

계측사례를 통한 낙동강 하구 점토의 압축특성 재평가

Reappraisal of Compressibility Properties of Nakdong River Estuarine Clays from field Measurement

이강운¹⁾, Kang-Woon Lee, 유일형²⁾, Il Hyoung Ryu, 박택규³⁾, Taek Gyu Park

¹⁾ (주)동성엔지니어링 전무이사, Member, Senior Managing Director, Dongsung Engineering, Co., Ltd.

²⁾ (주)동성엔지니어링 부장, Member, General Manager, Dongsung Engineering, Co., Ltd.

³⁾ (주)동성엔지니어링 과장, Manager, Dongsung Engineering, Co., Ltd.

SYNOPSIS : Because depth of deposit is deeper as well as compressibility is very larger than the other regions in Korea, behaviour of settlement at Nak-Dong river estuarine causes hot issue at ground improvement. Defined properties for design differ from measurement. Therefore it affects cost of construction. This study presents design standard to engineers as it defined properties of compressibility at Jangyu Area of Nak-Dong river estuarine. To search value of representation for region, back analysis was performed using the measurement. To verify that, the measurement of recently designed site was confirmed, and the cost of construction with properties of consolidation was calculated.

주요어(Key words) : Nak-Dong river mouth, Measurement, Compressibility, Back analysis

1. 서 론

1.1 연구배경

연약지반 설계에 있어 지반정수 산정의 불확실성은 공사비 증가와 안전사고 발생의 원인을 제공하므로 사회, 경제적으로 미치는 영향이 대단히 크다. 그러므로 설계 시 한 지역을 대표하는 신뢰성 높은 지반정수 자료는 해당지역의 실험자료 평가에 있어 불확실성을 감소시킬 수 있는 귀중한 자료가 될 것이다.

그러므로 연약지반 설계에 있어 지반정수의 산정은 대단히 중요하며, 현재에도 지반정수의 신뢰성 제고를 위하여 관련분야 종사자들이 많은 연구와 노력을 경주하고 있으나, 아직까지는 실제 지반의 특성을 명확히 평가한다는 것은 매우 어려운 실정이다.

이와 관련하여 본 연구는 낙동강 하구지역의 압축특성을 알아보하고자 1차적으로 최근의 낙동강하구 지역에 대한 연구사례인 Chung(1999), 임 등(2001), Chung & Giao(2001), Chung et.al.(2002), Locat & Tanaka(1999), Park et.al.(2000), Tanaka et.al.(2001) and Kim(1999) 등의 자료를 기준으로 연구 전·후의 설계와 시공된 사례를 중심으로 지반거동을 분석하였다.

자료분석은 낙동강 하구지역 중 장유지역의 자료를 중심으로 활용하였으며, 이중 2개지역(A, B) 자료는 지역특성 연구발표전 자료이며, 1개지역(C)은 지역특성 연구발표 후 적용된 자료로서 3지역 모두 현재까지 계측 중에 있으며, 성토시공은 완공단계에 있다. 이를 보면 표 1과 같다.

표 1. 연구 대상지역 현황

지역	설계시기	성토고(m)	연약층두께 (m)	시험자료 교란보정 유무	비고
A지역	1997	10.3 ~ 14.1	24.5 ~ 26.5	×	계측 진행중
B지역	1997	9.1 ~ 10.6	17.7 ~ 25.5	×	
C지역	2001	5.7 ~ 9.10	15.0 ~ 26.0	○	

× : 보정없음, ○보정

본 연구에서는 3개소에서 수집된 자료에 대해 기 제안된 연구결과(정 등, 2001 ; 김 등, 2003)와 본 연구지역 시험자료 중 물리적 특성과 압축지수의 상관성을 평가하였다. 그리고 A,B지역에서 실시된 계측자료와 예측자료를 비교분석하여 본 연구지역에 타당한 압축지수를 재 산정하였으며, 산정된 자료로부터 C지역에서 실시된 계측자료를 확인하였다.

즉, 낙동강 하구지역 3개 지역에서 실시된 시험자료와 계측자료를 이용하여 압축특성의 재평가를 실시하였으며, 재평가는 토층구성상 상·하부의 물리·역학적 성질이 상이한 고소성점토(CH)와 저소성 점토(CL)로 구분하여 실시하였다.

1.2 과대침하 발생원인

본 연구지역은 지역에 따라서 실측된 침하량이 설계 예상 침하량의 2~3배 까지 초과함으로 공학적 및 사회적인 문제점으로 비화되기도 하였으며, 이 같은 원인 규명을 위하여 다양한 연구사례(정 등, 2002; Tanaka et. al., 2001; 김 등 ; 2001)가 진행되고 있다. 이 같은 현상에 대해 Chung, S, G(1999)는 부산점토로부터 표 2와 같은 자료를 제시하므로써 실험 자료의 신뢰성에 의문을 제기하였다.

