

주요 강하구 연약지반의 압밀 특성 평가

Estimation of Consolidation Characteristics of Soft Ground in Major River Mouth

이 준 대¹⁾ · 권 영 철²⁾ · 배 우 석[†]

JunDae Lee · YoungChul Kwon · WooSeok Bae

Received: December 4th, 2018; Revised: December 11th, 2018; Accepted: January 31st, 2019

ABSTRACT : The coastal area forms various sedimentary layers according to the environmental conditions such as the topography and geological features of the upper region of the river, ocean currents, and river mouth. Therefore, identifying the characteristics of the marine clay deposited in the coastal area plays a key role in the investigation of the formation of soft ground. In general, alluvial grounds are formed by a variety of factors such as changes in topography and natural environment, they have very diverse qualities depending on the deposited region or sedimentation conditions. The most important thing for the construction of social infrastructures in soft ground areas is economical and efficient treatment of soft ground. In this study, the author collected data from diverse laboratory and field tests on five areas in western and southern offshore with relatively high reliability, and then statistically analyzed them, thereby presenting standard constants for construction design. Correlation between design parameters such as over consolidation ratio, preconsolidation pressure was analyzed using linear and non-linear regression analyses. Also, proposed distribution characteristics of design parameters in consideration of each region's uncertainty through statistical analyses such as normality verification, outlier removal.

Keywords : River mouth, Uncertainty, Statistical methods, Preconsolidation pressure, Over consolidation ratio

요 지 : 해안지역은 강의 지형과 지질, 해류 및 강하구 등 환경조건에 따라 다양한 퇴적층을 구성하므로 해안지역에 축적된 해성점토 특성을 파악하는 것이 연약지반의 형성을 규명하는데 중요한 역할을 수행하게 된다. 일반적으로 축적지반은 지형과 자연환경 변화와 같은 다양한 구성요소로 형성되므로 퇴적된 지역이나 퇴적상황에 따라 매우 다른 성질을 가지게 된다. 더구나 해안지역을 따라 다양한 대형사업이 강하구에 집중됨으로써 해류의 흐름이나 퇴적특성이 바뀌어 퇴적상태가 변하여 불확실성이 더욱 심해지고 있는 상황이다. 따라서 본 연구에서는 지반의 불확실성을 고려한 설계 상수를 제시할 목적으로 서해안과 남해안을 5개 영역으로 구분하고 대상연안에 해당되는 상대적으로 높은 신뢰성을 가진 실내 및 현장조사 자료를 수집하여 통계적인 분석을 수행하였으며, 선형 및 비선형 회귀 분석을 사용하여 설계 매개 변수 간의 상관관계를 분석하였다. 또한 정상 검증, 이상치제거와 같은 통계 분석을 통해 각 지역의 불확실성을 고려한 설계 매개 변수의 분포 특성을 제안했다.

주요어 : 강하구, 불확실성, 통계분석, 선형압밀하중, 과압밀비

1. 서 론

우리나라 서·남해안의 지반은 지형적인 특성으로 연약한 실트나 점토질 흙의 퇴적으로 이루어진 경우가 많다. 특히 해안 지형은 파랑, 연안류, 조류, 바람 등의 침식·퇴적 작용에 의해 형성되거나 변화하며 이러한 작용으로 위치에 따라 침식이 일어나거나 퇴적작용이 발생되어 지반 내의 응력의 크기가 달라지고 조수간만차로 인해 해수면 위로의 노출이 반복되거나 해수면 상승으로 인해 수위가 높아짐에 따라 많은 영향을 받게 된다. 또한 근대에 이루어진 대규모

방조제나 하구둑, 간척사업 등은 강물과 조류의 흐름을 차단하거나 방향을 변화시켜 과거의 퇴적작용과 상이한 과정을 유발하므로 주변의 하구 발달에 따라 특징적인 연약지반 특성을 보이게 된다.

해안지역은 이와같이 지형과 지질, 조수간만, 해수면의 변화, 인위적인 건설현황 등의 환경조건에 따라 다양한 퇴적층을 구성하며, 일반적으로 축적층으로 구분된다. 축적층은 가장 최근에 형성된 지층으로 암반의 풍화에 의한 침식과 다양한 운반, 퇴적작용으로 이루어진 지층으로 매우 복잡한 구성 요소에 영향을 받으므로 퇴적된 지역이나 퇴적상황에 따라

1) Professor, Department of Civil Engineering, Semyung University

2) Professor, Department of Civil Engineering and Management, Tohoku Institute of Technology

† Director of Research, R&D Center, NANO-GEO ENC Co. Ltd. (Corresponding Author : old1007@hanmail.net)

매우 상이한 성질을 갖는다. 특히 국내의 남해안은 수차례의 조산운동으로 복잡한 리아시식 해안을 형성하며 연안류에 의한 세립 퇴적물 유입, 조류에 의한 공급, 중국 양자강 부유 퇴적물, 하천에서 유출된 퇴적물 유입 등에 의해 형성되었으며, 서해안은 침수해안으로 크고 작은 규모의 만(bay)을 가진 리아형 해안으로 평균 4.0m 이상의 대조차 해안이며 밀물과 썰물의 주기적 해수면 상하운동에 지배되는 조수환경을 갖는다. 따라서 퇴적환경에 따른 연약층의 생성원인과 형성과정의 차이로 물리역학적인 인자가 서로 상이하며 특히 압밀상태에 관련된 인자의 차이를 예상할 수 있다.

따라서 연약지반의 토질특성이나 침하특성을 평가하기 위해서는 해수면 변동이나 퇴적환경에 따라 발생하는 지반의 압밀상태를 정확히 파악하는 것이 중요하다. 이에 대한 연구로 Hwang(2004)은 목포지역에 대해 지표면에서 4m 깊이까지 과압밀 경향이 강해 4m 이하를 정규압밀로 보고 해석한다고 제안하고, Kim(2006)은 진주 남강지역에 대해 세립토의 98%가 과압밀 상태이며 지하수위나 상재하중의 영향이 크게 미치지 않는 8m를 기준으로 정규압밀을 나타낸다고 주장하였다. Ann(2009)은 황강유역의 기초지반 분석을 통해 하천을 중류와 하류지역으로 나누고 과압밀비를 제시하였고, Jeong(2011)은 서낙동강 유역에 대한 분석을 통해 지하수위와 상재하중의 영향을 많이 받는 5m 심도까지는 과압밀(14%)이, 심도가 깊어짐에 따라 정규압밀 양상(86%)을 나타내는 것으로 주장하였다. 또한 Bae & Heo(2011)는 통계적 방법에 의해 압축지수 예측식을 제안하였고, Kang(2012)은 남해안 지역의 과압밀비에 대한 평가를 수행한 바 있으며, Jeong(2013)은 조석간만의 차이가 서로 다른 조류를 야기하여 서로 다른 퇴적현상을 만든다고 판단하고 남해안과 서해안 조류의 유속이 20배가 넘게 차이가 나기 때문에 연안에서의 현저한 유속차가 주요 강하구에서의 퇴적조건을 다르게 하고 이에 따라 지반의 압밀특성이 달라졌다고 주장하였다. 또한 Hwang(2016)은 서해안 지역의 점토를 강하구를 중심으로 분류하고 각 지역의 물리적인 특성에 대해 연구한 바 있다.

본 연구에서는 해안지역을 퇴적 특성이 상이할 것으로 판단되는 서남해안의 한강, 금강, 영산강, 섬진강, 낙동강 하구

로 국한하여 양질의 실험자료를 확보한 후 설계정수의 불확실성을 줄이기 위해 정규성검증이나 이상치 제거 등의 통계처리를 통해 강하구별로 압밀특성을 구분하고 비교하였다.

