

해성퇴적지반에서 성토로 인한 침하량과 측방유동량 산정식 제안

김경수^{1*} · 정대석² · 이종길³

¹한국지질자원연구원 지구환경연구본부, ²중부대학교 토목공학과, ³조달청 품질관리단

Proposal of Equations related to Settlement and Lateral Movement According to Embankment on Marine Sedimentary Ground

Kyeong-Su Kim^{1*}, Dae-Seouk Chung², and Jong-Gil Lee³

¹Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²Dept. of Civil Engineering, Joongbu University

³Public Procurement Service, Quality Management Office

본 연구에서는 부지조성을 위해 매립한 해성퇴적지반을 대상으로 성토량의 증가에 따라 발생하는 침하량과 측방유동량을 분석하여 연약지반의 깊이 및 성토하중을 고려한 침하량과 측방유동량 산정식을 제안하였다. 이를 위해 압성토공법이 적용된 해성퇴적지반 개량구간으로부터 현장조사와 실내시험 및 현장시험을 실시하였으며, 여러 계측기기를 설치하여 현장 계측을 수행하였다. 그리고 이들 조사, 시험 및 계측결과로부터 지반의 분포상태, 물성 및 공학특성을 파악하였으며 회귀분석을 통한 침하량과 측방유동량을 산정하였다. 연구지역의 지층은 상부로부터 매립층, 퇴적층 및 기반암층으로 구성되어 있으며 자연적으로 형성된 점토층은 3.9~44.5 m 두께로 분포하고 있다. 그리고 지반개량을 위한 성토고는 4.7~7.8 m이고 이로 인해 발생된 침하량과 측방유동량은 각각 0.959~2.217 m 및 0.048~0.313 m 범위인 것으로 나타났다. 회귀분석을 실시한 결과 성토에 따른 침하량 및 측방유동량 산정식은 각각 $s = 0.02h^2 + 0.11h$ 및 $\delta = 0.01e^{0.37h}$ 와 같이 제시할 수 있다. 제안된 이들 경험식은 연구지역과 유사한 조건을 가진 해성퇴적지반에서 성토하중에 따른 침하량과 측방유동량을 개략적으로 산정할 시 적용이 가능할 것이다.

주요어 : 해성퇴적지반, 지반개량, 침하, 측방유동, 경험식

In this study, the relationship between the settlements and the horizontal displacements according to embankment was analyzed at the marine sedimentary grounds for preparation of a site, and then the empirical equations of both the settlement and the horizontal displacement considering the embankment load and the thickness were proposed. To do this, the field and laboratory tests were performed at the improvement section where the pre-loading method was applied, and the field monitoring was performed using various sensors. Based on the results of the tests and monitoring, the ground deposits, soil characteristics and engineering properties were analyzed and the settlements and lateral movements were estimated by the Regression analysis. The ground deposits from the ground surface were composed of reclaimed soils, sedimentary soils and based rocks. The thickness of clay in the sedimentary soils layer was ranged from 3.9 m to 44.5 m. The embankment heights to improve the ground during pre-loading were constructed from 4.7 m to 7.8 m in each section. The settlements during embankment were ranged from 0.959 m to 2.217 m and the lateral movements were ranged from 0.048 m to 0.313 m. As the result of regression analysis, the equations of settlements and horizontal displacements according to embankments may be proposed as $s = 0.02h^2 + 0.11h$ and $\delta = 0.01e^{0.37h}$, respectively. The proposed empirical equations of the settlements and the horizontal displacements according to embankment on the marine sedimentary ground may be applied to the site where has a similar condition of study area.

Key words : marine sedimentary ground, ground improvement, settlement, horizontal displacement, empirical equation

*Corresponding author: kks@kigam.re.kr

서 론

연약지반에 성토를 할 경우 계측기에는 초기에 많은 침하량이 감지되는데 점토의 배수특성에 비추어 볼 때 이 침하량은 분명 즉시침하이거나 압밀에 의한 침하일 수는 없으며 측방유동에 의한 침하라고 볼 수 있다. 설계당시 또는 성토시공 초기에서부터 측방유동에 의해 유발되는 성토부 중앙에서의 연직침하량을 고려할 수 있다면 소요 성토량과 계측관리 기간 중의 압밀도 판단에 보다 정확성을 기할 수 있게 될 것이다. 계측기에 나타난 침하량의 측정치는 초기에서부터 이러한 측방유동에 의한 침하량이 포함되어 나타난 것이므로 그 크기를 분리 판단할 수 있어야 한다.

연약지반에서 측방유동으로 인한 문제는 연약지반상 성토시공을 하는 경우와 교대 등과 같은 구조물을 시공하고 뒤채움을 할 때 발생하는 문제를 들 수 있다. 이러한 문제들로 인해 지금까지 많은 연구자들이 연약지반의 측방유동과 관련된 연구를 수행해 왔는데, 성토문제와 관련해서는 주로 연약지반의 압밀거동 해석에 초점이 맞춰져 왔고 교대 등 구조물 시공시는 주로 교대의 인정해석 측면에 초점을 둔 연구가 수행되어져 왔다. 연약지반의 측방유동에 대한 연구는 Franx and Boonstra(1948)에 의하여 시작되었다고 할 수 있는데, 그는 연약지반에 설치된 말뚝의 파손원인과 측방유동의 상관관계를 연구하였다. 그리고 Heyman and Boersma(1961), Leussink and Wenz(1969) 등도 연약지반상에 설치된 말뚝의 변형 및 모멘트에 대한 연구를 수행하였으며, Stermac et al.(1968)은 발생한 말뚝의 모멘트는 예측하기 어렵고 이 때 발생하는 측방유동은 인접 구조물에 위험한 결과를 초래한다고 보고하였다. 이후 측방유동에 대한 연구가 활발하게 이루어지면서 Peck (1969)이 연약지반에서의 측방유동을 처음으로 정의하였으며, Tschobotarioff (1973)가 모스크바에서 개최된 ICSMFE에서 구조물에 작용하는 점성토지반의 수평토압에 관한 연구결과를 발표함으로써 측방유동에 관한 연구가 본격적으로 시작되었다.

국내에서는 홍원표 외(1991, 1994), 안종필과 홍원표(1994), 조성민(1998), 최혁(1998), 그리고 박형규(2004) 등에 의하여 연약지반상에 시공되는 성토제방 및 말뚝의 수평변위, 교대의 수평이동 등에 관한 연구가 수행되었으며, 이종길(2010)은 연약지반에서의 측방유동과 침하량의 상관성을 연구한 바 있다.