표 2. 설계값과 계측침하량의 비교

위치	지역	두께 (m)	성토높이 (m)	설계침하량 (cm)	계측침하량 (cm)	비고
모래질층	녹산	7.1 (2.5~16.2)	5.5 (4.3~10.5)	19.0	30.0	1-D Terzaghi
	신호	12.6 (9.0~12.0)	3.6 (2.9~4.6)	7.9	48.5	
	명지	10.3 (8.5~12.2)	6.5 (5.0~10.0)	13.1	24.0	
			5.9 (5.0~8.7)			
	울속도	19.0 (18.0~21.0)	8.0	15.1	100.3	
점토층	양산	5.8 (1.4~12.6)	5.0	15.6	32.2	
	녹산	36.8 (1.4~54.9)	5.5 (4.3~10.5)	112.0	188.3	
	신호	26.2 (21.0~33.5)	3.6 (2.9~4.6)	71.8	182.1	
	명지	19.5 (15.2~21.2)	6.5 (5.0~10.0)	102.9	119.0	
			5.9 (5.0~8.7)			
점토층	울속도	21.0 (17.0~25.5)	8.0	280.0	120.0	
	양산	15.0 (4.5~20.5)	5.0	184.5	155.3	

또한, 김상규 등(2001)은 압밀침하량 산정방법에 있어서 고전적으로 사용해 오는 Terzaghi의 침하량 산정방법의 개선을 제안하였으며, 정성교 등(2002)은 실내에서 실시한 시료의 교란정도가 시험값에 미치는 영향이 크므로 이를 보정하여 사용할 것을 제안하였다. 그리고 김운태 등(2004)은 이 같은 현상이 시료교란과 creep변형에 의한 2차 압축침하에 기인한다고 주장하므로서 침하원인에 있어서 다양한 원인이 있음을 제시하고 있다. 이상과 같이 예측값과 실측값의 차가 발생하는 원인은 아직 명확히 밝혀지지 않아 지속적으로 연구가 진행되어야 하나 실무 종사자들을 위해서는 그 방향성을 제시할 필요성이 요구되었다. 따라서 본 연구는 발생원인에 대한 검증은 차후로 미루더라도 가시적인 방향성이 제시되어야 하는바 기존에 제시된 압밀이론중 Terzaghi의 압밀이론이 타당한 것으로 가정하여 본 연구지역에 적용한 압축특성을 알아보고자 한다.

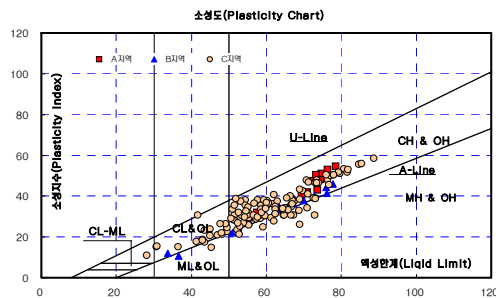
2. 부산점토의 물리적 특성

2.1 연구대상지역

본 연구지역은 장유지역과 신호지역 사이에 위치하며, 소성도 분포는 그림 1과 같이 대체적으로 CH층이 주를 이루고 있는 것으로 나타났다.



(a) 연구대상지역

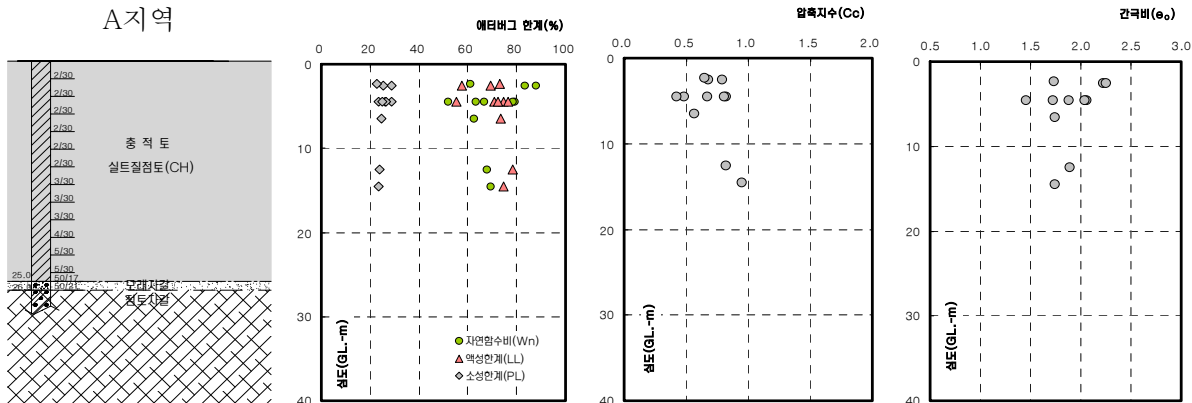


(b) 지역별 소성도

그림 1. 연구 대상지역 및 지역별 소성도

2.2 지층 및 물리·압축특성

본 연구 대상지역은 장유지역과 신호지역 사이에 있으며, 지역에 따라 다소 차이는 있으나 정성교 등(2002)이 밝힌 바와 같이 점토층이 약 20~40m의 두께로 형성되어 있으며, 일부 CL, ML계열의 저압축성 지반이 분포하기는 하나 대부분 높은 압축성의 CH층이 주를 이루어 분포하고 있다.



