한국지반신소재학회논문집 제18권 3호 2019년 9월 pp. 55 ~ 67
J. Korean Geosynthetics Society Vol.18 No.3 September 2019 pp. 55 ~ 67
DOI: https://doi.org/10.12814/jkgss.2019.18.3.055
ISSN: 2508-2876(Print) ISSN: 2287-9528(Online)

수치해석에 의한 낙동강 하구 연약지반의 장기침하특성

Characteristics of Long-Term Settlement in the Soft Ground of Nakdong River by Numerical Analysis

박춘식[1], 류민영[2]*
Choon-Sik Park[1], Mean-Young Ryu[2]*

[1]*Member, Professor, School. of Civil, Environmental and Chemical Engineering, Changwon National Univ., 20 Changwondaehak-ro, Uichang-gu, Changwon-si, Gyeongsangnam-do 51140, Republic of Korea*
[2]*Member, Doctor of Engrg, Director, Sejin Engineering & Construction Co. Ltd., 6Fl, 304 Gamgye-ro, Buk-myeon, Uichang-gu, Changwon-si, Gyeongsangnam-do 51112, Republic of Korea*

ABSTRACT

Deep soft ground in mouth of Nackdong river requires to be analysed with prediction method concerning characteristics of secondary consolidation from the beginning because it causes excessive settlement due to time-dependant secondary consolidation characteristics. This study investigated characteristics of extended settlement by conducting one-dimensional theory, elasto-plastic model and visco-elasto-plastic model as well as analyzing long-term measuring data observed over 2,000 days. According to one-dimensional theory and elasto-plastic model, there is not definite correlation between height of embankment and depth of soft ground while visco-elasto-plastic model showed similar result of settlement to that of long-term measuring data. Consequently it is suggested that applying visco-elasto-plastic model to developing deep underground place as studied area on predicting extended settlement before construction prevents economic loss and delay during process by preparing secondary consolidation characteristics.

요 지

낙동강 하구 일대 대심도의 연약지반 지역은 시간 의존적인 2차압밀 특성 등의 원인으로 예측보다 실제 과다한 침하가 발생하므로 설계 시점부터 2차압밀 특성을 고려한 예측기법의 필요성이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 2,000일 이상의 장기 계측자료 분석과 1차원 이론, 탄소성, 점·탄소성의 수치해석을 수행하여 장기침하 특성을 분석하였다. 그 결과 1차원 이론, 탄소성 해석 모두 성토 높이와 연약층 깊이에 따른 뚜렷한 상관관계를 찾을 수 없었으나, 점·탄소성 해석 방법은 장기계측 결과와 아주 유사하게 침하를 예측하였다. 따라서 연구 대상 지역과 같은 대심도 지역에서 장기 침하 예측 시 점·탄소성 해석을 시공 전에 적용하면 2차압밀 침하 거동 특성을 미리 예측하여 시공 중 발생할 수 있는 공기 지연과 경제적 손실을 사전에 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

Keywords : Deep Soft Ground, Consolidation, Long-Term Settlement, One-Dimensional Theory, Elasto-Plastic Model, Visco-Elasto-Plastic Model

1. 서 론

연약지반이 깊게 발달한 남해안 일대 특히 낙동강 하구 지역은 대부분 점성토 지반의 연약층이 20m～70m 전후로 두껍게 분포하는 대심도 연약지반 지역이다. 낙동강 하구 지역은 대규모 공사 진행에 따른 전단변형, 지지력 부족, 시간 의존적 압밀침하 등 각종 지반공학적 문제점들이 발생하고 있다. 언급된 문제 중 압밀침하는 장기적으로 크게 발생하며, 공학적으로나 경제적으로 심각한 문제로 인식되고 있다.

Received *7 Aug. 2019,* ***Revised*** *19 Sep. 2019,* ***Accepted*** *20 Sep. 2019*
****Corresponding author***
Tel: +82-55-277-2728; Fax: +82-55-238-2428
E-mail address: sharprmy@naver.com (M. Ryu)

또한, 본 연구지역의 대심도 연약지반에 대한 설계단계의 예측한 침하 거동이 시공단계에서 계측 수행한 침하 거동과 다른 침하 양상을 나타내고 있다. 이와 같은 양상의 주요 원인에 대하여 Kim et al.(2008)은 2차압밀 특성인 크리프 특성이 고려되지 않은 점을 언급하였으며, Kim (1996)은 압밀침하 계산의 해석적 한계와 연직 배수재 적용 지반에 대한 압밀 수치해석의 어려움을 확인하였다. K-water(2014)는 피압대수층의 존재와 연직 배수재의 피압대수층 관통 영향을 연구하였고, Chung(1999)은 실내시험 시료의 교란 영향 등의 원인을 확인하였다. 따라서, 본 연구에서는 2차압밀 특성인 크리프 특성이 고려되지 않아 발생할 수 있는 장기침하예측에 대한 오차를 줄이기 위하여 2차압밀 특성을 고려할 수 있는 적정 모델에 대한 수치해석 적용성을 검증하려고 하였다.

2차압밀 특성을 고려한 수치해석의 기존 연구모델을 살펴보면 크리프 특성과 Dilatancy 특성, 시간 의존성을 고려한 점·탄소성 구성모델(Sekiguchi and Otha., 1977), 점소성 이론에 근거한 점·탄소성 모델(Adachi and Oka., 1982), 과압밀 상태에 대한 점·탄소성 모델(Kutter and Sathialingam., 1992), Yoshikuni의 점·탄성 모델(Yoshikuni et al., 1995), 등가적 시간개념 모델을 이용한 비선형 점·탄소성 모델(Yin and Graham., 1994), Isotache 모델(Imai et al., 2003), 시간 의존적 점소성을 고려한 비선형 점·탄소성 모델(Kim., 2005), 1차원 점·탄성 모델을 3차원으로 확장한 수치해석모델(Baek et al., 2006) 등의 다양한 압밀 모델들이 제안되었다. 하지만 이러한 2차압밀 특성을 고려한 수치해석 모델들이 대부분 해석방법 및 모델링이 복잡하고, 결과의 신뢰성 검증 문제로 쉽게 적용하지 못하는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 이러한 2차압밀 특성인 크리프 특성을 반영하고 장기적인 압밀침하 거동을 분석하기 위하여 최근 2차압밀 특성의 해석모델 중 신뢰도 높은 범용 프로그램에 탑재된 Sekiguchi-Ohta 점·탄소성 모델을 적용하였다. 연구대상 연약지반의 장기 압밀 거동특성을 보다 효과적으로 해석하고 신뢰도 높은 예측이 가능한지에 대하여 검증적 해석을 수행하였다. Terzaghi 1차원 압밀이론과 탄소성 구성모델인 Modify Cam-Clay 모델의 해석적 접근을 통한 이론적 상관관계를 분석하여 Sekiguchi-Ohta 점·탄소성 모델의 수치해석 적합성을 알아보았다. 연구대상 지역의 약 2,000일 이상 되는 장기 계측자료를 확보하고 분석하여 Sekiguchi-Ohta 점·탄소성 모델의 2차압밀 침하거동 특성의 검증을 통하여 장기침하특성에 대한 실무적인 적용기법을 찾아보고자 연구를 수행하였다.