2. 퇴적환경과 지반특성

2.1 대상지역의 퇴적환경 및 주요성분

일반적으로 남해안의 연약지반은 그 깊이가 20~40m로 두터운 편으로 해성점토층은 매우 비균질하고 압축성이 매우 큰 특징을 보이는 반면, 서해안은 깊이가 10~25m이며, 압축성도 남해안에 비해 양호한 특징을 보여 두 지역은 공학적으로나 지질학적으로 현저한 차이를 보이고 있다(Jeong, 2013). 특히 한강하구는 조석의 영향과 완만한 하상구배로 두꺼운 점토층이 퇴적되어 있으며, 금강하구는 대조기에 염수가 깊이 침입하여 하구역역이 매우 큰 강으로 카올리나이트 함유율이 높은 미세 퇴적물로 형성되어 있고 영산강하구는 하안을 따라 넓은 갯벌이 형성되어 있다.

한강과 금강, 영산강 하구의 퇴적물은 일라이트의 함량이 평균 52% 정도로 가장 높고 다음으로 카올리나이트의 함량이 평균 13%, 스�멕타이트가 평균 4% 정도를 차지하는 것으로 나타나(Choi et al., 2010) 서해안은 일라이트의 특성을 가장 크게 보이고 있다. 또한 섬진강 하구는 하천의 영향을 더 많이 받은 넓은 간석지가 위치하고 퇴적암이 우세하여 세립분 함량이 크고 흡착수와 층간수를 다량으로 함유하는 몬모릴로나이트 성분이 한국의 다른 지역에 비해 많이 함유되어 있으며, 낙동강 하구는 대규모 삼각지로 연약점성토가 매우 두껍게 분포하고 있으며, 섬진강 하구와 마찬가지로 견운모 함량이 우세하며 몬모릴로나이트가 함유되어 있다(Oh, et al., 2009). 그러나 장기간동안 수행되어온 해안구간의 간척사업과 항구, 방파제 사업으로 하구의 해수유동과 퇴적특성이 크게 변하고 있어 지반의 불확실성은 지속적으로 변동되고 있음을 밝혀둔다. 본 연구에서는 Table 1과 같이 물성실험 자료 5,312건, 압축시험 자료 5,823건, 압밀시험 3,107건을 수집하고 분류하여 분석에 활용하였다. 분석에 사용된 자료는 Yoon & Heo(2004)와 Kang(2012),

Table 1. Maximum data of major river mouth

Test types	Number of the data				
	Han	Keum	Yeongsan	Seomjin	Nakdong
Physical test	1,879	638	288	1,290	1,217
Uniaxial compression test	1,135	204	116	806	857
Triaxial compression test	993	175	116	684	737
Standard consolidation test	1,101	229	128	829	820

Table 2. Comparison of physical properties

Physical properties	Average				
	Han	Keum	Yeongsan	Seomjin	Nakdong
W _n (%)	34.42	40.75	44.49	82.78	58.05
LL (%)	37.73	41.53	48.57	79.81	64.06
PI (%)	15.29	18.15	25.88	51.11	37.30
A	1.23	1.14	0.84	1.44	1.09

Hwang(2016)이 서남해안의 물리 역학 특성을 분석하기 위해 수집한 취합하여 활용하였으며 총 619개 현장의 물성 및 역학시험자료를 분석하였다.

Table 2는 대표적인 물성실험 결과를 비교한 것으로 서해안에 비해 남해안의 연약점토가 함수비와 액성한계가 100% 이상 큰 값을 보여 압축성이 큰 것으로 나타났으며 영산강 지역은 함수비가 약 9~30%, 액성한계는 약 7~18%, 소성지수는 100%

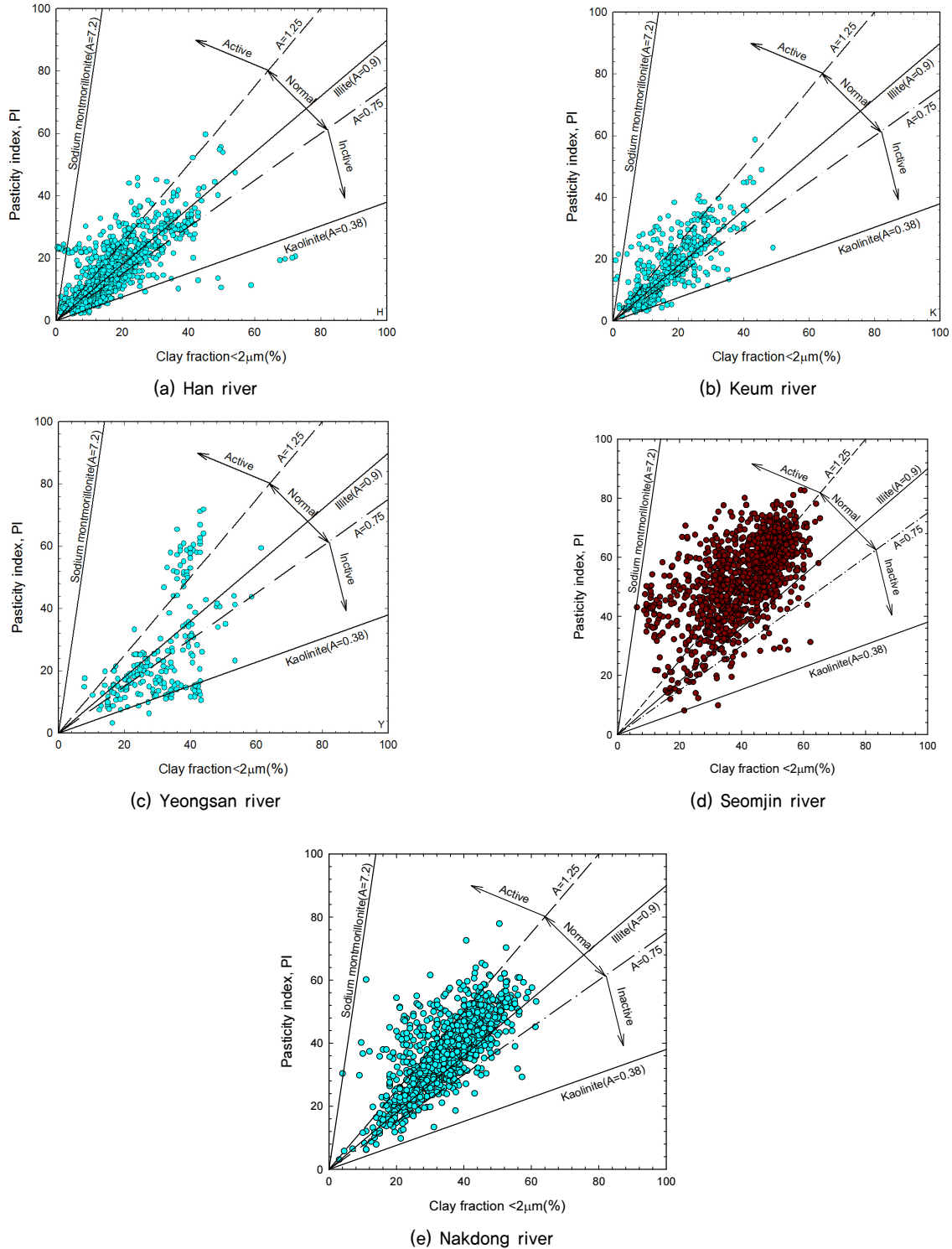


Fig. 1. Variation of activities with river site

이상 큰 것으로 나타나 다른 서해안 지역과는 차이를 보이고 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 활성도 및 점토광물의 종류가 기타지역과 차이가 나기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 1은 Skempton(1953)의 활성도 도표에 점토의 소성지수와 점토함유율($<2\mu\text{m}$)과의 관계를 분석한 결과로 한강과 금강지역의 활성도는 대부분 0.075~46.8사이에 분포하며, 주로 Illite 점토광물로 구성되어 있고 약간의 Montmorillonite 계열로 보통 내지 고활성도를 나타내었고 영산강지역은 Illite와 Kaolinite 계열로 구성되어 있으며 비활성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 섬진강지역의 활성도는 대부분 0.8~3.0 사이에 분포하고 있는 것으로 나타나 Illite와 Montmorillonite와 같은 보통 내지 고활성도의 점토로 구성되어 있으며, 낙동강지역은 대부분 0.8~1.5사이에 분포하며, 주로 Illite 점토광물로 구성되어 있으며, 약간의 Montmorillonite 계열도 존재하는 것으로 나타났다.

