대심도 연약지반의 현장계측을 이용한 장기침하거동특성 분석에 관한 연구

A Study on the Long-term Settlement Characteristics of Thick Clay Deposits Using Field Monitoring

권현욱¹, 임종철²*, 장지건³, 강상균⁴

Hyun-Wook Kwon¹, Jong-Chul Im²*, Ji-Gun Chang³, Sang-Kyun Kang⁴

¹Member, Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National Univ., 2 Busandaehak-Ro, 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Republic of Korea

²Member, Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National Univ., 2 Busandaehak-Ro, 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Republic of Korea

³Nonmember, Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National Univ., 2 Busandaehak-Ro, 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Republic of Korea

⁴Nonmember, Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National Univ., 2 Busandaehak-Ro, 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Republic of Korea

ABSTRACT

Despite a number of studies on consolidation behavior that have been carried out in the Nakdong River estuary in Busan, these are focused on the prediction of final settlement during ground improvement process, and there is almost no research on the long-term settlement occurring after that. For the practical study on the long-term settlement, the field monitored settlement data that measured over 10 years in the Busan new port facilities area were used, and the final settlement and predicted time-settlement line were constituted by hyperbolic function. As a result, the measured settlements depend on the thickness of clayey soils, and the pattern were similar to each other and good agreement with the predicted time-settlement line using hyperbolic method. Also, the settlement in the lower non-improved layer occupied 62–76% of total settlement. Information about above results would be quite helpful to understand the long-term settlement behaviors as well as the non-improved layer's settlement is more careful consideration needed at design phase.

요 지

대심도 연약지반을 개량하여 상부에 개설되는 도로 등 각종 시설물의 안전을 확보하기 위해서는 공용개시 후 잔류 침하량에 대한 명확한 이해를 바탕으로 한 합리적인 설계관리기준의 설정과 예측 값 산정이 매우 중요하다. 그러나 지난 수십 년 동안 낙동강 하구 일원 등 대심도 연약지반상의 지반개량을 통해 조성된 부지에서는 설계단계에서 예측한 잔류 침하량을 크게 상회하는 침하가 발생하여 많은 시설물의 파손과 아울러 사회적인 논란을 야기되고 있음에도 이에 대한 연구는 거의 전무한 실정이다. 본 논문에서는 공용하중 개시 이후 장기간에 걸쳐 발생하는 잔류 침하에 대한 기초적이며 실무적인 연구를 위해, 대심도 연약지반개량을 통해 조성된 부지에서 약 10년에 걸쳐 측정한 침하계측결과를 이용하여 장기 침하거동 양상을 분석하 였다. 그 결과 계측된 잔류침하량은 점성토층의 두께의 차이로 지점별로 차이가 있으나 침하양상은 모든 계측결과가 유사하였 으며, 쌍곡선 함수식을 이용한 장래 잔류침하 예측결과와는 매우 좋은 일치를 보였다. 또한, 하부 미개량층에서 발생한 침하량 이 전체침하량의 대부분(62-76%)을 차지하는 것으로 확인되어 개량층을 대상으로 허용침하량을 규정하고 있는 국내의 현실에 좀 더 신중한 고민이 필요한 것으로 나타났다.

Keywords : Long-term settlement, Hyperbolic method, Ground improvement, Field monitoring

Received 4 Oct. 2018, Revised 26 Oct. 2018, Accepted 31 Oct. 2018

*Corresponding author

Tel: +82-51-510-2442; *Fax:* +82-51-518-3084 *E-mail address: imjc@pusan.ac.kr (J. C. Im)*