2. 지반특성 및 침하계측 결과

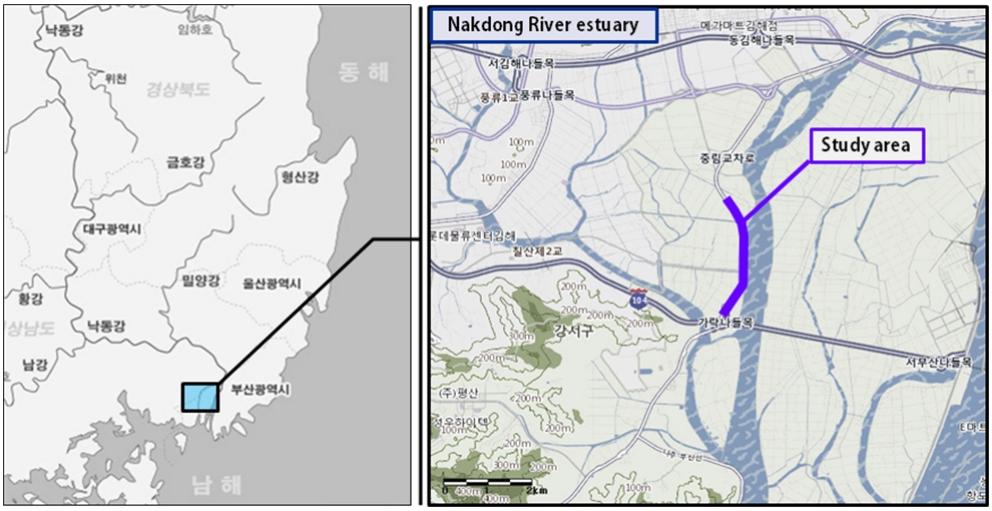
2.1 지층구성 토질특성

연구대상 지역의 지반조사 자료는 시공 전 지층확인 및 토질특성을 파악하기 위하여 2003년에서 2005년까지 단계적으로 수행한 지반조사 결과가 제공되었다(Busan Metropolitan City Construction Headquarters, 2005). 지반조사 결과 지층구성은 매립층, 충적층, 풍화잔류토, 풍화암, 기반암으로 구분된다. 매립층은 인위적으로 형성된 층으로 주로 실트 섞인 모래, 모래 섞인 자갈 및 실트로 형성되어 있다. 충적층은 낙동강 유역 일대의 충적평야지대로서 상부에는 느슨한 사질퇴적층이 5m 이하의 심도로 분포하고, 하부에는 N치 1/30～4/30의 연약한 상태의 연약 점성토층이 20m～40m 두께로 폭넓게 형성되어 있다. 그 하부의 퇴적층은 비교적 단단한 점토 및 실트 또는 자갈모래층이 분포하며, 아래로 풍화잔류토, 풍화암이 분포한다. 기반암은 장석반암이 주를 이루고 있으며 분포상 대부분 풍화암 하부에 발달하고 있으나 일부 퇴적층 및 풍화잔류토층 하부에 나타나는 경우 있으며 강도와 풍화정도에 의하여 연암과 경암으로 구분된다. Fig. 1에는 연구대상 지역의 위치와 대상 지반의 연약지반 점성토 층후를 단면번호와 적용시추공과 함께 나타내었다.

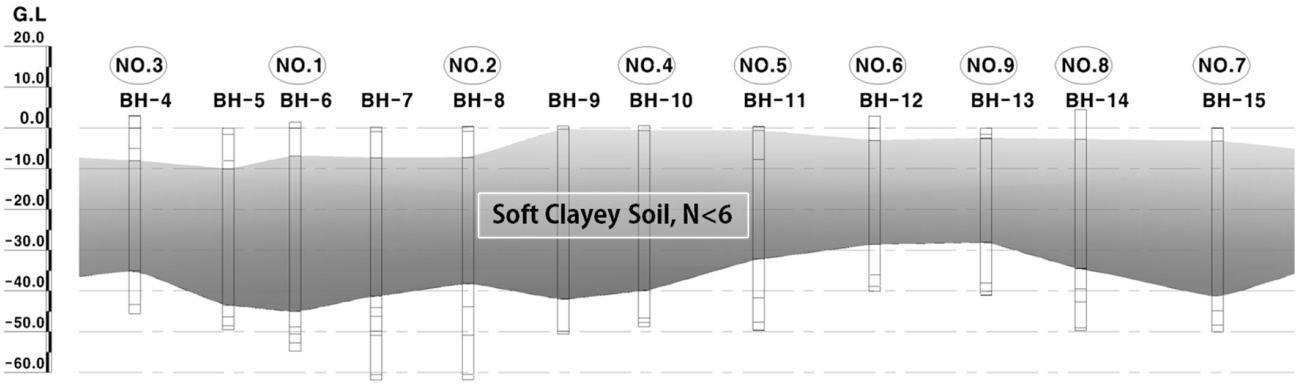
지반조사 실내시험 분석결과 토질특성은 함수비 36.7%～81.0%, 액성한계 33.1%～67.7%, 소성지수 11.4～34.7로 압축성이 큰 CL, CH의 특성을 보였다. 심도에 따른 압밀특성은 Fig. 2.에서와 같이 초기간극비(e_0) 1.03～2.15, 압축지수(C_c) 0.38～1.12, 선행압밀하중(P_c) 43.0kN/m^2～147.2 kN/m^2 대체로 폭넓은 분포를 보였으나 값들이 모두 약 20.0m 깊이까지는 비교적 증가하는 경향이 나타나지만, 심도가 더 깊어질수록 전체적으로 감소하는 경향을 찾아볼 수 있다.

2.2 장기 침하계측 분석결과

분석에 사용한 장기침하 계측자료는 낙동강 하구 지역의 도로 건설공사 현장에서 수행한 현장계측 측정자료 자료이며, 구간별로 2004년 12월 21일에 측정을 시작하여

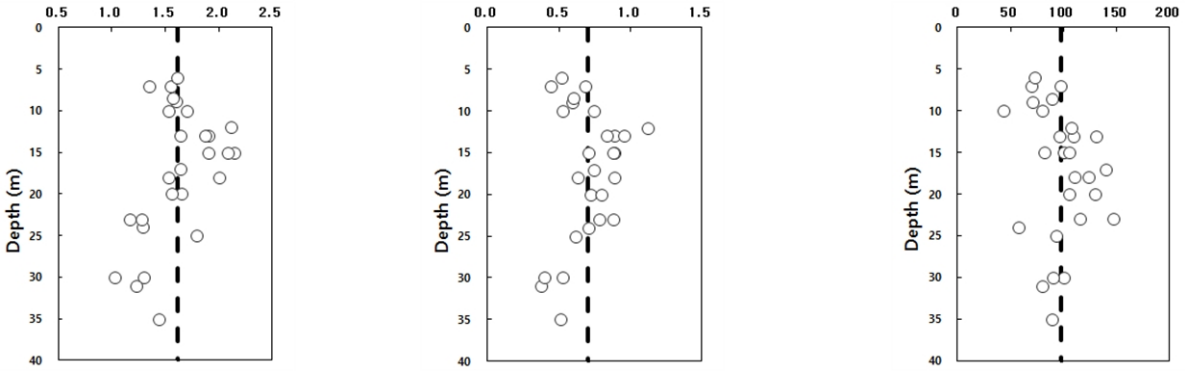


(a) Location of the study area (Nakdong River estuary)



