailing(Lazarte, 2011) 등이 있다.

신뢰성이론을 적용하여 저항계수를 보정할 경우 필연적으로 설계방법에 내재된 불확실성을 통계학적 분석이 가능한 형태로 정량화될 수 있어야 하며, 통계학적 분석이 가능해야 할 만큼의 많은 시험 데이터를 필요로 하므로 그에 따른 많은 비용과 시간이 요구되는 어려움에 직면하게 된다. 한계상태설계법을 도입하고 있는 국가들은 가능한 중복되지 않은 실험연구를 계획하여 실험결과를 데이터베이스로 구축하고, 서로의 데이터를 공유하고 협력하는 등의 대안을 마련하고 있다. 그러나 실험에 참여하지 못한 후발 국가나 연구자들에게는 데이터를 공개하지 않고 있기 때문에 신뢰성이론을 적용한 하중저항계수설계법을 개발하기 위해서는 구조물 기초의 저항력에 대한 데이터베이스 구축이 선행되어야 한다.

또한 데이터베이스의 품질을 평가하고 데이터를 선별하는 조건들은 모든 구조물 기초에 대한 연구에서 공통적으로 적용되고 있는 것이 아니라 연구시기와 연구자의 주관에 따라 선택적으로 적용되었으며, 대부분 데이터베이스 구축 단계가 아닌 저항편향계수 결정 단계에서만 이루어지고 있다.

따라서 본 연구에서는 국내·외 학술논문 및 정재하시험 보고서 등으로부터 쇄석다짐말뚝의 저항력을 구성하는 항목에 해당하는 자료를 수집하고, 데이터베이스의 분석을 실시하였다. 그리고 하중저항계수설계법의 저항계수 보정을 위한 데이터베이스 구축 시 데이터의 품질을 평가하는 객관적 지표가 설정될 필요가 있음을 인식하고, 저항편향계수 결정 단계뿐만 아니라 데이터

베이스 구축 단계에서도 데이터베이스의 품질을 평가하는 방법을 제안함으로써 저항력의 불확실성을 나타내는 저항편향계수와 이를 이용하여 보정된 저항계수의 신뢰도를 높이고자 한다.

## 2. 국내·외 LRFD 데이터베이스 구축 및 품질 관리 현황

### 2.1 데이터베이스 구축

하중저항계수설계법에서 구조물 기초의 저항력에 대한 불확실성의 정량화는 저항계수를 보정하는데 중요한 과정이나 불확실성을 정확하게 정량화하는 것은 매우 어려우며, 가장 최선의 방법은 충분한 자료수집에 의한 데이터베이스 구성과 통계학적 분석이다.

국내·외 말뚝기초, 얇은기초, 쏘일네일링, 보강토옹벽에 대한 하중저항계수설계법 연구에서는 Table 1과 같이 구조물 기초별로 63~549개의 데이터를 수집하였다. 하중저항계수설계법에서는 지반의 종류와 기초의 시공방법, 기초 재료, 보강재의 종류에 따라 저항계수가 보정되므로 세부적으로 구분된 데이터 수는 2~346개의 범위로 구성되어 있다.

국내의 기초구조물 저항계수 결정 연구(KICT, 2008)에서는 약 2000여개가 넘는 재하시험 데이터베이스를 수집했으나, 대부분의 재하시험들은 설계의 검증용으로서 설계하중의 2배까지 재하하고 시험을 종료하기 때문에 실제로 극한지지력 또는 항복지지력이 확인되어 Table 1과 같이 63개의 재하시험 자료가 저항계수 보정에 이용되었다.

AASHTO LRFD 교량시방서(AASHTO, 2010)에 수록된 구조물 기초의 저항계수는 Table 2~4에 나타난

Table 1. Driven pile database for calibration of resistance factor

Type of Foundation	Soil type	Construction method / Type of material	Number of data	Reference
Driven pile	Cohesionless soil	Standard Penetration Test	63	KICT (2008)
	Rock, Sand, Clay	H-Piles, PPC, Pipe	338	Paikowsky et al. (2004)
Drilled pile	Sand, Clay, Mixed soil, etc.	Casing, Slurry, Dry	256	
Shallow Foundation	Sand, Gravel, Mixed, Others	Plate load test Small and Large footing Rafts & Mats	549	Paikowsky et al. (2010)
Reinforced soil retaining wall	Sand, Granular backfill	Uniaxial HDPE Biaxial PP, Woven PET	318	Huang (2010)
Soil-nailing	Sand, Gravel, Clay, Weathered Rock	-	153	Lazarte (2011)

미국 고속도로 관련 시설물 연구 프로그램 Report 507 (Paikowsky et al. 2004)과 Report 651(Paikowsky et al., 2010)의 연구결과에 기반하고 있다. 통계학적인 관점에서 저항편향계수의 통계학적 유의미성 부여를 위해서는 중심극한정리 이론에 의해 최소 자료수가 30개 이상 확보되어야 하지만, 항타말뚝의 인발저항에 관한 저항계수를 보정하는데 이용된 자료는 12~15개에 불과한 경우도 있었다. 따라서 본 연구에서는 쇄석다짐말뚝의 저항편향계수에 통계학적인 의미가 부여될 수 있도록 문헌 및 정재하시험 보고서로부터 65개소의 정재하시험 데이터를 수집하여 연구의 신뢰성을 확보할 수 있는 데이터베이스를 구축하고자 하였다.

## 2.2 데이터베이스 품질 관리

국내외 하중저항계수설계법에서 저항의 실측자료로 이용된 데이터베이스의 품질을 향상시키기 위한 사례들을 살펴보면, Paikowsky et al.(2004), KICT(2008) 등은 저항편향계수 산정 단계에서 실측 및 예측 저항력의 값이 너무 크거나 작아서 저항편향계수의 통계량이 왜곡되는 것을 방지하기 위하여 저항편향치 평균값의  $\pm 2$  배 표준편차 범위의 데이터만을 선택하는 방법을 사용하였으며, Allen et al.(2005), Huang(2010), Paikowsky et al.(2010), Smith et al.(2011) 등은 저항편향치를 정규확률지에 도시하여 확률분포에 적합하지 않은 꼬리(tail) 부분의 데이터를 제거하거나, Chi-square 검정법으로 로그정규분포에 적합하지 않은 데이터를 이상치(outlier)로 간주하여 실측 데이터를 제거하는 방법을 사용하는 것으로 분석되었다.

그러나 이들 데이터베이스의 품질 향상 및 데이터 제외 조건들은 모든 구조물 기초에 대한 연구에서 공통적으로 적용되고 있는 것이 아니라 연구시기와 연구자의 주관에 따라 선택적으로 적용되었으며, 대부분 데이터베이스 구축 단계가 아닌 저항편향계수 결정 단계에서만 이루어지고 있다. 따라서 본 연구에서는 데이터베이스 구축 시 데이터의 품질을 평가하는 객관적 지표를 설정하여 보다 신뢰성 있는 저항계수 보정이 수행될 수 있도록 하였다.

