

## 토목섬유로 보강된 성토지지말뚝 구조에 적합한 말뚝재료의 개발

### A Study on the Pile Material Suited for Pile Supported Embankment Reinforced by Geosynthetics

최충락<sup>1</sup>, 이광우<sup>2\*</sup>, 김은호<sup>3</sup>, 정지원<sup>4</sup>

Choong-Lak Choi<sup>1</sup>, Kwang-Wu Lee<sup>2\*</sup>, Eun-Ho Kim<sup>3</sup>, Ji-Won Jung<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Member, Managing Director, Geotechnical Engineering Department, Pyunghwa Engineering Consultants, Pyunghwa Bldg., 454, Gwanak-daero, Dongan-gu, Anyang-si, Gyeonggi-do, 13949, Republic of Korea

<sup>2</sup>Member, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283, Goyangdae-ro, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, 10223, Republic of Korea

<sup>3</sup>Member, General manager, Geotechnical Engineering Department, Pyunghwa Engineering Consultants, Gwanak-daero, Dongan-gu, Anyang-si, Gyeonggi-do, 13949, Republic of Korea

<sup>4</sup>Nonmember, Manager, Geotechnical Engineering Department, Pyunghwa Engineering Consultants, Gwanak-daero, Dongan-gu, Anyang-si, Gyeonggi-do, 13949, Republic of Korea

#### ABSTRACT

It is a current trend that the concrete track is applied for high speed railway. In the case of the railway embankment constructed on soft ground, the damage to concrete track which is sensitive to settlement such as distortion and deflection could be caused by very small amount of long term settlement. Pile Supported Embankment method can be considered as the effective method to control the residual settlement of the railway embankment on soft ground. The Geosynthetics is used inside of the embankment to maximize the arching effect transmitting the load of the embankment to the top of the piles. But, PHC piles that are generally used for bridge structures are also applied as the pile supporting the load of embankment concentrated by the effect of the Geosynthetics. That is very low efficiency in respect of pile material. So, in this study, the cast in place concrete pile was selected as the most suitable pile type for supporting the embankment by a case study and the optimum mixing condition of concrete using a by-product of industry was induced by performing the mixing designs and the compressive strength designs. And it is shown that the cast in place pile with the optimum mixing condition using the by-product of industry is 2.8 times more efficient than the PHC pile for the purpose of Pile Supported Embankment by the finite element analysis method.

#### 요 지

최근 철도는 고속화를 위해 콘크리트궤도를 적용하는 추세이고 연약지반 구간에 건설된 철도는 장기간에 걸친 작은 양의 침하발생으로도 침하에 민감한 콘크리트 궤도의 침하량 허용범위를 초과하여 궤도의 손상과 뒤틀림을 초래할 수 있다. 연약지반에 건설된 철도의 잔류침하를 효과적으로 제어 할 수 있는 방법으로 성토지지말뚝공법을 들 수 있으며 성토하중을 말뚝머리로 전달하기 위해 콘크리트 슬라브가 사용되기도 하나 하중이 전달되는 과정에 나타나는 성토체 내부의 아칭효과를 극대화하는 토목섬유를 이용한 방법이 보다 경제적이다. 그러나 토목섬유 등으로 인해 집중된 성토하중을 받는 성토지지용 말뚝은 일반적으로 교량구조물에 사용하는 PHC말뚝을 그대로 사용하고 있으며 이는 필요이상으로 높은 강도의 재료를 사용함으로써 재료의 효율성이 크게 떨어지고 있는 실정이다. 이에 따라 해외의 적용사례 조사를 통해 성토지지용으로 가장 적합한 말뚝의 형식으로 현장타설 콘크리트 말뚝을 선정하고 산업부산물을 이용한 배합설계와 압축강도시험을 통해 성토지지용 말뚝재료의 최적 배합조건을 도출하였다. 그리고 최적배합조건을 적용한 성토지지용 현장타설말뚝이 기존 PHC말뚝에 비해 재료의 효율성이 약 2.8배 뛰어나다는 것을 수치해석을 통해 확인하였다.

**Keywords** : Soft soil, Pile supported embankment, Pile material, Geo-grid

Received 20 Jan. 2016, Revised 16 Mar. 2016, Accepted 18 Mar. 2016

\*Corresponding author

Tel: +82-31-9100-232; Fax: +82-31-9100-211

E-mail address: kwangwu@kict.re.kr (K.-W. Lee)

# 1. 서론

고속도로 연약지반구간의 대표적인 지반개량 공법인 연직배수 및 프리로딩 공법을 콘크리트 궤도의 철도에 적용할 경우 방치기간이 과도하게 증가하게 되어 공사기간 확보에 어려움이 있으며, 치환공법은 깊은 심도의 대규모 연약지반 개량에 적용이 어렵고 교량으로 연약지반구간을 통과할 경우 건설비가 지나치게 증가하게 된다. 따라서, 연약지반 구간에서 허용 침하기준을 만족하고 건설비를 대폭 절감할 수 있는 말뚝기초와 토목섬유를 이용한 성토 지지말뚝 구조가 신형식의 토공 침하억제공법으로 제시되고 있다.

연약지반의 침하억제를 목적으로 하는 성토지지말뚝이 분담하는 하중은 교량의 말뚝기초가 받는 하중에 비해 상대적으로 작다. 일반적으로 교량 및 건물의 기초에 적용되는 고강도의 말뚝구조재료를 성토지지말뚝 구조에 적용할 경우 재료의 강도가 지나치게 크다는 점에서 효율성이 떨어져 과설계의 우려가 있다. David(2005)는 대부분의 경우에 낮은 압축강도의 말뚝형식이 성토지지말뚝으로서 가장 경제적인 대책방법이 된다고 하였다. 따라서 성토지지의 목적에 부합하면서 재료의 강도 및 비용 측면에서 효율적인 성토지지용 말뚝재료의 개발이 요구된다.

본 연구에서는 해외의 적용사례 조사를 통해 성토지지용으로 가장 적합한 말뚝의 형식을 결정하고 산업부산물을 이용한 배합설계와 압축강도시험을 통해 성토지지용 말뚝재료의 최적 배합조건을 도출하였다. 그리고 기존 PHC말뚝 재료와의 효율성을 비교하기 위해 수치해석을 수행함으로써 최적의 성토지지용 말뚝재료를 제시하였다.