l. 서 론

대심도 연약지반 상에 성토를 실시할 때 침하량 및 압밀 시간을 실측값과 유사하게 예측하는 기술은 공학적 및 사 회적 측면에서도 매우 중요하다. 하지만, 국내외의 여러 사례에서 보듯이 많은 차이를 보여 사회적인 논란의 대상 이 되기도 하였다. 특히 전 세계적으로도 보기 드물게 연 약층이 두텁게 분포하고 있는 낙동강하구 일대의 각종 개 발사업 현장에서는 이러한 경향이 더욱 대두되어 침하량 과 압밀시간이 각각 2-4배 그리고 3-10배 과소평가되기도 하였다(Chung, 1999). 근래에 들어 침하시간에 대해서는 많은 연구가 진행되어 설계단계에서부터 실측값과 유사한 압밀시간을 예측할 수 있는 많은 방법들이 제안되기도 하였으나(Rendulic, 1935; Carillo, 1942; Barron, 1948; Yoshikuni and Nakanodo, 1974; Hansbo, 1981; Onoue, 1988; Zeng and Xie, 1989; Lo, 1991; Chung et al., 2009) 이들 연구들은 연약지반 개량과정에서 발생하는 침하예측 에 국한된 연구이다. 하지만, 대심도 연약지반이 두텁게 분포하고 있는 낙동강하구 일대의 대부분의 지역에서는 부지조성 완료이후 큰 잔류침하가 발생하여 유지관리에 어려움을 겪고 있으며, 최근에는 부산항 신항 일원의 준설 점토 매립을 통해 조성된 부지에서 상부시설 운영 중 많은 양의 잔류 침하가 발생하여 사회적으로 논란이 되고 있다. 그럼에도 장기 침하에 대한 정확한 이해와 발생 원인에 대 한 연구는 거의 전무하며, 설계단계에서 예측한 잔류 침하 량보다 크게 흔히 발생하고 있음에도 국내 대부분의 연약 지반개량현장에서 허용잔류침하량 기준을 개량층의 1차 압밀잔류침하량으로 규정하고 있어 과오를 반복하고 있는 실정이고 일본의 경우 연약층 두께에 따라 압밀잔류침하 량을 달리 규정(Korea Express Corporation, 2008)하고는 있으나 국내의 설계기준과 크게 다르지 않다.

부지조성 완료 후 장기 잔류침하 관측사례로 국내에서 는 약 15여년 전 매립 및 지반개량이 완료된 녹산국가공단 의 경우 지금까지도 침하가 발생하고 있으며(Kim, 2006), 일본에서는 Kansai(関西) 국제공항에서 계산된 침하량보 다 훨씬 더 큰 침하가 18m 두께의 연약한 충적층(soft alluvial clay) 아래 수백 m에 달하는 약간 과압밀된(OCR=1.4) Pleistocene 점토층(얕은 모래 및 자갈층 협재)에서 장기간 에 걸쳐 계속 발생되고 있어 많은 어려움을 겪고 있는 것 으로 보고된 바 있다(Akai and Tanaka, 1999). 이러한 이 차압축의 원인과 관련한 연구로 Moroto(1995)는 Kashiwazaki(柏崎市) 현장에서 부지조성 완료이후 약 17여 년 간 지표면 변화를 측정한 결과(1980년 계측시작, 1989년 기준으로 약0.13m 침하관측)로부터 지하수위 변화가 직 접적인 영향을 미친 것으로 확인한 바 있고, 또한, Tetsuzo and Shigeru(2012)는 Saga(佐賀)공항 도로건설 현장에서 포장 완료 후 약 3,000일 동안 장기 계측한 결과 공항건설 을 위한 토사운반용 트럭(약300대/일)이 지대한 영향을 미 쳐 도로 중앙부에서는 포장이후 약 800일이 경과한 시점 에 0.35m, 그리고 보도와 차도 경계에서는 0.25m의 침하 가 관측되었다고 문헌에 수록하였다. 또한, 이차압축량과 관련한 연구로 Murakami(1980)는 Mesri and Rokhsar (1974)가 제안한 $\Delta e^s = \alpha \cdot C_{\alpha} \cdot \Delta \log t$ 이 정규압밀점토에 서 유효하며 과압밀된 Aged점토에서는 이차압축량이 거의 발생하지 않는다는 연구결과를 소개한 바 있으며, Mesri et al.(2001)은 Surcharge하중 유무에 따른 이차압축 량에 대한 연구를 수행하면서 스웨덴 Skå-Edeby시험시공 현장의 계측결과와 비교하여 Surcharge하중이 이차압축 량 감소에 크게 영향을 미친다고 연구결과에서 밝힌 바 있다.

