

지표침하판계측을 통한 연약지반 침하분석 사례연구

김준석*

A Case Study on the Analysis of Soft Ground Consolidation by the Measurement of Surface Settlement Plate

Kim, Joon-Seok*

Abstract : The installation of soft ground instruments and the performance of measurement and management of the measurement shall be carried out in order to ensure the safety of the construction work and to improve the quality of the construction work. The purpose of the pressure density deposition calculation is to determine the stability of the foundation ground and the formulation by measuring and calculating the density conditions generated on the soil through the period of neglect after completion of the soil at each stage. In practice, it is judged that the analysis by the hyperbolic method can be applied to the safety side.

키 워 드 : 연약지반계측, 쌍곡선해석방법, Asaoka 분석방법, 압밀침하

Key Words : Soft ground measurement, Hyperbolic method, Asaoka method, Consolidation settlement

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

건설공사 중 연약지반 계측관리에 따른 연약지반 계측기 설치 및 계측관리업무 수행은 건설공사의 안전성 확보 및 공사의 질적 향상을 위하여 실시하여야 한다(Bjerrum, 1967). 압밀도 침하산정은 각 단계 성토완료 후 방치기간을 통하여 성토체에 발생된 압밀 상태를 측정 및 산정하여 기초지반 및 제체의 안정성 여부를 파악하여, 후속공정 시기를 결정하기 위함이다(Ladd, 1974). 본 연구구간에 대한 현장조사 및 실내시험 분석결과, 연구구간 전반에 걸쳐 상부에는 사질토, 하부에는 연약 점성토 지반이 분포하는 것으로 조사되었다. 본 연구의 연약구간에 대하여 연약지반 내 자연시료를 대상으로 실내시험과 현장시험을 실시하여 연약지반의 물리적·역학적 특성을 파악 분석하고, 연약지반 설계기준에 의하여 도로 및 기타 구조물의 안정성 확보를 위한 최적의 연약지반처리 대책공법 설계 및 도로 제체 비탈면의 안정성을 확보하고자 하였으나, 무엇보다도 연약지반 개량이 완료되어야 하는 기본조건이 필요하였다(Johnson, 1970). 최근 연구로서 부산의 연약지반에 대한 침하예측을 연구한 바 있으나 부산지역에 한정된 연구로서 다른 여러지역에 대한 추가 연구가 필요하다.(김종묵, 2019). 따라서, 본 연구에서는 현장에서 측정된 데이터에 의한 연약지반에 대한 침하계측 분석을 통하여 연약지반 개량 종료시기를 판단

하고자 하는 것이 본 연구의 목적이다(Hansbo, 1981).

1.2. 연구의 범위 및 방법

본 연구에서는 Figure 1과 같이 전라북도 서해안 지역의 연약지반 현장의 일정구간을 선정하여 지표침하판, 수위계, 간극수압계를 설치하고 2018년9월부터 2019년 12월 까지 15개월 동안 계측하여 분석하는 것으로 연구의 범위를 설정하였다. 본 연구의 범위와 방법은 실무에서 진행되고 있는 상황을 분석함으로써 이론적 기술내용이 실무에 어떻게 적용될 수 있는지에 대한 연구로 설정하였다.

2. 연약지반 계측분석

2.1 연약지반 설계기준

2.1.1 연약지반 판정기준

1) 일반적 기준

연약지반의 판정은 연약지반에 축조되는 쌓기 하중과 과거 연약지반이 경험했던 선행하중에 따라 변화하기 때문에 상대적인 문제로 해석 및 평가하는 것이 바람직하며, 연약지반의 판정은 단순히 지반조건 만으로 결정되는 것이 아니므로, 토질의 성상 및 시공 상황 등에 따라 다르기 때문에 제체나 구조물의 종류, 형식, 규모와 지반특성 등을 고려하여 판정하여야 한다.

본 연구에서는 일반적으로 많이 적용되고 있는 연약지반 판정기준 외에 본 사업구간의 최대

* 청운대학교 공과대학 토목환경공학과 교수.

쌓기고가 17.88m의 고성토임을 고려하여 N값이 6 보다 큰 굳은 점성토층은 쌓기하중과 선행하중과의 분석을 통하여 하부 굳은 점성토층에 대한 연약지반 판정여부를 별도로 검토한 결과 상부 쌓기하중이 각 점성토의 과거최대 선행하중보다 크므로 N값이 6 보다 큰 점성토층도 압밀대상층으로 선정하였다.

