

# 지반물성치 통계분석을 통한 실규모 시험용 제방축조의 재현성에 관한 정량적 평가

## Quantitative Evaluation of Reproducibility of Embankment for Full Scale Test through Statistical Analysis of Physical Properties of Soil

이 희 민<sup>1)</sup> · 문 준 호<sup>2)</sup> · 김 민 진<sup>3)</sup> · 김 영 욱<sup>†</sup>

Heemin Lee · Junho Moon · Minjin Kim · Younguk Kim

Received: March 14<sup>th</sup>, 2022; Revised: March 16<sup>th</sup>, 2022; Accepted: March 25<sup>th</sup>, 2022

**ABSTRACT** : For the substantiation and verification of studies related to the construction of a levee using riverbed soil, real-scale levee construction and experimental studies are essential. One of the most important factors in the experimental study is the reproducibility of the multiple levees with the same initial conditions. Quantitative analysis of the reproducibility should be presented. In this study, a number of physical properties (specific gravity test, sieving test, liquid-plastic limit test, compaction test, on-site Density test) for multiple embankments built with fine-grained bed soil was obtained. The collected data then used to obtain the possibility of reproducing levee through statistical analysis to suggest a process of indicating a numeric initial condition of the real-scale test. As a result of statistical analysis to verify the aforementioned process, it was confirmed that it was possible to quantitatively evaluate the reproducibility of the construction under the same conditions of embankments. This is expected to be a basic data for a full-scale embankment test using riverbed soil including other soil based real-scale tests.

**Keywords** : Levee, Physical property test, Real-scale, Reproducibility, Riverbed soil, Statistical analysis

**요 지** : 하상토를 활용한 제방 축조에 관련된 연구의 실증 및 검증을 위해서는 실규모의 제방 축조 및 시험 연구가 필수인데, 이 중 가장 중요한 인자 중 하나가 시험에 활용되는 다수의 축조된 제방들이 얼마나 동일한 초기 준비 조건으로 축조될 수 있는지, 즉 동일한 시험 초기조건의 다수 재현 가능성에 대한 수치적, 정량적 기준을 먼저 제시하여야 한다. 본 연구에서는 세립분이 함유된 하상토로 시험을 위하여 축조한 복수 제방에 대해 다양한 지반물성치(비중시험, 체가름시험, 액소성한계시험, 다짐시험, 현장밀도시험)를 취득하고, 수집한 데이터의 통계분석을 통해 제방 축조 시 동일 조건의 시험 준비 재현 가능성을 정량적으로 검토할 수 있는 일련의 과정을 수립하여 제시하였다. 과정수립에 대한 검증으로 시험용 제방을 축조하고 지반물성치를 수집하여 통계분석한 결과, 시험용 제방의 동일 조건 축조 재현성에 대한 정량적 평가가 가능함을 확인할 수 있었으며, 이는 제방뿐만 아니라 다양한 실규모 시험에 있어 초기조건의 정량적 동일성을 평가할 수 있는 기초적인 자료가 될 수 있을 것으로 기대된다.

**주요어** : 제방, 물성시험, 실규모, 재현성, 하상토, 통계분석

## 1. 서 론

최근 이상기후에 의한 집중호우의 빈번한 발생으로 홍수에 의한 하천 제방의 붕괴 및 피해가 급증하고 있는 추세이다. 특히 2020년 6월-7월, 우리나라는 54일이라는 역대 최장 기간의 장마로 인해 댐이 범람하고 하천 제방이 붕괴되는 등의 대규모 홍수 피해를 겪었다(최종남, 2021).

하천 제방의 붕괴는 역학적, 수공학적, 지반공학적 등 다양한 원인들에 의해 발생한다. 한국건설기술연구원에서 하천 제방의 붕괴 원인을 조사한 결과에 따르면 약 50%가 축조

재료의 선정, 다짐의 불량 등 제방 토공부분에 관련된 것으로 파악되었으며, 이는 기존에 하상토가 제체 축조재료의 주재료이기 때문인 것으로 나타났다(Kim, 2009). 이후 피해 사례들을 감안하여 제방의 안정성 확보를 위해 다짐 및 재료관리의 어려움이 있는 하상토를 제체의 축조재료로 사용하는 것을 원칙적으로 금지하고 있다. 또한, 2019년 개정된 하천설계기준에서는 전단강도 및 투수특성이 양호한 양질의 토사를 제체의 축조재료로 사용하여 시공하도록 권장하고 있다(하천설계기준, 2019). 그러나 하천설계기준에 의해 권장되는 양질의 토사는 시공현장에서 쉽게 구할 수 없다는

1) Employee, KCC Engineering and Construction CO. Ltd.