## 2. 성토지지말뚝의 적용사례 조사

성토지지말뚝 구조의 기본개념은 성토하중이 아칭효과를 통해 말뚝머리로 전달되고 말뚝재료를 통해 견고한 지지층으로 전달되는 것으로 해외 적용 사례 등을 볼 때 연약지반 구간의 철도공사에 침하억제 측면에서 안전성을 확보할 수 있는 합리적인 대안이라 할 수 있다. 그러나 국내에서는 성토지지말뚝의 아칭효과 및 말뚝재료에 대한 연구가 충분하지 않고 적용사례가 부족하기 때문에 드물게 적용되고 있는 실정이다.

국내의 성토지지말뚝 시공사례는 호남고속철도 등 소수에 불과하여 적용사례가 드물다. 호남고속철도(3-3공

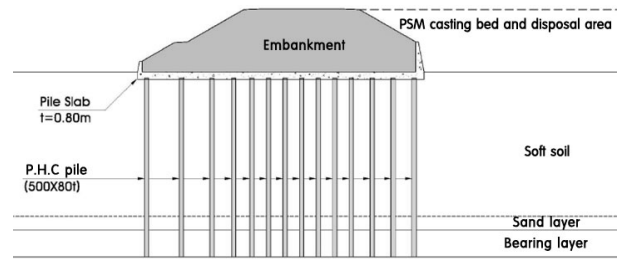


Fig. 1. Pile-slab method applied in Honam high-speed railroad LOT 3-3

구)는 연약점성토층이 최대 17.8m 두께로 두껍게 분포하고 있어 치환공법의 적용이 어렵고 콘크리트궤도 구간의 경우 압밀축진공법으로는 제한된 공사기간 내에 잔류침하량 기준을 만족할 수 없는 지층 조건을 가지고 있다. 따라서 말뚝을 연약지반 속으로 관통시켜 지지층에 근접하고 말뚝전체를 콘크리트 Slab로 연결하여 상부하중을 지지함으로써 노반의 안정성을 확보하는 공법인 성토지지말뚝을 연약지반 2구간(연장 740m)에 적용하여 침하 및 활동에 대한 확실한 안정성을 확보하였다. 말뚝 시공법으로는 SDA공법을 적용하여 주변 연약지반의 이완 및 공벽붕괴를 방지하였다. 말뚝재료는 PHC말뚝( $\phi 500 \times 80$ ) B종을 사용하였고 말뚝작용 하중은 737.0~806.0kN/본이며, 말뚝기초의 허용지지력은 775.9~828.1kN/본으로 조사되었다.

Lee(2006)는 경전선 및 부산신항 배후철도 건설현장의 측방유동으로 인한 대책공법이 필요한 총 6개의 교량중 하나의 교량에 토목섬유보강 성토지지말뚝 공법을 시험 시공하였다. 교대 배면의 20m구간에 직경 600mm인 PHC말뚝을 84본(7열 $\times$ 12열) 시공하고, 각각의 말뚝 두부에는 가로 $\times$ 세로 $\times$ 높이=1.2 $\times$ 1.2 $\times$ 0.6m인 철근콘크리트 말뚝캡을 설치하여 말뚝으로의 성토하중 전이효과를 증대시켰다. 말뚝재료는 PHC말뚝( $\phi 600$ )을 사용하였고 말뚝작용 하중은 계측에 의한 측정하중으로 459~671N/본이며, 말뚝의 허용지지력은 1765.0kN/본으로 조사되었다. 말뚝캡 상부에는 인장강도 150kN/m인 지오그리드를 2열 시공하였다. 시험시공결과 전체 성토하중의 61~88%가 말뚝으로 전이되었음을 계측결과를 통해 알 수 있었으며 말뚝캡의 침하량은 10mm 이내로 미소하였다.

두꺼운 연약지반 위의 기존도로에 접하는 철도성토를 안전하게 설계하기 위해 인천국제공항 제2여객터미널 연결철도 실시설계에는 Fig. 2와 같이 성토지지말뚝+슬래브 공법이 적용되었다.

성토지지말뚝으로는 PHC말뚝을 재료로 SDA공법이 적

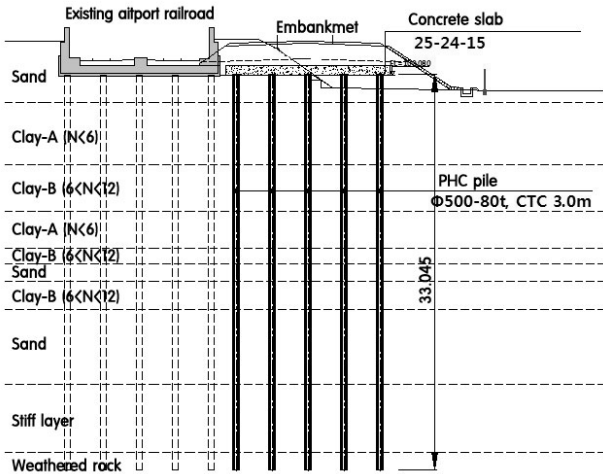


Fig. 2. Pile Supported Embankment applied to railroad link of 2nd passenger terminal in Incheon international airport

용되었으며 말뚝재료는 PHC말뚝(Ø600)을 사용하였고 말뚝작용 하중은 975N/본이며, 말뚝의 허용지력력은 1,643kN/본 (재료 허용력 1,691kN/본)으로 조사 되었으며 시공법으로는 SDA공법이 적용되었다. 말뚝은 연약지반을 통과하여 풍화암에 지지하도록 하여 약 32.5m의 길이로 설계되었다. 말뚝의 침하량 안정성 검토결과 연직침하량은 9.9mm, 수평변위는 5.9mm로 허용치 이내로 나타났으며 유한요소 해석을 통해 인접도로의 동반침하에 대해 효과적인 대책으로 선정되었다.

국내 성토지지말뚝의 하중전달시스템으로는 콘크리트 슬라브와 말뚝을 연결하는 구조가 주로 사용되고 있으며 토목섬유를 이용한 성토지지말뚝 구조는 아직 연구단계인 시험시공 수준인 것으로 보인다. 말뚝재료는 대부분 PHC 말뚝을 사용하였으며 말뚝에 작용하는 하중은 459~975kN으로 나타났다. 국내 시공사례를 요약하면 Table 1과 같다.