본 논문에서는 대심도 연약지반개량을 통해 조성된 부 지의 공용하중 개시 이후 발생하는 잔류 침하에 대한 기초 적이며 실무적인 연구를 위해, 부산항신항 북컨테이너부 두 배후단지에서 약 10여년에 걸쳐 측정한 침하계측결과 를 바탕으로 장기침하거동 양상을 분석하고 그 결과로부 터 합리적인 장기 침하를 설계단계에서 예측 및 관리할 수 있는 방안을 설정하는데 도움을 주고자 한다.

2. 연구대상 현장

2.1 지층구성 및 연약지반개량

본 논문의 연구대상 현장은 부산광역시 강서구 성북동, 경남 진해시 용원동 일원의 3,083천m²면적에 공유수면매 립을 통해 컨테이너 부두 배후단지개발을 위해 추진한 부 산항 신항 북컨배후부지 현장이다(Fig. 1). 본 현장은 낙동 강 하구지역에 위치하고 있으며, 지층은 상부로부터 부지 조성을 위해 매립한 모래매립층(준설점토), 하상퇴적 상부 점성토층, 견고한 하부점성토층 그리고 모래전석 및 기반 암층의 순으로 구성되어 있으며 기반암은 상부로부터 약 75m 하부에 위치하고 있는 것으로 조사되었으며(Fig. 2), 하부점성토층은 견고한 지층(SPT N값> 8)으로 대상현장



Fig. 1. Predicted long-term settlement at design phase (Data obtained from Pusan Newport Company, 1999)



Fig. 2. Soil profile and geotechnical properties (Chung et al., 2009)

전역에 걸쳐 5m에서 최대 약 20m정도 고루 분포하고 있다. 연약지반개량을 위해 PBD(100mm × 4mm)공법이 적용 되었으며, 직사각형 배치로 Diamond형식의 멘드렐(장반 경 120mm)을 이용하여 SPT N값이 8이하 심도까지 설치 하였다. PBD는 국내 장비의 시공한계인 최대50m까지 설 치되었으며, 하부점성토층은 연약지반개량이 이루어지지 않았다. 그리고 재하성토는 약 9.5m-11.5m 두께로 재하 하였으며, 도로구역에는 재하성토 외 교통하중을 고려하 여 약 1m를 추가 재하 하였다. 설계에 적용된 허용잔류침 하량은 PBD개량층의 1차 압밀 잔류침하량 30cm이내로 관리토록 규정하였으며, Fig. 1과 같이 설계단계에서 예측 된 공용개시 후 장기 침하량(1차압밀잔류침하+개량 및 미 개량층 2차 압축침하)은 $C_{\alpha} = 0.034 \times C_{c} (= 0.7 \sim 0.76) 를$ 적용하여 준공이후 50년 동안 약 0.13-0.92m정도 발생할 것으로 예측하였다.