## 3. 쇄석다짐말뚝의 정재하시험 데이터베이스 구축

본 절에서는 쇄석다짐말뚝의 파괴형태, 극한지지력

이론식, 정재하시험법을 분석하여 데이터베이스 구축에 필요한 항목을 도출하고, 쇄석다짐말뚝의 정재하시험 사례를 이용한 데이터베이스 구축과정을 설명하였다. 또한 구축된 데이터베이스의 범위와 분포를 파악하고, 각 데이터베이스 항목 간의 상관성을 분석하였다.

### 3.1 쇄석다짐말뚝의 데이터베이스 구성 항목

Barksdale and Bachus(1983)와 Juran and Guermazi (1988)는 다짐말뚝의 주요 파괴 메커니즘을 팽창파괴(bulging failure), 전반전단파괴(general shear failure), 펀칭파괴(punching failure)로 구분하였으며, 흙과 다짐말뚝 간의 상호작용은 주로 다짐말뚝의 팽창을 억제하기 위한 원지반의 횡방향 구속압력의 증가에 지배된다고 하였다.

Black et al.(2007)은 미국 Plymouth University에서 수행된 점성토지반에 설치된 다짐말뚝에 대한 모형시험으로 구속압력이 가장 낮은 점성토 지반의 상부에서 팽창파괴가 발생하는 현상을 관찰한 바 있으며, McKelvey et al.(2004)은 기초에 작용되는 하중에 따라 다짐말뚝의 거동을 시각적으로 확인할 수 있도록 찰흙(clay-like)과 같은 특성을 가진 투명한 재료를 이용하여 모형시험을 수행한 결과 다짐말뚝의 길이가 짧은 경우에는 말뚝 길이 전체에 걸쳐 팽창파괴가 발생하였으며, 길이가 긴 경우에는 지반의 상부에서 팽창파괴가 발생한 것을 확인하였다. 이는 다짐말뚝의 길이가 긴 경우에는 말뚝의 상부에서 발생된 팽창으로 인해 말뚝 선단에 하중이 거의 전달되지 않는 것을 의미한다.

또한 Kim et al.(1997)은 말뚝직경의 2~3배의 깊이에서 대부분의 쇄석다짐말뚝의 경우에는 팽창파괴가 지배적인 파괴유형이라 하였다. 따라서 본 연구에서는 쇄석다짐말뚝의 주요 파괴모드를 팽창파괴로 선정하고, 팽창파괴에 대한 극한지지력 이론식을 Table 2에 나타내었다.

극한지지력 이론식에 대한 설계정수의 영향은 지지력 이론식의 형태를 관찰함으로써 설명될 수 있다. Greenwood (1970), Hughes and Withers(1974), Hansbo(1994)의 이론식은 Eq. (1)과 같이 횡방향응력과 비배수전단강도의 합에 수동토압계수가 곱해지는 형태로 정의된다.

$$q_u = (\sigma_{ro} + Xc_u) \frac{1 + \sin\phi_s}{1 - \sin\phi_s} \quad (1)$$

Table 2. Ultimate bearing capacity equations for bulging failure

Reference	Ultimate bearing capacity equation
Gibson & Anderson (1961)	$q_u = \left[ \sigma_{ro} + c_u \left( 1 + \ln \frac{E_c}{2c_u(1+\nu_c)} \right) \right] \frac{1 + \sin\phi_s}{1 - \sin\phi_s}$ $\sigma_{ro}$ : Initial in-situ lateral stress (kN/m <sup>2</sup> ) $E_c$ : Modulus of elasticity of soil within the unit cell (kN/m <sup>2</sup> ) $c_u$ : Cohesion of in-situ soil (kN/m <sup>2</sup> ) $\phi_s$ : Friction angle of the aggregate pier (°) $\nu_c$ : Poisson's ratio of in-situ soil
Greenwood (1970)	$q_u = (\gamma_c z K_{pc} + 2c_u \sqrt{K_{pc}}) \frac{1 + \sin\phi_s}{1 - \sin\phi_s}$ $\gamma_c$ : Unit weight of in-situ soil (kN/m <sup>3</sup> ) $z$ : Expected depth for bulging failure (m) $K_{pc}$ : Coefficient of passive earth pressure of in-situ soil
Vesic (1972)	$q_u = (c_u F_c' + q_{avg} F_q') \frac{1 + \sin\phi_s}{1 - \sin\phi_s}$ $q_{avg}$ : Average stress at the equivalent failure depth $(=\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3})$ (kN/m <sup>2</sup> ) $F_c', F_q'$ : Cavity expansion factors
Hughes & Withers (1974)	$q_u = (\sigma_{ro} + 4c_u) \frac{1 + \sin\phi_s}{1 - \sin\phi_s}$
Brauns (1978)	$q_u = \left[ \sigma_{ro} + \left( 1 + \ln \frac{E_c}{3 \cdot c_u} \right) \cdot c_u \right] \frac{1 + \sin\phi_s}{1 - \sin\phi_s}$
Hansbo (1994)	$q_u = (\sigma_{ro} + 5c_u) \frac{1 + \sin\phi_s}{1 - \sin\phi_s}$
Madhav et al. (1979)	$q_u = (4c_u + \sigma_{ro} + K_o q_s)(W/B)^2 \frac{1 + \sin\phi_s}{1 - \sin\phi_s} + [1 - (W/B)^2] q_s$ $B$ : Width of loading (m) $q_s$ : Bearing capacity of in-situ soil $(=(2/3)c_u N_c)$ (kN/m <sup>2</sup> ) $W$ : Width of equivalent granular pile strip (m) $K_o$ : Coefficient of earth pressure at rest

이 때 비배수전단강도의 배수로 표현되는 계수 X는 각 연구자들의 실험결과에 따라 2~5로 제안되었으며, 지지력이론식 중 계수 X가 가장 큰 Hansbo(1994)의 이론식이 비배수전단강도 변화에 가장 큰 영향을 받고, Greenwood(1970)은 비교적 영향을 적게 받는 것으로 분석되었다. Madhav et al.(1979)의 이론식은 쇄석다짐말뚝의 등가폭(W)과 하중재하폭(B)의 비에 대한 영향  $(W/B)^2$ 을 고려하며, 하중재하폭은 쇄석다짐말뚝의 설치간격과 같으므로 1보다 작은 값이 되어 비배수전단강도에 영향을 가장 적게 받는 것으로 분석된다. 따라서 쇄석다짐말뚝의 극한지지력을 예측하기 위해서는 원지반의 비배수전단강도와 쇄석의 내부마찰각에 대한 신중한 선택이 요구된다.