최근에는 연직변위에 의한 측방유동압의 증가로 인해 측방유동이 발생하고 지반이 융기함으로써 결국 활동과괴에 이르는 경우가 많아 이와 관련한 연구가 확대되고 있는

추세이다. 그리고 이러한 문제들로 인해 연약지반상 성토체의 안정을 위해서는 연직변위인 침하량과 수평변위인 측방유동량을 함께 고려할 수 있는 연구들이 진행되어야 할 것이다. 따라서 본 논문에서는 실제 해상퇴적지반 개량 현장에서 측정된 성토하중에 의한 침하량과 측방유동량을 이용하여 성토하중에 따른 침하량과 측방유동량을 산정할 수 있는 경험식을 제안하고자 한다.

연구지역

연구대상지역은 진해○○사업지구의 일부 지역이다. 총 적층으로서 약 45 m 깊이까지 자연적인 해상퇴적지반이 형성되어 있던 곳에 매립공사를 시행한 지역이다. 낙동강을 경계로 북서쪽은 비교적 높은 산세를 보이고 오른쪽인 낙동강 하구에는 삼각주상의 총적지가 발달하고 있다. 수계는 연구지역과 맞닿은 서낙동강을 비롯하여 그 오른쪽에 위치한 평강천, 맥도강 및 낙동강 등이 바다로 유입되는 남-북방향의 수계가 발달하고 이외에 동-서방향의 소지류 및 농업용수로가 분포하고 있다(Fig. 1). 연구지역의 지질은 백악기의 상부 유천층군과 불국사관입암류로 대별된다. 유천층군은 퇴적초기에는 정상적인 퇴적상이 우세하였으나 안산암질 화산활동이 전개되었으며 휴화산기에 안산암질

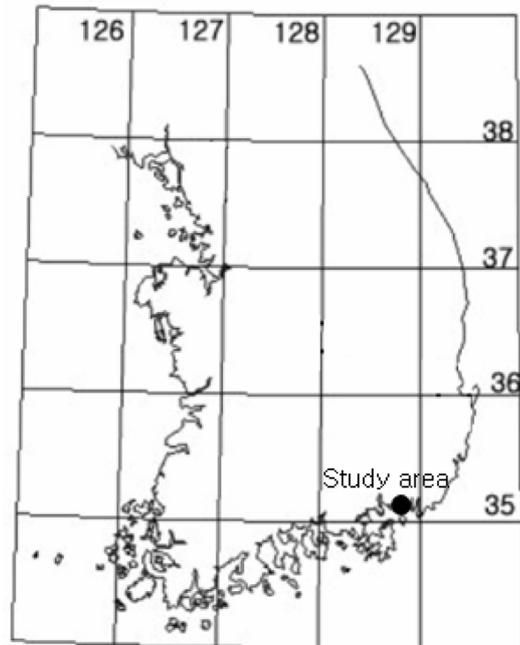


Fig. 1. Location of the study area.

암류 상위에 응회질퇴적물이 퇴적되고 이후 유문암질 화산 활동이 일어났다(장태우 외, 1983).

지반조건

지층의 분포양상 및 각 지층의 지반공학적 특성을 파악 하기 위해 총 29개소에서 시추조사를 실시하였다. 그리고 시추결과에 의한 연약점토시료를 대상으로 한 실내시험과 여러 현장시험을 통하여 지반의 물리적 성질 및 공학적 특성을 파악하였다.

지층의 분포

시추조사결과 연구지역은 상부로부터 매립층, 퇴적층 및 기반암층으로 이루어져 있으며, 매립층의 경우는 점토/모

래층으로서 0.4~5.8m의 층후를 갖는 것으로 조사되었다. 퇴적층은 상부로부터 모래층, 점토층, 모래층, 자갈층의 순으로 이루어져 있으며, 층후는 상부 모래층 5.2~11.9 m, 점토층 3.9~44.5 m, 하부 모래층 1.6~22.0 m, 그리고 자갈층은 0.9~20.9 m인 것으로 조사되었다.

Table 1은 연구지역에서 시행한 시추조사결과 각 시추 공별 지층의 분포양상을 수직적 층후로 나타낸 것으로 대상지반은 상부로부터 성토층, 충적층 및 기반암층으로 이루어져 있으며, 성토층은 점토와 모래이고 충적층은 상부로부터 모래, 점토, 모래 및 자갈의 순으로 층상을 이루고 있다. 그리고 연약지반 하부의 기반암층은 풍화토, 풍화암 및 연암으로 분포하고 있다. Fig. 2는 시추조사결과를 토대로 하여 퇴적층인 연약점토층의 층후를 나타낸 것으로 중앙하부가 약 40m 정도로 연약점토층이 가장 두껍게 형

Table 1. The ground deposits of the marine sedimentary ground based on the borings.

Bore hole No.	Reclaimed soil (m)		Sedimentary soil (m)			Based rock (m)			Boring depth (m)
	Clay/Sand	Sand	Clay	Sand	Gravel	Weathered soil	Weathered rock	Soft rock	
BH-01	1.9	5.2	3.9	1.6	0.9				13.5
BH-02	0.6	7.6	14.2		0.1				22.5
BH-03	0.7	7.6	15.1	5.3	2.3				31.0
BH-04	0.7	5.4	15.6	4.6		8.2	1.5		36.0
BH-05	4.1	6.0	5.9	5.0					21.0
BH-06	0.4	7.6	31.6		0.9				40.5
BH-07	1.2	9.1	28.0		0.7				39.0
BH-08	0.9	7.9	17.7	8.3	1.2				36.0
BH-09	1.9	7.6	20.1	1.6		3.9	37.3	2.6	75.0
BH-10	0.6	7.7	25.2	1.7		7.5	2.3		45.0
BH-11	0.7	8.1	29.4		4.8	7.5	3.5		54.0
BH-12	0.7	7.5	25.8	7.0			13.0	2.0	56.0
BH-13	3.4	7.5	8.3	1.8					21.0
BH-14	1.9	6.8	9.9	12.0	9.2		2.2		42.0
BH-15	2.0	7.6	9.1	10.8	0.9			2.1	32.5
BH-16	1.0	9.1	27.2	1.0		13.3	28.4		80.0
BH-17	1.0	8.8	35.1		1.0	1.4	6.3	6.4	60.0
BH-18	0.6	9.0	31.6		1.2	5.6	1.5		49.5
BH-19	1.8	8.4	32.4		0.6	12.8	20.0	2.0	78.0
BH-20	1.3	8.3	30.4		0.3	21.7	18.4	6.7	87.1
BH-21	0.6	6.9	44.5	2.8	8.7		11.5	2.0	77.0
BH-22	0.6	6.6	22.3	22.0	18.7		1.8		72.0
BH-23	1.4	11.6	18.0	20.0	13.9		5.1	6.0	76.0
BH-24	5.8	10.0	19.0	17.3	20.9		5.0	3.0	81.0
BH-25	4.4	10.4	29.4	15.6	1.7				61.5
BH-26	4.3	11.9	17.3	18.5	19.4		1.6	2.0	75.0
BH-27	5.1	8.2	26.3	13.8	20.6		2.0	2.0	78.0
BH-28	4.6	9.9	19.9	21.2	17.5		4.7	2.0	79.8
BH-29	1.0	8.8	30.0			7.4	8.3		55.5