(b) Distribution status of soft clayey soil in the study area

Fig. 1. Location & status of the study area

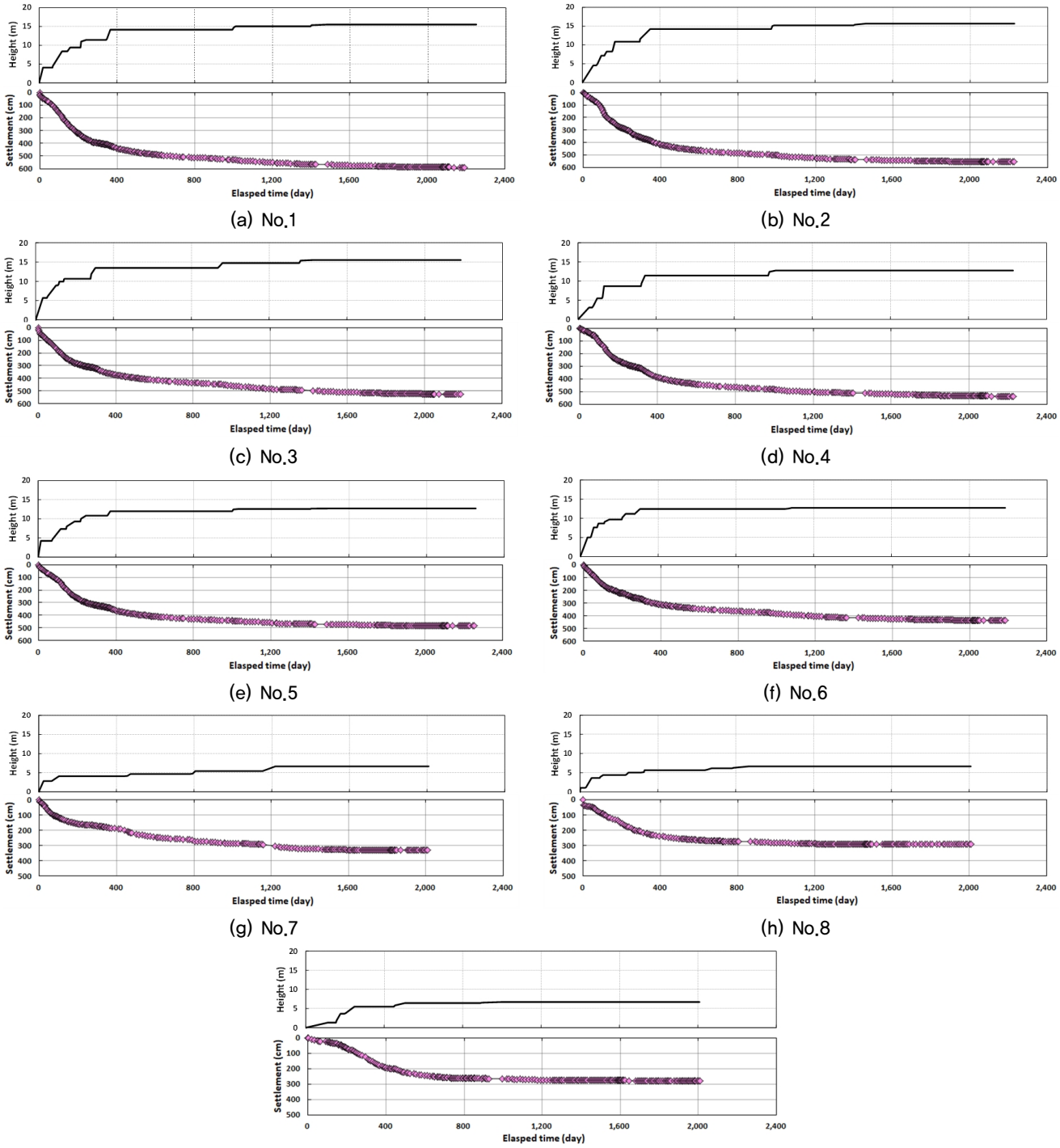


(a) Initial void ratio, e_0 (b) Compression index, C_c (c) Preconsolidation pressure, P_c (kN/m^2)

Fig. 2. Consolidation characteristics the study area (Data obtained from Busan Metropolitan City Construction Headquarters, 2005)

공사 완료 후 2012년 3월 1일까지 성토 시 주 2회에서 성토 완료 후 월 1회의 빈도로 단계적으로 수행한 현장계측 측정 Data가 제공되었다(Busan Metropolitan City Construction Headquarters, 2012). 현장 특성상 현장에 매설한 층별침하계 등의 계측기기는 대부분 망실 및 재설치로 장기 측정 Data가 확보 불가하였고, 장기적으로 분석 가능한 침하 측정 Data는 지표침하판 계측기기의 자료만 확보하였다.

전체 계측자료 중 장기 침하특성 분석이 가능한 2,000일 이상인 계측 Data를 별도로 분류하여 2,008일~2,248



(a) No.1 (b) No.2 (c) No.3 (d) No.4 (e) No.5 (f) No.6 (g) No.7 (h) No.8 (i) No.9

Fig. 3. Embankment hight and measured settlement over elasped time

일의 측정 Data를 확보하였다. 분류한 계측자료 중 최대한 확인 시추조사 위치에 인접한 자료로서 성토 높이와 연약 점성토층 두께가 유사한 위치를 기준으로 선별하였다. 최종적으로 9개소의 위치를 선정하여 장기침하 계측결과를 분석하였다. 선정한 위치의 시추공, 연약 점성토층 두께, 최종 성토높이, 계측기간, 최종 계측침하량은 Fig. 3과 Table 1과 같다. 발생 침하량의 크기는 비교적 성토높이에 비례하였으며, 최종 성토높이와 연약 점토층 두께가 유사한 위치에서는 계측 최대 발생침하량이 유사하게 발생되어 침하에 영향을 주는 주요 요소로 평가되었다.

Table 1. Analysis data of measured settlement in the study area

Division	Borehole no.	Final embankment hight (m)	Soft clay layer thickness (m)	Measured period (days)	Final measured settlement (cm)
No.1	BH-6	15.520	38.2	2,248	590.8
No.2	BH-8	15.700	30.9	2,228	552.9
No.3	BH-4	15.510	27.0	2,185	526.7
No.4	BH-10	12.747	39.3	2,228	537.1
No.5	BH-11	12.703	31.5	2,253	484.4
No.6	BH-12	12.728	25.5	2,185	437.8
No.7	BH-15	6.672	38.3	2,008	332.5
No.8	BH-14	6.665	31.7	2,008	294.1
No.9	BH-13	6.706	25.5	2,008	278.5

3. 수치해석 결과

3.1 해석조건 구분

본 연구대상 지역은 연약점성토층이 20m~40m 정도로 깊게 발달한 대심도 연약지반 구간으로 연직배수재 P.B.D가 1.2m 간격으로 조밀하게 시공되었고, 6.7m~15.7m 높이로 성토되었다. 수치해석을 위한 해석단면은 연구대상 지역의 다양한 지반조건과 시공조건 등을 포함하여야 한다. 구체적으로 각각의 해석단면에는 해당되는 연구대상 위치의 연직배수재 시공현황, 조사된 연약지반 지층현황과 지층별 토질특성이 반영되었다. 해석단면의 단계성토 시공이력은 비교대상이 되는 현장계측분석 시의 위치별 시공현황과 동일하게 반영하여 1차원 이론 해석, 탄소성 해석, 점·탄소성 해석을 수행하였다.