2.2 장기 침하계측 및 교통량 조사

Fig. 3에서는 연구대상 현장의 부지조성 후 발생하는 장 기 침하 관측을 위한 현장계측위치와 도로 공용개시 후 통 행량 조사를 실시한 지점을 도시하였다. 현장 침하계측은 도로구역 내 지표침하핀 33개소, 층별침하계 2개 지점에 대해 실시하였으며, 부지조성이 완료된 2006년 12월보다 2여년 늦은 2009년 1월부터 계측을 실시하여 현재까지 측



Fig. 3. Location of field monitoring and traffic survey



(b) Improved and non-improved layer settlement vs. t plots



정 중에 있다. 층별침하계는 스크류형식으로 PBD개량층 과 미개량층 발생침하를 구분하여 확인할 수 있도록 개량 지층 경계부에 그리고 간극수압계는 개량층과 미개량층 중앙부 지점에 각각 설치하였다(CS-3, CS-4지점). 그리고 차량통행량 조사는 공용개시 후 장기 침하가 교통량에 미 치는 영향에 대한 평가를 위해, 주진출입 도로부에서 일일 차량종류별(승용, 화물, 버스 등)로 통행량을 조사하였다. 참고로 해당구간은 2009년 4월부터 차량통행이 개시되었 으며 통행량 조사는 2015년 12월부터 수행하였다.

3. 현장 계측결과 및 분석

3.1 장기 침하계측

Fig. 4에서는 현장계측에 의한 시간-침하량 관계곡선을 나타내었다. Fig. 4(a)는 지표침하핀에 의한 전체침하량을

그리고 Fig. 4(b)는 층별침하계측에 의한 PBD개량층과 미 개량층의 침하계측 결과를 나타낸 것으로, 연약층 심도가 20여m이내로 얕은 지점(S-1~10, CS-1~2)에 대한 계측성 과는 본 논문에서는 제외하였다. Fig. 4(a)에서 보면, 최초 계측이 실시된 2009년 1월부터 약 10년이 경과한 현시점 까지 계측지점별 침하량은 점성토층의 두께차이로 다소 차이는 있으나 최대 0.5m이내로 발생하고 있으며 침하경 향을 전 지점에서 매우 유사한 경향을 띠는 것으로 나타났 다. 그리고 Fig. 4(b)에 나타낸 층별침하계측 결과에서는 개량층과 미개량층의 두께가 두꺼울수록 침하량은 큰 것 으로 나타났으며, 개량층보다 지층 두께가 상대적으로 얇 은 미개량층에서 전체 침하량의 대부분이 발생하는 것으 로 계측되었다. 이러한 경향은 연약지반개량을 위한 재하 성토 및 Surcharge하중이 상부 개량층에 직접영향을 미쳐 이차압축량이 현저히 작게 발생하고 있으며 하부 미개량 층에는 이러한 하중영향이 거의 미치지 않아 상대적으로 큰 침하가 발생하는 것으로 Murakami(1980)와 Mesri et al.(2001)의 연구결과로부터도 잘 이해할 수 있다.

3.2 장기 침하거동 분석

Fig. 5에서는 침하계측결과를 이용하여 장래침하를 예

측한 결과를 보여주고 있으며, 비교를 위해 실측값과 예측 값을 함께 표현하였다. 장래침하예측을 위해 국내외에서 침하예측기법으로 널리 적용되고 있는 쌍곡선 분석기법 (Tan et al., 1991)을 이용하여(Fig. 6), Fig. 4의 계측결과 중 최소 및 최대침하를 나타낸 S-12, S-23지점의 전체침하 량과 CS-3, 4지점의 개량층과 미개량층에 대해 분석하였 으며 그 결과를 Table 1에 수록하였다. 그림에서 보면, 모 든 실측값은 각각의 쌍곡선 함수식에 의한 예측 값과 매우 좋은 일치 경향을 보이고 있으며, 예측된 최종침하량은 0.43-1.09m로 설계단계에서 $C_{\alpha} = 0.034 \times C_{c} (= 0.7 \sim 0.76)$ 값으로 추정한 침하량과 유사한 것으로 분석되었다. 그리 고 최종 예측침하량 예측결과에서 개량층에서는 0.16-0.33m, 미개량층에서는 0.47-0.84m가 발생할 것으로 예측되어 미 개량층에서 전체침하량의 대부분(약62-76%)을 차지하는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 쌍곡선 함수식이 Terzaghi 의 압밀이론식에 기초하여 T_x/U-T_x관계 그래프가 60% ≤ U≤ 90%구간에서는 동일한 기울기를 가진다는 Sridharan et al.(1987)이 제안한 방법이나 본 연구대상 현장에서는 압밀도 12-52%구간의 기울기 값으로 분석되었음에 비추 어 볼 때 다소 한계가 있어 보인다. 하지만, 앞선 Fig. 6의 t/s vs. t 관계에서 낮은 압밀도 구간의 데이터를 활용한 분석결과임에도 매우 좋은 일치를 보이고 있어 장래 침하