2.2 대상지역의 선행압밀특성

본 연구에서는 대상지역의 퇴적이력에 의한 응력 상태를 정확히 평가하기 위해 시추된 시료를 이용하여 압밀시험 결과를 분석하였다. Fig. 2는 각 강하구의 깊이에 따른 선행압밀응력(P_c)의 변화를 나타낸 것으로 깊이가 깊어짐에 따라 선행압밀압력이 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 이는 상부의 유효상재하중이 크고 장기간 영향을 받았기 때문인 것으로 판단된다.

서남해안에 접하는 주요강 하구에 대한 압밀시험 결과, Fig. 2와 같이 한강지역의 선행압밀응력은 0.98~686.5kPa의 범위(평균 67.86)의 값을 나타냈으며, 금강지역은 17.55~296.20kPa(평균 60.41), 영산강지역은 24.527~293.22kPa(평균 86.10)이고 섬진강지역은 4.90~313.81kPa(평균 47.76), 낙동강지역은 7.85~647.24(평균 92.77)인 것으로 평가되었다.

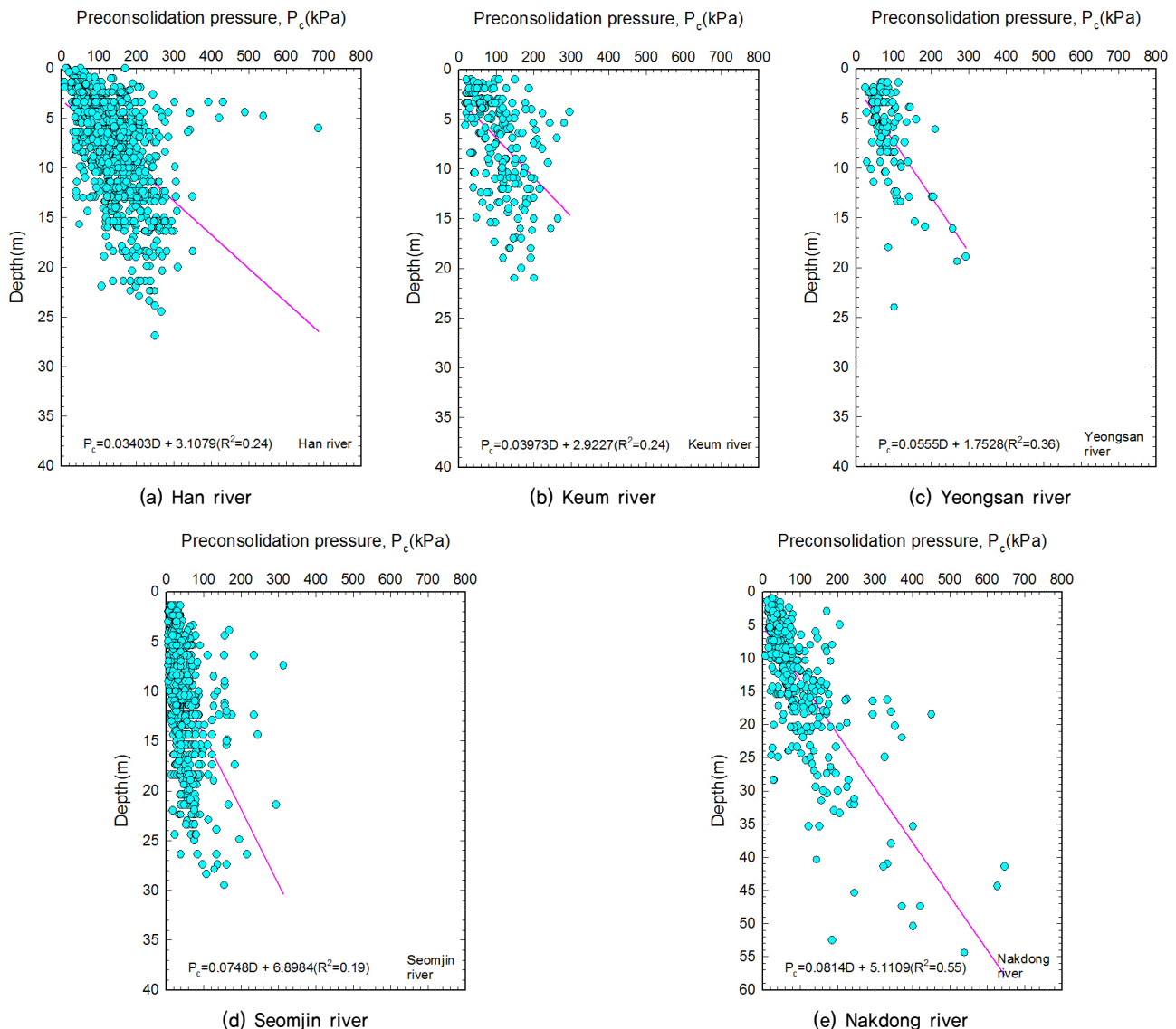


Fig. 2. Variation of preconsolidation pressure with depth

분석결과 선행압밀하중은 다른 서해안 지역에 비해 영산강지역이 30% 정도 큰 값을 보이고 있으며, 섬진강 지역의 경우 다른 지역에 비해 측정 자료의 분산도가 큰 것으로 나타났다.

2.3 과압밀비(OCR)

서해안지역에서의 과압밀비(OCR)는 깊이가 깊어짐에 따라 지수함수식($y = y_0 + e^{-bx}$)의 형태로 감소하며, 깊이 7m 이내에서는 전반적으로 과압밀비가 2 이상의 값을 나타내고 있어 과압밀 상태에 있는 것으로 나타났다. 또한 남해안 지역도 과압밀비가 지수함수식($y = y_0 + e^{-bx}$)의 형태로 감소하고 있으며 깊이 약 4m 이내에서 전반적으로 과압밀비가 2 이상의 값으로 과압밀 상태에 있는 것으로 나타났으나 반면, 일정깊이(섬진강지역의 경우 16m, 낙동강지역의 경우

22m) 이하에서는 대부분 1 이하의 과압밀비를 보이고 있는 것으로 나타났다.

주요 강하구의 평균 과압밀비는 한강지역 1.86, 금강지역 2.10, 영산강 지역 2.37, 섬진강 지역 1.318, 낙동강지역 1.07로 전체적으로 남해안지역의 과압밀비가 서해안에 비해 최대 80% 이상 큰 것으로 나타났으며, 서해안 지역에서는 한강지역이 남해안에서는 낙동강 지역이 다소 낮은 값을 나타내고 있다.