국내·외 쇄석다짐말뚝에 대한 적용사례가 증가하면서 다양한 지반조건 및 시공조건에 부합하는 설계기법 정립과 설계지지력 확인, 단말뚝, 복합지반, 군말뚝의 거동을 평가하기 위한 정재하시험이 여러 연구자들에

의해 Fig. 1과 같은 형태로 수행되었다. Fig. 1에서 (a)는 단말뚝의 지지력과 침하량을 평가하기 위한 재하시험 형태이며, (b), (c)는 주로 복합지반에서 각각 단말뚝과 군말뚝에 대한 응력분담비와 지지력, 침하량을 평가하기 위한 재하시험 형태이다. (d)는 말뚝의 배치형태에 따른 군말뚝의 지지력과 침하량을 평가하기 위한 재하시험이다.

단일 쇄석다짐말뚝은 정재하시험으로부터 얻어진 하중-침하량 곡선을 이용하여 극한지지력을 판정한다. 그러나 복합지반 및 군말뚝의 형태로 정재하시험이 수행된 경우에는 재하판의 형태와 면적, 쇄석다짐말뚝의 직경 및 간격을 고려하여 치환면적비를 산정한 다음, 말뚝 1본당 분담하는 극한지지력을 산정하므로 정재하시험 및 쇄석다짐말뚝의 제원을 파악하는 것이 중요하다.

쇄석다짐말뚝의 파괴형태와 극한지지력 이론식의 구성, 쇄석다짐말뚝의 정재하시험법을 상기와 같이 검토

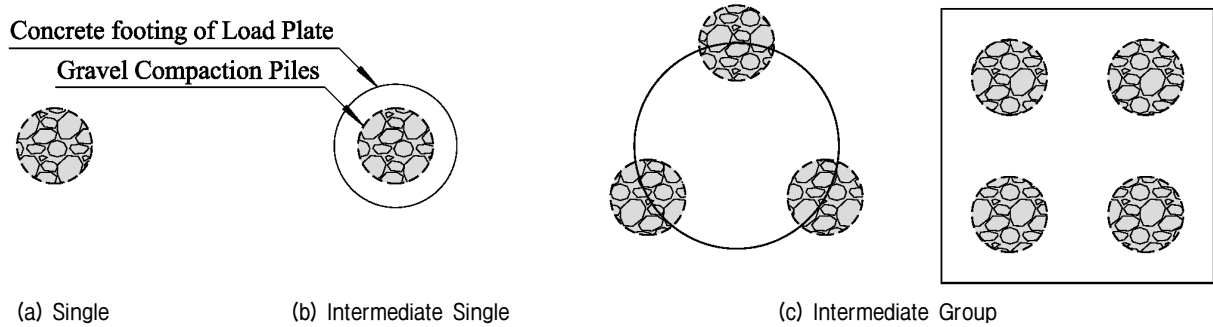


Fig. 1. Typical static load test for aggregate pier (Stuedlein, 2008)

Table 3. Database component of aggregate pier

Category	Components
Static load test	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Load test (type, displacement, pressure)</li> <li>• Footing (shape, width, diameter, depth of embedment)</li> <li>• Area replacement ratio</li> </ul>
In-situ soil properties	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unit weight, undrained shear strength, elastic modulus, poisson's ratio</li> </ul>
Specification of aggregate pier	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compaction method</li> <li>• Aggregate pier (diameter, length, internal friction angle)</li> </ul>

Table 4. Number of static load test cases conducted in various literature

Literature	Domestic		International	
	Journal	Test report	Journal	Test report
Number of test data	7	5	32	21

한 결과, 하중저항계수설계법을 위한 데이터베이스를 구축하기 위해서는 정재하시험의 제원과 극한지지력 예측에 필요한 쇄석다짐말뚝의 제원, 원지반의 공학적 특성 자료의 수집이 요구되므로 데이터베이스 구성 항목을 Table 3과 같이 계획하였다.

### 3.2 데이터의 수집 및 데이터베이스 구축

데이터베이스 구축을 위하여 국내·외 학술논문 및 쇄석다짐말뚝의 시험/시공 결과 보고서로부터 72개소의 쇄석다짐말뚝의 정재하시험 자료를 수집하였으며, 사질 토지반에 설치된 쇄석다짐말뚝과 무리말뚝에 대한 정재하시험은 7개소로 자료수가 상대적으로 적어 통계학적 분석이 곤란한 이유로 본 연구에서는 점성토지반에 설치된 단일쇄석다짐말뚝을 대상으로 Table 4와 같이 65개소에 대한 데이터베이스를 구축하였다. 정재하시험은 미국(36개소), 한국(12개소), 인도(6개소), 필리핀(5개소), 중국(3개소), 영국(1개소), 기타 확인되지 않은 지역(2개소) 등에서 수행되었다.

### 3.3 데이터베이스의 분석

쇄석다짐말뚝의 정재하시험은 원형(56개소)과 사각형(9개소)의 재하판이 이용되었다. 재하판의 재료는 대부분 콘크리트 푸팅(44개소)과 강판(16개소)으로 구성되었으며, 일부 쇄석매트, 모래매트 등(5개소)이 이용되었다. 재하판의 직경은 Fig. 2(a)와 같이 0.3~4.0m의 범위로 대부분 0.7~0.9m 크기의 재하판이 이용되었으며, 재하판의 근입깊이는 4개소를 제외하고 1.0m 이내로 설치되었다(Fig. 2(b)).

쇄석다짐말뚝은 램머다짐(50개소), 진동다짐(15개소)으로 시공되었으며, 쇄석다짐말뚝의 직경은 0.3~1.1m 범위로 시공되었다. 대부분의 쇄석다짐말뚝의 시방기준에서 말뚝의 직경을 0.7~0.9m로 규정하고 있어 대부분의 자료가 이 범위에 속하고 있다(Fig. 2(c)). 쇄석다짐말뚝의 길이는 Fig. 2(d)와 같이 1.5~20.7m로 분포하며, 52개소의 쇄석다짐말뚝은 길이가 10m 이하이며, 7개소는 10~15m인 것으로 분석되었다.