Table 1. Coefficients and final settlement obtained from hyperbolic method

Measuring point		α	β	$s_f(=1/\beta)$	$k \bigl(= \alpha \boldsymbol{\cdot} s_{f} \bigr)$	Remarks
S-12		0.8614	2.31×10 ⁻²	0.43 m	0.373	min
S–23		0.3730	9.20×10 ⁻³	1.09 m	0.405	max
CS-3	Improved	0.9156	2.99×10 ⁻²	0.33 m	0.306	$h_1 = 30.0 \text{ m}$
	Non improved	1,1834	1.19×10 ⁻²	0.84 m	0.994	$h_2 = 14.5 \text{ m}$
CS-4	Improved	2 <u>.</u> 2029	6.00×10 ⁻²	0 <u>.</u> 17 m	0.367	h ₃ =26.8 m
	Non improved	0.7076	2.13×10 ⁻²	0.47 m	0.332	$h_4 = 19.5 \text{ m}$





Fig. 7. Effect of traffic induced load on long-term settlement

예측결과의 신뢰도에 대한 의문의 여지는 낮아 보인다. Fig. 7에서는 장기 침하에 교통량이 미치는 영향에 대한 분석을 위해, 교통량 조사결과와 간극수압 및 층별침하계 측 결과를 함께 나타내었다. 그림에서 보면, CS-3지점의 미개량층, CS-4지점의 개량층에서 2016.8월을 전후하여 침하 증가양상을 보이고 있다. 이러한 결과는 외부적인 요 인으로 교통하중 외의 기타요인이 없음에 견주어 볼 때 침 하경향의 변화에 교통하중이 크게 영향을 미쳤음을 배제 할 수 없으나 과잉간극수압에서 특별한 변화를 확인할 수 없음과 아울러 일부계측에서 교통하중이 크게 영향을 미 쳤을 것으로 판단되는 상부 개량층보다 하부 미개량층에 서 큰 변화를 보여 명확한 규명을 위해서는 보다 많은 연 구가 필요해 보인다.

3.3 쌍곡선 함수식을 이용한 시간-압밀도 관계곡선 제안

Fig. 8에서는 쌍곡선 함수식에 의한 예측 값을 이용한 시간-압밀도 관계곡선을 보여주고 있으며, 압밀도(*U*)는 각각의 쌍곡선 함수식을 이용한 최종침하량 예측 값(*s_f*)을 실측값에 나눈 값으로 표현하였다. 앞선 3.2절에서 설명한 바와 같이, 현장계측에 의한 장기 침하는 쌍곡선 함수식과 매우 좋은 일치를 보여주고 있다.

이러한 결과를 이용하여 Tan et al.(1991)이 제안한 쌍 곡선 함수식을 이용하여 시간-압밀도 관계식으로 표현하 면 식 (1a, b)과 같다. 여기서, *s_f*는 최종침하량, α와 β는 *t/s* vs. *t*관계에서 절편과 기울기를 의미한다.

$$s = \frac{t}{\alpha + \beta \cdot t} \stackrel{\underline{\circ}}{=} \underbrace{c}_{s} \frac{t}{s} = \alpha + \beta \cdot t \tag{1a}$$

$$\lim_{t \to \infty} = \lim_{t \to \infty} \frac{1}{\frac{\alpha}{t} + \beta} = s_f = \frac{1}{\beta}$$
(1b)