2) Research Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University

3) Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University

† Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University (Corresponding Author : yukim@mju.ac.kr)

문제가 있어 과도한 공사비의 지출로 인한 경제성 저하의 원인이 될 수 있다. 따라서 경제적이고 재료의 확보가 비교적 쉬운 하상토를 이용한 하천제방 축조기술에 대한 연구가 추가적으로 필요한 상황이다(정호준, 2010). 이러한 연구의 실증 및 검증을 위해서는 다수의 제방 축조 및 실험 연구가 필수적이며, 이 중 가장 중요한 인자 중 하나는 실험을 위하여 축조된 제방들이 얼마나 동일한 초기조건으로 축조되어 있는지, 즉 실험 초기조건 재현 가능성에 대한 정량적 통계수치의 증빙을 들 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 세립분이 함유된 하상토로 실험을 위하여 축조한 다수의 제방에 대하여 가설검증을 통해 정량적 통계수치로 실험제방의 준비 재현성(매번 동일한 초기조건으로 준비된 제방들)을 검증하는 방법을 제안하였다. 제방 축조 시 다수의 물성치(비중시험, 체가름시험, 액소성한계시험, 다짐시험, 현장밀도시험)를 취득하고, 수집한 데이터의 통계분석을 통해 제방 축조 시 동일 조건의 시험 준비 재현 가능성을 수치적으로 검토하고자 하였다. 통계분석에 관한 연구 흐름도는 다음 Fig. 1과 같다.

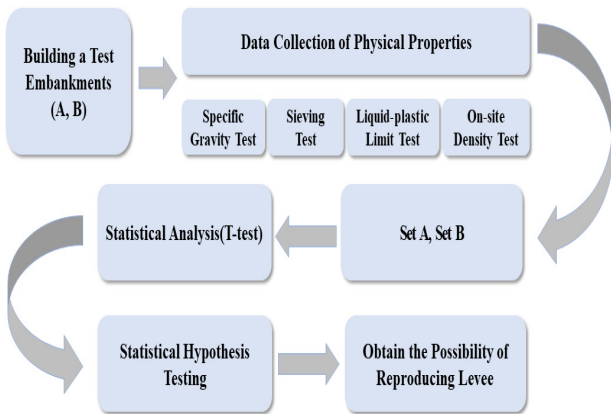


Fig. 1. Flow chart

## 2. 시험용 제방의 물성 특성

본 연구에서 사용된 시료는 하상토에 세립분의 시료를 임의로 혼합하여 준비하고 이를 이용해 두 개의 시험용 제방 A와 B를 동일 조건으로 축조하였으며 축조하는 중간에 임의의 위치에서 시료를 채취하고 이에 따른 물성시험을 수행하였다. 제방 A와 제방 B에 대한 시험 데이터를 Set A와 Set B로 분류하여 분석에 활용하였다.

### 2.1 비중

비중은 흙 입자의 크기나 흙 성분의 변화에 따라 변화하는

범위가 좁기 때문에 비중만으로 흙을 분류하거나 또는 흙의 종류를 판별하기는 어렵다. 그러나 흙의 특성을 파악하는데 가장 기본적인 자료이므로 본 연구에서는 비중을 측정하고 연구과정에서 분석자료로 활용하였다. 시험 제방을 준비하는 과정에서 층별 다짐 시 각각의 제방 A와 B에서 8개소의 산발된 위치에서 시료를 채취하였다. 각 위치에서는 5개의 시료를 채취하여 값을 구하고 5개의 평균치를 그 위치에서의 대표 비중으로 결정하였다.

본 연구의 비중 시험의 결과는 Table 1과 Table 2에 정리되어 있으며 Set A의 비중 평균값은 2.60, Set B의 비중 평균값은 2.62로 나타났다.