단일쇄석다짐말뚝의 거동을 분석하기 위하여 수행된 47개소의 정재하시험에서는 말뚝의 직경과 재하판의

직경이 동일하여 치환면적비가 95~100%이고, 말뚝과 지반의 응력분담을 고려하는 18개소의 복합지반 개념의 정재하시험에서는 재하판의 직경이 말뚝이 직경 보

다 크므로 치환면적비가 20~80%이다(Fig. 2(e)). 쇄석 다짐말뚝의 거동 분석과 극한지지력 평가에 이용된 쇄석재료의 내부마찰각은 Fig. 2(f)와 같이 35~50° 범위

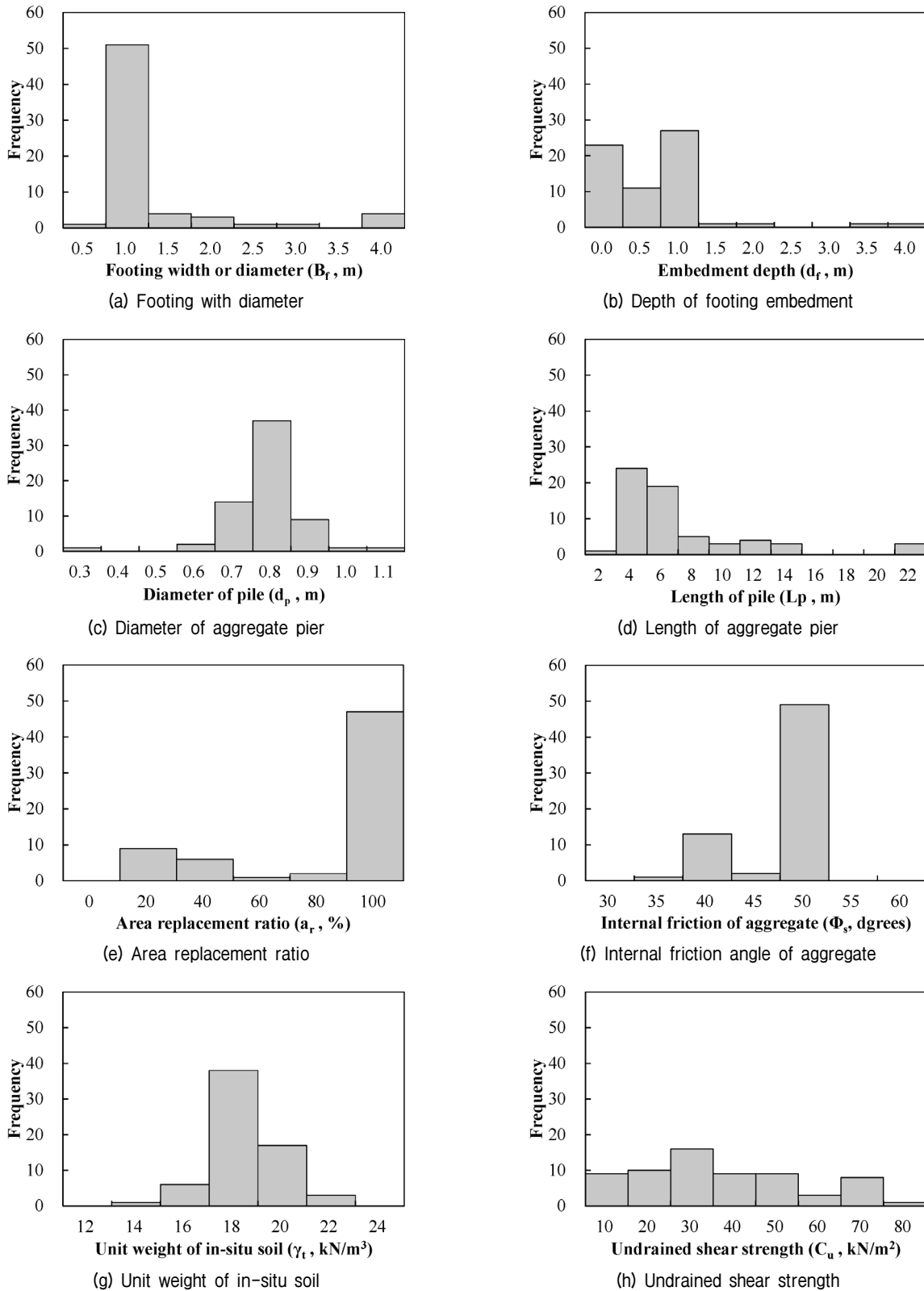


Fig. 2. Frequency histogram for variables in static load test database

로 적용되었고, 최근 적용 실적이 증가하고 있는 램머다짐을 이용하는 쇄석다짐말뚝에서는 대부분 내부마찰각을 50°로 적용하고 있다.

점성토지반에 설치된 단일쇄석다짐말뚝의 팽창파괴에 대한 지지력은 원지반의 구속압에 지배를 받고 있으므로 원지반의 단위중량과 비배수전단강도의 파악이 중요하다. 특히 본 연구에서는 쇄석다짐말뚝의 여러 파괴모드 중에서 팽창파괴에 대하여 분석하고자 하므로 팽창파괴가 발생되는 말뚝 직경의 2~5배가 되는 심도의 비배수전단강도의 평균값을 데이터베이스에 입력하였다. 정재하시험이 실시된 원지반의 단위중량은 Fig. 2(g)와 같이 14.0~20.4kN/m<sup>3</sup> 범위로 분포하며, 평균 단위중량은 17.8kN/m<sup>3</sup>로 분석되었다. 쇄석다짐말뚝의 데이터베이스는 여러 지역에서 시공된 자료를 수집하였기 때문에 비배수전단강도는 Fig. 2(h)와 같이 6.0~72.0kPa로 비교적 넓은 범위로 분포하였으며, 평균 비배수전단강도는 33.6kPa로 분석되었다.

### 3.4 데이터의 상관성 분석

정재하시험으로부터 평가된 극한지지력과 설계변수들 간의 상관성의 정도는 단순회귀분석에 의해 산정된 결정계수( $R^2$ )를 이용하여 분석하였으며, 각 설계변수들 간의 결정계수를 Table 5에 나타내었다. 쇄석다짐말뚝의 극한지지력과 상관성이 높은 설계변수는 쇄석의 내부마찰각( $R^2=0.54$ )으로 나타났으며, 양(+)의 상관관계로 설계변수가 증가한다면 극한지지력도 증가하는 것으로 분석되었다.

설계변수들 간의 상관계수는 재하판의 폭( $B_f$ )과 재하판의 치환면적비( $a_r$ )에서  $R^2=0.72$ 로 매우 상관성이 높은 것으로 나타났다. 이는 쇄석다짐말뚝의 직경은 대부

분 0.7~0.9m로 제한된 크기로 시공되지만, 쇄석다짐말뚝과 원지반의 응력분담을 고려한 복합지반 개념의 정재하시험에서는 재하판의 폭을 증가시킬 경우에는 재하판의 치환면적비가 감소하는 특성이 반영된 결과이다. 그러나 이들 설계변수의 상관성은 쇄석다짐말뚝의 한계상태설계법을 구성하는 데에는 큰 영향을 미치지 않는다.

## 4. 데이터베이스의 품질평가법 제안

본 연구에서는 연약지반개량공법의 한계상태설계법 연구에 관한 설문조사를 2011년 11월부터 2012년 6월까지 총 8개월간 수행하였으며, 연약지반개량공법 및 한계상태설계법과 관련된 전문가그룹의 자문회의를 실시하였다. 국내 설계회사, 시공사, 공기업, 연구소 등에서 지반공학 분야를 담당하고 있는 105명의 기술자들을 대상으로 시행하였으며, 설문응답율은 62%(65명)로 업무경력이 10~20년인 기술자의 비율(44.7%)이 가장 많았다.