2) 허용 잔류침하량 기준

허용 잔류침하량은 구조물 사용목적 및 중요성과 공사기간 등을 종합적으로 고려하여 결정하여야 한다. 본 연구에서는 잔류침하량 과다 시공 후 도로포장의 균열 및 변형 발생으로 도로장기유지보수비 증가 및 주행성 불량으로 인해 안전운행에 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 공사기간, 경제성 및 유지관리시 처리가능 범위를 고려하여, 도로구간은 허용잔류침하량을 10cm로 설정하고, 사석제 및 녹지구간은 30cm로 각각 적용하였다. 연약지반의 판정은 연약지반에 축조되는 쌓기 하중과 과거 연약지반이 경험했던 선행하중에 따라 변화하기 때문에 상대적인 문제로 해석 및 평가하는 것이 바람직하다.

2.2 연약지반 연구구간의 특징

2.2.1 지층분포현황

기본 및 실시설계에서 100m 간격의 연약지반 조사를 수행하여 압밀대상 지층을 상세히 파악하였으며, 현장 및 실내시험을 종합하여 구간별 연약지반의 압밀특성을 분석하였다. 본 연구구간은 느슨한 사질토, 사질토, 연약 점성토, 굳은 점성토의 순으로 다음과 같은 층후로 분포하는 것을 확인하였다.

연구구간의 조사위치와 표시는 Figure 1에 표시하였으며, 연구구간은 Figure 2에 지반의 토질현황은 Figure 3에 표시하였다.

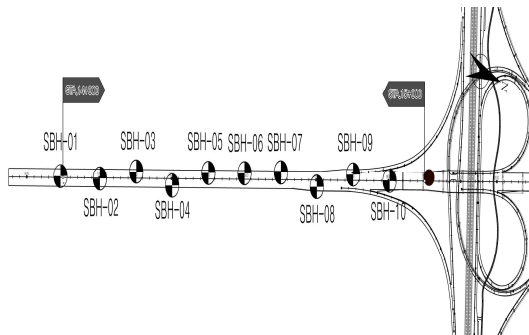


Figure 1. 현장 조사위치

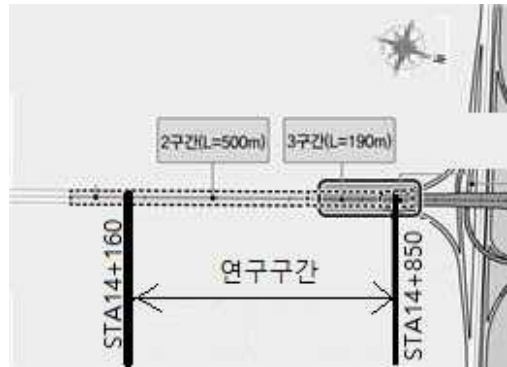


Figure 2. 현장 연구구간 설정

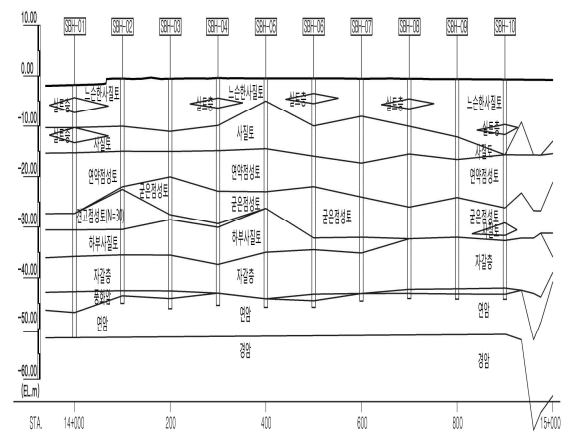


Figure 3. 현장 지층현황(횡단면)

연구구간은 Figure 2에 표시한 것과 같이 STA.14+160부터 STA.14+850 까지의 구간이다. 따라서, 침하판등 연약지반 침하계측 위치는 이 구간 안에서 이루어지며 위치 표시도 이 구간안의 위치로 표시된다. 연구구간의 지층분석을 Table 1에 정리하였다.