3. 선행압밀용력과 과압밀비의 통계분석

3.1 원자료에 대한 정규성검정

본 연구의 확률통계분석은 압밀시험 결과를 대상으로 빈도 분석, 데이터탐색 등을 통하여 원 자료에 대한 평균, 표준편차

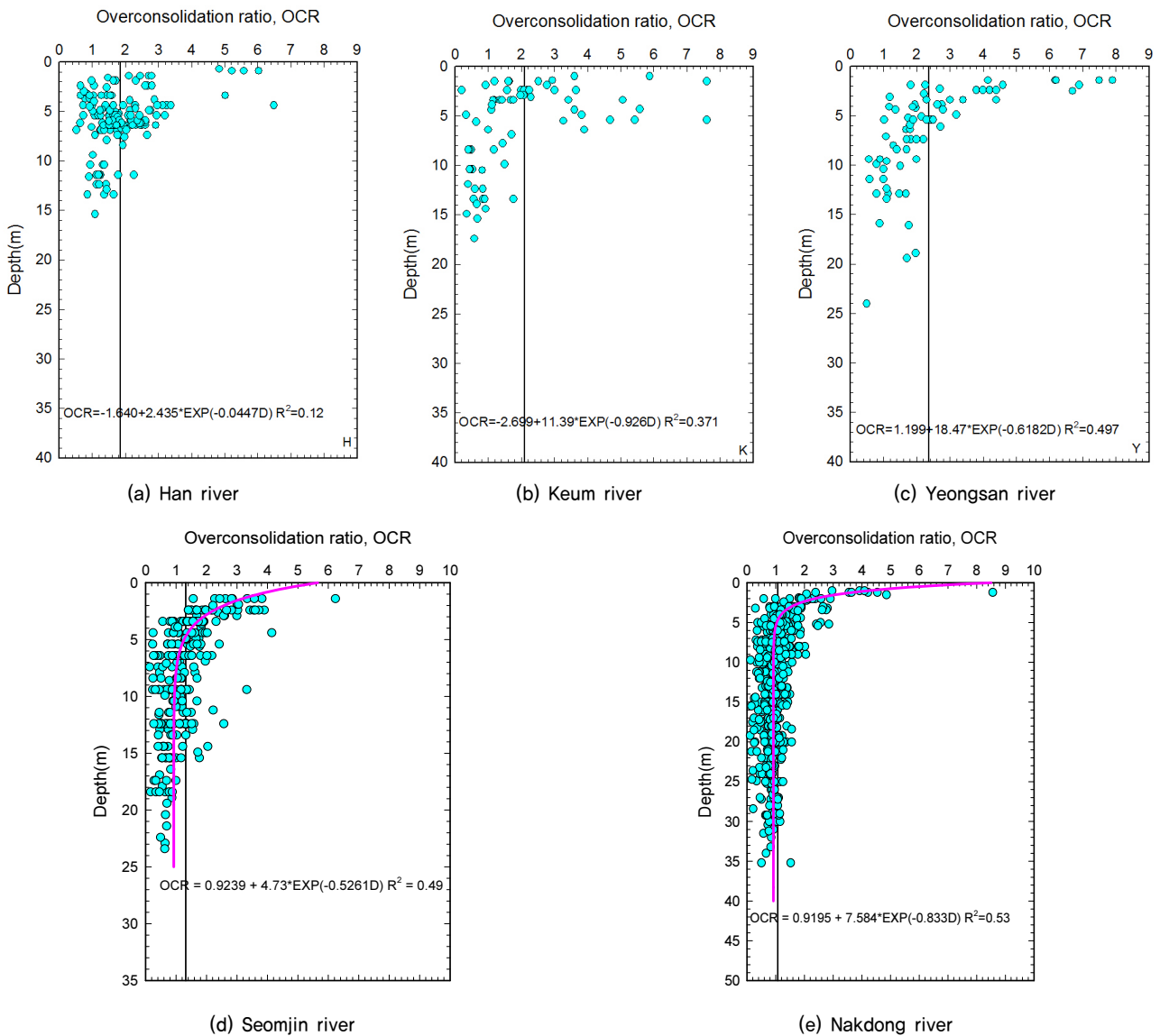


Fig. 3. Variation of the OCR with depth

등의 기술통계량을 작성하였으며, Q-Q plot, Kolmogorov-Smirnov 방법을 통하여 시험자료에 대한 정규성 검정을 실시하고 정규분포를 따르는 물성치를 확인하였다. 단 본 연구에서 유의수준은 일반적으로 많이 사용되고 있는 0.05(5%)를 적용하였다. 변동 계수(coefficient of variation, C.V.)는 표준 편차를 산술 평균으로 나눈 것이며 상대적인 차이를 나타내는데 표준편차가 편향적인 결과를 나타낼 수 있어 기준으로 사용하고 있다.

Table 3은 유역별 기술통계량으로 과압밀비의 왜도와 첨도는 한강의 경우 각각 2.32, 10.4561이며, 금강은 각각 1.7431, 5.9070, 영산강은 각각 1.6875, 5.3670, 섬진강은 각각 1.804, 5.747, 낙동강은 각각 4.47, 37.918로 나타났다. 또한 95% 신뢰구간의 과압밀비 분포범위는 한강지역에서 1.330~3.186, 금강지역에서 0.8440~5.7638, 영산강지역 1.1375~6.3750, 섬진강지역 1.221~1.414, 낙동강지역 1.0182~1.1223 정도로 모든 지역에서 오른쪽으로 크게 왜곡되어 있으며, 정규분포보다 매우 뾰족한 모양을 가진 분포를 보이고 있는 것으로 나타났다.

기술통계량 중 왜도(skewness)는 분포가 어느 한쪽으로 치우친 정도를 말하며 분포가 좌우대칭일수록 0에 가까운 값을 보이고 오른쪽 꼬리가 더 길면 0보다 큰 값을 보이고 왼쪽 꼬리가 더 길면 0보다 작은 값을 나타낸다. 첨도(kurtosis)란

분포의 모양이 뾰족한 정도로 종모양일수록 3에 가까운 값을 보이고 3보다 클수록 뾰족한 분포를, 3보다 작을수록 평평한 분포를 나타낸다. 왜도가 0, 첨도가 1에 가까울수록 표준정규분포 형태가 되지만 이것은 절대적인 기준이 있는 것은 아니며 주관적인 판단이 이용되는 기법이다. 본 연구 대상 자료의 왜도는 모두 양의 값을 보이고 있어 정점이 왼쪽으로 기울어지며 평균이 오른쪽에 위치하고 꼬리가 오른쪽으로 긴 분포형태를 나타낸다.

또한 Kolmogorov-Smirnov의 방법에 의한 정규성 검정결과, 검정통계량의 유의확률(p 값)이 유의수준보다 작게 평가되어 자료가 정규분포를 따르지 않는 것으로 나타났다.

3.2 이상치 제거

일반적으로 이상치는 25% 분위수와 75% 분위수로부터 사분위범위(IQR)의 1.5배를 넘어갈 경우 이상치로 판단하게 된다. 따라서 본 연구에서는 획득된 자료의 정규성을 확보하기 위해 box-plot을 이용하여 이상치를 제거하였다.