국내 사례와는 달리 해외에는 다수의 성토지지말뚝 설계 및 시공사례가 있으며 다양한 종류의 성토지지말뚝 재료가 사용되었다. Alexiew and Gartung(1999)에 의하면 독일에서는 1990년 동독과 서독의 통일 후 교통수요의 증대로 인해 기존 철도의 개량이 최근까지 활발히 진행되고 있으며, 주요 기초보강 공법으로 성토지지말뚝공법이 적

Table 1. Cases of pile supported embankment in domestic

Site	Load transfer system	Pile material	Load applied to a pile
Honam high-speed railroad LOT 3-3	Concrete slab	PHC(D500mm)	737~806 kN
Test construction by Lee(2006)	Geogrid(T=150kN/m) 2layers + Concrete cap	PHC(D600mm)	459~671 kN
Railroad link of 2nd passenger terminal in Incheon international airport	Concrete slab	PHC(D600mm)	975 kN

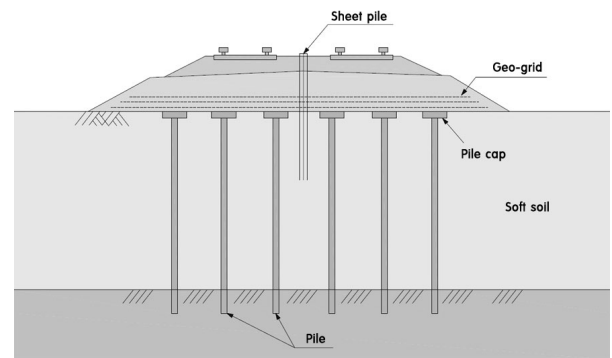


Fig. 3. Double track railway between Magdeburge and Berlin by Pile Supported Embankment(Alexiew and Gartung, 1999)

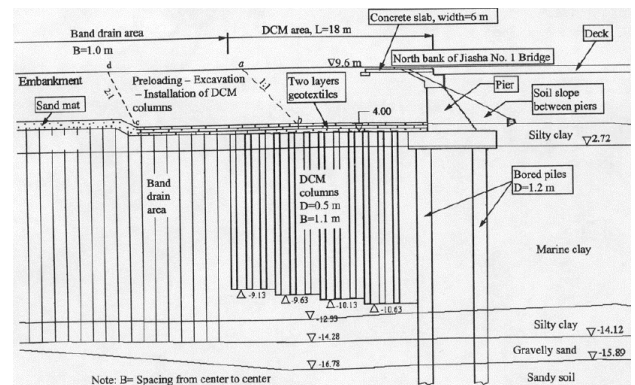


Fig. 4. Pile Supported Embankment applied to coastal highway in China.(Lin and Wong, 1999)

용되고 있다. Magdeburge- Berlin 간 복선철도의 철도성능개선공사에서는 환경적인 이유와 공사기간 단축을 목적으로 성토지지말뚝이 적용되었으며 그림과 같이 슈트파일을 이용하여 상행과 하행을 구분하여 시공하였다.

중국의 A coastal highway with embankments in southeast China (Lin and Wong, 1999)에서는 교량 교대로 연결되는 연약지반 성토 구간을 위한 성토지지말뚝과 토목섬유 적용하였으며 직경 0.5m의 DCM을 1.1m 간격으로 적용하였다. 성토높이는 4~7m이며 연약층 두께는 20m이다.

Tsukada et al.(1993)은 일본 Yono City에서 시공된 도로의 연약지반상 저성토 구간에서 성토지지말뚝으로서 DM

Table 2. Application of pile material for Pile Supported Embankment in overseas

Type	Material	No. of application
Drilled shaft	VCC	25
	CFA	4
	Total	29
Precast pile	Precast Concrete	12
	Timber pile	6
	Total	18
Cement or aggregate injected pile	Jet grouting (Cement powder)	8
	Stone column	1
	Total	9

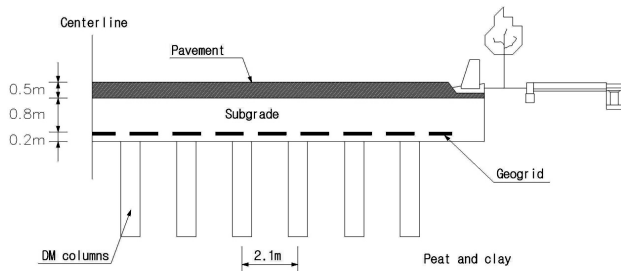


Fig. 5. Low height embankment reinforced by DM Columns (Tsukada et al, 1993)

Columns을 적용한 사례를 발표하였다. 유기질토와 점성토로 이루어진 약 8m의 연약층을 직경 800mm의 DM Columns을 2.1m간격으로 보강하여 약 1.5m의 상대적으로 낮은 성토하중을 지지하였다. DM Columns의 일축압축강도는 1MPa이었으며 말뚝상부는 말뚝캡과 토목섬유를 적용하였다. 15개월간의 계측결과 최대부등침하는 15mm로 나타났다.

그 외의 David(2005)가 조사한 성토지지말뚝의 사례조사 결과를 포함하여 총 56건의 다양한 해외 적용사례를 말뚝공법에 따라 Table 2에 분류하였다.

VCC, CFA말뚝 등 현장타설말뚝의 사용이 가장 일반적이며 Jet grouting, Stone column 등 지중에 시멘트 및 모래자갈을 주입하여 개량체를 형성하는 지반개량말뚝이 가장 적게 사용되는 것으로 나타났다. 따라서 향후 국내 철도건설에 사용될 성토지지말뚝공법으로 현장타설말뚝 형식을 선정하였으며 성토지지용 말뚝구조가 요구하는 현장타설말뚝의 재료에 대한 연구를 수행하였다.

### 3. 성토지지용 말뚝의 제원 및 성능 결정

#### 3.1 검토단면

성토지지말뚝으로 적합한 말뚝재료의 요구성능을 결정

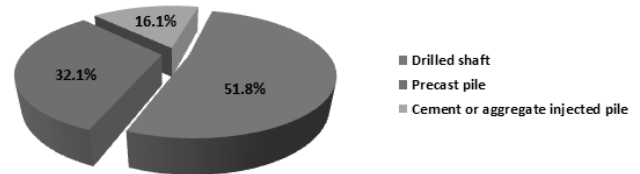


Fig. 6. Application of pile material for Pile Supported Embankment

하기 위해 호남고속철도에 적용된 단면을 참고하여 다음과 같은 표준단면을 가정하였다. 철도하중은 53kPa(궤도하중 17kPa, 열차하중 36kPa), 쌓기비탈면 경사는 1:1.8이며, 연약층두께는 13.5m이고 말뚝기초는 연약지반을 통과하여 기반암에 지지하도록 가정하였다. 성토고가 지나치게 높을 경우 교량대비 경제적 이점이 크게 감소하므로 실제 건설사업에서 성토지지말뚝구조의 적용이 적합할 것으로 예상되는 성토높이로 5m를 가정하였다.