Table 1. Specific gravity test result-Set A

No.	Specific gravity $G_s$
A-1	2.58
A-2	2.59
A-3	2.58
A-4	2.64
A-5	2.66
A-6	2.58
A-7	2.58
A-8	2.61
Average	2.60

Table 2. Specific gravity test result-Set B

No.	Specific gravity $G_s$
B-1	2.62
B-2	2.64
B-3	2.58
B-4	2.63
B-5	2.60
B-6	2.65
B-7	2.62
B-8	2.61
Average	2.62

### 2.2 균등 / 곡률계수

수분에 의하여 뭉쳐진 세립질을 포함한 시료의 표준 체가름 시험을 실시할 경우 흙 입자들이 잘 분류가 되지 않는 문제가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 세립분의 함유율을 더 명확하게 파악하기 위해 Wet-Sieve 시험을 수행하였으며, 시험 후 건조기에 노건조시켜 무게를 측정하여 입도분포곡선을 작도하였고, 균등계수( $C_u$ )와 곡률계수( $C_g$ )를 산정하였다. 시료의 채취 위치 및 방법은 비중 시험과 동일하며 시험 결과는 다음 Table 3, Table 4에 정리하였다.

Table 3. Sieving test result-Set A

No.	Uniformity coefficient $C_u$	Curvature coefficient $C_g$
A-1	5.06	1.39
A-2	5.31	1.27
A-3	5.15	1.29
A-4	4.94	1.33
A-5	5.86	1.32
A-6	4.72	0.92
A-7	6.40	1.37
A-8	4.71	1.18
Average	5.27	1.26
Classification	SP	

Table 4. Sieving test result-Set B

No.	Uniformity coefficient $C_u$	Curvature coefficient $C_g$
B-1	4.86	1.08
B-2	4.94	1.11
B-3	4.59	1.07
B-4	5.77	1.23
B-5	4.97	1.16
B-6	6.04	1.28
B-7	5.41	1.16
B-8	5.12	1.19
Average	5.21	1.16
Classification	SP	

### 2.3 다짐 / 들밀도 시험

다짐 시험에서 결정한 최대 건조단위중량과 현장밀도 시험에 의해 결정한 시료의 건조단위중량을 통해 상대다짐도를 구할 수 있다. 따라서 현장밀도 시험에 앞서 제방 A와 제방 B의 축조 시료를 활용하여 다짐시험을 실시하여 최대 건조단위중량을 먼저 결정하였다. Set A와 Set B의 최대 건조단위중량과 최적함수비는 각각  $1.90g/cm^3$ ,  $1.95g/cm^3$ , 14.15%, 13.68%로 도출되었다.

Table 5. Compaction test result

	Set A	Set B
Maximum dry unit weight ( $g/cm^3$ )	1.90	1.95
Optimum water content (%)	14.15	13.68

앞에서 설명한 바와 같이 시료 채취 위치에서 현장밀도 시험을 실시하여 정리하면 Table 6, 7과 같다.

Table 6. On-site density test result-Set A

No.	Relative compaction (%)
A-1	92.85
A-2	87.19
A-3	93.31
A-4	90.28
A-5	88.15
A-6	87.48
A-7	86.78
A-8	89.11
Average	89.39

Table 7. On-site density test result-Set B

No.	Relative compaction (%)
B-1	87.54
B-2	84.95
B-3	89.89
B-4	89.66
B-5	86.69
B-6	88.15
B-7	86.03
B-8	86.57
Average	87.43