식 (1a)로부터 압밀도(*U*)와 시간(*t*) 관계식으로 표현하 면, 식 (2)와 같이 정의할 수 있으며 여기서, *k* = α · *s_f*, β · *s_f* = 1이다.

$$U = \frac{s}{s_f} = \frac{t}{\alpha \cdot s_f + \beta \cdot s_f t} = \frac{t}{k+t}$$
(2)

그리고 Fig. 7의 전체침하량, 개량 및 미개량층에 대한



Fig. 8. U versus time plots from hyperbolic function

t/s vs. *t* 관계로부터 얻은 *k*값의 범위는 Table 1에 수록하 였으며, 식 (2)을 시간-압밀도 관계식으로 표현하면 다음 과 같다.

$$t = k \left(\frac{U}{1 - U} \right) = \alpha \cdot s_f \times \left(\frac{U}{1 - U} \right) = (0.373 \sim 0.405) \times \left(\frac{U}{1 - U} \right) \quad (3)$$

4. 결론 및 토의

대심도 연약지반개량을 통해 조성된 부지의 공용하중 개시 이후 장기간에 걸쳐 발생하는 잔류침하에 대한 거동 특성 규명을 위해 본 논문에서 약10여년에 걸쳐 측정된 현장계측 결과를 이용하여 분석한 결과로부터 얻은 결론 은 다음과 같다.

- (1) 장기 침하계측 결과, PBD개량지층 및 미개량 지층의 두께가 두터울수록 침하량은 크게 나타났으며, 개량 충보다 지층 두께가 상대적으로 얇은 미개량층에서 전체 침하량의 대부분(약62-76%)이 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 연약지반개량을 위해 재하 한 재하성토 및 Surcharge하중이 상부 개량층에 직접 영향을 미쳐 현저히 작은 침하가 발생하는 것으로 Murakami(1980)와 Mesri et al.(2001)의 연구와 동일 한 결과가 도출되었다.
- (2) 쌍곡선 분석기법으로 장래 침하량을 예측한 결과, t/s vs. t관계에서 낮은 압밀도인 12-52%구간의 직선 기 울기 값으로 예측하였음에도 실측값과 좋은 일치를 보였으며, 예측된 최종침하량은 0.43-1.09m로 설계단 계에서 C_α = 0.034 × C_c(= 0.7 ~ 0.76)값으로 추정한 침 하량과 유사한 것으로 분석되었다.
- (3) 쌍곡선 함수식을 이용하여 장기 침하계측성과를 분석 한 결과, 모든 실측값은 쌍곡선 함수식과 좋은 일치를 보이는 것으로 예측되었으며, 시간-압밀도 관계곡선 은 k계수 값이 0.373-0.405범위를 가지는 함수식을 제 안할 수 있었다.
- (4) 국내의 대부분 설계에서 적용하고 있는 허용잔류침하 량 기준은 PBD개량층의 1차 압밀 잔류침하량으로 규 정하고 있으나, 본 논문의 연구대상 현장의 장기 계측 에서는 하부 미개량층에서 발생한 침하량이 전체 침 하량의 대부분(62-76%)을 차지하는 것으로 확인되어 개량층을 대상으로 한 허용 잔류침하량 규정에 좀 더

신중한 고민이 필요한 것으로 나타났다.

(5) 또한, 층별침하계측 결과 중 일부지점에서 급격한 침 하증가 경향을 보인결과는 외부적인 하중증대요인이 없음에 비추어 교통하중이 직접적인 영향을 미쳤음을 배제할 수 없으나, 교통하중 영향이 작게 미쳤을 것으 로 판단되는 하부 미개량층에서 큰 변화를 보이는 등 합리적인 평가에는 한계가 있었으며, 교통하중이 장 기침하에 미치는 영향에 대한 명확한 판단을 위해서 는 보다 많은 연구가 필요해 보인다.