Table 1. 연구구간의 지층 분석

구 분	출현심도 (m)	두께(m)	N값(평균 N값)
느슨한사질토	0.0	1.5 ~ 15.0	2/30~13/30(7/30)
사질토	0.0~11.5	4.0 ~ 18.5	5/30~34/30(14/30)
연약점성토	13.5~16.8	6.0 ~ 12.0	1/30~7/30(3/30)
굳은점성토	12.5~25.5	3.3 ~ 13.5	5/30~32/30(12/30)
하부사질토	25.8~31.7	2.3 ~ 8.7	8/30~50/5(37/30)
자갈층	31.4~37.0	5.6 ~ 10.1	21/30~50/3(50/17)
풍화대	40.8~42.7	0.8 ~ 4.2	50/30~50/5(50/16)

2.2.2 계측 자료 분석

계측분석 종목으로는 지표침하판, 지하수위계, 간극수압계, 지표침하판 등 3개 종목을 분석하였다. 각각의 계측자료는 아래 Table2, 3, 4 와 같다.

Table 2에서 실측위치가 L, C, R로 표시된 것은 왼쪽(L), 중앙(C), 오른쪽(R)을 의미한다.

Table 2의 14K+200 의 경우 중앙기준으로 성토종료 시점에서 26.7cm 침하발생하였고, 약12개월이 지난 현재시점에서 33.6cm 침하되어 거의 수렴되고 있음을 알 수 있다. 또한 Table 2에서 2구간의 경우 중심기준으로 최대 63.1cm의 침하가 발생되었으며, 3구간에서는 최대 100.4cm의 침하가 발생되었다.

Table 2. 지표침하판 계측값

구간	설치위치	위치	침하량 누계(cm)		증 감 (cm)	성토고 (m)
			성토종료	현 재		
2구간	14K+200	L	-25.0	-34.4	-9.40	7.11
		C	-26.7	-38.6	-11.90	
		R	-27.1	-38.0	-10.90	
	14k+400	L	-26.2	-35.8	0.00	7.82
		C	-30.5	-42.1	0.00	
		R	-25.0	-35.1	0.00	
14k+600	L	-48.3	-60.5	0.00	10.74	
	C	-48.0	-63.1	0.00		
	R	-43.3	-56.4	0.00		
3구간	14k+800	L	-82.5	-95.9	0.00	14.96
		C	-85.8	-100.4	0.00	
		R	-79.7	-92.8	0.00	

Table 3. 지하수위계 계측값

구간	본선	설치위치	성토종료	현 재	증 감 (m)
			E.L(m)	E.L(m)	
2구간	본선	SMW-2 (14K200L)	-1.088	-0.828	0.26
		SMW-3 (14K400R)	-0.730	-0.350	0.38
		SMW-4 (14K600L)	-0.635	-0.595	0.04
3구간	본선	SMW-5 (14K800R)	-0.413	-0.213	0.20

Table 4. 간극수압계 계측값

구간	본선	설치위치	과잉간극수압 변화량(kg/cm ²)			증 감 (kg/cm ²)	성토고 (m)
			최 대	성 토 종 료	현 재		
2구간	본선	SMPW-2 (14K200)	0.2660	0.2660	0.1558	-0.1102	7.11
		SMPW-3 (14K400)	0.2704	0.2671	0.1045	-0.1626	7.82
		SMPW-4 (14K600)	0.1525	0.1161	0.0037	-0.1124	10.74
3구간	본선	SMAPW-5 (14K800)	1.2400	0.4700	0.3560	-0.1140	14.96

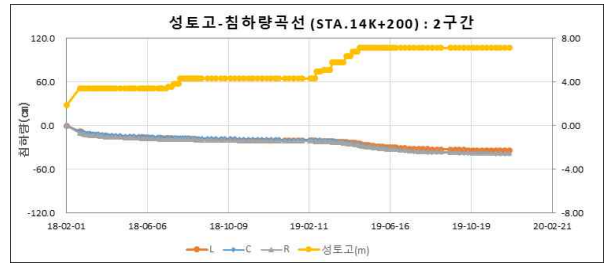


Figure 4. 성토고-침하량곡선(STA.14+200)