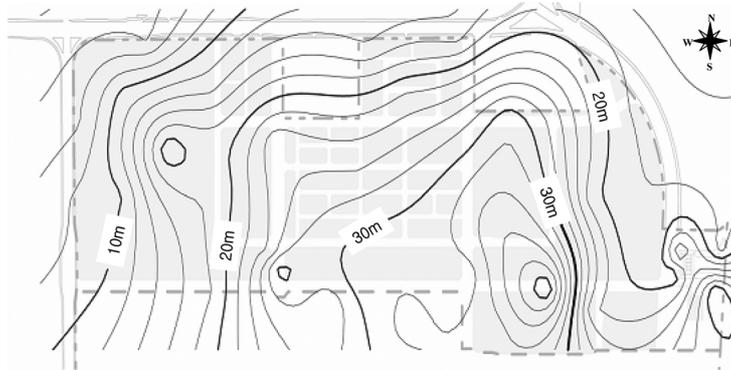
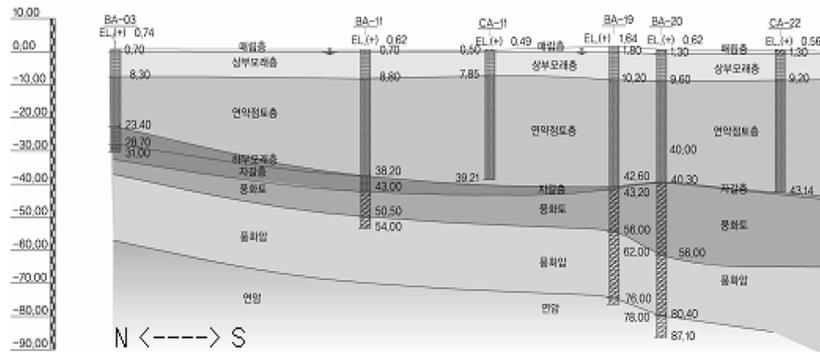
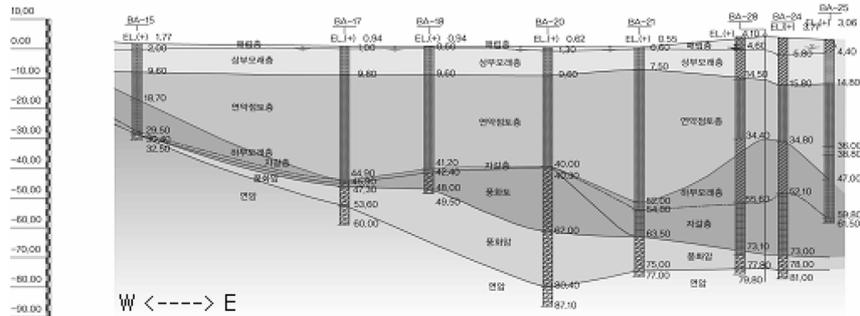


Fig. 2. The thickness of sedimentary soil according to the result of boring.



(a) South and north direction



(b) East and west direction

Fig. 3. The representative section of ground deposits by borings.

성되어 있으며 외곽으로 갈수록 얇은 것으로 나타났다. 한편, Fig. 3은 동서방향 및 남북방향으로 구분하여 대표적 지층단면도를 나타낸 것으로 연약점토층은 대체적으로 연구지역의 동서방향 중앙하부가 약 40m 정도로 가장 두꺼운 층후를 형성하고 있으며 북측과 서측에 이질수층 얇은 것으로 나타났다.

물리적 성질

Table 2는 연구지역 연약지반에서 채취한 연약점토시료에 대한 실내 물성시험 결과를 깊이별로 구분하여 상부, 중부 및 하부구간으로 나타낸 것이다. 시험결과 점토층의 함수비는 31.5~75.5%의 범위로서 평균치를 기준으로 할 경우 중부구간이 가장 높고 하부구간이 가장 낮으며, 밀도는 2.67~

Table 2. The results of soil physical properties according to depths of soft ground.

Section	Moisture content (%)	Density (g/cm^3)	Unit weight (g/cm^3)	Liquid limit (%)	Plastic limit (%)
Upper part	55.7	2.70	1.69	63.2	26.7
Middle part	67.5	2.70	1.64	75.9	29.4
Lower part	41.4	2.69	1.84	50.7	25.6

2.71 g/cm^3 의 범위로서 깊이별로 특별히 구분되지 않는다. 단위중량은 1.55~1.87 g/cm^3 의 범위로서 하부구간이 가장 크고 중부구간이 가장 작은 것으로 나타났다. 한편, 액성한계와 소성한계는 각각 35.7~91.6% 및 21.4~33.3%의 범위를 보였으며 이들은 함수비의 경우와 마찬가지로 중부구간이 가장 크고 하부구간이 가장 작은 것으로 나타났다.

공학적 특성

Table 3은 일축압축시험과 삼축압축시험에 의한 결과를 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 일축압축시험에 의하면 비배수전단강도는 상부구간이 중부 및 하부구간에

Table 3. The results of uniaxial and triaxial compression tests according to depths of soft ground.

Section	Undrained strength (kPa)	
	Uniaxial strength	Triaxial strength
Upper part	1.24Dz + 1.72	1.46Dz + 19.91
Middle part	0.63Dz + 26.58	1.75Dz + 17.64
Lower part	0.62Dz + 21.83	0.59Dz + 48.89

비해 2배 정도 큰 것으로 나타났다. 그리고 삼축압축시험 결과는 중부구간이 가장 크고 상부 및 하부구간의 순으로 작은 결과를 나타내었다. 이들 결과로 볼 때 하부구간은 다른 구간들에 비해서 비배수전단강도가 상대적으로 작은 경향성을 보였다. 여기서 Dz는 지표면으로부터의 깊이이다.