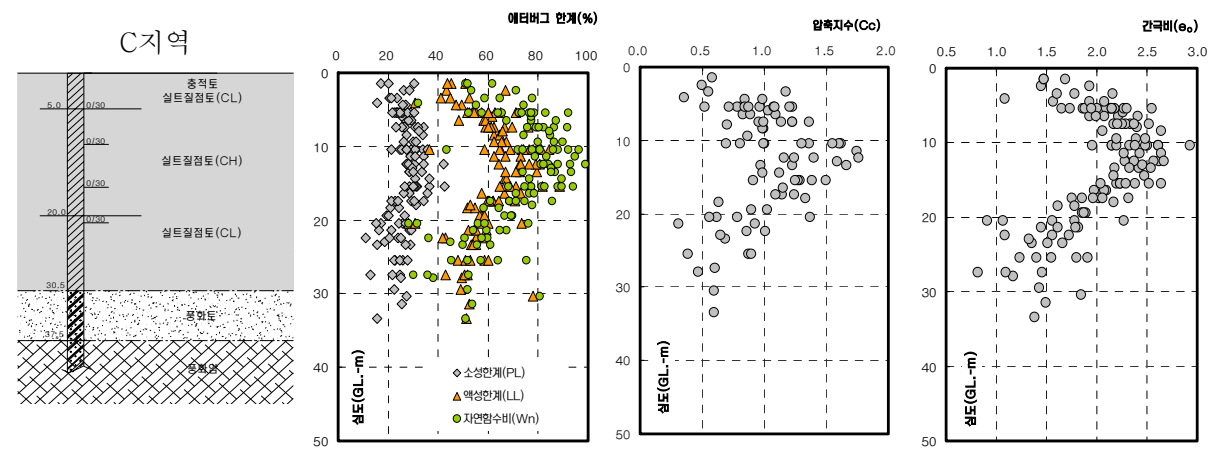
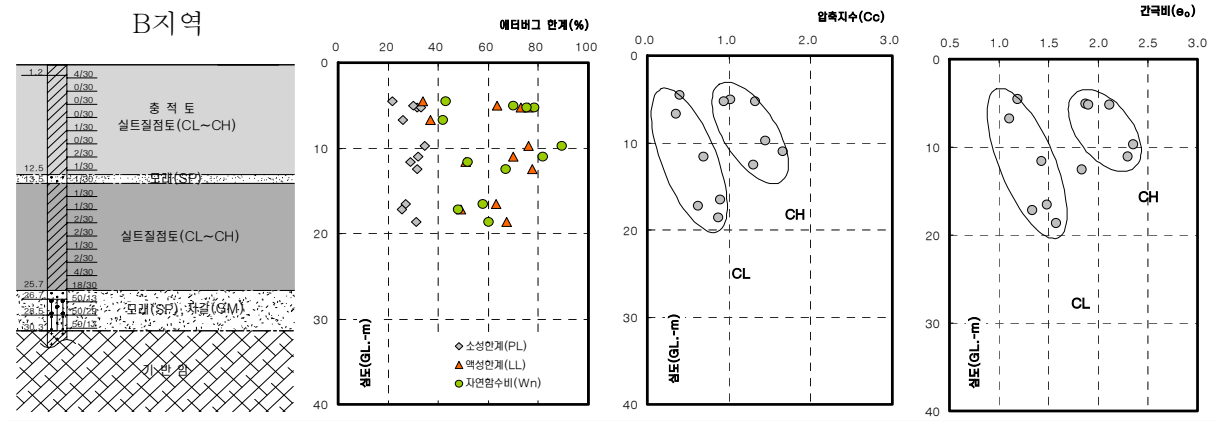


그림 2. 지역별 물리적 특성 및 압축특성

A지역은 하천의 퇴적작용에 의해 형성된 지역으로 점토성분이 주를 이루고 있으며, 압축지수는 대략 0.5~1.0의 분포로 심도별로 증가하는 경향이 나타난다.

B지역의 상부층은 점토 및 실트층(CL, CH, ML층)으로 이루어져 있으며, 하부층은 모래 또는 실트질 모래층이 주로 분포하고 있다. 압축지수는 0.345~1.654로 지역에 따라 다소 값의 변화가 심하나 전체적으로 CL과 CH의 두가지 토층에 따라 압축특성이 다르게 나타나며, 심도별 증가경향을 보인다.