또한, 해석결과를 이용하여 성토 높이와 연약층 두께에 따른 상관성과 장기침하 경향성을 분석하기 위하여 단면조건을 성토높이와 연약층 두께를 기준으로 Table 2와 같이 같이 단순화하여 재분류하였다. 성토높이는 16.0m, 13.0m, 7.0m와 연약 점성토층 두께는 26.0m, 31.0m 40.0m로 구분하여 해석결과 분석에 적용하였다.

3.2 수치해석 적용

1차원 이론 침하의 수치해석은 K-Embank 프로그램을 사용하였고, 탄소성 및 점·탄소성 침하의 수치해석 수행은 SoilWorks 프로그램을 사용하여 유한요소해석을 수행하였다. 침하 수치해석 수행을 위한 성토재, 사질층 및 연약 점토층의 심도별 적용 지반정수는 확인 지반조사 실내시험(표준 압밀시험 등) 결과와 문헌 자료를 분석하여 정리한 값으로 다음 Table 3과 같다.

Table 2. Types and conditions of analysis section

Division	Borehole no.	Numerical analysis applied		Analysis condition of result	
		Final embankment hight (m)	Soft clay layer thickness (m)	Final embankment hight (m)	Soft clay layer thickness (m)
No.1	BH-6	15.520	38.2	16.0	40.0
No.2	BH-8	15.700	30.9		31.0
No.3	BH-4	15.510	27.0		26.0
No.4	BH-10	12.747	39.3	13.0	40.0
No.5	BH-11	12.703	31.5		31.0
No.6	BH-12	12.728	25.5		26.0
No.7	BH-15	6.672	38.3	7.0	40.0
No.8	BH-14	6.665	31.7		31.0
No.9	BH-13	6.706	25.5		26.0
Numerical analysis conditions			• One-dimensional • Elasto-plastic • Visco-elasto-plastic		

Table 3. Input parameters applied to numerical analysis

Parameters	Embankment material	Upper sand layer	Soft clay layer depth			Lower sand layer
			0~20m	20~30m	30m~	
E (kN/m^2)	15,000	8,000	1,650	1,500	3,000	15,000
ν	0.30	0.33	0.35	0.35	0.35	0.30
γ_t (kN/m^3)	19.0	18.0	16.0	16.3	18.0	19.0
PI (%)	–	–	24.0	26.0	18.0	–
C_c	–	–	0.740	0.750	0.433	–
e_0	–	–	1.930	1.770	1.164	–
C_v (m^2/day)	–	–	0.00837	0.00837	0.00837	–
C_α	–	–	0.00370	0.00375	0.00217	–
λ	–	–	0.321	0.326	0.188	–
κ	–	–	0.032	0.033	0.019	–
α	–	–	0.005	0.006	0.004	–
$\dot{v}_0$ (1/min)	–	–	5.07×10^{-10}	8.72×10^{-10}	8.27×10^{-9}	–

3.3 수치해석 결과 및 분석

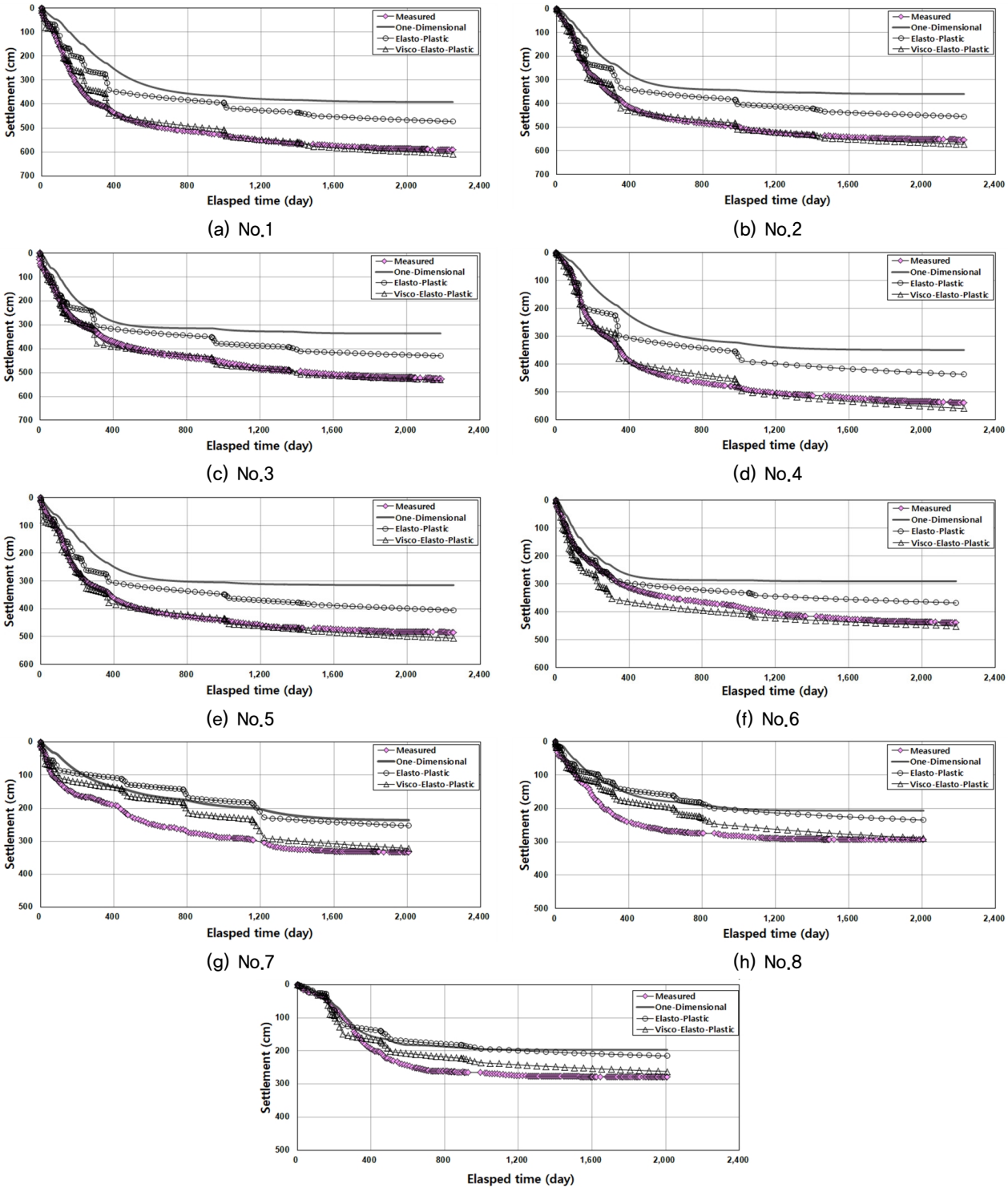
Table 4는 수치해석 결과 최종 침하량이며, Fig. 4는 기간별 1차원 이론 해석, 탄소성 해석, 점·탄소성 해석 침하량을 기간별로 계측된 침하량과 비교한 결과이다.