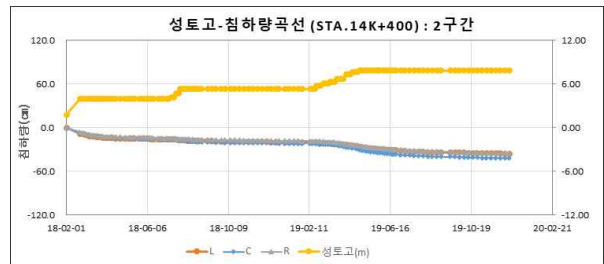


Figure 5 성토고-침하량곡선(STA.14+400)

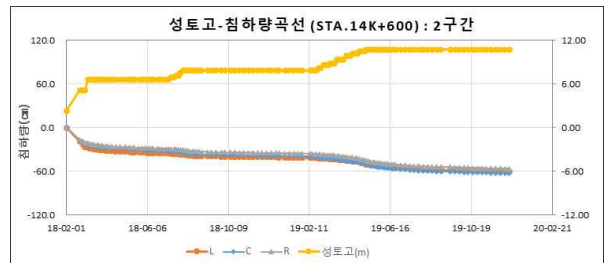


Figure 6. 성토고-침하량곡선(STA.14+600)

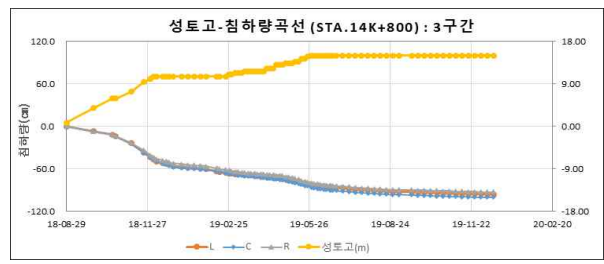


Figure 7. 성토고-침하량곡선(STA.14+800)

2.2.3 입밀침하 분석

본 연구에서는 압밀침하분석방법으로 Asaoka 방법과, 쌍곡선법(Hyperbolic method)을 적용하였다. 압밀침하를 위하여 성토를 시작한 시점은 2018년 9월이며, 2019년 12월을 기준으로 분석을 수행하였다.

1) Asaoka방법에 의한 분석결과

Asaoka방법에 의한 분석결과 압밀도 97% 이상 분석

되었으며 Table 5에 정리하였다.

Table 5. Asaoka방법에 의한 분석결과

설치위치	성토고 (m)	경과일 (day)	현재침하량 (cm)	ASAOKA법				
				최종예상침하량 (cm)	예상잔류침하량 (cm)	압밀도 (%)		
2구간	14K+200	L	7.1	231	34.4	34.42	0.02	99.94
		C	7.1	231	38.6	39.09	0.49	98.75
		R	7.1	231	38.0	38.34	0.34	99.11
	14k+400	L	7.8	231	35.8	35.96	0.16	99.55
		C	7.8	231	42.1	42.46	0.36	99.16
		R	7.8	231	35.1	35.62	0.52	98.55
14k+600	L	10.7	221	60.5	61.06	0.56	99.16	
	C	10.7	221	63.1	63.24	0.14	99.84	
	R	10.7	221	56.4	56.73	0.33	99.49	
3구간	14k+800	L	15.0	203	95.9	97.38	1.48	98.48
		C	15.0	203	100.4	100.93	0.53	99.48
		R	15.0	203	92.8	93.38	0.58	99.37

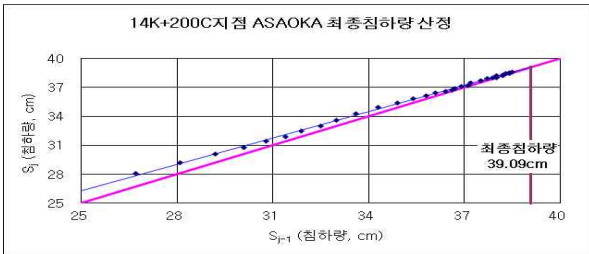


Figure 7. Asaoka방법에 의한 분석(STA.14+200C)

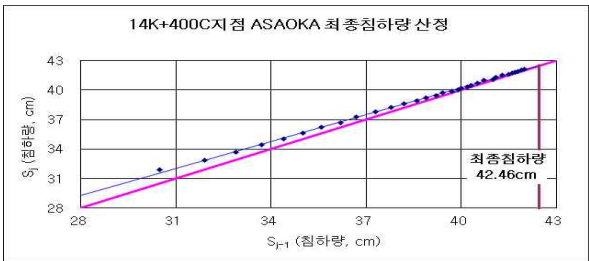


Figure 8. Asaoka방법에 의한 분석(STA.14+400C)