그리고 현장시험으로 수행된 베인, 피조콘관입 및 딜라토미터(DMT) 시험결과는 Table 4에서 보는 바와 같으며, 이 때 피조콘관입시험은 콘계수(N_{60}) 14를 적용하여 비배수전단강도를 산정하였다. 그 결과 현장베인시험이 다른 시험결과에 비해 분산이 적으며 심도에 따른 강도증가가 뚜렷한 경향성을 보였으며, DMT에 의한 위치별 비배수전단강도는 0.75~2.87의 기울기를 나타내었다. 한편, 일축압축, 삼축압축, 베인, 피조콘관입 및 DMT 시험결과를 종합하여 깊이에 따른 연약지반의 비배수전단강도를 산정한 결과 상부구간, 중부 및 하부구간이 각각 1.59Dz+12.61(kPa), 1.66Dz+12.60(kPa) 및 1.25Dz+20.04(kPa)인 것으로 나타났다.

연약지반에 대한 압축지수, 초기간극비, 과압밀비 등 압밀특성 관련지수를 측정하기 위하여 대상지반의 깊이별로 압밀시험을 실시하였다. Fig. 4는 대상지반의 깊이별 압축

Table 4. The results of field tests according to depths of soft ground.

Section	Undrained strength (kPa)		
	Vane	Piezo cone penetration	DMT
Upper part	1.36Dz + 17.23	1.41Dz + 15.24	1.84Dz + 8.30
Middle part	2.03Dz + 5.64	1.01Dz + 27.03	2.87Dz + 15.90
Lower part	0.90Dz + 35.37	1.54Dz + 13.17	0.75Dz + 29.64

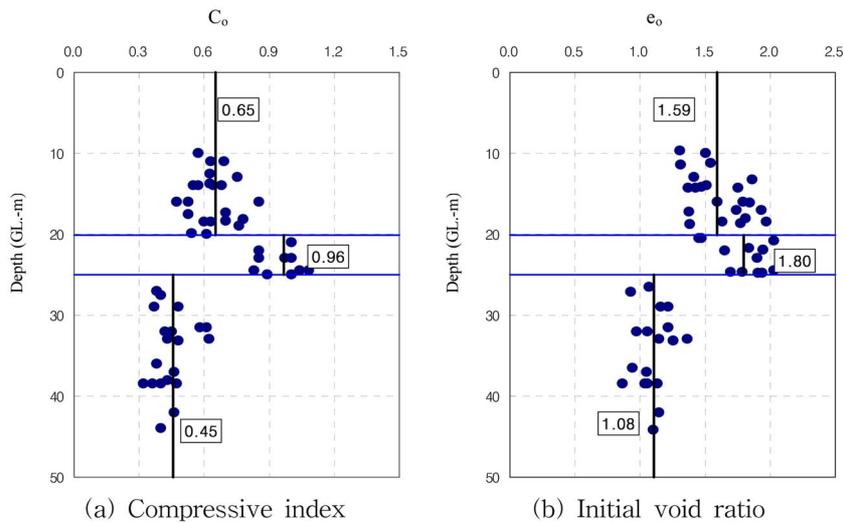


Fig. 4. Compressive index and initial void ratio according to depths of soft ground.

지수와 초기간극비를 나타낸 것으로 압축지수는 0.33~1.08의 범위에 있으며 각 위치별 평균 압축지수는 상부구간의 경우 0.65이고 중부구간은 0.96, 그리고 하부구간은 0.45로서 중부구간이 가장 크게 나타났다(Fig. 4(a)). 그리고 초기간극비는 0.86~2.03의 범위에 있으며 위치별 평균 초기간극비는 상부구간의 경우 1.59이고 중부 및 하부구간은 각각 1.80 및 1.08로서 중부구간이 가장 큰 것으로 나타났다(Fig. 4(b)).

한편, Fig. 5는 대상지반의 깊이별 재압축지수와 과압밀비(OCR)를 나타낸 것으로 재압축지수는 0.05~0.14의 범위에 있으며 각 위치별 평균 재압축지수는 상부구간의 경우 0.09이고 중부구간은 0.13, 그리고 하부구간은

0.07로서 초기의 압축지수와 유사한 경향성을 보였다(Fig. 5(a)). 그리고 과압밀비는 0.50~1.58의 범위에 있으며 위치별 평균 과압밀비는 상부구간의 경우 1.02이고 중부 및 하부구간은 각각 0.99 및 0.95로서 상부구간이 가장 크고 하부구간이 가장 작은 경향성을 보였다(Fig. 5(b)).

현장계측

본 연구지역의 지반개량구간에 대해서 상재하중에 의한 성토체의 침하 및 측방유동의 안정관리를 위하여 여러 계측기기를 설치하고 현장계측을 실시하였으며 Fig. 6은 이들 계측기기의 설치위치를 나타낸 것이다. 그리고 Table 5

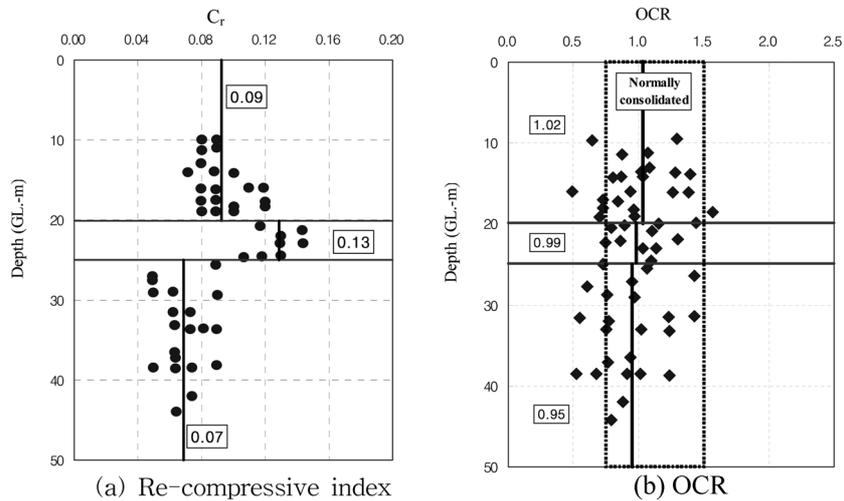


Fig. 5. Re-compressive index and OCR according to depths of soft ground.