#### 3.2 성토지지용 말뚝의 간격 결정

##### 3.2.1 아칭효과를 고려한 말뚝간격

성토지지말뚝 구조에서 말뚝의 간격이 지나치게 클 경우 성토재료에서 말뚝으로 하중이 전달되는 과정에서 나타나는 아칭효과를 상실하게 되어 말뚝이 전체 성토체의 침하를 효과적으로 지지할 수 없게 된다. Lee et al.(2000)은 현장시험을 통하여 말뚝의 순간격이 말뚝캡 직경의 3배 정도가 될 때 현저한 부등침하 방지와 지지력 증대효과가 있다고 하였다. 따라서 말뚝직경 0.8m를 적용할 경우 말뚝의 순간격이 2.4m, 중심간격 3.2m를 넘지 않는 범위에서 말뚝의 간격을 결정하였다.

##### 3.2.2 말뚝의 허용지지력을 고려한 말뚝간격

성토지지말뚝은 성토재료와 토목섬유에 의해 발생하는

Table 3. Coefficients of discontinuity spacing, Ksp

Discontinuity Spacing		Ksp
Description	Spacing (m)	
Moderately close	0.3 to 1	0.1
Wide	1 to 3	0.25
Very wide	> 3	0.4

지반아침에 의해 말뚝으로 전이된 성토하중만을 부담하게 되나, 일반적으로 말뚝의 지지력 검토시 안전측의 설계를 위해 성토하중, 궤도 및 철도하중 등을 포함한 말뚝 상부의 모든 하중을 말뚝이 지지하는 것으로 가정하게 된다. 따라서, 말뚝을 정방향으로 배치할 경우, 말뚝에 요구되는 허용지지력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P=(r \cdot H + w) \times D^2 \quad (1)$$

여기서, P : 말뚝에 요구되는 허용지지력(kN)

r : 성토재 단위중량(kN/m<sup>3</sup>)

H : 성토고(m)

w : 상재하중(kPa)

D : 성토지지말뚝 중심간격(m)

말뚝재료의 강도가 무한히 크더라도 기초지반의 지지력을 상회하는 하중을 지지할 수는 없으므로 말뚝과 지반 사이의 저항 특성인 기초지반의 허용지지력을 말뚝재료의 허용응력과 함께 고려하여 말뚝기초에 대한 배치를 결정해야 한다. 국내외에 제시된 다양한 지지력 산정방법 중 암반층에 지지된 현장타설말뚝의 허용지지력(Q<sub>a</sub>) 산정을 위해 국내에서 널리 사용중인 대표적으로 방법인 Canadian Foundation Engineering Manual(2006)방법을 적용하였다.

$$Q_a = K_{sp} \times q_{u-core} \times A_p \quad (2)$$

여기서, K<sub>sp</sub> : 암반 불연속면 간격에 따른 상수

q<sub>u-core</sub> : 암코어의 일축압축강도(MPa)

A<sub>p</sub> : 말뚝의 선단면적(m<sup>2</sup>)

암코어의 일축압축강도를 30MPa로 가정하고 CFEM에서 제시하는 방법에 따라 암반지지 말뚝의 허용지지력 산정하고 말뚝의 배치 간격에 따른 작용 축력과 비교하였다.

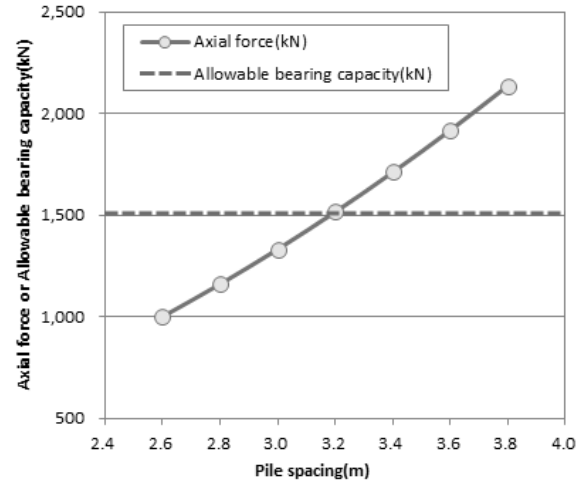


Fig. 7. Allowable bearing capacity in different pile spacing

높이 5.0m의 성토하중에 대해 말뚝 중심간격 3.0×3.0m 적용시 말뚝 작용축력이 1,332kN으로 암반에 지지된 직경 0.8m의 말뚝기초의 허용지지력인 1,508kN으로 지지할 수 있는 것으로 나타났으며 따라서 본 연구에서는 중심간격 3.0×3.0m의 말뚝배치를 고려하였다.

### 3.3 말뚝재료의 허용압축력

국내에서 깊은 기초 형식으로 주로 사용되는 말뚝재료로는 현장타설말뚝, PHC말뚝, 강관말뚝이 있다. 산정된 말뚝머리 작용하중과 허용지지력을 동일한 직경의 말뚝기초 재료에 따른 허용압축력과 비교하면 Table 4와 같다.

말뚝재료의 허용압축강도는 강관말뚝이 4,159kN, PHC말뚝이 4,020kN, 허용압축강도가 가장 낮은 현장타설 콘크리트 말뚝이 3,016kN(설계기준강도 24MPa 적용시)으로 연직하중 1,332kN 대비 226.4 ~ 312.2%로 지나치게 과대하여 성토지지 목적으로는 효율성이 떨어진다. 성토지지를 목적으로 효율을 높일 수 있는 말뚝재료 개발을 위하여 순환골재 등 산업부산물을 활용한 배합설계 및 강도 시험을 수행하였다.

Table 4. Allowable vertical forces for applicability evaluation for various pile materials

Type		Allowable or acting force (kN)	Remark
Allowable bearing capacity on rock (kN)		1,508	qu_core=30MPa
Acting force on pile top (kN)		1,332	
Compressive strength of pile material (kN)	PHC pile	4,020	-
	Steel pile	4,159	-
	Drilled shaft	3,016	Fck=24MPa
	Aimed pile in this study	2,262	Fck=18MPa

#### 4. 말뚝재료 최적배합조건 결정

##### 4.1 사용재료 및 재료시험방법

기존의 고강도 말뚝기초를 대체하기 위한 연약지반에 적용 가능한 경제적인 성토지말뚝 재료를 선정하기 위하여 기존 콘크리트 말뚝의 구성재료를 상대적으로 저렴한 산업부산물로 대체하여 압축강도 시험을 수행하였다. 사용된 배합재료로는 시멘트, 플라이애쉬, 고로슬래그, 순환골재가 있으며 각 재료의 채취장소/제조사는 Table 5와 같다.