변동 계수(coefficient of variation, C.V.)는 표준 편차를 산술 평균으로 나눈 것으로 숫자가 클수록 상대적인 차이가 크다는 것을 의미한다. 일반적으로 표준편차는 평균값이 큰 데이터 쪽이 커지는 경향이 있으므로 다른 평균값을 가진 데이터를 비교하는 경우, 표준편차를 기준으로 하면 적당하

Table 3. Descriptive statistics of original data

Region	Items	Mean	Median	SD	Variance	C.V	Skewness	Kurtosis	95% confidence interval	
									LL	UL
Han	A	1.2334	0.9016	2.6283	6.9081	2.1310	12.5403	179.2614	0.7359	1.9316
	P_c (kPa)	133.6941	133.5568	0.5996	0.3596	0.4398	0.3010	2.6398	89.24052	242.5969
	OCR	1.7180	1.6410	0.6076	0.3691	0.3536	0.5050	2.8057	1.3054	2.8170
Keum	A	1.1436	0.9300	1.4315	2.0492	1.2518	10.1425	124.4773	0.7590	2.0951
	P_c (kPa)	103.7347	97.4781	0.6039	0.3647	0.5709	0.5705	2.6612	55.68216	204.5863
	OCR	1.7640	1.4300	1.3264	1.7593	0.7519	1.1947	3.7558	0.8150	4.5376
Yeongsan	A	0.8385	0.7736	0.3900	0.1521	0.4651	0.7611	3.0253	0.5543	1.5735
	P_c (kPa)	77.63925	74.53054	0.2921	0.0853	0.3689	0.5960	3.0954	57.17277	134.3511
	OCR	1.9701	1.8000	1.0054	1.0108	0.5103	0.9910	3.4039	1.1375	4.1825
Seomjin	A	1.2651	1.2500	0.2412	0.058	0.1907	0.247	-0.233	1.2503	1.2799
	P_c (kPa)	47.76819	39.2266	0.3529	0.1246	0.7245	2.597	11.244	45.50286	50.02372
	OCR	1.3180	1.1880	0.8084	0.6536	0.6134	1.804	5.747	1.2221	1.4140
Nakdong	A	1.0107	1.0000	0.1440	0.021	0.1425	0.144	-0.106	1.0018	1.0195
	P_c (kPa)	92.7611	64.23356	0.8841	0.7816	0.9347	2.630	9.863	84.66081	100.8712
	OCR	1.0702	0.9600	0.6398	0.4094	0.5978	4.470	37.918	1.0182	1.1223

Table 4. Results of normality tests using Kolmogorov-Smirnov

	Han river	Han p.vleue	Keum river	Keum p.vleue	Yeongsan river	Yeongsan p.value	Seomjin river	Seomjin p.value	Nakdong river	Nakdong p.value
P_c	0.0718	<0.0001	0.075	0.1524	0.1535	<0.0001	0.134	<0.0001	0.182	<0.0001
OCR	0.1631	<0.0001	0.1938	0.0096	0.255	<0.0001	0.118	<0.0001	0.187	<0.0001

Table 5. Descriptive statistics with outlier filtering

Region	Outlier filtering	Items	Mean	Median	SD	Variance	C.V	Skewness	Kurtosis	95% confidence interval	
										LL	UL
Han	before O.F	U.C.S	53.41682	48.10162	0.3365	0.1132	0.6178	2.6221	17.4519	32.36195	111.1682
		Pc	138.1855	134.7826	0.6924	0.4794	0.4913	1.2979	8.5914	90.22118	254.2864
		OCR	1.8567	1.6530	0.9383	0.8805	0.5054	2.3200	10.4561	1.3300	3.1860
	after O.F	U.C.S	48.62137	46.97385	0.2311	0.0534	0.4662	0.4878	2.9024	31.95007	91.44701
		Pc	133.6941	133.5568	0.5996	0.3596	0.4398	0.3010	2.6398	89.24052	242.5969
		OCR	1.7180	1.6410	0.6076	0.3691	0.3536	0.5050	2.8057	1.3054	2.8170
Keum	before O.F	U.C.S	46.36584	44.12993	0.2792	0.0780	0.5906	1.1714	5.6740	26.11511	97.84095
		Pc	104.5781	97.87037	0.6163	0.3799	0.5780	0.6343	2.8575	55.89791	208.5188
		OCR	2.1007	1.5000	1.8990	3.6061	0.9040	1.7431	5.9070	0.8440	5.7638
	after O.F	U.C.S	43.73766	44.12993	0.2331	0.0543	0.5226	0.4133	2.9788	25.59536	81.21868
		Pc	103.7347	97.4781	0.6039	0.3647	0.5709	0.5705	2.6612	55.68216	204.5863
		OCR	1.7640	1.4300	1.3264	1.7593	0.7519	1.1947	3.7558	0.8150	4.5376
Yeongsan	before O.F	U.C.S	41.16832	33.98004	0.2675	0.0716	0.6372	2.1401	8.6956	25.15406	88.35792
		Pc	86.08277	76.00154	0.4669	0.2180	0.5319	2.0942	8.6780	57.79059	175.7842
		OCR	2.3695	1.8550	1.6712	2.7928	0.7053	1.6875	5.3670	1.1750	6.3750
	after O.F	U.C.S	36.4317	33.14648	0.1666	0.0278	0.4485	0.6698	3.0049	25.00696	65.43978
		Pc	77.63925	74.53054	0.2921	0.0853	0.3689	0.5960	3.0954	57.17277	134.3511
		OCR	1.9701	1.8000	1.0054	1.0108	0.5103	0.9910	3.4039	1.1375	4.1825
Seomjin	before O.F	U.C.S	513.2016	450.6156	2.7930	7.8010	0.5337	0.9543	0.5653	485.8607	540.5425
		Pc	47.76819	39.2266	0.3529	0.1246	0.7245	2.597	11.244	45.50286	50.02372
		OCR	1.3180	1.1880	0.8084	0.6536	0.6134	1.804	5.747	1.2221	1.4140
	after O.F	U.C.S	503.4342	441.7896	2.6272	6.9019	0.5118	0.742	-0.341	477.5839	529.2845
		Pc	389.932	371.4661	1.2465	1.5540	0.3135	0.440	-0.138	381.106	400.7291
		OCR	1.2347	-	0.4712	-	0.3658	0.231	-0.50767	1.1199	1.3494
Nakdong	before O.F	U.C.S	501.8161	482.4872	2.2848	5.2201	0.4465	1.2342	3.6957	485.6155	518.0167
		Pc	92.7611	64.23356	0.8841	0.7816	0.9347	2.630	9.863	84.66081	100.8712
		OCR	1.0702	0.9600	0.6398	0.4094	0.5978	4.470	37.918	1.0182	1.1223
	after O.F	U.C.S	483.4875	472.6805	1.9418	3.7707	0.3939	0.388	-0.317	469.5424	497.4325
		Pc	381.616	371.064	1.1133	1.2390	0.2861	0.369	-0.231	369.1027	394.1195
		OCR	1.2143	-	0.4703	-	0.3492	0.5070	0.8690	1.1203	1.3082

지 않은 경우가 있다. 변동계수는 표준편차를 평균값으로 나눔으로써 이 평균값의 차이를 조정하고 있다.

분석결과 Table 5와 같이 이상치 제거 후 변동계수가 감소하고 왜도의 값이 0에 가깝게 감소하여 분포형태가 대칭 형태에 근접하는 것을 확인하였다.

4. 주요강하구 압밀정수의 상관성분석

본 연구에서는 SPSS를 이용하여 압밀특성에 대한 상관성분석을 주요 강하구별로 나누어 수행하였으며, 특히 지역별로 지반의 압밀상태를 규명하기 위해 선행압밀하중과 과압밀비를 중심으로 분석하였다.