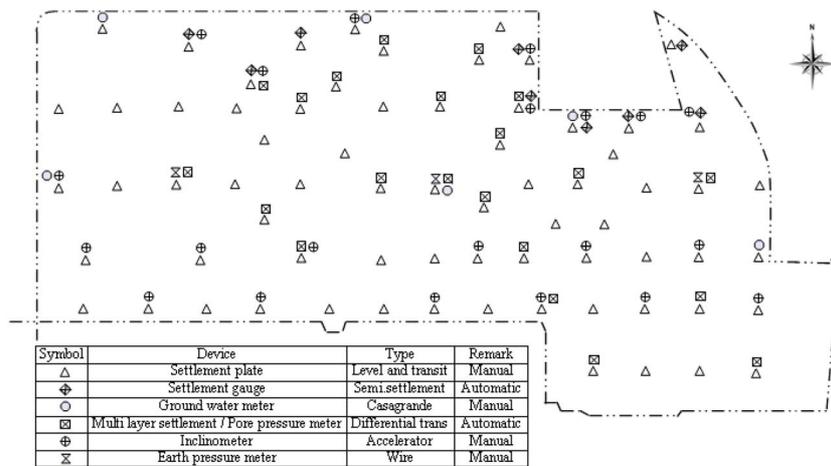


Fig. 6. Location of sensors installed in the study area.

Table 5. Instrumentation device and method.

Device	Type	Method	Point
Settlement plate	Level and transit	Manual	69
Multi layer settlement	Resistance	Automatic	2
Multi layer settlement	Magnetic	Manual	19
Settlement gauge	Semiconductor settlement	Automatic	9
Pore pressure meter (Automatic)	Differential trans	Automatic	2
Pore pressure meter (Manual)	Differential trans	Manual	19
Ground water meter	Casagrande	Manual	6
Earth pressure meter	Wire	Manual	3
Inclinometer	Accelerator	Manual	20

는 연구지역에 설치한 계측기기의 수량을 나타낸 것으로 계측기기는 침하판, 층별침하계, 침하계, 간극수압계, 지하수위계, 토압계 및 지중경사계를 설치하였다. 계측방법은 층별침하계, 침하계 및 간극수압계는 수동 및 자동계측을 동시에 실시하였으며 침하판, 지하수위계, 토압계 및 지중경사계는 수동계측을 실시하였다.

성토단계별 침하량

Fig. 7은 지표침하판을 이용하여 연구지역에서 측정된 성토단계별 침하량을 대표적으로 나타낸 것으로 성토가 진행됨에 따라 즉, 성토하중이 증가함에 따라 침하량도 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 성토가 완료된 이후에는 침하량이 수렴되는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 이는 해성퇴적지반에서 성토하중으로 인하여 초기에 발생한 과잉간극수압이 소산되면서 발생하는 압밀현상에 기인한 것으로 압밀이 진행됨에 따라 침하가 일어나는 것으로 볼 수 있다. 침하는 성토고 4.7~7.8 m 구간에서 진행되었으며 이로 인한 침하량은 0.959~2.217 m인 것으로 나타났는데, 이는 해성퇴적지반의 두께와 상관성이 높은 것으로 해석되었다.

성토단계별 측방유동량

Fig. 8은 성토지반의 하단부에서 경사계를 이용하여 측정된 성토단계별 측방유동량을 대표적으로 나타낸 것으로 성토가 진행됨에 따라 즉, 성토하중이 증가함에 따라 측방

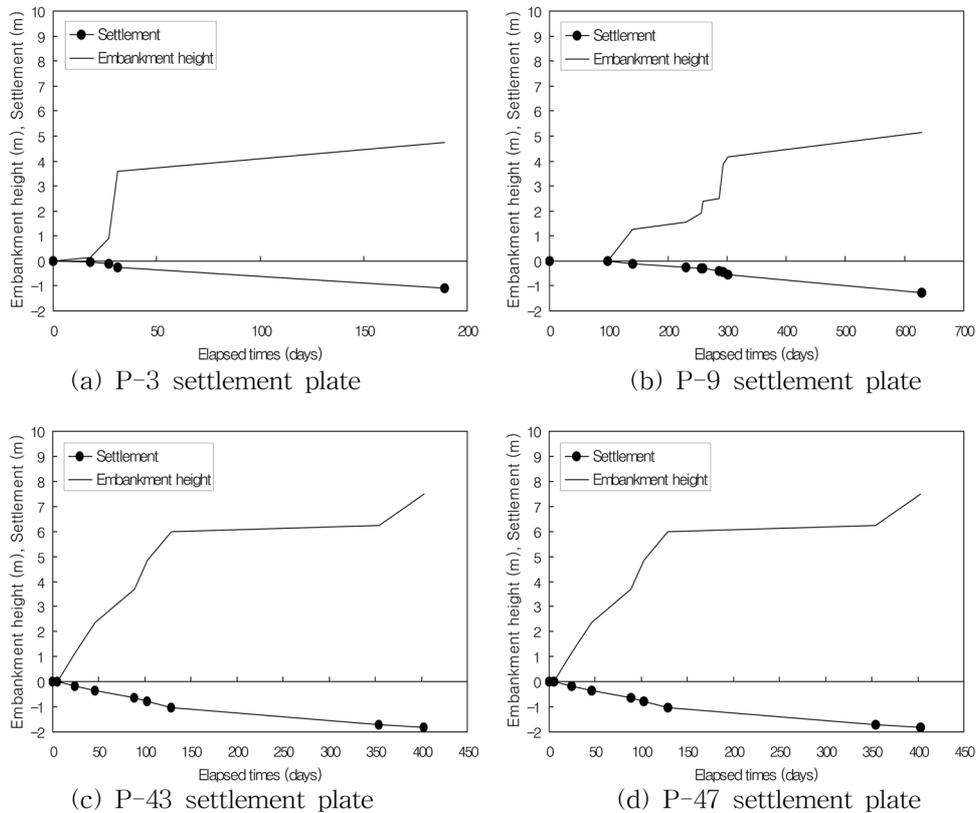


Fig. 7. Settlement according to the embankment stage measured by settlement plate.