목표 설계기준 강도는 기존 현장타설말뚝의 설계기준 강도 24MPa보다 작은 18MPa로 적용하였다. 실내시험을 위한 공시체 제작을 위해 사용된 각각의 재료는 Table 6의

공인된 시험방법에 따라 품질을 확인하였다.

Table 6의 시험결과 각각의 배합재료의 물리화학적 특성치는 Table 7~12와 같이 나타났으며 모두 콘크리트 재료로서의 품질허용기준치를 만족하였다.

콘크리트 배합과정은 표준편차의 결정, 소요 평균강도의 결정, 시험배합을 통한 평균강도를 얻기 위해 요구되는 배합비의 선택으로 이루어진다. 선택된 배합비의 평균강도는 표준편차를 고려하여 설계기준압축강도 보다 콘크리트 구조기준(2012)에서 규정하는 양만큼 더 높아야 한다. 콘크리트 구조기준(2012)에서는 표준편차 계산을 위한 현장 강도 기록 자료가 없을 경우 Table 13과 같은 배합강도를 적용하도록 제시하고 있으므로 목표하는 설계기준강도 18MPa에 7MPa를 추가하여 배합강도를 25MPa로 설정하였다.

Table 5. Borrow sites or manufacturers for mix ingredients

Type	Collecting place / Manufacturer
Portland cement (type-1)	"A" cement co.
Crashed coarse aggregate for concrete-57A	"B" Engineering co.,Ltd.
Crashed fine aggregate for concrete-A	Aggregates pit, Hobong-ri, Gangwon Province
Recycled aggregate for concrete (coarse)	"B" Engineering co.,Ltd.
Recycled aggregate for concrete (fine)	"B" Engineering co.,Ltd.
Fly ash (type-2)	"C" power station of Korea south-east power co.
Micropowder of blast furnace slag (type-3)	"D" slag & materials co.
Chemical Admixtures for concrete (AE water reducing agent)	"E" co.,Ltd.

Table 6. Quality Tests and test ingredients for making concrete specimens

Used material	Test code	Remark
Potland cement (type-1)	KS L 5201:2013	
Crashed aggregate	KS F 2527:2007	Crashed coarse aggregate 57A Crashed fine aggregate A
Fly ash	KS L 5405:2009	
Micropowder of blast furnace slag	KS F 2563:2009	
Recycled aggregate	KS F 2573:2011	Recycled coarse aggregate 25mm Recycled fine aggregate
Chemical Admixtures	KS F 2560:2014	AE water reducing agent

**Table 7. The features of portland cement by quality tests**

List of test		Unit	Criteria for quality	Test result	Remark
Compressive strength (28days)		N/mm <sup>2</sup>	More than 42,5	50,5	pass
Fineness		cm <sup>2</sup> /g	More than 2,800	3,370	pass
Volume stability (Autoclave)		%	Less than 0,8	0,08	pass
Setting time (Vicat test)	Final setting time	hour	Less than 10	6,2	pass
	Ignition loss	%	Less than 3	1,9	pass
Chemical composition	MgO	%	Less than 5	3,3	pass
	SO <sub>3</sub>	%	Less than 3,5	2,2	pass
Specific Gravity		g/cm <sup>3</sup>	-	3,15	pass

**Table 8. The features of coarse aggregate by quality tests**

List of test		Unit	Criteria for quality	Test result		Remark
				Crashed-57A	Recycled	
Grain size	40mm	%	100	100	100	pass
	25mm	%	95~100	100	100	pass
	13mm	%	25~60	29	29	pass
	5mm	%	0~10	1	1	pass
	2,5mm	%	0~5	0	0	pass
	0,08mm	%	Less than 1	0,2	0,6	pass
Volume stability		%	Less than 12	3	10	pass
Attrition rate		%	Less than 40	21	35	pass

**Table 9. The features of crashed fine aggregate by quality tests**

List of test		Unit	Criteria for quality	Test result		Remark
				Crashed-A	Recycled	
Grain size	10mm	%	100	100	100	pass
	5mm	%	95~100	98	98	pass
	2,5mm	%	80~100	92	81	pass
	1,2mm	%	50~90	71	62	pass
	0,6mm	%	25~65	39	25	pass
	0,3mm	%	10~35	17	18	pass
	0,15mm	%	2~15	4	13	pass
Volume stability		%	Less than 10	3,4	8	pass

**Table 10. The features of fly ash by quality tests**

List of test	Unit	Criteria for quality	Test result	Remark
Silica	%	More than 45	52,5	pass
Moisture	%	Less than 1	0,08	pass
Ignition loss	%	Less than 5	3,7	pass
Specific Gravity	g/cm <sup>3</sup>	More than 1,95	2,25	pass
Fineness	cm <sup>2</sup> /g	More than 3,000	3,922	pass
Flow value ratio	%	More than 95	100	pass
Activity index (28days)	%	More than 80	93	pass

Table 11. The features of blast furnace slag by quality tests

List of test	Unit	Criteria for quality	Test result	Remark
Specific Gravity	g/cm <sup>3</sup>	More than 2.8	2.9	pass
Fineness	cm <sup>2</sup> /g	4,000~6,000	4,282	pass
Activity index (28days)	%	More than 75	107	pass
Flow value ratio	%	More than 95	104	pass
MgO		Less than 10	4.86	pass
SO <sub>3</sub>		Less than 4	1.72	pass
Ignition loss	%	Less than 3	0.52	pass

Table 12. The features of blast furnace slag by quality tests

List of test	Unit	Criteria for quality	Test result	Remark	
Water reducing ratio	%	More than 10	15.8	pass	
Bleeding	%	Less than 70	57	pass	
Difference of setting time	Begging	min	-60 ~ +90	+30	pass
	End	min	-60 ~ +90	+25	pass
Compression strength ratio	7days	%	More than 110	120	pass
	28days	%	More than 110	117	pass
Ignition loss	%	Less than 120	101	pass	
Freezing-thawing resistance	%	More than 80	91	pass	

Table 13. Compressive strength of concrete mix design in case that the number of test is less than 14 or not recorded

Specific concrete strength, $f_{ck}$ (MPa)	Mixing strength, $f_{cr}$ (MPa)
Less than 21	$f_{ck} + 7.0$
Between 21 and 35	$f_{ck} + 8.5$
More than 35	$1.1f_{ck} + 5.0$