4.1 깊이-선행압밀응력에 대한 선형회귀분석

심도에 따른 압밀특성을 파악하기 위하여 선형회귀분석을 실시하였으며, 분석을 위해 box plot을 통하여 이상치를 제거한 후의 자료를 이용하였다.

Fig. 4, Table 6은 표준압밀시험(SCT) 결과로부터 이상치를 제거한 후 산정된 깊이에 따른 선행압밀응력(P_c)의 변화로 심도에 따라 선행압밀응력이 전체적으로 증가하는 양상을 나타냈으며, 이상치 제거 후 결정계수가 증가하고 있음을 확인하였다.

4.2 비배수전단강도(일축)와 선행압밀응력의 관계

Table 7은 비배수전단강도와 선행압밀응력의 비($P_c/[q_u/2]$)에 대한 통계분석 결과를 보이고 있으며, Fig. 5는 $q_u/2$ 와

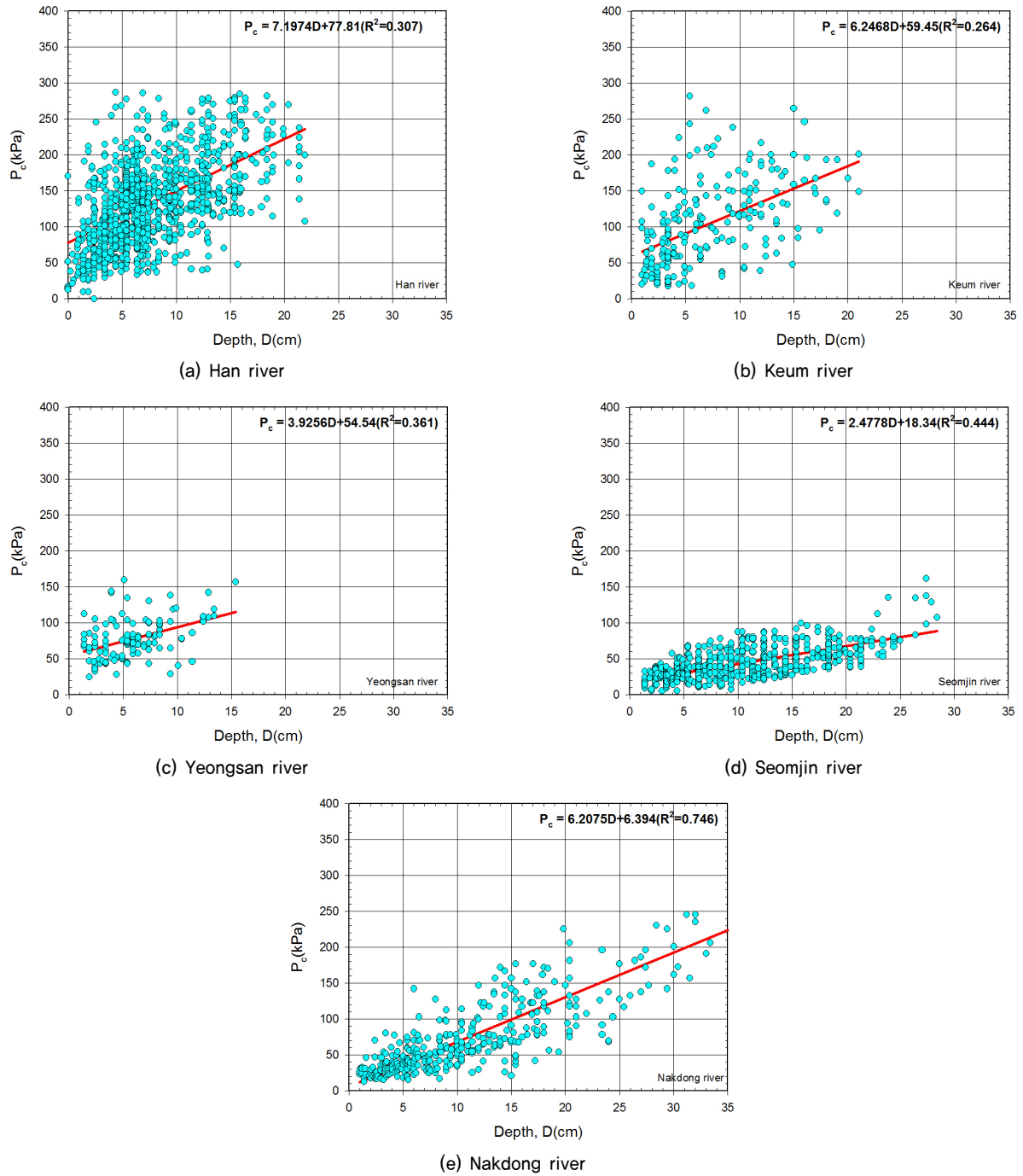


Fig. 4. Relationship between P_c and depth

Table 6. Results of Linear regression analysis about D- P_c

Region	Outlier filtering	Linear regression equations	Coefficient of determination
Han	before O.F	$P_c = 0.03403D + 3.1079$	0.240
	after O.F	$P_c = 7.1974D + 77.81$	0.307
Keum	before O.F	$P_c = 0.03973D + 2.9227$	0.244
	after O.F	$P_c = 6.2468D + 59.45$	0.264
Yeongsan	before O.F	$P_c = 0.0555D + 1.7528$	0.356
	after O.F	$P_c = 3.9256D + 54.54$	0.361
Seomjin	before O.F	$P_c = 0.0748D + 6.8984$	0.192
	after O.F	$P_c = 2.4778D + 18.34$	0.444
Nakdong	before O.F	$P_c = 0.0814D + 5.1109$	0.553
	after O.F	$P_c = 6.2075D + 6.394$	0.746

P_c 의 관계를 도식한 것으로 대체적으로 선형적인 관계를 갖는 것으로 나타났다.

이상치 제거 후 $P_c / [q_u/2]$ 의 값의 95% 신뢰구간은 한강지역의 경우 1.947~5.937, 금강지역 1.711~6.862, 영산강지역 1.69~4.287, 섬진강지역 3.8862~4.0863, 낙동강지역 3.7638~4.0189로 평가되었다. 또한 평균값을 고려하면 비배수전단강도와 선형압밀응력의 관계는 한강지역 $P_c = 3.205(q_u/2)$, 금강지역 $P_c = 2.971(q_u/2)$, 영산강지역 $P_c = 2.483(q_u/2)$, 섬진강지역 $P_c = 3.9762(q_u/2)$, 낙동강지역 $P_c = 3.8914(q_u/2)$

Table 7. Results of statistical analysis about Pc/[qu/2] after O,F

Region	Mean	Median	SD	Variance	C.V	Skewness	Kurtosis	95% confidence interval	
								LL	UL
Han	314.3031	261.3472	3.333	11.11	1.04	12.96	244.9	190.9355	582.2208
Keum	291.3556	223.3955	2.236	5.001	0.7528	2.869	13.88	167.7918	672.9323
Yeongsan	243.4991	218.198	1.215	1.477	0.4895	2.325	10.5	165.7324	420.4111
Seomjin	389.932	371.4661	1.2465	1.5540	0.3135	0.440	-0.138	381.106	400.7291
Nakdong	381.616	371.064	1.1133	1.2390	0.2861	0.369	-0.231	369.1027	394.1195

의 관계가 있는 것으로 분석되었으며, 서해안 지역이 남해안에 비해 최소 21%에서 최대 60%까지 작게 나타났고 퇴적환경에 따라 상이한 관계를 나타내었다.