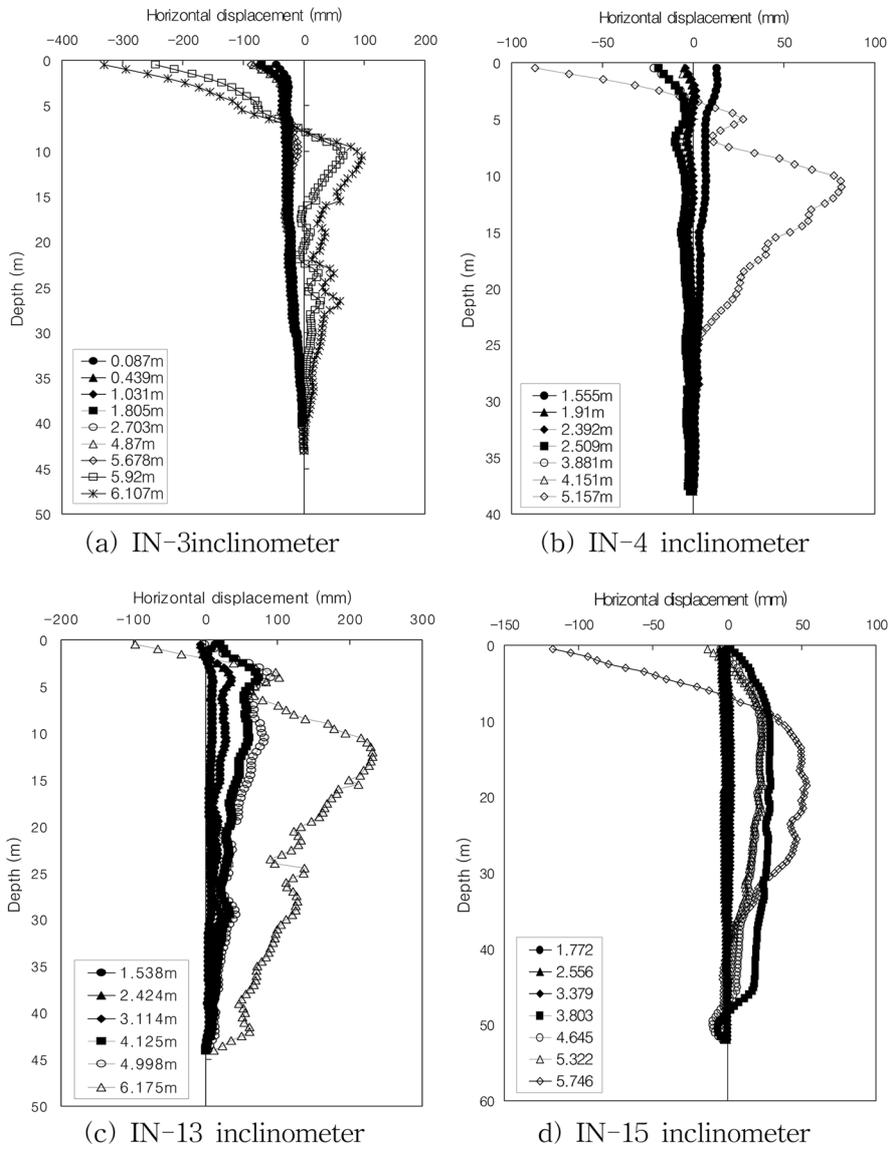


Fig. 8. Horizontal displacements according to the embankment stage measured by inclinometer.

유동량도 증가하는 것으로 나타났다. 측방유동은 성토고 4.7~7.8m 구간에서 진행되었으며 이로 인한 측방유동량은 0.048~0.313m인 것으로 나타났다. 한편, 측방유동에 대한 형상은 성토 하부 기초지반의 압밀과정과 직접적인 연관성을 갖는 것으로 성토 초기단계와 완료단계에서는 전형적인 연약지반의 측방유동 양상을 나타내고 있다. 최대측방유동은 지표면으로부터 약 10m 깊이에서 주로 발생하는 것으로 나타났으며, 이 때 기초지반은 정규압밀상태이고 항복상태에 도달함을 확인하였다.

결과분석

성토고에 따른 침하량 산정

연약지반에 성토하중이 작용하게 되면 침하와 측방유동이 발생하게 되며 이 때 침하량과 측방유동량은 동일한 크기로 발생되지 않고 서로 다르게 발생되는데, 일반적으로는 침하량이 측방유동량보다 크게 나타난다. Fig 9는 연구지역에 설치한 계측기로부터 측정된 단계별 성토고에 따른 해성 퇴적지반에서의 침하량을 모두 도시한 것으로 성토고와

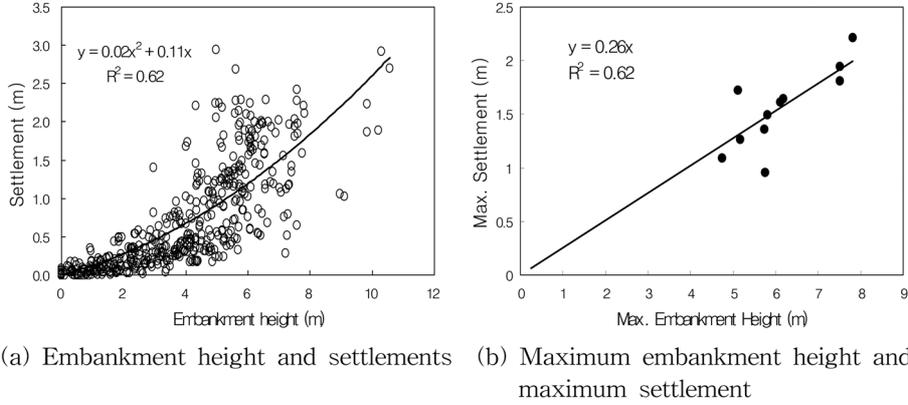


Fig. 9. Variation of settlement according to the embankment height.

침하량의 상관관계를 나타낸 것이다. 성토고와 침하량의 관계를 도시한 Fig. 9(a)에서와 같이 성토고가 증가함에 따라 침하량도 증가하는 경향성을 보였다. 그리고 측정된 자료에 대해 회귀분석을 실시한 결과 이차함수 다항식의 비례관계를 보이며, 식 (1)과 같은 상관식을 제안할 수 있다. 여기서 s 는 침하량(m)이고 h 는 성토고(m)이다.

$$s = 0.02h^2 + 0.11h \quad (1)$$

그리고 Fig. 9(b)에서와 같이 최대성토고에 따른 최대 침하량은 비례관계를 보임으로써 회귀분석결과로부터 식 (2)와 같은 상관식을 제안할 수 있다. 제안된 식 (2)는 해성퇴적지반의 최대침하량을 예측하는데 활용도가 매우 높을 것으로 판단된다. 여기서 s_m 는 최대침하량(m)이고 h_{max} 는 최대성토고(m)이다.