## 4.2 압축강도 시험계획

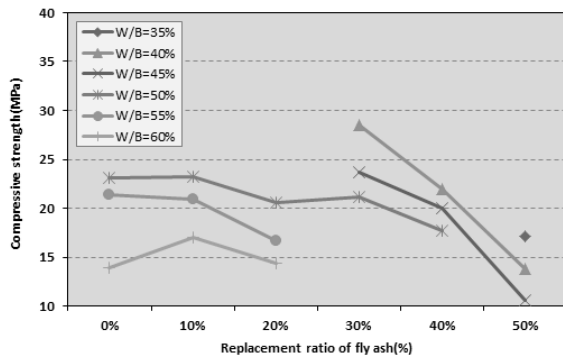
콘크리트 말뚝의 재료비 측면에서 플라이애쉬 함량을 증가시키는 것이 유리하나 과도한 양의 플라이애쉬는 콘크리트 강도의 발현을 지연시키는 경향이 있다. 따라서 목표하는 제품을 현장타설 말뚝으로 시공하는 경우 적정시기에 강도를 발현하지 못하면 수분의 유입에 의해 현장타설말뚝의 품질저하가 우려된다. 따라서 재령 28일의 목표 강도를 18MPa로 결정하고 플라이애쉬 함량의 변화에 따른 압축강도의 변화를 확인하여 최적의 플라이애쉬 함량을 결정하도록 계획하였다. Lee et al.(1999), Kim et al.

(2000) 등 플라이애쉬 함유 콘크리트에 대한 기존 연구사례에서 플라이애쉬의 최대 함량을 50%까지 시험하였으며 50%를 초과한 사례를 찾을 수 없었으므로 본 연구에서도 최대 플라이애쉬 함량을 50%로 적용하였다. 또한 플라이애쉬에 추가적으로 고로슬래그가 첨가되는 경우 콘크리트의 품질의 변화를 확인하였다. 또한 콘크리트용 순환 골재의 함량을 증가시키는 경우 콘크리트의 품질 저하가 우려되므로 철근콘크리트 표준시방서 2009 기준에 의거하여 최대 30%까지 함량의 변화를 주어 압축강도 시험을 수행하였다. 산업부산물 함량 변화에 따른 시험 계획은 Table 14와 같으며 모든 케이스에 대해 물/결합재에 변화를 주며

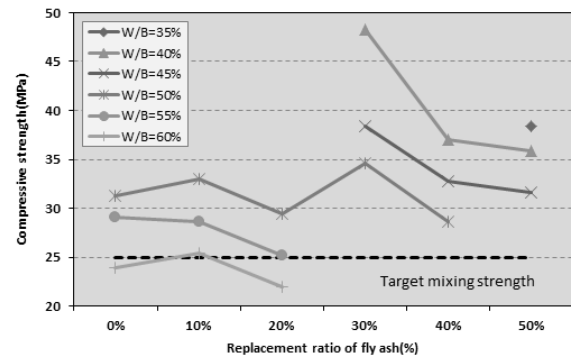
Table 14. Mix ingredients and quality test for preparation of test specimens

No.	Replacement ratio	No.	Replacement ratio	No.	Replacement ratio
1-1	Fly ash 0%	2-1	Fly ash 30%, Blast furnace slag 20%	3-1	Fly ash 30%, Recycled aggregate 10%
1-2	Fly ash 10%	2-2	Fly ash 50%, Blast furnace slag 20%	3-2	Fly ash 30%, Recycled aggregate 20%
1-3	Fly ash 20%			3-3	Fly ash 30%, Recycled aggregate 30%
1-4	Fly ash 30%			3-4	Fly ash 50%, Recycled aggregate 10%
1-5	Fly ash 40%			3-5	Fly ash 50%, Recycled aggregate 20%
1-6	Fly ash 50%			3-6	Fly ash 50%, Recycled aggregate 30%





(a) 7 days compressive strength



(b) 28 days compressive strength

Fig. 8. The correlation between flyash replacement rate and compressive strength

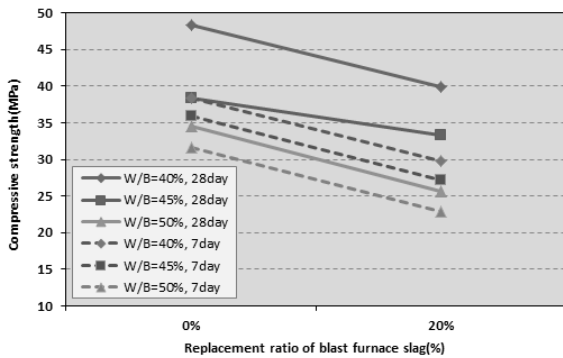


Fig. 9. The correlation between replacement rate of blast furnace slag and compressive strength

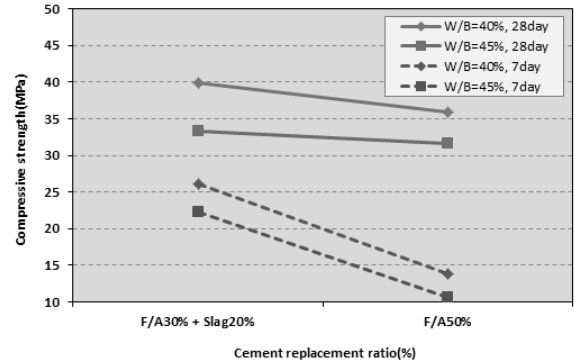


Fig. 10. Comparison of compressive strength of concrete for same replacement rate for cement

재령 7일, 28일 강도를 확인하였다.

### 4.3 압축강도 시험결과

콘크리트의 강도는 물/결합재비와 밀접한 관계를 나타내며 물/결합재비가 증가하면 압축강도는 감소하는 경향을 나타낸다. 동일한 물/결합재비에 대하여 플라이애쉬의 대체율 변화에 따른 콘크리트 공시체의 압축강도 시험 결과는 Fig. 8과 같다. 플라이애쉬 대체율이 높을수록 콘크리트의 압축강도는 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 특징은 물/결합재비가 낮을수록 그리고 재령기간이 짧을수록 분명하게 나타났다.

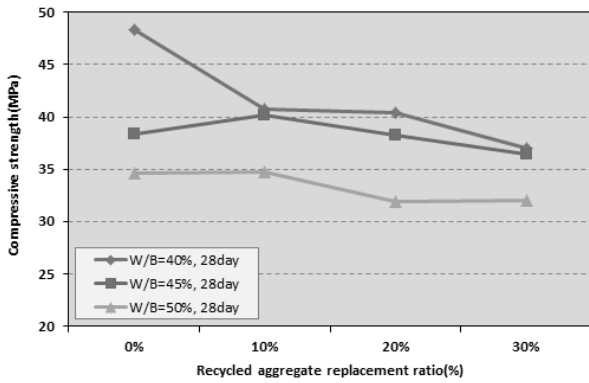
콘크리트 배합시 고로슬래그를 첨가할 경우 Fig. 9와 같이 고로슬래그 대체율이 증가할수록 재령 7일 강도와 재령 28일 강도 모두 감소하는 것으로 나타났다.