1차원 이론 해석은 계측 침하량에 비하여 63.8%~71.1% 범위로, 평균적으로는 66.0%로 산정되었다. 탄소성 해석은 계측침하량에 비해 76.2%~83.9% 범위로, 평균적으로는 81.3%로 작게 산정되었다. 점·탄소성 해석은 계측침하량에 비해 94.1%~104.4% 범위로, 평균적으로는 102.2%로 계측침하량과 매우 유사하였다. Table 5와 Fig. 5는 각 수치해석 최종 침하량 해석결과와 계측 침하와의 비교이다.

1차원 이론 해석은 Terzaghi에 의한 1차원 압밀침하 탄성이론식에 의한 것으로 실제 3차원으로 거동하는 지반과는 차이가 있고, 실제 연약지반에서는 단순한 1차원 압밀이론 침하뿐만 아니라 수평방향 유동에 의한 복합적인 침하가 발생하므로 실제 침하량보다 작게 산정되었다. 탄소성 침하 해석은 한계상태이론을 바탕으로 제안된 수정 Cam-clay 모델을 적용한 탄소성체 구성모델로 점성토 지반의 압밀과 전단파괴 현상을 비교 잘 재현할 수 있다. 그러나 실제 점성토 연약지반의 2차압밀 및 크리프 특성과 같은 시간 효과를 고려하지 못하여 실제 장기적인 계측침하량과는 차이가 있다. 점·탄소성 침하 해석은 탄소성 침하 해석모델에서 시간 경화를 재현하기 위하여 수정 Cam-clay 모델에서 점성의 항과 이방성을 도입한 Sekiguchi-Otha 모델을 적용하였다. 장기적인 침하특성을 확인하기 위해

Table 4. Analysis results on predicted settlement in the study area

Division	Measured settlement (cm)	Predicted settlement (cm)		
		One-dimensional	elasto-plastic	Visco-elasto-plastic
NO.1	590.8	391.5	473.1	607.7
NO.2	552.9	359.9	454.6	572.0
NO.3	526.7	336.0	429.3	532.0
NO.4	537.1	348.9	436.4	558.9
NO.5	484.4	314.8	405.0	505.7
NO.6	437.8	290.1	367.5	450.8
NO.7	332.5	236.4	253.3	321.8
NO.8	294.1	207.0	235.1	289.4
NO.9	278.5	196.4	215.3	262.1



(a) No.1 (b) No.2 (c) No.3 (d) No.4 (e) No.5 (f) No.6 (g) No.7 (h) No.8 (i) No.9

Fig. 4. Comparison with measured and predicted settlement in section no.1~9

서는 시간 의존적 변형특성이 재현 가능한 점·탄소성 침하 해석인 Sekiguchi-Otha 모델이 실제 계측 침하와 가장 유사하였다.

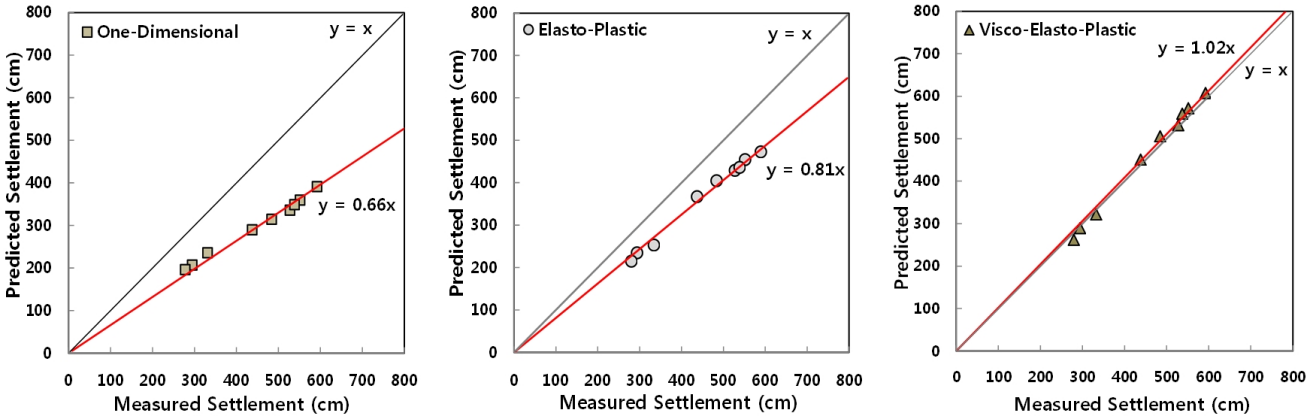
4. 장기침하 특성 분석

4.1 수치해석 장기 침하특성 비교·분석

계측결과와 해석결과와의 장기적인 침하 유사성 분석

Table 5. Comparison of the final settlement by measured and predicted

Division	Final embankment hight (m)	Soft clay layer (m)	Comparison of measured settlement (%)		
			One-dimensional	Elasto-plastic	Visco-elasto-plastic
NO.1	16.0	40	66.3	80.1	102.9
NO.2		31	65.1	82.2	103.5
NO.3		26	63.8	81.5	101.0
NO.4	13.0	40	65.0	81.3	104.1
NO.5		31	65.0	83.6	104.4
NO.6		26	66.3	83.9	103.0
NO.7	7.0	40	71.1	76.2	96.8
NO.8		31	70.4	80.0	98.4
NO.9		26	70.5	77.3	94.1



(a) One-dimensional predicted (b) Elasto-plastic predicted (c) Visco-elasto-plastic predicted

Fig. 5. Comparison of fitting parameters measured and predicted final settlement

을 위하여 1차원 이론 해석, 탄소성 해석, 점·탄소성 해석의 시간-침하 결과의 정규화 분석결과는 Fig. 6, Table 6과 같다.

계측결과 대비 수치해석에 의한 장기침하량의 정규화 분석결과 점·탄소성 해석 > 탄소성 해석 > 1차원 이론 해석 순으로 계측 침하와 유사한 결과를 보였으며, 점·탄소성 해석 결과는 계측결과와 가장 유사하였다. 또한, 최종 침하량에 대한 정규화 분석결과도 실제 계측 침하와 비교하여 1차원 이론 해석은 0.66, 탄소성 해석은 0.81, 점·탄소성 해석은 1.02의 침하량 발생비를 보였는데 이러한 침하량 발생비 결과를 활용한다면 실무 설계단계에서 보편적으로 적용하는 1차원 이론에 의한 수치해석결과의 보정 기준으로 응용될 수 있다.

4.2 성토 높이에 따른 장기 침하특성 비교·분석

장기침하량의 성토 높이에 따른 영향을 비교·분석한 결과 점·탄소성 침하가 계측침하와 가장 유사한 결과를 보이며, 성토 높이 10.0m 이상에서는 침하량 발생비가 1.03, 1.04로 약간 크게 10.0m 이하에서는 0.97로 작게 나타났다. 그러나 높이 조건에 따른 장기침하량 발생비의 뚜렷한 상관성은 찾을 수 없었다. 자세한 비교 결과는 Fig. 7와 같다.

4.3 연약층 두께에 따른 장기 침하특성 비교·분석

장기침하량의 연약층 두께에 따른 영향을 분석하기 위하여 연약층 두께별로 침하량을 비교·분석한 결과 점·탄소성 침하가 계측침하와 가장 유사한 결과를 보이며, 연약층 두께에 따른 침하량 발생비는 1차원 이론, 탄소성, 점·탄소성 해석 모두 비슷하였다. 그러나 연약층 두께 조건에 따른 장기침하량 발생비의 뚜렷한 상관성은 찾을 수 없었다. 비교 결과는 Fig. 8과 같다.