설문응답자들은 연약지반개량 설계 시 시험시공, 계측 등의 피드백 부족(24%)을 가장 큰 문제점으로 지적하였으며, 현장 및 실내시험 수량의 부족(21%), 불확실한 설계정수 적용(20%)의 순으로 응답하였다. 또한 연약지반개량 설계 개선의 우선순위로 시추조사 및 지반조사 수량의 증가(43%), 재하시험 등을 통한 설계품질 개선(28%)이 시급하다고 하였다.

쇄석다짐말뚝의 하중저항계수설계법 개발에서 우선적으로 고려되어야 할 사항으로 전문가들은 정재하시험 등을 통한 실측 저항력(극한지지력)의 평가, 지반 및 쇄석말뚝의 역학적 특성 평가, 쇄석다짐말뚝의 시공사례 수집이 중요하다는 자문의견을 제시하였다.

Table 5. Correlation coefficient between ultimate bearing capacity and design variables

	$q_u$	$B_f$	$d_f$	$d_p$	$\phi_s$	$a_r$	$L_p$	$\gamma_t$	$S_u$
$q_u$	1.00	-0.12	-0.17	-0.25	0.54	0.14	-0.09	-0.19	0.21
$B_f$	-0.12	1.00	-0.09	0.56	-0.16	-0.72	0.33	0.06	0.00
$d_f$	-0.17	-0.09	1.00	0.04	-0.17	0.17	-0.02	0.13	0.10
$d_p$	-0.25	0.56	0.04	1.00	-0.21	-0.18	0.23	0.01	-0.16
$\phi_s$	0.54	-0.16	-0.17	-0.21	1.00	0.17	0.03	-0.35	-0.08
$a_r$	0.14	-0.72	0.17	-0.18	0.17	1.00	-0.30	0.01	0.02
$L_p$	-0.09	0.33	-0.02	0.23	0.03	-0.30	1.00	-0.20	-0.34
$\gamma_t$	-0.19	0.06	0.13	0.01	-0.35	0.01	-0.20	1.00	0.34



정재하시험으로부터 판정되는 극한지지력은 실측 저항력으로 구성되고, 정재하시험에 이용된 쇄석다짐말뚝의 제원과 원위치에서 조사된 원지반의 물리·역학적 특성은 극한지지력 이론식에 대입하여 예측 저항력을 산정하는데 이용되므로 데이터베이스의 품질은 하중저항계수설계법의 저항계수 보정에 큰 영향을 미친다. 그러나 기존의 하중저항계수설계법에서는 신뢰도 높은 데이터베이스 구성을 위한 데이터의 품질을 평가하지 않고 있으며, 저항편향계수의 통계량이 왜곡되지 않도록 적절한 범위의 데이터만을 선택하는 기법만 제시하고 있다. 따라서 본 연구에서는 하중저항계수설계법을 위한 데이터베이스 구축 시, 수집된 데이터의 품질을 평가하기 위한 방안으로 상기 설문조사 결과 및 전문가들의 자문의견을 정성적으로 반영하여 Table 6과 같이 품질평점표를 제안하였다.

데이터베이스의 품질기준으로는 정재하시험에 의해 실측된 저항력의 신뢰성을 판단하는 기준으로 정재하시험이 극한 또는 항복하중까지 재하되었는지를 평가하였으며, 지반특성과 쇄석다짐말뚝의 특성을 이용하여 예측 저항력의 신뢰성을 판단하는 기준으로 원지반의 물리·역학적 특성 및 쇄석의 특성값이 명확한지를 평가하도록 계획하였다. 그리고 실측 및 예측 저항력을 산정하는데 필요한 쇄석다짐말뚝의 제원(직경, 길이, 재하판 크기)이 명확한지를 평가하도록 하였다.

정재하시험에서는 설계하중의 200% 수준에서 재하하중이 결정되므로 시험규정에 의해 시험이 시행되었는지를 판단하기 위하여 정재하시험의 재하하중과 설계하중의 비에 따라 0~10점을 부여하도록 하였으며, 정재하시험 결과를 이용하여 항복하중 또는 극한하중이 판정되는지에 따라 0~30점을 부여하였다.

지반특성에 관한 품질기준에서는 쇄석다짐말뚝의 극한지지력에 가장 큰 상관관계를 갖는 쇄석의 내부마찰각에 가중치를 두어 0~20점을 부여하였으며, 그 외 물리·역학적 특성값을 추정하는 방법에 따라 0~10점을 부여하였다.

쇄석다짐말뚝의 제원에 대한 품질기준에서는 말뚝의 제원, 시공방법, 재하시험의 제원의 3가지 항목에 따라 각각 0~10점을 부여하였으며, 평가항목 중 명확하지 않은 항목마다 5점씩 감점하고, 평가항목이 제시되지 않은 경우 0점을 부여하였다.

데이터베이스로 구축된 65개의 쇄석다짐말뚝의 데이터는 상기 데이터베이스 품질평점표에 의해 Fig. 3과 같이 정량적인 평점이 부여되었다.

정재하시험 자료의 출처별 평균 평점은 국내 학술논문(KJ)이 86점으로 가장 높게 나타났으며, 해외 학술논문(AJ) 77점, 국내 재하시험보고서(KR) 65점, 해외 재하시험보고서(AR) 62점 순으로 나타났다. 품질평점이 60점 이하인 자료의 대부분은 정재하시험에 의해 항복하

Table 6. Quality rating table of database for aggregate pier

Quality criteria	Rate item	Rating	Total	
Static load test	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Test load and design load ratio</li> </ul>	Under 1.0	0	40
		1.0~2.0	3	
		2.0~3.0	5	
		Over 3.0	10	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Determining whether the yield load or ultimate load</li> </ul>	Impossible	0	30
Possible		30		
Soil properties	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Internal friction angle of aggregate</li> </ul>	If the calculated field or laboratory test	20	30
		If given in the design manual or specifications	15	
		If it is not present	0	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Physical and mechanical properties of in-situ soil</li> </ul>	If the calculated field or laboratory test	10	
		If the estimated standard penetration test	5	
		If the estimated by literature	3	
If it is difficult to estimate the properties	0			
Specification of aggregate pier	• If the diameter, length, embedment of the aggregate pier is clearly presented	10	30	
	• If the proposed construction method of the aggregate pier	10		
	• If the specifications (test type, shape, width of footing, number of aggregate pier) of the load test are presented	10		
	• One characteristic is missing, each of the 5 penalty points	-5		