C지역은 연약층이 최대 30m 이상까지 출현하는 지역으로 원지반하에서 GL.-10.0m 이상까지는 압축특성이 점차로 증가하나 그 이하부터는 감소하는 경향을 보이며, GL.-5.0m까지와 GL.-20.0m 이상은 저소성의 CL층이 분포하고, 중간의 GL.-5.0~20.0m 까지는 고소성의 CH층이 분포하는 것으로 나타났다.

2.3 설계적용 지반정수

본 연구대상 3개지역의 실험자료 및 설계적용 지반정수는 표 3과 같으며, 압축지수는 지역별, 토층별로 차이는 있으나 CH층인 경우 A, B 지역은 0.626~1.409, C지역은 1.350이며, CL층인 경우에 B지역은 0.399, C지역은 0.60~0.80의 범위로 나타나 동일 토층이라해도 지역에 따라 2.0배 이상의 차이를 보이는 것으로 나타났고 A, B지역에 비해 C지역은 상대적으로 큰 값이 적용되었다.

이와 같은 결과는 C지역 지반정수 선정시 본지역의 지반특성에 대해 많은 연구자들(Chung, 1999 등)이 제안한 바에 따라 실험방법과 평가에 있어서 신중했으며, 교란시료의 보정방법을 통한 압축지수를 사용했기 때문인 것으로 판단된다.

표 3. 설계적용 지반정수 사례

구 분		r_t (t/m ³)	e_0	C_c	비고	
A지역	범위(평균)	1.523~1.674(1.591)	1.474~2.249(1.884)	0.422~0.950(0.695)		
	설계적용(CH)	1.559	2.151	0.626		
B지역	범위(평균)	1.548~1.710(1.650)	1.099~2.353(1.705)	0.345~1.654(0.957)		
	설계	CH	1.548~1.624	2.114~2.299	1.050~1.409	
		적용	CL	1.118~1.291	1.099~1.423	0.399
C지역	범위(평균)	1.382~1.952(1.561)	0.813~2.930(1.999)	0.341~2.079 (1.206)		
	설계	상부(CL):0~5m	1.650	1.700	0.600	
		중간(CH):5~20m	1.530	2.300	1.350	
	적용	하부(CL):20m이상	1.660	1.500	0.800	

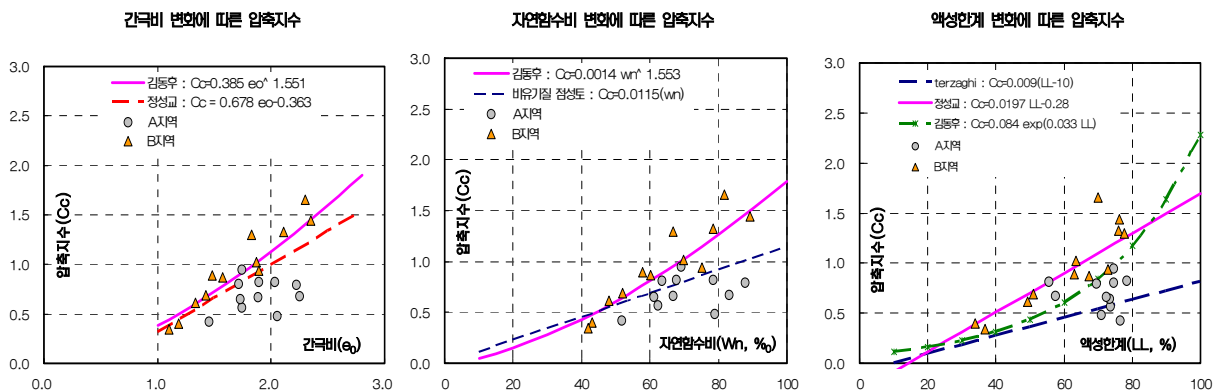
3. 압축특성

연약지반 성토 시 침하량 산정에 있어 가장 큰 영향을 주는 요소는 압축지수이다. 압축지수는 국내 서해안 및 내륙지역에서 측정된 대부분의 경우에 있어서 0.5이상을 초과하지 않는 것으로 밝혀져 있으며, 해외에서도 특정한 경우를 제외하고는 이 같은 경향을 보이는 것으로 알려져 있다. 그러나 본 연구지역인 낙동강 하구지역에서 측정된 시험자료는 서해안 및 내륙지역의 값에 비해 2~3배 이상 큰 것으로 밝혀지고 있으며, 이마저도 계측결과를 역해석하여 추정된 값에 따르면 2배 이상 차이가 발생하기도 한다. 이와 같이 설계값과 시공 시 나타난 침하거동이 큰 차를 보이므로 본 연구에서는 연구 대상지역의 적합한 압축지수를 찾아보고자 한다.