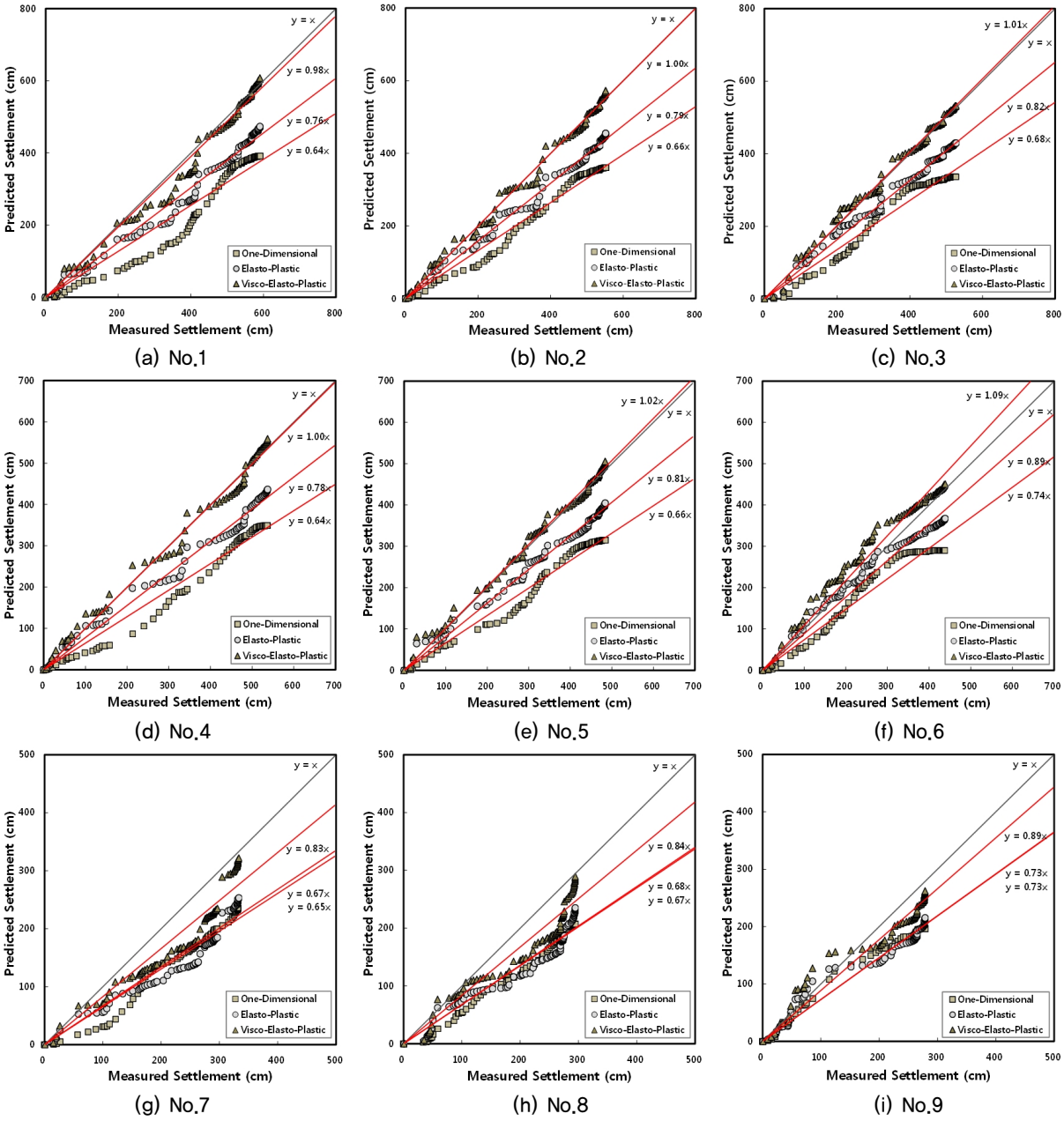
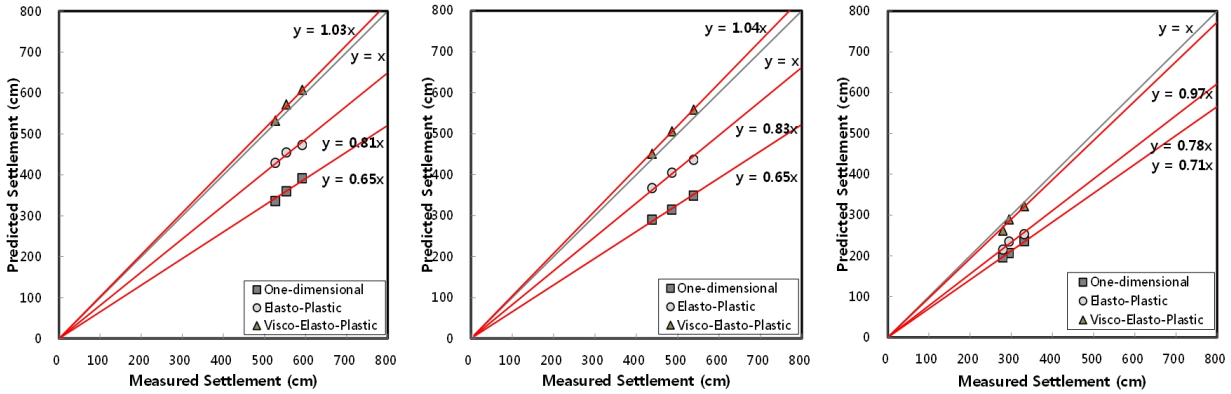


Fig. 6. Comparison of fitting parameters measured and predicted settlement in section No.1~9

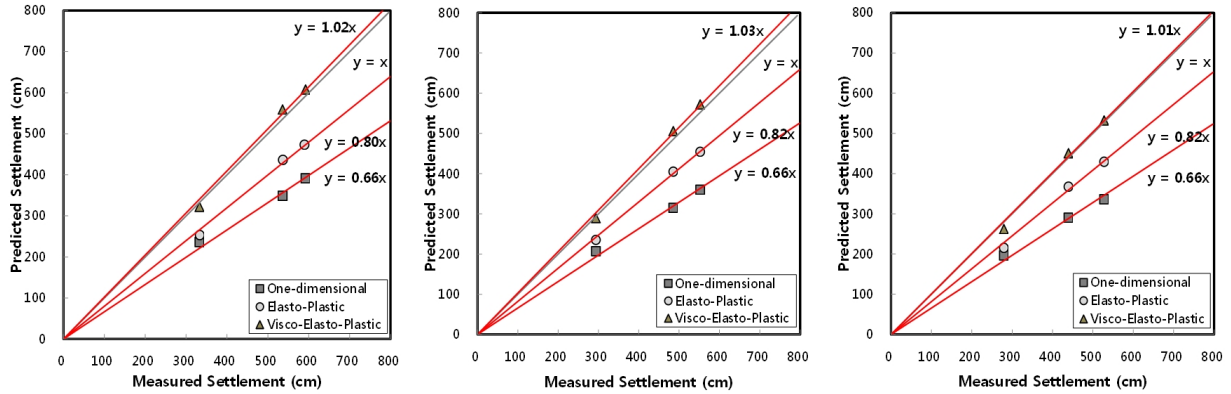
Table 6. Measured and predicted settlement normalization results for each section