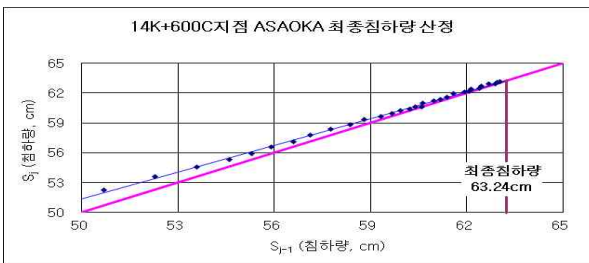


Figure 9. Asaoka방법에 의한 분석(STA.14+600C)

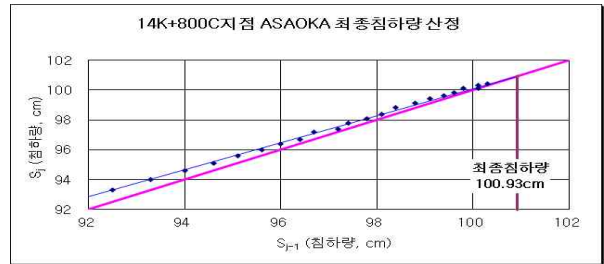


Figure 10. Asaoka방법에 의한 분석(STA.14+800C)

2) 쌍곡선방법에 의한 분석결과

쌍곡선방법에 의한 분석결과는 Table 6과 같이 구간에 따라 중앙기준으로 89.98~95.58%로 분석되었다. 분석내용은 Figure 11~14에 표시하였다.

Table 6. 쌍곡선방법에 의한 분석결과

설치위치	성토고 (m)	경과일 (day)	현재침하량 (cm)	쌍곡선법		압밀도 (%)		
				최종예상침하량 (cm)	예상잔류침하량 (cm)			
2구간	14K+200	L	7.1	231	34.4	37.01	2.61	92.96
		C	7.1	231	38.6	42.90	4.30	89.98
		R	7.1	231	38.0	41.69	3.69	91.16
	14k+400	L	7.8	231	35.8	38.67	2.87	92.57
		C	7.8	231	42.1	45.94	3.84	91.65
		R	7.8	231	35.1	39.15	4.05	89.66
14k+600	L	10.7	221	60.5	64.54	4.04	93.74	
	C	10.7	221	63.1	66.68	3.58	94.63	
	R	10.7	221	56.4	59.87	3.47	94.21	
3구간	14k+800	L	15.0	203	95.9	102.89	6.99	93.21
		C	15.0	203	100.4	105.04	4.64	95.58
		R	15.0	203	92.8	97.28	4.48	95.40

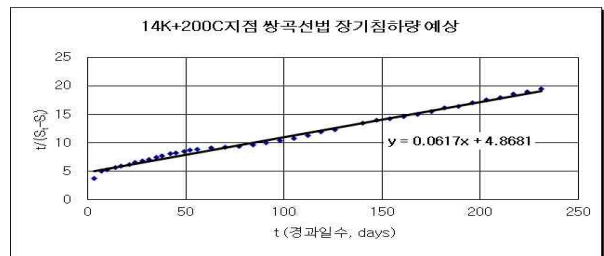


Figure 11. 쌍곡선 방법에 의한 분석(STA.14+200C)

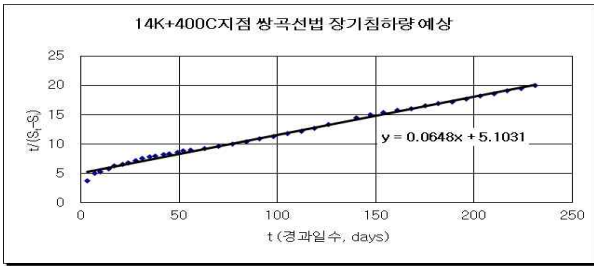


Figure 12. 쌍곡선 방법에 의한 분석(STA.14+400C)