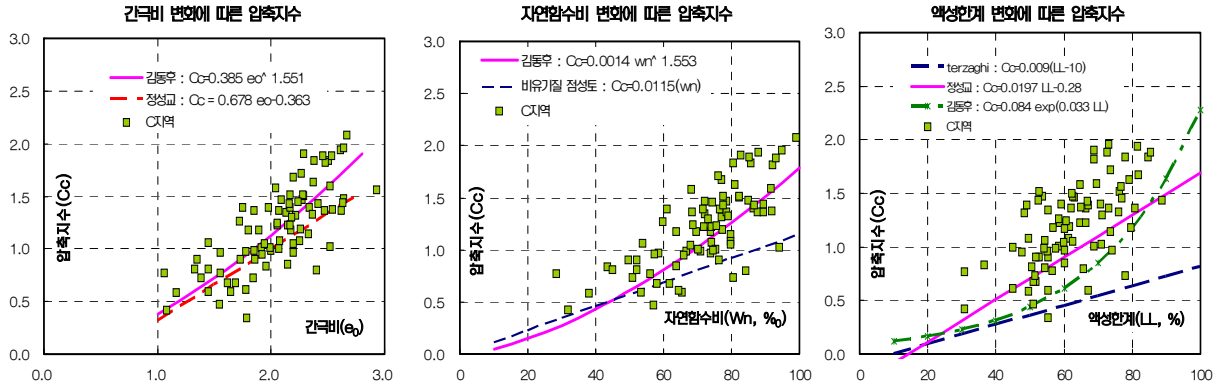
3.1 압축지수와 물리적 특성의 상관성 분석 설계적용 지반정수

점토의 압축특성과 물리적 특성의 상관성은 Terzaghi & Peck이 액성한계와 압축특성의 상관성을 밝힌 이후 많은 연구자들에 의해 다양한 방법(간극비, 자연함수비 등)이 제안되었으나, 본 연구에서는 정성교 등(2002)과 김동후 등(2003)에 의해 최근에 제안된 관계식을 이용하여 본 연구자료의 적정성을 평가하였다. 그림 3은 압축특성과 자연함수비, 액성한계, 간극비의 상관성 분포도를 나타낸 결과로서 A지역은 실험값을 보정하지 않은 영향도 있으나, 대체로 기존의 연구결과보다 다소 낮은 분포를 보이는 것으로 나타났으며, B지역은 정성교(2002)와 김동후(2003)의 연구결과와 유사한 분포를 보이는 것으로 나타났다.

그러나, C지역은 대체로 기존의 연구자들이 제안한 값보다 다소 크게 분포하는 것으로 나타났다.



(a) A, B지역



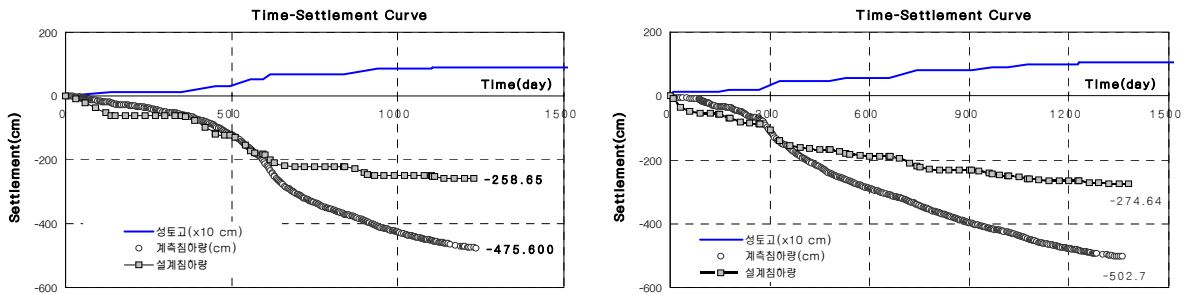
(b) C지역

그림 3. 물리적 특성치에 따른 압축지수의 분포

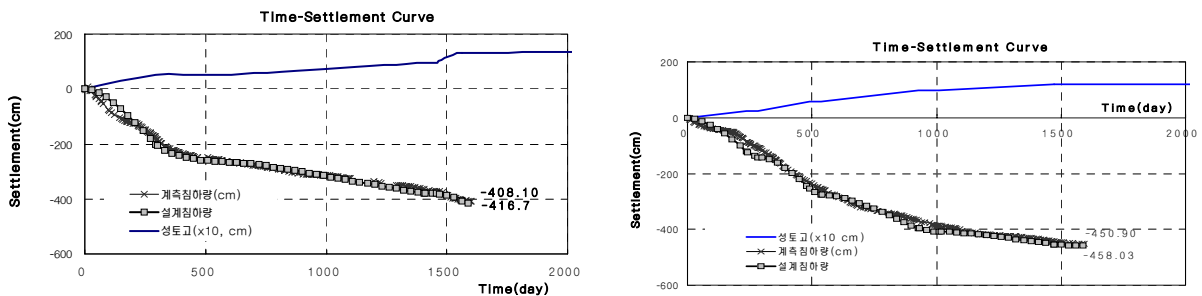
이같은 경향은 장유지역의 일부점토가 높은 압축지수를 가지고 있다는 정성교(2002)등의 연구결과와도 일치하는 것이다. 그러므로 낙동강 하구의 점토는 기존의 Terzaghi & Peck의 제안값과의 차이는 크며, 기 제안된 정성교 등(2002)과 김동후 등(2003) 연구자료 등도 지역에 따라서 부분적으로 편차를 보이므로 더욱더 많은 지역의 다양한 값들을 반영한 특성식으로 제안될 필요성이 있는 것으로 판단되었다.