Division	Measured settlement	One-dimensional analysis settlement	Elasto-plastic analysis settlement	Visco-elasto-plastic analysis settlement
NO.1	1.00	0.64	0.76	0.98
NO.2	1.00	0.66	0.79	1.00
NO.3	1.00	0.68	0.82	1.01
NO.4	1.00	0.64	0.78	1.00
NO.5	1.00	0.66	0.81	1.02
NO.6	1.00	0.74	0.89	1.09
NO.7	1.00	0.67	0.65	0.83
NO.8	1.00	0.67	0.68	0.84
NO.9	1.00	0.73	0.73	0.89
Final Settlement	1.00	0.66	0.81	1.02



(a) 16.0 m (b) 13.0 m (c) 7.0 m

Fig. 7. Comparison of Final Embankment hight conditions



(a) 40.0m (b) 31.0m (c) 26.0m

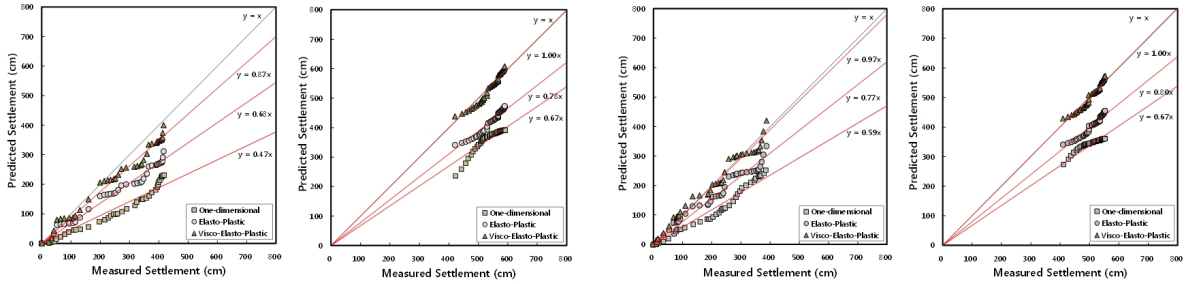
Fig. 8. Comparison of soft clay layer thickness conditions

Table 7. Measured and predicted settlement normalization results for each section (Early and medium-term/Long-term characteristics)

Division	One-dimensional analysis settlement		Elasto-plastic analysis settlement		Visco-elasto-plastic analysis settlement	
	Early and medium-term	Long-term	Early and medium-term	Long-term	Early and medium-term	Long-term
NO.1	0.47	0.67	0.68	0.78	0.87	1.00
NO.2	0.59	0.67	0.77	0.80	0.97	1.00
NO.3	0.65	0.68	0.84	0.81	1.04	1.01
NO.4	0.53	0.66	0.78	0.78	1.00	1.00
NO.5	0.58	0.68	0.83	0.81	1.03	1.01
NO.6	0.79	0.72	1.00	0.86	1.23	1.05
NO.7	0.61	0.68	0.59	0.66	0.74	0.84
NO.8	0.59	0.69	0.63	0.69	0.78	0.84
NO.9	0.85	0.72	0.87	0.72	1.06	0.88

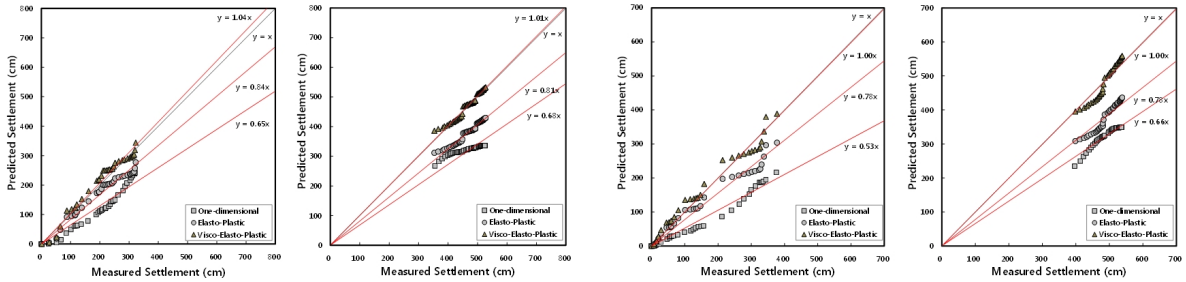
4.4 시간경과 구분에 따른 장기 침하특성 분석

시간 경과 구분에 따른 해석방법별 정규화 분석결과는 Table 7 및 Fig. 9과 같다. 장기적인 압밀침하 특성을 좀 더 상세하게 분석하고 성토가 이루어지는 초기 및 중기와 장기에 대한 계측결과 대비 침하 유사성을 알아보기 위하여 성토단계의 초기 및 중기 침하량이 수렴되지 않는 구간과 방치단계의 장기 수렴되는 구간을 구분하여 정규화 분석을 하였다.



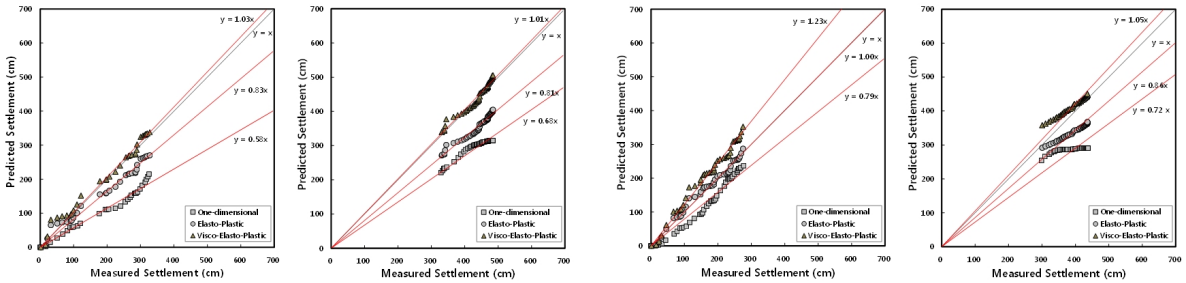
〈Early and medium-term〉 〈Long-term〉 〈Early and medium-term〉 〈Long-term〉

(a) No.1 (b) No.2



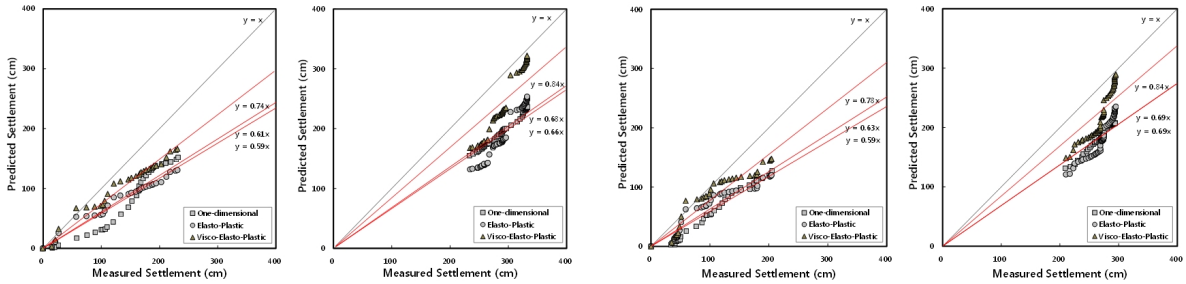
〈Early and medium-term〉 〈Long-term〉 〈Early and medium-term〉 〈Long-term〉