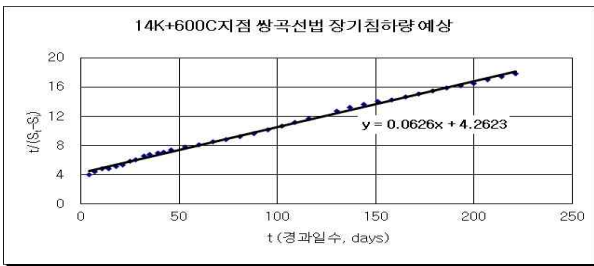


Figure 13. 쌍곡선 방법에 의한 분석(STA.14+600C)

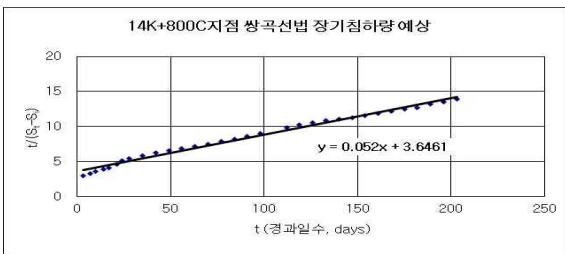


Figure 14. 쌍곡선 방법에 의한 분석(STA.14+800C)

3) 분석결과

14K+200L 지점의 현재 침하량은 34.4cm로 실측 침하량을 기준으로 쌍곡선법에 의해 추정된 잔류 침하량은 2.61cm, 압밀도는 92.96%를 보이며, 아사오카방법에 의해 추정된 잔류 침하량은 0.02cm, 압밀도는 99.94%로 허용잔류침하량(10cm) 기준을 만족한다. 14K+200C 지점의 현재 침하량은 38.6cm로 실측 침하량을 기준으로 쌍곡선방법에 의해 추정된 잔류 침하량은 4.30cm, 압밀도는 89.98%를 보이며, 아사오카방법에 의해 추정된 잔류 침하량은 0.49cm, 압밀도는 98.75%로 허용잔류침하량(10cm) 기준을 만족한다. 14K+200R 지점의 현재 침하량은 38.0cm로 실측 침하량을 기준으로 쌍곡선방법에 의해 추정된 잔류 침하량은 3.69cm, 압밀도는 91.16%를 보이며, 아사오카방법에 의해 추정된 잔류 침하량은 0.34cm, 압밀도는 99.11%로 허용잔류침하량(10cm) 기준을 만족한다.

14K+400L 지점의 현재 침하량은 35.8cm로 실측 침하량을 기준으로 쌍곡선방법에 의해 추정된 잔류 침하량은 2.87cm, 압밀도는 92.57%를

보이며, 아사오카방법에 의해 추정된 잔류 침하량은 0.16cm, 압밀도는 99.55%로 허용잔류침하량(10cm) 기준을 만족한다. 14K+400C 지점의 현재 침하량은 42.1cm로 실측 침하량을 기준으로 쌍곡선방법에 의해 추정된 잔류 침하량은 3.84cm, 압밀도는 91.65%를 보이며, 아사오카방법에 의해 추정된 잔류 침하량은 0.36cm, 압밀도는 99.16%로 허용잔류침하량(10cm) 기준을 만족한다. 14K+400R 지점의 현재 침하량은 35.1cm로 실측 침하량을 기준으로 쌍곡선방법에 의해 추정된 잔류 침하량은 4.05cm, 압밀도는 89.66%를 보이며, 아사오카방법에 의해 추정된 잔류 침하량은 0.52cm, 압밀도는 98.55%로 허용잔류침하량(10cm) 기준을 만족한다.

14K+600L 지점의 현재 침하량은 60.5cm로 실측 침하량을 기준으로 쌍곡선방법에 의해 추정된 잔류 침하량은 4.04cm, 압밀도는 93.74%를 보이며, 아사오카방법에 의해 추정된 잔류 침하량은 0.56cm, 압밀도는 99.16%로 허용잔류침하량(10cm) 기준을 만족한다. 14K+600C 지점의 현재 침하량은 63.1cm로 실측 침하량을 기준으로 쌍곡선법에 의해 추정된 잔류 침하량은 3.58cm, 압밀도는 94.63%를 보이며, 아사오카방법에 의해 추정된 잔류 침하량은 0.14cm, 압밀도는 99.84%로 허용잔류침하량(10cm) 기준을 만족한다. 14K+600R 지점의 현재 침하량은 56.4cm로 실측 침하량을 기준으로 쌍곡선방법에 의해 추정된 잔류 침하량은 3.47cm, 압밀도는 94.21%를 보이며, 아사오카방법에 의해 추정된 잔류 침하량은 0.33cm, 압밀도는 99.49%로 허용잔류침하량(10cm) 기준을 만족한다.