$$s_m = 0.26h_{max} \quad (2)$$

Fig. 10은 성토단계에 따른 침하량의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 10(a)는 성토비와 침하량의 관계를 보여 주는 것으로 성토비가 증가함에 따라 침하량도 증가하는 것으로 나타났으며, 성토비가 약 0.6 이상일 경우 침하량은 급격하게 증가함을 알 수 있다. 여기서 성토비는 각 단계별 성토고를 최종성토고로 나눈 값이다. 그리고 Fig. 10(b)는 단계별 성토고를 해성퇴적지반의 깊이로 나눈 값과 침하량과의 관계를 나타낸 것으로 성토하중이 증가함에 따라 침하량은 비선형적으로 증가하는 경향성을 보였다. 성토고와 해성퇴적지반의 깊이비가 작을 경우 침하량은 급격히 증가하지만 성토고와 해성퇴적지반의 깊이비가 증가할수록 침하량의 증가량은 감소함을 알 수 있다. 식 (3)은 성토고 및 해성퇴적지반의 깊이비와 침하량의 상관식을 나타낸 것으로 이 식을 이용하면 해성퇴적지반의 깊이와 성토고를 알고 있을 경우 침하량을 개략적으로 산정

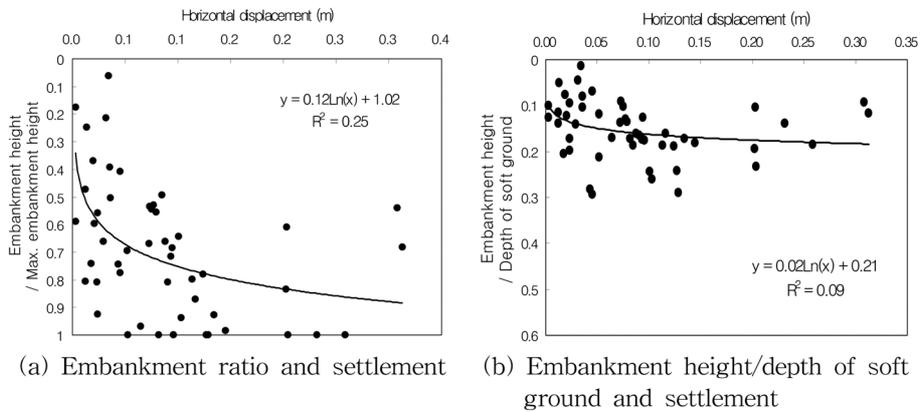


Fig. 10. Variation of settlement according to the embankment stage.

할 수 있을 것으로 판단된다. 여기서 H 는 해성퇴적지반의 두께(m)이다.

$$h/H = 0.04\ln(s) + 0.17 \quad (3)$$

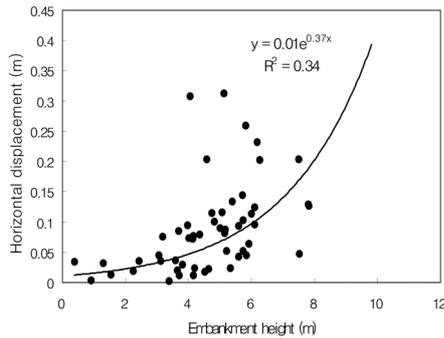
성토고에 따른 측방유동량 산정

Fig. 11은 연구지역에서 측정된 단계별 성토고에 따른 해성퇴적지반에서의 측방유동량을 모두 도시한 것으로 성토고와 측방유동량의 상관관계를 나타낸 것이다. Fig. 11(a)에서와 같이 성토고에 따라 측방유동량도 증가하고 특히, 일정 성토고 이후에서는 측방유동량이 급격하게 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 성토시 하부 해성퇴적지반이 과압밀상태에서 정규압밀상태가 되고 탄성상태에서 항복상태로 변화되기 때문인 것으로 해석된다. 그리고 측정된 자료에 대한 회귀분석을 실시한 결과 지수형태의 비례관계를 보이며, 식 (4)와 같은 상관식을 제안할 수 있다. 여기서 δ 는 측방유동량(m)이다.

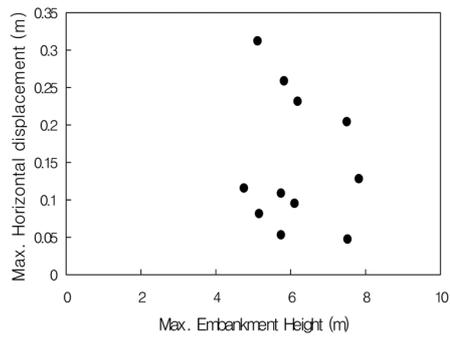
$$\delta = 0.01e^{0.37h} \quad (4)$$

그리고 Fig. 11(b)는 최대성토고와 최대측방유동량의 상관관계를 나타낸 것으로 최대성토고에 따른 최대측방유동량은 비교적 상관관계가 낮은 것으로 나타났다. 정확한 상관성 분석을 위해서는 보다 장기간의 계측자료를 추가하여 상관성을 분석하여야 할 것이다.

Fig. 12는 성토단계에 따른 측방유동량의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 12(a)는 성토비와 측방유동량의 상관관계를 보여주는 것으로 성토비가 증가함에 따라 측방유동량도 증가하는 것으로 나타났으며, 성토비가 약 0.6 이상일 경우 측방유동량은 급격하게 증가하는 경향성을 보였다. 이는 성토비에 따른 침하량의 관계에서와 유사함을 알 수 있다. 한편, Fig. 12(b)는 단계별 성토고를 해성퇴적지반의 깊이로 나눈 값과 측방유동량의 상관관계를 도시한 것으로 성토하중이 증가함에 따라 측방유동량은 비선형적으로 증가하는 경향성을 보였다. 성토고와 해성퇴적지반의

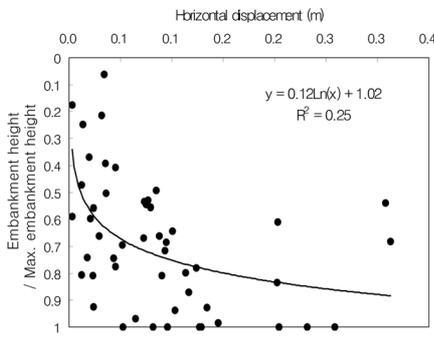


(a) Embankment height and horizontal displacement

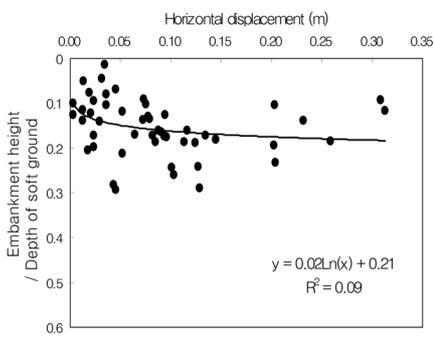


(b) Maximum embankment height and maximum horizontal displacement

Fig. 11. Variation of horizontal displacement according to the embankment height.