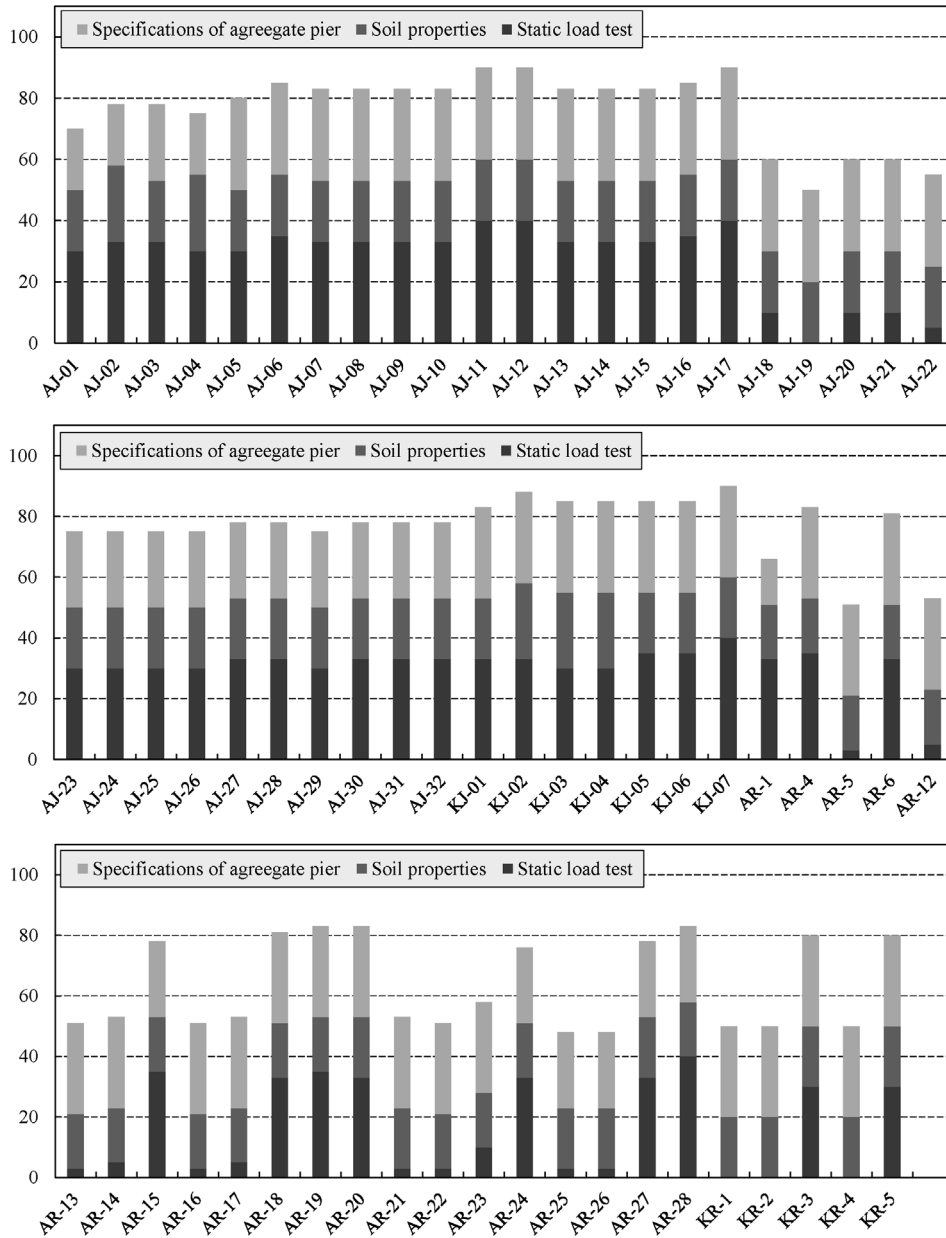


Fig. 3. Quality rating score of database

중 또는 극한하중이 판정되지 않아 실측 저항력의 신뢰도를 확보하지 못하는 경우가 대부분을 차지하였다.

데이터의 품질등급을 부여하는 체계는 Table 10에서 세 가지 품질기준에 대한 품질평점의 합이 80점 이상인 경우에 Good 등급을 부여하였으며, Fine 등급은 60점 이상인 경우에 부여하였다. 최소한 한 가지 품질기준이라도 추정이 불가능하거나 평점이 60점 미만인 경우에는 Poor 등급을 부여하였다. 본 연구에서 수집된 65개소의 데이터 중에서 Good 등급과 Fine 등급을 부여받아 비교적 품질 기준을 만족하는 데이터는 Table 7과 같이 49개소로 분석되었다.

Table 7. Quality evaluation result of the database

Quality rating	Good	Fine	Poor
Number of data	28	21	16

## 5. 데이터베이스 품질평가법의 적용

하중저항계수설계법에서는 공간적 불확실성, 조사의 불확실성, 설계 및 해석모델의 불확실성 등 저항과 관련된 불확실성을 저항편향계수로 정량화하여 저항계수 보정에 이용하고 있으며, 저항편향치(resistance bias)는 정재하시험 등을 통하여 실측된 저항( $R_m$ , measured

resistance)에 대한 이론식에 의해 예측된 공칭저항( $R_m$ , predicted or nominal resistance)의 비로 Eq. (2)와 같이 나타낸다.

$$\lambda_{Ri} = \frac{R_m}{R_i} \quad (2)$$

저항편향치에 대한 통계학적 분석을 통하여 산정되는 저항편향치의 평균값인 저항편향계수( $\lambda_R$ , resistance bias factor)는 Eq. (3)과 같이 산정하며, 저항값을 예측하는 이론식의 정확성과 평균적인 내재적 보수성을 정량적으로 나타내는 계수이다. 변동계수( $COV_R$ )는 저항편향계수의 평균값에 대한 표준편차의 비로서 저항편향계수의 불확실성을 정량화한 값이다. 즉, 예측값이 정확한 이론식일수록 저항편향계수는 1에 가까워지며, 저항편향계수의 변동계수(COV)는 작은 값을 나타낸다. 또한 저항편향계수가 1보다 크다는 것은 저항력을 예측하는 이론식에 내재된 안전여유가 크다는 것을 의미하며, 보수적인 이론식으로 평가할 수 있다.

$$\lambda_R = \frac{\sum \lambda_{Ri}}{N}, \sigma_R = \sqrt{\frac{\sum (\lambda_{Ri} - \lambda_R)^2}{N-1}}, COV_R = \frac{\sigma_R}{\lambda_R} \quad (3)$$

데이터베이스로 구축된 정재하시험 65개소 중에서 극한지지력을 판정할 수 없는 6개소를 제외한 59개소에 대하여 실제 지지력을 비교적 정확히 예측하는 것으로 나타난 Hughes and Wither(1974)의 지지력이론식을 기준으로 저항편향치를 산정하였다. 저항편향치는 Fig. 4와 같이 정규확률지 상에 이론적인 로그정규분포와 데이터의 분위수에 따른 확률값을 도시하였으며, 검정색

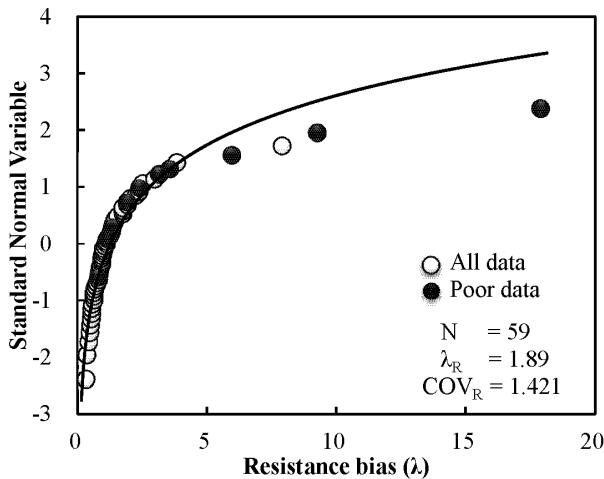


Fig. 4. Standard normal quantile of bias data for all data

표식으로 나타낸 Poor 등급 데이터의 저항편향치는 0.8 ~ 17.9 범위로 비교적 넓게 분포하였다.