3.2 설계값과 실측침하량의 비교검토

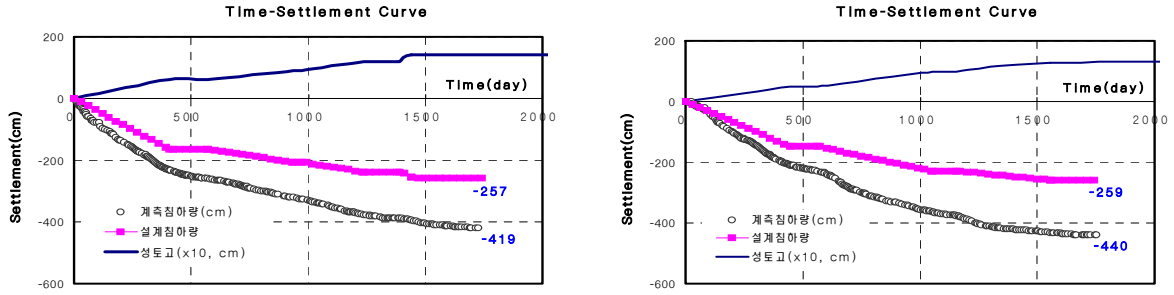
표 3으로부터 가정된 설계정수에 의해 Terzaghi의 압밀이론을 적용하여 각 지역별 대표단면에 대해 예측된 침하량과 현장에서 실시된 실측침하량 관계도를 취합하여 나타내면 그림 4와 같으며, 계측자료는 성토시공 후 약1300~1700일(3.6~4.6년)이 경과한 자료로 압밀이 약 73~95%까지 진행되었다.



(a) A지역 : CH층



(b) B지역 : CH층



(c) B지역 : CL층

그림 4. 설계침하량과 계측침하량

A 지역은 대부분 토질분류상 CH층으로 나타나는 지역으로 침하량은 설계시 예측침하량 259~275cm에 비해 계측결과 476~503cm로 나타나 약 212~228cm 이상의 편차를 보여 주므로써 설계정수가 대단히 과소 평가된 것으로 나타났다.

B지역의 CH층은 대체로 예측치와 실측치가 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다. 그러나 CL층은 예측치 259cm, 실측치 440cm를 대비할 경우 약 181cm의 편차가 발생한 것으로 나타났으며, 이 같은 경향은 CL층에서 실시한 시험자료의 신뢰도가 낮았던 것을 알 수 있었다.

표 4. 예측치과 실측치의 최종침하량 비교

구분			설계값				계측값		비교 계측값/ 설계값 (배)
			성토고 (m)	연약층 두께 (m)	압축 지수	침하량 (m)	성토고 (m)	침하량 (m)	
A지역	No. 1	CH	5.6	26.5	0.626	2.644	9.1	4.717	1.78
	No. 2		6.2	24.5	0.626	2.644	10.6	4.985	1.89
B지역	No. 3	CH	8.5	22.3	1.050	4.920	11.9	4.509	0.92
	No. 4		8.7	17.7	1.409	4.490	13.3	4.081	1.10
	No. 5	CL	9.8	22.0	0.399	2.54	14.0	4.229	1.66
	No. 6		9.8	22.4		2.54	14.1	4.191	1.65
	No. 7		9.8	25.0		2.54	12.3	4.276	1.68
	No. 8		8.5	25.5		2.54	10.3	2.985	1.18

따라서, 지층을 토질별로 구분하여 대비할 경우 각 토층에 타당한 압축지수 값이 다른 것을 예측할 수 있었다.

3.2.1 역해석 결과

가. 추정방법

본 연구에서는 아래의 방법을 이용하여 계측결과로부터 압축지수를 역 추정 하였다.

- ① 쌍곡선법 (Hyperbolic Method)에 의한 압축지수의 추정
- ② Asaoka법에 의한 압축지수의 추정
- ③ 암밀이론을 이용한 침하량 예측기법

나. 추정결과

상기 추정방법을 이용하여 A, B지역에서 예측된 압축지수는 표 5과 같다. 표 5를 살펴보면 각각의 추정방법에 따라 다소 차이는 있으나, 추정결과 CH층인 경우 A지역은 1.179~1.374, B지역은 1.050~1.380으로 나타났으며, 이 값은 설계값에 비해 A지역은 1.8~2.2배, B지역 CH층은 0.9~1.2배의 차이를 보여 B지역은 비교적 비슷한 것으로 나타났다.