4.3 깊이와 과압밀비의 관계

과압밀비는 지반의 응력이력 정도를 판정하는 중요한 지수로 OCR=1 일 때 정규압밀, OCR=1~8일 때 과압밀, OCR>8 일 때 큰 과압밀이라 하며 OCR이 1보다 적은 경우($P_c < P_o$)를 과소압밀점토라 한다.

깊이에 따른 과압밀비는 지반특성분석결과(Fig. 5)와 같이 지수함수식($y = y_0 + e^{-bx}$)의 형태로 감소하며, 퇴적환경과 깊이에 따른 차이가 큰 것으로 나타났다. 따라서 과압밀비의 분석에서는 깊이에 따른 과압밀비의 분포를 고려하여 크게 3개의 영역(과압밀영역, 정규압밀영역, 과소압밀영역)으로 구분하였다.

또한 원자료와 이상치 제거 후의 자료에 대해 Kolmogorov-Smirnov 방법과 Shapiro-Wilk의 방법에 의한 정규성 검정 결과 모든 지역에서 심도에 따라 구분한 영역 내에서 정규분포를 따르는 것으로 나타나고 이상치 제거 후 왜도가 0에 근접하는 값을 보여 이를 근거로 과압밀비를 구분하는 심도를 결정하였다.

서해안 모든 지역에 대하여 깊이가 5~6m 이하의 경우 과압밀비의 폭이 크게 나타나며 5~6m 이상일 경우 일정한 값을 가지는 패턴을 보여 서해안지역에서는 심도를 2개의 범위(한강, 영산강:5m, 금강:6m)로 구분하였다. 또한 남해안 지역은 3개의 범위에서 일정한 패턴을 보여 섬진강지역은 4m 미만, 4~16m, 16m 초과로 구분하였고, 낙동강지역은 4m 이하, 4~22m, 22m 초과로 구분하여 영역별 과압밀비를 분석하였다. 일반적으로 첫 번째 영역에서는 깊이에 따른 과압밀비의 변화가 심하게 나타나며, 전반적으로 1 이상의 과압밀비를 보이고 있고, 두 번째 영역은 전반적으로 1 내외의 과압밀비를 나타내고, 마지막 영역에서는 대부분이 1 이하의 값을 보이는 것으로 나타났다.

Table 8은 과압밀비에 대한 원자료와 이상치 제거 전후의 대상자료에 대한 통계분석 결과를 나타낸 것으로 한강지

역의 경우 심도 5m 이하에서 평균 1.9720, 5m 이상은 평균 1.654이다. 금강지역은 6m 이하에서 평균 2.2440, 6m 이상은 평균 0.8074이었으며, 영산강지역의 경우 5m 이하에서 평균 3.5060, 5m 이상에서 평균 1.4950로 나타났다. 또한 남해안의 섬진강지역의 경우 4m 미만에서 평균 2.0237, 4~16m에서 평균 1.0778, 16m 초과에서 평균 0.6025상태를 보이고 있다. 낙동강 지역은 4m 이하에서 평균 1.8608, 4~22m 심도에서 평균 0.9524, 22m 초과시 평균 0.8296를 보여 심도에 따라 명확한 응력상태의 차이를 나타내고 있다.

회귀분석 결과, 한강지역 점토층의 깊이와 OCR의 상관관계식은 $OCR = 1.640 + 2.435e^{-0.0447D}$ 로 표현되며, 금강지역은 $OCR = 2.699 + 11.39e^{-0.926D}$, 영산강지역은 $OCR = 1.199 + 18.47e^{-0.618D}$ 으로 표현 된다. 또한 섬진강 지역은 $OCR = 0.9239 + 4.73e^{-0.5261D}$, 낙동강 지역은 $OCR = 0.9195 + 7.584e^{-0.833D}$ 과 같이 지수감소 함수식으로 표현된다. 이상과 같이 과압밀비는 깊이에 따른 분포상태를 고려하여 영역(과압밀영역, 정규압밀영역, 과소압밀영역)을 구분하고 강하구별로 퇴적여건을 고려하여 영역을 대표하는 심도를 구분해야 할 것으로 판단된다.

Table 9는 주요강 하구에 대한 5,300여 개의 물성시험 결과와 3,100여 개의 압밀시험 결과를 취합하여 정규성검증을 수행하고 이상치를 제거하였으며 이 자료를 산술평균한 결과이다. 지역별로 분석결과를 종합해보면, 한강유역에서 영산강 유역으로 갈수록 함수비가 커지고 액성한계와 소성지수가 증가하는 특성을 보여 점토의 압축성이 커지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 초기간극비와 압축지수와 같은 설계정수에서도 동일하게 나타나는 것으로 분석되었다.

또한 서해안의 경우 남해안에 비해 함수비는 약 23~60%, 간극비는 약 18~58%, 소성지수는 약 24~78%까지 값이 감소하여 압축성이 남해안에 비해 작아지는 경향을 확인할 수 있으며, 유역에 따라서도 명확한 차이를 보이고 있는 것으로 나타났다. 압축지수는 섬진강유역이 다른 유역에 비해 최대 78%까지 큰 값을 보이고 있으며 낙동강, 영산강, 금강, 한강 유역의 순으로 압축성의 크기를 보여 퇴적특성과

Table 8. Results of statistical analysis about OCR

Region	Outlier filtering	Depth	Mean	SD	CV	Range	Skewness	Kurtosis	95% confidence interval	
									LL	UL
Han	before O.F	< 5m	2.1970	1.4230	2.0260	0.642~6.486	1.3840	4.3910	1.1050	5.3490
		5m <	1.6910	0.5020	0.2520	0.53~3.20	0.4553	3.2730	1.3650	2.6060
	after O.F	< 5m	1.9720	1.0970	1.2030	0.6481~5.22	1.1730	4.2450	1.0590	4.1110
		5m <	1.6540	0.4555	0.2075	0.530~2.655	0.1481	2.7870	1.3600	2.4730
Keum	before O.F	< 6m	2.7610	2.0400	4.1610	0.209~9.197	1.3800	4.4610	1.3040	7.3440
		6m <	0.9383	0.7455	0.5557	0.35~3.912	2.7130	11.210	0.4860	1.7520
	after O.F	< 6m	2.2440	1.3440	1.8060	0.209~5.882	1.0800	3.7510	1.1950	5.1710
		6m <	0.8074	0.4161	0.1731	0.350~ 1.763	1.0560	3.0360	0.4860	1.6680
Yeongsan	before O.F	< 5m	3.6520	1.9280	3.7160	1.17~ 7.90	0.7620	2.5300	2.2370	7.2300
		5m <	1.4950	0.5512	0.3039	0.50~ 2.72	0.1448	2.2350	1.0950	2.4110
	after O.F	< 5m	3.5060	1.7840	3.1820	1.17~ 7.50	0.7571	2.6000	2.2300	6.8200
		5m <	1.4950	0.5512	0.3039	0.50~ 2.72	0.1448	2.2350	1.0950	2.4110
Seomjin	before O.F	< 4m	2.0613	0.9464	0.4591	0.562~6.234	1.518	3.991	1.8405	2.2822
		4~16m	1.0988	0.5477	0.4985	0.132~4.141	1.443	5.573	1.0187	1.1789
		16m <	0.5999	0.2180	0.3634	0.162~0.991	-0.261	-0.461	0.4978	0.7019
	after O.F	< 4m	2.0237	0.7994	0.3950	0.802~3.894	0.745	-0.324	1.8345	2.2129
		4~16m	1.0778	0.4328	0.4016	0.258~2.217	0.245	-0.420	1.0129	1.1428
		16m <	0.6025	0.1813	0.3009	0.273~0.874	-0.297	-0.779	0.5123	0.6926
Nakdong	before O.F	< 4m	1.9257	1.1837	0.6147	0.290~8.560	2.815	12.180	1.6606	2.1908
		4~22m	0.9573	0.3630	0.3792	0.110~2.850	0.932	3.401	0.9229	0.9917
		22m <	0.8132	0.2420	0.2976	0.170~1.520	-0.365	1.069	0.7571	0.8692
	after O.F	< 4m	1.8608	0.9052	0.4865	0.580~4.860	1.447	2.044	1.6553	2.0662
		4~22m	0.9524	0.3114	0.3270	0.250~2.010	0.349	0.604	0.9224	0.9823
		22m <	0.8296	0.1943	0.2342	0.331~1.250	-0.275	-0.041	0.7833	0.8760