동일한 양의 시멘트를 플라이애쉬로 대체하는 경우와 고로슬래그를 플라이애쉬와 함께 대체하는 경우로 구분하여 시험결과를 분석하였다. 플라이애쉬 대체율 50%인 경

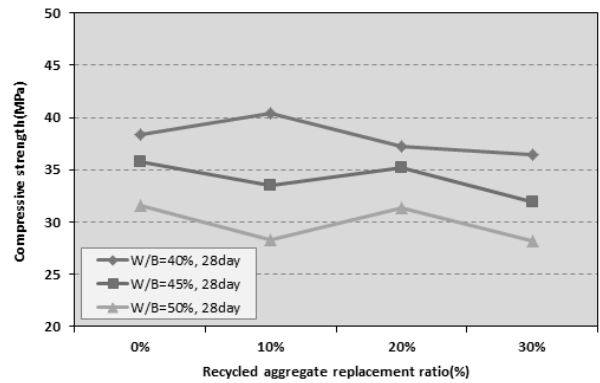
우와 플라이애쉬 30%를 고로슬래그 20%와 함께 대체한 경우의 압축강도를 비교하였다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 동일한 물/결합재비 조건에서 일정한 시멘트 양을 플라이애쉬로 대체한 경우보다 플라이애쉬와 함께 고로슬래그를 사용하여 대체한 경우가 7일 강도 측면에서 우수한 것으로 나타났으나 28일 강도 측면에서는 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다.

콘크리트 배합시 천연골재 대체재로서 순환골재를 사용할 경우 압축강도의 변화를 시험하였다. 시험결과 Fig. 11과 같이 플라이애쉬 함유량 30%와 50%에서 순환골재 함량이 0%~30%로 증가함에 따라 강도가 감소하는 경향을 나타내었다.

성토지지 목적에 적합한 콘크리트 말뚝의 재료 개발을 위해 산업부산물을 이용하여 배합한 콘크리트의 압축강도 시험을 수행한 결과 플라이애쉬 함유량이 증가함에 따라, 고로슬래그 함유량이 증가함에 따라, 순환골재의 함량이 증가함에 따라 재령 28일 강도는 감소하는 경향을 나타내었다. 시멘트 대체재로서 플라이애쉬를 단독으로 사용하는 것



(a) Fly ash 30% (28 days compressive strength)



(b) Fly ash 50% (28 days compressive strength)

Fig. 11. Compressive strength for replacement rates of recycled coarse aggregates

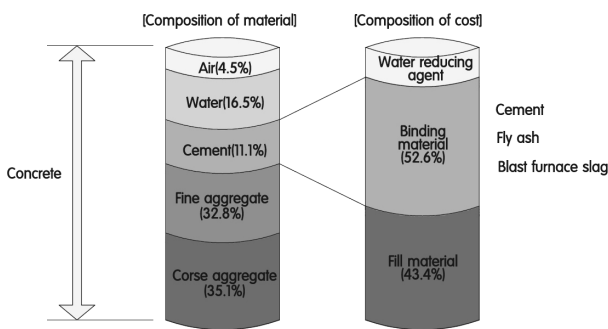


Fig. 12. Component ratio for cost of concrete (Kim, 2014)

보다는 플라이애쉬와 고로슬래그를 혼합하는 것이 압축강도 측면에서 유리하지만 그 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 또한 시멘트 대체재로서 산업부산물을 이용할 경우 시멘트의 50%이상을 대체하거나 물/결합재비가 55%를 넘을 경우는 목표로 하는 배합강도 25MPa을 만족하지 못

하는 것으로 나타났다.

#### 4.4 성토지지용 콘크리트말뚝 최적배합비 선정

Kim(2014)에 의하면 콘크리트는 대략 67.9%의 채움재와 11.1%의 결합재 등으로 구성되어있으나 콘크리트의 생산원가에 차지하는 비중은 결합재가 52.6%로 가장 크며 채움재인 골재는 43.4%를 차지하고 있다.

산업부산물을 이용한 콘크리트의 경제성을 분석하기 위하여 그림에서 제시한 콘크리트의 원가구성비를 활용하였으며 Table 15와 같이 플라이애쉬의 재료비는 시멘트의 약 45%수준이고 재생골재는 천연골재의 63%수준임을 고려하여 배합조건별 재료비를 Table 16과 같이 분류하였다.

재료비와 압축강도 시험결과(W/B=45%)를 Fig. 14에 나타내었다. 콘크리트 강도시험 결과 화살표로 표기한 플

Table 15. Comparison of material cost for general concrete and industrial by-products

Binding material			Fill material	
Cement	Fly ash	Blast furnace slag	Natural aggregate	Recycled aggregate
1.0	0.45	0.73	1.0	0.63

Table 16. Analysis of material cost for mixing conditions

No. of specimen	Binding material (%)			Fill material (%)		Cost	Remark
	Cement	Fly ash	Blast furnace slag	Natural aggregate	Recycled aggregate		
General Conc.	100	—	—	100	—	1.00	
F30R0S0	70	30	—	100	—	0.91	
F30R0S20	50	30	20	100	—	0.88	
F30R30S0	70	30	—	70	30	0.87	
F50R0S0	50	50	—	100	—	0.86	
F50R30S0	50	50	—	70	30	0.81	
F50R0S20	30	50	20	100	—	0.83	

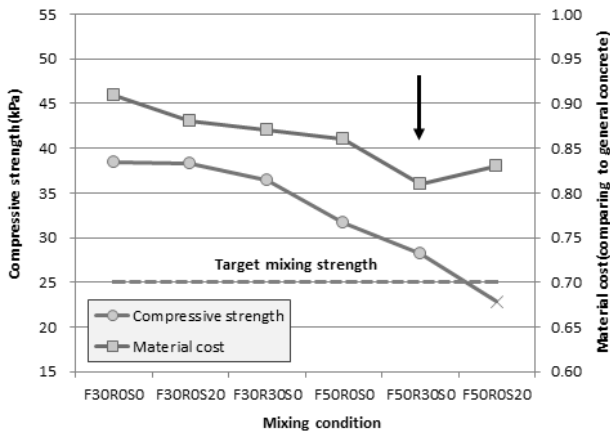


Fig. 13. Compressive strength and cost for mixing conditions

라이애쉬 50%, 순환골재 30%의 배합조건에서 성토지지말뚝이 요구하는 배합강도이상의 압축강도를 확보하면서 기존 현장타설 콘크리트 말뚝 대비 재료비가 81%로 감소하는 것으로 나타났다.