특히 Poor 등급으로 판정된 데이터가 평균값 주변에 다수 분포하는 것을 볼 수 있는데, 이 데이터들은 정재하 시험 자료, 쇄석다짐말뚝의 제원, 원지반의 공학적 특성 등 데이터베이스 구성 항목들을 구성하기에 신뢰도가 낮은 자료임에도 불구하고 우연하게도 저항편향치의 평균값과 유사하며 확률분포에 어울리게 산정되었음을 의미한다. 이는 기존의 저항편향치 평균값의  $\pm 2$ 배 표준편차 범위의 데이터만을 선택하는 방법과 확률분포에 적합하지 않은 꼬리(tail) 부분의 데이터를 제거하는 방법으로는 데이터의 품질상태를 직접 확인할 수 없는 단점을 보여주고 있으며, 본 연구에서 제안된 데이터베이스의 품질평가법이 저항편향계수 및 저항계수의 신뢰도를

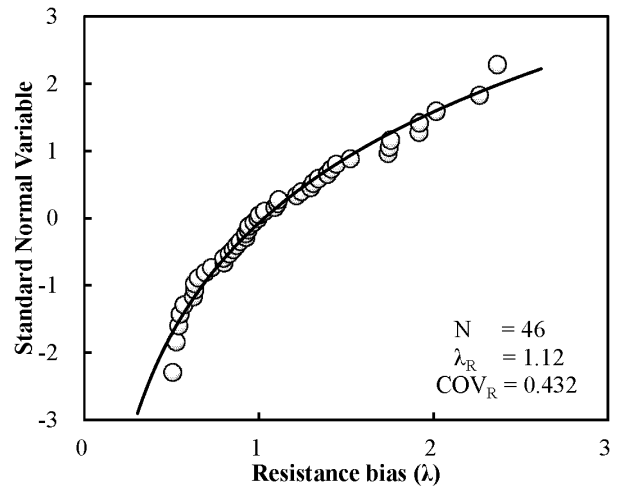


Fig. 5. Standard normal quantile of bias data with the outlier removed

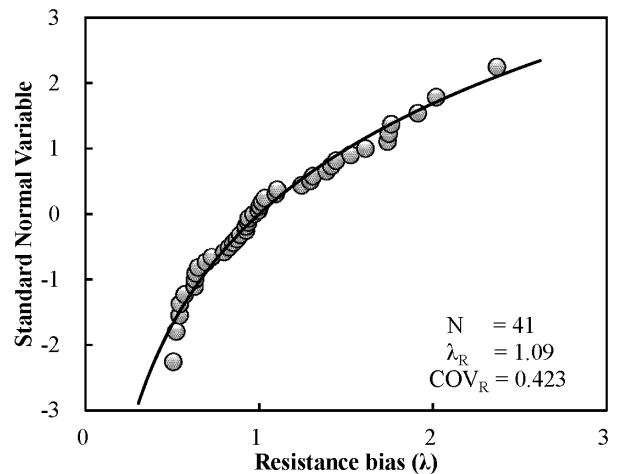


Fig. 6. Standard normal quantile of bias data with the quality evaluation method

Table 8. Statistical characteristics of resistance bias factor according to database quality evaluation

Status of data	Number of data	Resistance bias factor		
		Range	$\lambda_R$	$COV_R$
All database	59	0.34~17.9	1.89	1.421
Existing method	46	0.50~2.37	1.12	0.485
Proposed method	41	0.50~2.37	1.09	0.423

높일 수 있는 효과적인 방법임을 나타내고 있다.

Fig. 5와 Fig. 6은 저항편향치를 로그정규분포에 적합하도록 꼬리 부분의 이상치(outlier)만을 제거하는 기존의 방법과 본 연구에서 제안된 데이터베이스의 품질평가법을 병행하였을 경우에 정규확률지에 표현된 저항편향치를 비교한 것이다. 두 가지 방법에 의해 저항편향계수 산정에 선택된 데이터 수는 각각 46개소와 41개소로 기존의 방법에서는 Poor등급의 데이터가 5개소가 포함된다. 즉, 기존의 방법에서는 저항편향치에 대한 확률분포의 적합도를 검증하는 통계학적 분석을 수행하더라도 Poor 등급 데이터가 포함되는 현상을 막을 수 없는 것으로 판단된다.

데이터베이스 품질평가법에 따른 저항편향계수의 통계학적 특성을 Table 8에 나타내었다. 극한지지력을 판정할 수 있는 쇄석다짐말뚝의 정재하시험 데이터 전체에 대한 저항편향계수와 변동계수는 각각 1.89, 1.421로 지지력이론식에 내재된 안전여유는 비교적 크며, 불확실성은 매우 큰 것으로 분석되었다. 확률분포에 어울리지 않는 이상치를 제거하는 기존의 방법을 적용하였을 경우에는 전체 데이터에 대한 저항편향계수의 불확실성보다 약 66% 감소하였으며, 품질평가법을 병행할 경우에는 약 70% 감소하는 것으로 분석되었다. 특히 본 연구에서 제안된 품질평가법을 병행될 경우 기존의 방법에 비해서도 저항편향계수의 불확실성은 약 13%가 감소되는 것으로 분석되었다.

저항편향계수와 변동계수의 변화는 직접적으로 저항계수에 영향을 미치므로 고품질의 데이터베이스를 이용한 저항계수의 보정이 이뤄질 수 있도록 데이터베이스의 품질평가 과정이 필요한 것으로 판단된다.