(c) No.3 (d) No.4



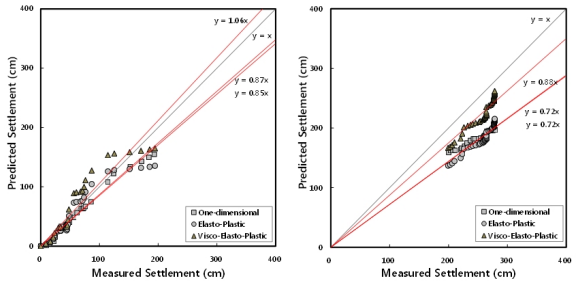
〈Early and medium-term〉 〈Long-term〉 〈Early and medium-term〉 〈Long-term〉

(e) No.5 (f) No.6



〈Early and medium-term〉 〈Long-term〉 〈Early and medium-term〉 〈Long-term〉

(g) No.7 (h) No.8



〈Early and medium-term〉 〈Long-term〉

(i) No.9

Fig. 9. Comparison of soft clay layer thickness conditions (No.1~9)

분석결과 1차원 해석은 침하 발생비가 전반적으로 초·중기에 비하여 장기에서 다소 큰 경향을 보였으며, 탄소성 해석은 전반적으로 초·중기와 장기의 비교에서 유사하였다. 점·탄소성 해석은 초·중기와 장기의 비교에서는 전체적인 유사한 경향을 보였고, 특징적으로 높은 성토 구간에 비하여 낮은 성토 구간에서 침하 발생비가 비교적 작았다. 또한, 초·중기에서는 일부 편차가 있으나 장기에서는 뚜렷한 경향성을 보였다. 이는 2차 압밀 특성인 크리프 특성이 고려된 결과로 대심도 연약지반의 장기침하 특성에서 10m 이상의 높은 성토 구간이 더 점·탄소성 해석의 적용성이 우수하였다.

5. 결 론

본 연구는 낙동강 하구일대의 대심도 연약지반에서 확보한 2,000일 이상의 장기계측 자료들을 분석하고, 1차원 이론, 탄소성, 점·탄소성의 수치해석을 수행하여 설계 시부터 2차압밀 특성을 고려한 장기침하에 대한 실무적인 적용기법을 제시하고자 하였으며, 본 연구의 내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 수치해석을 통한 침하 분석결과 점·탄소성 해석 > 탄소성 해석 > 1차원 이론 해석 순으로 계측결과와 유사하였고, 장기계측결과 대비 1차원 이론 해석은 66.0%, 탄소성 침하 해석은 81.3% 정도 작은 침하 경향을 보였다. 점·탄소성 침하 해석은 장기계측결과와 유사한 102.2%의 결과를 나타내었는데 이는 기존의 보편적인 설계방법인 1차원 이론 방법에 의한 설계 시 보정 기준으로 응용될 수 있다.

(2) 조건에 따른 장기침하특성 분석에서 계측결과 기준으로 1차원 이론, 탄소성, 점·탄소성의 각 해석결과를 조건에 따라 정규화 분석하면 해석방법 모두 성토높이와 연약층 두께에 따른 뚜렷한 상관성을 찾을 수 없었으며, 점·탄소성 해석은 이러한 조건과 상관없이 실측치와 유사하였다.

(3) 점·탄소성 해석의 경우 시간 경과와 관계없이 해석방법 중 계측결과와 가장 유사하였으며, 초·중기와 장기의 비교에서는 높은 성토 구간에서 장기침하 특성의 적용성이 가장 우수하였다.

(4) 연구 대상지역과 같은 낙동강 하구 일대의 대심도 지역에서 장기침하 예측 시 실제 침하와 해석결과가 잘 일치하는 점·탄소성 해석을 시공 전에 적용한다면 2차압밀 침하의 거동특성을 예측하여 시공 중 발생할 수 있는 공기 지연과 경제적 손실을 사전에 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This paper was obtained from Ph. D. Thesis (Ryu, Mean-young) of Changwon National University in August 2014.

References

1. Adachi, H. and Oka, R. (1982), "*Constitutive Equations for Normally Consolidated Clay based on Elasto-Visco Plasticity*", Soils and Foundations, Vol.22, No.4, pp.57-70.
2. Baek, W. J., Moriwaki, T. and Sasaki, Y. (2006), "*Numerical Analyses on Consolidation of Clayey Ground Improved by Vertical Drain System based on 3-D Elasto-Viscous Model*", Soils and Foundations, Vol.46, No.2, pp.159-172.
3. Imai, G., Tanaka, Y. and Saegusa, H. (2003), "*One-Dimensional Consolidation Modeling based on the Isotache Law for Normally Consolidated Clays*", Soils and Foundations, Vol.43, No.4, pp.173-188.
4. Kim, C. K., Cho, W. B., Lee, S. L. and Choi, W. J. (2008), "*A study on the Consolidation Characteristic of Cohesive Soil by Plastic Index*", Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol.24, No.8, pp.99-109.
5. Kim, Y. T. (2005), "*Axisymmetric Nonlinear Consolidation Analysis for Drainage-installed Deposit Considering Secondary Compression*", Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol.21, No.3, pp.17-28.
6. Kutter, B. L. and Sathialingam, N. (1992), "*Elastic-Visco Plastic Modeling of the Rate-Dependent behavior of Clays*", Geotechnique, Vol.42, No.3, pp.427-441.
7. Yin, J. H. and Graham, J. (1994), "*Equivalent Times and One-Dimensional Elastic Visto-Plastic Modeling of Time-Dependent Stress-Strain behavior of Clays*", *Canadian Geotechnique Journal*, Vol.31, pp.42-52.
8. Busan Metropolitan City Construction Headquarters and Nam-yang Construction (2005), *Ground Survey Report for Pusan New Port Post Road(1-Section) Construction Project (Assurance Survey).*
9. Busan Metropolitan City Construction Headquarters and Nam-yang Construction (2012), *Field Monitoring Report for Pusan New Port Post Road(1-Section) Construction Project (Soil improvement).*
10. K-water (2014), *Optimization of Ground Development for*

Deep Thick Soft Ground, 2015-WR-RR-13-33, pp.II, pp.VII, pp.XVIII.

11. Chung, S. G. (1999), "Engineering Properties and Consolidation Characteristics of Kimhae Estuarine Clayey Soils", *Thick Deltaic Deposits*, ATC-7 Workshop, Special Publication at the 11th ARC on SMGE, Seoul, pp.93-108.
12. Sekiguchi, H. and Ohta, H. (1977), "Induced anisotropy and time dependency in clays", *Constitutive Equation of Soils*, Proc. Speciality Session 9, 9th Int. Conf. Soil Mech. & Found. Engrg, Tokyo, pp. 306-315.
13. Yoshikuni, H., Okada, M., Ikegami, S. and Hirao, T. (1995), "One-Dimensional Consolidation Analysis based on an Elasto-Viscous Liquid Model", *Proc. of the International Symposium on Compression and Consolidation of Clayey Soils*, IS-Hiroshima'95, Vol.1, pp.233-238.
14. Kim, Y. T. (1996), *Consolidation Analysis and Application of Back-Analysis Techniques for Drainage-Installed Soft Deposits*, Ph.D Thesis, KAIST, pp.2-4, pp.160-163.