References

- Akai, K. and Tanaka, Y. (1999), "Settlement behavior of offshore airport KIA", *Proc., 12th European Conf. on SMGE*, Amsterdam, Vol.2, pp.1041-1046.
- Barron, R. A. (1948), "Consolidation of fine-grained soils by drains wells", *Tran., ASCE*, Vol.113, Paper No. 2346.
- 3. Carrillo, N. (1942), "Simple two and three dimensional cases in the theory of consolidation of soils", *Journal of Mathematics and Physics*, Vol.121, No.1, pp.1-5.
- Chung, S. G. (1999), "Enginneering properties and consolidation characteristics of Kimhae estuarine clayey soil", *Thick Deltaic Deposits, ATC-7 Workshop, Special Publication at the 11th ARC on SMGE*, Seoul, pp.93-108.
- Chung, S. G., Lee, N. K. and Kim, S. R. (2009), "Hyperbolic method for prediction of prefabricated vertical drains performance", *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol.136, No.4, pp.640-642.
- Hansbo, S. (1981), "Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains", 10th ICSMFE, Stockholm, Vol.3, Paper 12/22, pp.677-682.
- Kim, S. K. (2006), "Understanding of residual settlement in soft ground settlement management", *Korean Geotechnical Society*, Technical Note(1), Vol.22, No.10, pp.17-21. (in Korean)
- Korea Express Corporation (2008), "Ground survey report for the expansion project between naengjeong and busan of highway No.104 in namhae expressway", section No.3-2.

- Lo, D. O. K. (1991), "Soil improvement by vertical drains". PhD. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, pp.190-231.
- Mesri, G. and Rokhsar, A. (1974), "Theory of consolidation for clays", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol.100, No.GT8, pp.889-904.
- Mesri, G., Ajlouni, M. A., Feng, T. W. and Lo, D. O. K. (2001), "Surcharging of soft ground to reduce secondary settlement", *Int. Conf. on Soft Soil Engineering*, Hong Kong, pp.55-65.
- Moroto, N. (1995). "Long term settlement of very soft level ground". *Int. Symposium on Compression and Consolidation* of Clayey soils, IS-Hiroshima 95, pp.641-646.
- Murakami, Y. (1980). "A method for estimating the consolidation of a nomally consolidated clay of some age", *Soil and Foundation*, Vol.20, No.4, pp.83-93.
- Onoue, A. (1988), "Consolidation by vertical drains taking well resistance and smear into consideration", *Soils and Foundations*, Vol.28, No.4, pp.165-174.
- 15. Pusan Newport Company. (1999), Design Report for Terminal Related Facility Area of Pusan New Port Project (Reclamation and Soil improvement). (in Korean)
- Rendulic, L. (1935), "Der hydrodynamische spannungsausgleich in zentral entwasserten tonzylindern", *Wasserwirtsch. U. Tech.*, Vol.2, pp.250-253; 269-273.
- Sridharan, A., Murthy, N. S. and Prakash, K. (1987).
 "Rectangular hyperbolar method of consolidation analysis", *Geotechnique* 37, No3, pp.355-368.
- Tan, T. S., Inoue, T. and Lee, S. L. (1991). "Hyperbolic method for consolidation analysis", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.117, No.11, pp.1723-1737.
- Tetsuzo, M. and Shigeru, Y. (2012), *Road on soft ground*, Committee of floating foundation, General Institute of Civil Engineering. (in Japanese)
- Yoshikuni, H. and Nakanodo, H. (1974). "Consolidation of soils by vertical drain wells with finite permeability", *Soils* and Foundations, Vol.14, No.2, pp.35-46.
- Zeng, G. X. and Xie, K. H. (1989), "New development of the vertical drain theories", *12th ICSMFE*, Rio de Jamiero, Brazil, Vol.2, pp.1435-1438.