## 6. 결론

본 연구에서는 국내·외 쇄석다짐말뚝에 대한 설계 및 시공자료, 학술논문, 정재하시험 보고서 등으로부터 자료를 수집하여 하중저항계수설계법의 저항계수를 보정하기 위한 데이터베이스를 구축하였으며, 기존의 저항

편향계수 결정 단계에서만 수행되는 데이터의 신뢰도 확보를 보완하기 위한 데이터베이스 품질평가법을 제안함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 국내·외 하중저항계수설계법의 저항계수 보정 시 수집된 데이터베이스의 구축 및 품질 관리 현황을 검토하고, 쇄석다짐말뚝의 저항편향계수에 통계학적인 의미가 부여될 수 있도록 65개소의 정재하시험 데이터를 수집하였으며, 데이터베이스 구축 시 데이터의 품질을 평가하는 객관적 지표를 설정하여 보다 신뢰성 있는 저항계수 보정이 수행될 수 있도록 계획하였다.
- (2) 기존 구조물 기초에 관한 LRFD 연구에서 수행된 데이터베이스의 신뢰도 향상을 위한 방법으로는 데이터베이스 내에 유연히 포함된 저품질의 데이터를 확인할 수 없는 단점이 발견되었으며, 본 연구에서 제안된 데이터베이스의 품질평가법을 병행할 경우에는 보정된 저항계수의 신뢰도를 높일 수 있을 것으로 분석되었다.
- (3) 데이터베이스의 품질 향상을 위하여 이상치 제거를 시행한 경우에는 전체 데이터를 적용한 경우에 비하여 저항편향계수의 불확실성이 약 66% 감소하였으며, 데이터베이스 품질평가법을 병행할 경우에는 약 70%의 불확실성이 감소되는 것으로 분석되어 신뢰도 높은 하중저항계수설계법의 저항계수 보정을 위하여 데이터베이스의 품질평가 과정이 필요한 것으로 판단된다.

## 감사의 글

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

## 참고문헌 (References)

1. AASHTO (2010), *AASHTO LRFD bridge design specifications*, Fifth

- Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C, pp.10-39~10-51.
2. 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*, Report WA-RD 513, Washington State Department of Transportation, pp.108.
  3. Allen, T. M., Nowak, A. S., and Bathurst, R. J. (2005), *Calibration to determine load and resistance Factors for Geotechnical and Structural Design*, Circular Number E-C079, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp.13-14.
  4. 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-27.
  5. Barksdale, R. D. and Bachus, R. C. (1983), *Design and construction of stone columns*, Vol. 1, Report No. FHWA/RD 83/026, Federal Highway Administration, pp.27-35.
  6. Black, J. A., Sivakumar, V., Madhav, M. R., and Hamill, G. A. (2007), "Reinforced stone column in weak deposits: laboratory model test", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.133, No.9, pp.1154-1161.
  7. Brauns, J. (1978), "Die anfangstraglast von schottersäulen im bingigen untergrund", *Die bautechnik*, Vol.8, pp.263-271.
  8. Chen, Y. (2000a), "Practical analysis and design methods of mechanically stabilized earth walls I: design philosophies and procedures", *Engineering Structures*, Vol.22, No.7, pp.793-808.
  9. Chen, Y. (2000b), "Practical analysis and design methods of mechanically stabilized earth walls II: design comparisons and Impact of LRFD method", *Engineering Structures*, Vol.22, No.7, pp.809-830.
  10. D'Appolonia. (1999), *Developing new AASHTO LRFD specification for retaining walls*, Final Report, NCHRP Project 20-7, Task 88, Ground Technology, Inc., Monroeville, PA. pp.50.
  11. Greenwood, D. A. (1970), "Mechanical improvement of soils below ground surface", *Proceedings Conference on Ground Engineering*, Institution of Civil Engineers, London, UK, pp.11-22.
  12. Gibson, R. E. and Anderson, W. F. (1961), "Insitu Measurement of Soil Properties with the Pressuremeter", *Civil Engineering*, London, Vol.56, pp.615-620.
  13. Han, J. and Ye, S. (1991), "Field tests of soft clay stabilized by stone columns in coastal areas of China", *Proceedings 4th International Deep Foundations Institute Conference*, Vol.1, Balkema Press, Rotterdam, The Netherlands, pp.243-248.
  14. Hansbo, S. (1994), *Foundation engineering*, Developments in Geotechnical Engineering, Elsevier Press, 95, pp.450-455.
  15. Huang, B. Q. (2010), *Numerical study and load resistance factor design (LRFD) Calibration for reinforced soil retaining walls*, Ph. D. Thesis, Queen's University, Canada, p.174.
  16. 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.
  17. Jang, Y. S. and Park, J. M. (2013), "Application of LRFD method factor for aggregate piers", *2013 Spring Geosynthetics Conference*, Daegu, pp.1-7.
  18. Juran, I. and Guermazi, A. (1988), "Settlement response of soft soils reinforced by compacted sand columns", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.114, No.8, pp.930-943.
  19. KICT (2008), *Determination of resistance factors for foundation structure design by LRFD*, Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs, Korea, p.65.
  20. 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 1997 National Conference, Seoul, Korea, pp.73-80.
  21. Lawton, E. C. and Warner, B. J. (2004), *Performance of a group of GeoPier elements loaded in compression compared to single geopier elements and unreinforced soil*, Report No. UUCVEEN 04-12, University of Utah, Salt Lake City, UT., p.257.
  22. 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, DC., p.54.
  23. Madhav, M. R., Iyengar, N. G. R., Vitkar, R. P., and Nandia, A. (1979), "SIincreased bearing capacity and reduced settlements due to inclusions in soil", *Proceedings of the International Conference on Soil Reinforcement: Reinforced Earth and Other Techniques*, Paris, Vol.II, pp.329-333.
  24. Maurya, R. R., Sharma, B. V. R., and Naresh, D. N. (2005), "Footing Load Tests on Single and Group of Stone Columns", *Proceedings Sixteenth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Osaka, Japan. pp.1385-1388.
  25. McKelvey, D., Sivakumar, V., Bell, A., and Graham, J. (2004), "Modeling vibrated stone columns in soft clay", *Proceedings of the Institute of Civil Engineers Geotechnical Engineering*, Vol.157, Issue GE3, pp.137-149.
  26. 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, DC., p.16.
  27. 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, DC., pp.61-66.
  28. Pitt, J. M., White, D. J., Gaul, A., and Hoevelcamp, K. (2003), *Highway applications for rammed aggregate piers in Iowa soils, Final Report*, Iowa DOT Project TR-443, CTRE Project pp.1-60.
  29. Smith, T. D., Banas, A., Gummer, M., and Jin, J. (2011), *Recalibration of the GRLWEAP LRFD resistance factor for Oregon DOT*, FHWA-OR-RD-11-08, Oregon Department of Transportation Research Section, pp.49-50.
  30. Stuedlein, A. W. (2008), *Bearing capacity and displacement of spread footings on aggregate pier reinforced clay*, Ph.D. Dissertation, University of Washington, pp.213-302.
  31. Vesic, A. S. (1972), "Expansion of cavities in infinite soil mass", *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 98, No.3, pp.265-290.

Received : June 12<sup>th</sup>, 2014

Revised : July 23<sup>rd</sup>, 2014

Accepted : August 13<sup>th</sup>, 2014