14K+800L 지점의 현재 침하량은 95.9cm로 실측 침하량을 기준으로 쌍곡선방법에 의해 추정된 잔류 침하량은 6.99cm, 압밀도는 93.21%를 보이며, 아사오카방법에 의해 추정된 잔류 침하량은 1.48cm, 압밀도는 98.48%로 허용잔류침하량(10cm) 기준을 만족한다. 14K+800C 지점의 현재 침하량은 100.4cm로 실측 침하량을 기준으로 쌍곡선법에 의해 추정된 잔류 침하량은 4.64cm, 압밀도는 95.58%를 보이며, 아사오카방법에 의해 추정된 잔류 침하량은 0.53cm, 압밀도는 99.48%로 허용잔류침하량(10cm) 기준을 만족한다. 14K+800R 지점의 현재 침하량은 92.8cm로 실측 침하량을 기준으로 쌍곡선방법에 의해 추정된 잔류 침하량은 4.48cm, 압밀도는 95.40%를 보이며, 아사오카방법에 의해 추정된 잔류 침하량은 0.58cm, 압밀도는 99.37%로 허용잔류침하량(10cm) 기준을 만족한다.

지표침하판 계측결과에서 압밀도가 95%이상으로 분석되므로써 압밀침하가 마무리 단계인 점에 비하여 과잉간극수압(Table 4) 계측에서는 과

잉간극수압이 상당히 잔존하는 것으로 측정되었다. 이것은 과잉간극수압이 부분적으로 잔존할 수는 있으나 전체적으로 변화의 폭이 작은 것으로 분석할 때 계측의 오차인 것으로 추정된다.

논문투고일 2020년 11월 28일
 논문심사일 2020년 12월 18일
 논문게재일 2020년 12월 30일

3. 결론

본 연구를 통하여 실측자료를 분석한 결과 아사오카방법에 비하여 쌍곡선방법에 의한 압밀도 추정이 상대적으로 작게 나오는 것으로 도출되었다. 실측 침하량을 기준으로 아사오카법에 의해 추정된 잔류 침하량은 0.01 ~ 1.48cm, 압밀도는 94.36 ~ 99.98%를 보이며, 쌍곡선법에 의해 추정된 잔류 침하량은 0.80 ~ 6.99cm, 압밀도는 81.67 ~ 97.95%를 보였다. 따라서, 실무에서는 아사오카법에 의한 분석에 비하여 쌍곡선법에 의한 분석이 안전측으로 적용될 수 있는 것으로 판단된다. 즉, 연약지반 개량종료 시기의 판단은 아사오카방법이 쌍곡선방법에 비하여 빠르게 제시하는 것으로 분석되었다. 또한, 연약지반개량에 있어서 과잉간극수압의 계측자료 분석에서는 이론값에 비하여 작은 값으로 계측되었으며 계측값의 변화도 작은 것으로 분석되었다. 따라서, 과잉간극수압의 계측분석에서는 계측자료의 오차가 있을 수 있다는 가정 하에 신중한 판단이 필요하다.

REFERENCES

- 김종목(2019), “부산 연약지반개량 계측결과를 고려한 장래침하분석에 관한연구” 부경대학교대학원 해양공학과 석사학위논문
- Ladd, C. C. and Foott, R.(1974), “New design procedure for stability of soft clay” , ASCE, 100 No. GT7, pp.763 ~ 785
- Johnson, S. J.(1970), “Foundation pre-compression with vertical sand drains” , J. Soil Mech. Found. Div. ASCE, Vol.96, No.1, pp.145 ~ 175.
- Hansbo, S., Jamiolkowski, M. and Kok, L.(1981), “Consolidation by vertical drains” , Geotechnique, Vol.31, No.2,
- Bjerrum, L.(1967), “Engineering geology of norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlement of buildings” , Geotechnique, pp. 17 ~ 83