그러나 B지역의 CL층은 0.540~0.930으로 나타나 CL층에서의 설계와 실측값의 편차는 1.3~2.3배 인 것으로 나타나 B지역은 A지역과 같이 설계 지반정수 산정에 무리가 있었음을 간접적으로 추론할 수 있었다. (단 Terzaghi의 1차압밀이론이 타당하다고 가정한 경우임.)

표 5. 계측역해석에 의한 압축지수의 추정

구분		설계값		계측역해석에 의한 추정 압축지수			비고 (역해석값/ 설계값)
		토성	압축지수	쌍곡선법	Asaoka법	압밀이론	
A지역	No. 1	CH	0.626	1.374	1.179	1.250	1.8~2.2
	No. 2			1.312	1.403	1.200	
B지역	No. 3	CH	1.05	1.32	-	1.050	0.9~1.2
	No. 4		1.409	1.380	1.280	1.250	
	No. 5	CL	0.399	0.930	0.910	0.700	1.3~2.3
	No. 6			0.845	0.745	0.650	
	No. 7			0.750	-	0.710	
	No. 8			0.592	-	0.540	

따라서 본 연구지역과 같이 침하량이 과대하게 발생하는 낙동강 하구유역에서는 기존에 Terzaghi의 제안식을 사용하여 침하량을 추정하는 경우, 본 연구자료를 이용하면 도움이 될 것으로 판단된다. 참고로 정성교 등(2002)은 연구지역 부근에서 실시한 실험자료에 대해 그림 5와 같이 제안하였다.

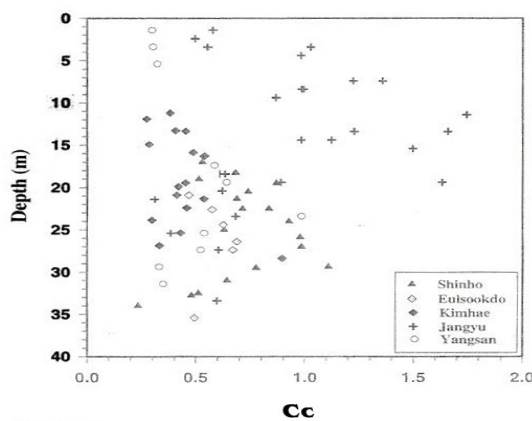


그림 5. 낙동강 하구지역의 각 지역별 심도에 따른 압축지수 분포(정, 2002)

상기 연구지역에서 나타난 바와 같이 연구전에 설계시 적용된 대부분의 압축지수 값은 역해석 값과 큰 차가 있었음을 알 수 있으며, 그림 5에 나타난 바와 같이 장유지역의 압축지수는 같은 부산점토중에서도 큰 경향을 보이는 것과 일치되는 것으로 예측된다.

다. 검증사례

상기와 같은 분석사례를 통해 나타난 지역특성값을 기준으로 C지역에서 실시된 실험자료 표 4를 근거로 침하거동을 살펴보았다. 그 결과는 그림 6과 같다.

그림 6에 나타난 바와 같이 C지역은 현장에서 성토시공 후 약 850~1000일(2.3~2.7년)이 소요된 상태로, 추정압밀도 90%내외의 설계예측 침하량과 계측결과를 나타낸 것으로 측정값과 예측값이 유사한 것을 알 수 있었다. 이와같은 거동은 설계시 적용된 CL층의 압축지수 값이 0.6~0.8, CH층 은 1.35를 적용한 결과이며, 이 값은 실험을 실시하여 얻은 자료에 대해 교란정도를 보정한 자료이다.

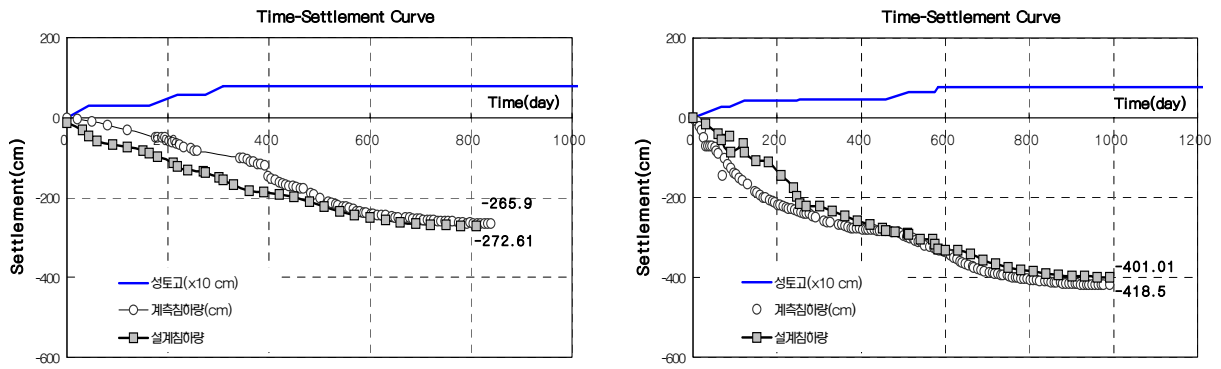


그림 6. 설계침하량과 실측침하량 (C지역)