## 3. SPSS 통계분석(T-검정)

### 3.1 가설 설정

통계적 가설검정은 통계적 추론의 하나로 모집단의 실제 값이 얼마가 된다는 주장과 관련해 표본의 정보를 활용해 가설의 합당성 여부를 판단하는 과정을 일컫는다. 예를 들어 한국 남성의 평균 신장은 170cm 라는 모집단의 특성인 모수의 합당성을 검증하는 방법이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 제방 A와 제방 B의 다양한 물성치의 평균 값을 모집단의 특성인 모수라 가정하고 두 모수 간의 비교/검정을 통하여 두 제방의 시험 준비 전 초기조건 유사성을 수치적으로 평가하는 과정 및 방법을 제안하였다. SPSS 통계분석 프로그램을 활용하여 T-검정을 실시하였고 가설 검정의 결론을 도출하였다. T-검정은 “제방 A와 제방 B의 물성치 평균값의 차이가 없다.”라는 귀무가설(2개의 표본 집단을 비교함에 있어 설정된 가설이 잘못되었다는 증거가 제시되기 전까지 참으로 받아들여지는 가설)과 “제방 A와 제방 B의 물성치 평균값의 차이가 있다”라는 대립가설(귀무가설이 잘못되었다는 충분한 증거가 제시되어 귀무가설이 기각될 때 받아들여지는 가설)을 먼저 설정하고 분석결과를 활용하여 이 두 가설에서 한 가지를 선택할 수 있도록

하는 통계적 접근법이다(안윤기, 2004). 본 연구에서는 다음과 같이 가설을 설정하였다.

귀무가설 : 제방 A와 제방 B의 물성치 평균값의 차이가 없다. (동일한 제방으로 간주할 수 있다.)

대립가설 : 제방 A와 제방 B의 물성치 평균값의 차이가 있다. (동일한 제방이 아니다. 즉, 시험 초기 조건이 달라 시험결과를 활용할 수 없다.)

### 3.2 분석 결과

통계분석 순서를 간단히 설명하면 다음과 같다. 먼저 두 표본집단의 평균차이를 확인하고, 두 집단에 분산의 동질성 가정을 검증한다. 두 집단의 모분산의 동질성을 나타내는 F값에 대한 유의확률이 유의수준 0.05보다 클 경우에는 등분산을 가정한 상태에서 검증결과를 해석하고, 유의수준 0.05보다 작으면 등분산을 가정하지 않은 상태에서 검증결과를 해석한다. 등분산의 가정 여부에 따라 T값을 구해 그에 대한 유의확률이 유의수준 0.05보다 클 경우에는 귀무가설을 채택하고, 유의수준 0.05보다 작을 경우에는 귀무가설을 기각하고 대립가설을 채택하게 된다.

Set A와 Set B에 대해 T-검정을 이용하여 분석해 본 결과, 아래와 같이 나타났다.

#### 3.2.1 비중( $G_s$ )

T-검정 결과, 두 집단 모분산의 동질성을 나타내는 F값이 1.737이며 F값에 대한 유의확률이 0.209>0.05이므로 등분산을 가정한 상태에서 결과를 해석하였다. 등분산을 가정한 상태에서의 T값은 -1.184, 그에 대한 유의확률은 0.256>0.05이므로 귀무가설을 채택하여 “제방 A와 제방 B 간의 비중 평균값의 차이가 없다”고 해석할 수 있다.

Table 8. Statistical analysis of specific gravity

Group statistics	N	Average	Standard deviation	Standard error
Set A	8	2.6031	.02971	.01050
Set B	8	2.6183	.02074	.00733

Independent samples test	F	Significance probability	T	Significance probability
Assuming equal variance	1.737	.209	-1.184	.256
Does not assume equal variances	-	-	-1.184	.258

#### 3.2.2 균등계수( $C_u$ )

T-검정 결과, 두 집단 모분산의 동질성을 나타내는 F값이 0.089이며 F값에 대한 유의확률이 0.770>0.05이므로 등분산을 가정한 상태에서 결과를 해석하였다. 등분산을 가정한 상태에서의 T값은 0.208, 그에 대한 유의확률은 0.838>0.05이므로 귀무가설을 채택하여 “제방 A와 제방 B 간의 균등계수 평균값의 차이가 없다”고 해석할 수 있다.

Table 9. Statistical analysis of uniformity coefficient

Group statistics	N	Average	Standard deviation	Standard error
Set A	8	5.2688	.58677	.20745
Set B	8	5.2125	.49106	.17361

Independent samples test	F	Significance probability	T	Significance probability
Assuming equal variance	.089	.770	.208	.838
Does not assume equal variances	-	-	.208	.838

#### 3.2.3 액성한계( $w_L$ )

T-검정 결과, 두 집단 모분산의 동질성을 나타내는 F값이 0.138이며 F값에 대한 유의확률이 0.720>0.05이므로 등분산을 가정한 상태에서 결과를 해석하였다. 등분산을 가정한 상태에서의 T값은 1.123, 그에 대한 유의확률은 0.294>0.05이므로 귀무가설을 채택하여 “제방 A와 제방 B 간의 액등계수 평균값의 차이가 없다”고 해석할 수 있다.