(a) Embankment ratio and horizontal displacement



(b) Embankment height/depth of soft ground and horizontal displacement

Fig. 12. Variation of horizontal displacement according to the embankment stage.

깊이비가 작을 경우 측방유동량은 급격히 증가하지만 성토고와 해성퇴적지반의 깊이비가 클수록 측방유동량은 완만한 증가세를 보임을 알 수 있다. 식 (5)는 성토고 및 해성퇴적지반의 깊이비와 측방유동량의 상관관계를 나타낸 것으로 이 식을 이용하면 해성퇴적지반의 깊이와 성토고를 알고 있을 경우 측방유동량을 개략적으로 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

$$h/H = 0.02\ln(\delta) + 0.21 \quad (5)$$

결론

본 연구지역은 해성퇴적지반으로서 산업시설 부지조성을 목적으로 매립을 통해 지반개량을 실시한 구역이다. 본 연구에서는 대상지역의 지층특성 및 지반특성을 파악하기 위해 현장조사, 시험시추 및 실내시험을 실시하고 지반의 변위특성을 파악하기 위해 현장계측을 수행하였다. 그리고 이들 결과를 이용하여 성토단계별 침하량과 측방유동량을 분석하였다. 또한, 이를 통해 연구지역과 유사한 해성퇴적지반에 성토를 할 경우 성토하중에 따른 침하량과 측방유동량을 산정할 수 있는 경험식을 제안하였다.

1) 연구지역의 지층은 상부로부터 매립층, 퇴적층 및 기반암층으로 이루어져 있다. 퇴적층 내에 존재하는 점토층은 3.9~44.5 m 깊이로 분포하고 있으며 성토고는 4.7~7.8 m이다. 해성퇴적지반의 함수비, 밀도, 액성한계 및 소성한계는 각각 31.5~75.5%, 2.67~2.71 g/cm³, 35.7~91.6% 및 21.4~33.3%의 범위이다.

2) 성토고의 증가에 따라 침하량 및 측방유동량도 비례적으로 증가되며, 매립으로 인해 발생된 해성퇴적지반의 침하량과 측방유동량은 각각 0.959~2.217 m 및 0.048~0.313 m인 것으로 나타났으며 이러한 변위양상은 해성퇴적지반의 심도와 상관성이 높다.

3) 성토고와 침하량은 이차함수 다항식의 비례적인 관계를 보이며 성토고와 측방유동량은 지수형태의 비례적인 관계로서 이들 상관식은 각각 $s = 0.02h^2 + 0.11h$ 및 $\delta = 0.01e^{0.37h}$ 와 같이 제시할 수 있다.

4) 성토고의 변화에 따른 해성퇴적지반의 깊이비와 침하량의 상관관계 분석결과로부터 $h/H = 0.04\ln(s) + 0.17$ 과 같은 상관식을, 그리고 해성퇴적지반의 깊이비와 측방유동량은 $h/H = 0.02\ln(\delta) + 0.21$ 과 같은 상관식을 제시할 수 있다.

5) 본 연구에서 제안된 해성퇴적지반의 성토하중에 따른 침하량과 측방유동량에 관한 경험식은 연구지역과 유사한 조건을 가진 해성퇴적지반에 적용이 가능할 것이다. 특히, 본 연구에서 제안한 성토하중에 의한 침하량과 측방유동량 산정식은 성토고와 해성퇴적지반의 깊이를 모두 고려할 수 있으므로 합리적인 방법이라고 판단된다.

사사

본 연구는 한국지질자원연구원 주요사업인 “급경사지 및 휴폐광산지역의 재해예방기술 개발”과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

박형규, 2004, 교대말뚝기초 지반의 측방유동 거동예측, 서울시립대학교 대학원 박사학위논문, p137.
 안종필, 홍원표, 1994, 측방유동을 받는 연약지반의 변형 거동에 관한 연구, 한국지반공학회지, 10(2), 25-40.
 이종길, 2010, 연약지반 성토시 측방유동과 침하의 상관성, 중부대학교 대학원 박사학위논문, p149.
 장태우, 강필중, 박석환, 황상구, 이동우, 1983, 부산·가덕도폭설명서, 한국동력자원연구소, 22p.
 조성민, 1998, 국내 연약 점성토 지반의 성토재하시 변형 특성 분석, 서울대학교 대학원 박사학위논문, 160p.
 최혁, 1998, 연약지반의 측방변위에 관한 거동분석, 서울시립대학교 대학원 석사학위논문, 67p.
 홍원표, 권오현, 한중근, 조성한, 1994, 연약지반상 교대의 측방이동에 관한 연구, 한국지반공학회논문집, 10(4), 53-65.
 홍원표, 이우현, 안종필, 남정만, 1991, 교대기초말뚝의 안정, 대한토질공학회지, 7(2), 67-79.
 Franx, C. and Boonstra, G. C., 1948, Horizontal pressure on pile foundations, Proc., 2nd ICSMFE, 1, 131-135.
 Heyman, L. and Boersma, L., 1961, Bending moment in piles due to lateral earth pressure, Proc., 5th Int. Conf, SMFE, 2, 425-429.
 Leussink, H. and Wenz, K. P., 1969, Storage Yard Foundation on Soft Cohesive Soils, Proc. 7th ICSMFE, 2, 149-155.
 Peck, R. B., 1969, Deep excavation and tunneling in soft ground, Proc. 7th ICSMFE, State of the art volume, 225-290.
 Stermac, A. G., Devata, M. and Selby, K. G., 1968, Unusual movements of abutments supported on end-bearing piles, Can. Geo-tech, J. 5(2), 69-79.
 Tschebotarioff, G. P., 1973, Lateral pressure of clayey soils on structures, Proc. of the 8th ICSMFE, Special Session 5, Moscow, 4(3), 227-280.

김경수

한국지질자원연구원 지구환경연구본부
305-350 대전광역시 유성구 과학로 92
Tel: 042-868-3054
Fax: 042-861-9723
E-mail: kks@kigam.re.kr

이종길

조달청 품질관리단 장비품질관리과
302-701 대전광역시 서구 둔산동 920 정부대전청사 3동
Tel: 042-481-7063
Fax: 042-472-2975
E-mail: gil@pps.go.kr

정대석

중부대학교 토목공학과
312-702 충남 금산군 추부면 대학로 101번지
Tel: 041-750-6480
Fax: 041-750-6483
E-mail: dsjung@joongbu.ac.kr