이상의 결과를 종합해 볼 때 본 지역에서 예측방법으로 추천되는 압축지수 값은 CL층인 경우 0.5~1.0, CH층인 경우 1.0~1.5로 추정 되었다. 따라서 향후 본 연구지역 시험결과로부터 압축지수를 평가할 경우 본 연구결과를 이용하면 설계에 도움이 될 것이며, 참고자료가 될 수 있을 것으로 예측된다.

4. 결론

본 연구지역에 과대한 침하가 발생하는 원인은 아직 명확히 규명되지 않았으나 그 원인을 시험값이 과소평가된 것으로 가정할 경우 계측사례와 설계값을 비교분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 연구지역에서 실시된 시험자료는 주로 장유지역 부근의 자료로서 장유지역은 물리적 특성과 압축특성의 상관관계에 있어서 정(2002) 등이 발표한 것과 같이 일반적인 부산점토의 연구결과(신호, 김해, 양산지역)와는 다른 경향을 보인다는 것으로 나타났다.
- 2) 낙동강 하구지역 3개소에서 실시된 압축특성은 서해안 및 내륙지방에 비해 현저히 크게 나타났으며, CL층과 CH층이 각 각 다르게 나타나는 것으로 판단되었다. 본 연구지역중 CL층의 경우 압축지수는 대략 $C_c=0.5\sim1.0$, CH층은 $C_c=1.0\sim1.5$ 의 범위에 있는 것으로 나타났다.

이 같은 경향은 그림 5에 나타난 바와같이 장유지역의 압축지수는 같은 부산점토중에서도 큰 경향을 보이는 것과 일치되는 것으로 예측된다. 그러나 이 값은 지역에 따라 다소 차이가 있을 수 있으며, 실내시험 보정후 설계시 시험값과 비교분석하여 적용성 여부를 판단하여야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 김동후, 김기웅, 백영식(2003), “해성점토의 물리적특성과 압축지수의 상관성”, 한국지반공학회 논문집, 제19권 6호 2003년 12월 pp.371-378.
2. 김윤태, 권용규, 박영목(2004), “배수재가 설치된 연약지반의 2차압축을 고려한 축대칭 비선형 압밀 해석”, ISSMGE ATC-7 Symposium, September, 9 2004, BUSAN, KOREA.
3. 김상규, 박성재, 정성교(2001), “대심도 연약지반에 시공된 매립단지 및 구조물의 기초 공법에 대한 평가” ISSMGE ATC-7 Symposium, September, 13, 2001, Busan, Korea
4. 임형덕, 김태규, 이우진(2001), “현장 및 실내시험에 의한 양산점토의 공학적 특성에 관한 연구”, 대한토목학회 논문집, 제21권, PP 385~395.
5. 정성교, 곽정민, 장우영, 김덕곤(2002), “낙동강 하구 점토의 압축특성에 관한 연구”, 한국지반공학회 논문집. 제 18권 4호 2002년 8월 pp.295-307.
6. Kim, S. K.(1999), "Large consolidation settlement occurred during reclamation works in the Nakdong river mouth", KGS 99 Dredging and Geoenvironmental Conference, pp.35-48.
7. Chung, S. G.(1999), "Engineering Properties and consolidation characteristics of Kimhae estuarine clayey soils, "Thick Deltaic Deposits, Special Publication, Roc. of the 11th ARC on SMGE, pp.93-108.
8. Chung, S. G., Giao, P. H. (2001), "Challenges in geotechnical investigation of Pusan clays", Invited Paper, Indian Geotechnical Conference_Vol.2, Indore chapter, pp.23-28.
9. Locat, J. and Tanaka, H.(1999), "Microstructure, mineralogy and physical properties: techniques and application to the Pusan clays", KGS '99 Dredging an Geoenvironmental Conference, pp.15-31.
10. Park, S. Z., G. H. Jeong, J. H. Park, P.E. Bautista, S. Suwa, M. Fukuda, H. Tanaka, O. Mishima and M. Tanaka(2000), "The mysterious formation of Nakdong river estuary soft soil", International Seminar on Geotechnics in Kochi, pp.41-48.
11. Tanaka, h., Mishima, O., Tanaka, M., Park, S. Z., Jeoung, G. H. and Locat, J.(2001), "Charcterization of Yangsan clay, Pusan, Korea", Soils and Foundations, Vol.41, No.2, pp.89-104.