Table 9. Comparison of design factors

Items	Unit	Representative value				
		Western coast			Southern coast	
		Han	Keum	Yeongsan	Seomjin	Nakdong
ω_n	%	32.8416	36.4686	44.4896	82.96	57.61
G_s	-	2.6898	2.7002	2.6908	2.704	2.708
γ_t	tf/m ³	1.8605	1.7907	1.7767	1.507	1.639
e_o	-	0.9549	1.1181	1.3258	2.297	1.627
LL	%	36.3029	40.0082	48.5698	80.47	63.87
PL	%	22.7449	22.5449	22.4981	28.68	26.34
PI	%	14.7327	17.8892	25.2389	51.35	37.24
A	-	0.9111	0.9253	0.8176	1.27	1.01
Cc	-	0.2484	0.3612	0.5080	1.1100	0.6680
Cs	-	0.0309	0.0501	0.0577	0.1040	0.0820
OCR	-	1.691(5m>)	2.244(5m>)	3.506(5m>)	2.024(4m>)	1.861(4m>)
		1.654(5m<)	0.807(5m<)	1.495(5m<)	1.078	0.952
					0.603(16m<)	0.830(22m<)

유역별로 토성을 좌우하는 토사의 특성이 압축성에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

5. 결 론

국내 서남해안의 연약지반을 대상으로 수행된 양질의 실내시험 결과를 바탕으로 압밀에 관련된 인자들을 평가하고,

정규성검증과 이상치 제거 등의 통계처리를 통해 주요 강하구의 연약지반에 대한 평가를 수행한 결과는 다음과 같다.

- (1) 서남해안의 주요 강하구 연약지반은 전반적으로 높은 일라이트와 약간의 몬모리노나이트 함량을 나타내고 있으나 영산강하구의 경우 높은 일라이트와 약간의 카올리나이트 함량을 보여 다른 지역과 차이를 보이고 있다.
- (2) 주요 강하구의 평균 과압밀비는 한강지역 1.86, 금강지역 2.10, 영산강 지역 2.37, 섬진강 지역 1.318, 낙동강 지역 1.07로 전체적으로 남해안지역의 과압밀비가 서해안에 비해 최대 80% 이상 큰 것으로 나타났으며, 서해안 지역에서는 한강지역이 남해안에서는 낙동강 지역이 다소 낮은 값을 나타내고 있다.
- (3) 선행압밀하중은 이상치 제거 후, 한강에서 $P_c = 7.1974D + 77.81$, 금강 $P_c = 6.2468D + 59.45$, 영산강 $P_c = 3.9256D + 54.54$, 섬진강 $P_c = 2.4778D + 18.34$, 낙동강 $P_c = 6.2075D + 6.394$ 의 회귀관계식을 나타내었다.
- (4) 이상치 제거 후 일축압축 비배수전단강도와 선행압밀응력 사이에 한강지역 $P_c = 3.205(q_u/2)$, 금강지역 $P_c = 2.971(q_u/2)$, 영산강지역 $P_c = 2.483(q_u/2)$, 섬진강지역 $P_c = 3.9762(q_u/2)$, 낙동강지역 $P_c = 3.8914(q_u/2)$ 로 분석되어, 서해안 지역이 남해안에 비해 최소 21%에서 최대 60%까지 작게 나타났고 퇴적환경에 따라 상이한 관계를 나타내었다.
- (5) 점토층의 깊이와 OCR의 상관관계식은 한강지역 $OCR = 1.640 + 2.435e^{-0.0447D}$ 로 표현되며, 금강지역은 $OCR = 2.699 + 11.39e^{-0.926D}$, 영산강지역은 $OCR = 1.199 + 18.47e^{-0.618D}$ 으로 표현된다. 또한 섬진강 지역은 $OCR = 0.9239 + 4.73e^{-0.5261D}$, 낙동강 지역은 $OCR = 0.9195 + 7.584e^{-0.833D}$ 과 같이 지수감소 함수식으로 표현된다.

이상에서와 같이 이상치 제거를 통한 압밀특성이 주요 강하구에 따라 상이한 범위를 나타내고 있어 각 지역의 퇴적환경에 영향을 받고 있음을 확인할 수 있고, 압밀비는 강하구별로 퇴적여건을 고려하여 영역을 대표하는 심도를 구분해야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

“이 논문은 2018년도 세명대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행된 연구입니다(This work was supported by the intramural research grant of Semyung University in 2018).”

References

1. Ann, S. H. (2009), The analysis for geotechnical properties of the sub soil under embankments on hwang river Basin in Gyeong Sang Nam-Do, Master's thesis, Gyeongsang University, pp. 1~84 (In Korean).
2. Bae, W. S. and Heo, T. Y. (2011) Prediction of compression index using regression analysis of transformed variables method, Marine Georesource and Geotechnolgy, Vol. 29, No. 1, pp. 76~94.
3. Choi, J. Y., Lim, D. I., Park, C. H., Kim, S. Y., Kang, S. R. and Jung, H. S. (2010), Characteristics of clay mineral compositions in river sediments around the yellow sea and its application to the provenance of the continental shelf mud deposit, Journal of the Geological Society of Korea, Vol. 46, No. 5, pp. 497~509 (In Korean).
4. Hwang, I. S. (2016), Analysis of correlation between physical properties and consolidation parameter of clay in han and geum river basin, Ph.D dissertation, Chungbuk National University, pp. 1~149 (In Korean).
5. Hwang, Y. B. (2004), Soil characteristics of soft clay in mokpo adjacency area, Master's thesis, Mokpo National Maritime University, pp. 1~98 (In Korean).
6. Jeong, H. S. (2013), Comparison of geotechnical characteristic between the west and south shore areas, Master's thesis, Korea University, pp. 1~58 (In Korean).
7. Jeong, O. S. (2011), Geotechnical properties of west nak-dong river basin, Master's thesis, Gyeongsang University, pp. 1~53 (In Korean).
8. Kang, S. B. (2012), Correlation analysis of soil parameters of marine clay in Busan and Kwangyang, Ph.D dissertation, Chungbuk National University, pp. 1~144 (In Korean).
9. Kim, T. W. (2006), Analysis for property of embankment in Jinju, Master's thesis, Gyeongsang University, pp. 1~61 (In Korean).
10. Oh, S. H., Ha, T. K. and Jeong, C. K. (2009), Geotechnical characteristics of soft clayey soil in South Korea, Proceedings of the Korean Geotechnical Society, pp. 922~929 (In Korean).
11. Skempton, A. W. (1953), The colloidal “Activity” of clays, Proceedings of the 3rd International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, pp. 57~60.
12. Yoon, G. L. and Heo, Y. (2004), Development of harbor structure design standard for next generation(IV): Development of harbor structure design standard for next generation, The Ministry of Oceans and Fisheries, pp. 1~245.