Table 10. Statistical analysis of liquid limit

Group statistics	N	Average	Standard deviation	Standard error
Set A	8	28.5740	1.65834	.74163
Set B	8	27.4560	1.48650	.66478

Independent samples test	F	Significance probability	T	Significance probability
Assuming equal variance	.138	.720	1.123	.294
Does not assume equal variances	-	-	1.123	.295

#### 3.2.4 상대다짐도( $R_C$ )

T-검정 결과, 두 집단 모분산의 동질성을 나타내는 F값이 1.584이며 F값에 대한 유의확률이 0.229>0.05이므로 등분산을 가정한 상태에서 결과를 해석하였다. 등분산을 가정한 상태에서의 T값은 1.805, 그에 대한 유의확률은 0.093>0.05

이므로 귀무가설을 채택하여 ‘제방 A와 제방 B 간의 상대다짐도 평균값의 차이가 없다’고 해석할 수 있다.

Table 11. Statistical analysis of relative compaction

Group statistics	N	Average	Standard deviation	Standard error
Set A	8	89.3938	2.53646	.89677
Set B	8	87.4347	1.73061	.61186

Independent samples test	F	Significance probability	T	Significance probability
Assuming equal variance	1.584	.229	1.805	.093
Does not assume equal variances	-	-	1.805	.096

#### 4. 결 론

본 연구에서는 하상토를 활용한 실규모 시험용 제방 실험 연구에 있어 실험에 활용되는 다수의 제방 축조 시 동일한 초기조건의 재현 가능성에 대하여 수치적으로 정량적 판단치를 제시할 수 있는 방법을 제안하였다. 제안방법에 대한 검증에 위하여 세립분이 함유된 하상토로 축조한 두 제방에 대해 다수의 물성치(비중시험, 체가름시험, 액소성한계시험, 다짐시험, 현장밀도시험)를 취득하고, 수집한 데이터의 통계분석을 통해 제방 축조 시 두 제방이 동일한 조건으로 실규모시험을 위한 준비가 되었음을 통계적 수치로 정량제시할 수 있음을 나타내었다.

즉, 제방 A와 B를 축조하면서 취득한 제방 A, B의 물성치들에 대한 T-검정 통계분석을 수행하고 “제방 A와 제방

B의 물성치 차이 여부”를 판단하였다. 통계분석 결과, 유의 확률에 따른 귀무가설을 채택할 수 있었으며 “제방 A와 제방 B의 물성치 평균값의 차이가 없다.”라는 통계수치적 결론에 도달할 수 있었다.

따라서, 본 연구에서 제안한 통계수치적 검정 방법을 활용하면 추후 흙과 관련된 대형 시험에서 본 시험 시작 전 초기조건의 동일성 또는 재현 가능성을 정량적으로 평가할 수 있을 것이다. 그러나, 이번 연구에서는 함수비에 따른 흙의 거동이 상이한 바, 함수비 및 시료채취 시의 기온 등을 획득하여 활용하지 못한 아쉬움이 남아있다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 물관리연구사업(과제번호:21AWMP-B160248-06)에 의해 이루어진 것으로, 이에 감사드립니다.

#### References

1. 안윤기 (2004), 가설검정, 민영사 pp. 5~20.
2. 정호준, 하은용, 손세구, 김영도 (2012), 하상준설토를 활용한 친환경 건설자재 개발, 한국폐기물자원순환학회 춘계학술발표논문집, Vol. 2012, No. 0, pp. 158~160.
3. 최종남 (2021), “기후위기 시대”, 우리가 가야할 길, 물과 미래 (수자원학회지), Vol. 54, No. 5, pp. 3~5.
4. 하천설계기준·해설 (2019), 한국수자원학회, pp. 496~544.
5. Kim, B. S. (2009), A study on the use of dredged bed materials for the riverbank construction, Master's thesis, Yunsei University, pp. 1~19 (In Korean).