기존의 고강도 PHC말뚝을 대체하기 위해 목표로 하는 성토지지용 현장타설말뚝 콘크리트의 설계기준강도를 18MPa, 배합강도는 25MPa로 선정하였으며 압축강도 시험결과와 비용분석을 통해 강도기준을 만족하는 최적의 배합조건은 F50R30S0으로 나타났다. 결정된 최적의 배합조건을 Table 17에 나타내었으며 이 배합조건은 추후 워커빌리티, 유동성 등 콘크리트의 성질을 검토하여 최종 결정해야 할 것이다.

## 5. 성토지지용 현장타설말뚝의 효율성 검증

말뚝이 배치된 연약지반상에 성토구조물이 시공될 경

우 말뚝에는 연직지지력과 함께 측방유동압에 의한 전단력과 모멘트가 동시에 작용하게 되며 이러한 일련의 하중은 말뚝의 위치와 심도에 따라 다른 값을 나타내게 된다. 성토로 인해 작용하게 되는 복잡한 하중, 전단력 및 모멘트의 변화로부터 본 연구에서 개발한 성토지지용 현장타설말뚝의 효율성을 확인하기 위하여 Midas사에서 개발한 Soil Works를 이용한 유한요소해석을 수행하였다.

### 5.1 해석 단면

본 수치해석은 성토지지용 현장타설말뚝의 효율성을 확인하기 위하여 토목공사에 일반적으로 사용되는 PHC 말뚝(B종)을 적용한 경우와 본 연구에서 개발한 성토지지용 현장타설말뚝을 적용한 경우로 구분하여 수치해석을 수행하였다.

구조물기초설계기준(2009)에서는 말뚝재료의 허용 압축응력을 현장타설말뚝의 경우 콘크리트 압축강도의 25%로 하며 PHC말뚝의 경우 압축강도의 25%에 유효스트레싱 만큼 감소시킨 값으로 제시하였으며 Table 18과 같다.

수치해석 단면은 Fig. 14와 같이 성토고 5.0m, 연약층두께 13.5m의 단면을 선정하였으며 말뚝은 중심간격(C.T.C) 3.0m으로 횡단면에 총 11열로 배치하고 말뚝 상부에 2열의 토목섬유를 적용하였다. 토목섬유는 단위중량 6kN/m<sup>2</sup>에 인장강도 200kN/m인 PET매트를 적용하였으며 상부하중으로 궤도하중(17kPa)과 열차하중(36kPa)을 고려하여 53kPa을 적용하였다. 각 지층에 적용된 지반정수는 Table 19와 같다.

Table 17. Optimal mixing condition of concrete pile for Pile Supported Embankment

W/B (%)	W (kg)	Binding material (kg)			Air (%)	S/a (%)	Natural aggregate (kg)		Recycled aggregate (kg)		Water reducing agent (g)
		C	FA	Slag			Coarse aggregate	Fine aggregate	Coarse aggregate	fine aggregate	
45	3,12	3,47	3,4	-	4	46	13,98	11,76	5,52	4,16	55,4

Table 18. Allowable compressive strength of pile material for numerical analysis

Type	Pile material	Concrete strength (MPa)	Allowable stress (MPa)
Case 1	PHC pile (type-B)	85	13.05
Case 2	Drilled shaft supporting embankment (Aimed pile in this study)	18	4.5

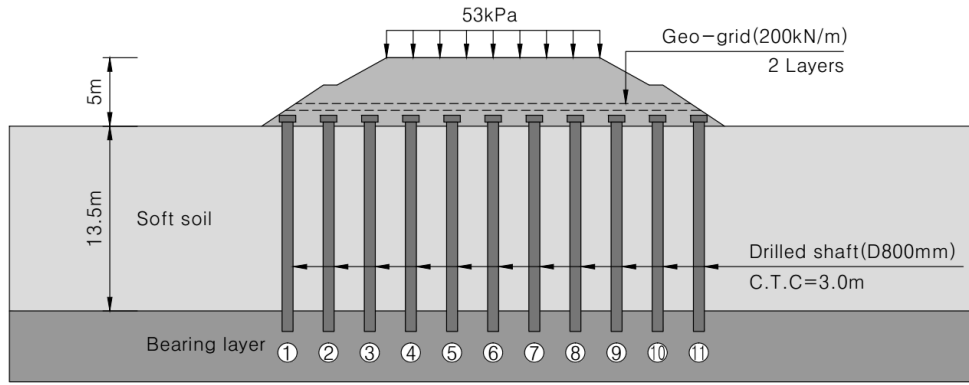


Fig. 14. Analysis section for pile material supporting railway embankment

Table 19. Soil properties applied to numerical analysis

Type	Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion (kN/m <sup>2</sup> )	Internal friction angle (degree)	Deformation modulus (kN/m <sup>2</sup> )
Embankment	19	0	35	70,000
Soft soil	17	20	0	20,000
Bearing layer	20	30	31	100,000

## 5.2 해석결과

Soilworks를 이용한 유한요소해석을 수행한 결과 성토 지지말뚝 구조의 지반변위 양상은 Fig. 15와 같이 나타났으며 말뚝에 발생하는 축력, 전단력, 모멘트 분포는 Fig. 16, Fig. 17과 같이 나타났다.

성토 중앙의 말뚝은 연직방향 하중을 지지하는 역할을 주로 수행하게 되지만 성토 외측의 말뚝은 비탈면 활동력에 의한 변위에 저항하는 역할을 함께 수행하게 되므로 최대 축력은 6번 말뚝에서 발생하였으며 최대 모멘트 및 최대 전단력은 1번 말뚝에서 발생하였다.

PHC말뚝을 적용한 경우 말뚝에 발생하는 최대 축력은 1,376.8kN, 최대 모멘트는 102.8kNm, 최대 전단력은 62.7kN

으로 나타났다.

성토지지용 현장타설말뚝을 적용한 경우 말뚝에 발생하는 최대 축력은 1,415.3kN, 최대 모멘트는 72.9kNm, 최대 전단력은 56.5kN으로 나타났다.

## 5.3 구조안정성 평가

말뚝의 휨응력은 말뚝에 작용하는 축력과 모멘트의 복합적인 작용에 의해 발생하며 이는 말뚝재료의 허용 압축응력을 넘지 않아야 한다. 구조물기초설계기준(2009)에서 제시하는 방법에 따라 산정된 PHC말뚝의 허용 압축응력 13.05MPa와 성토지지용 현장타설말뚝의 허용 압축응력 4.5MPa를 기준으로 휨응력 대비 말뚝재료의 효율성을 검토하였다.

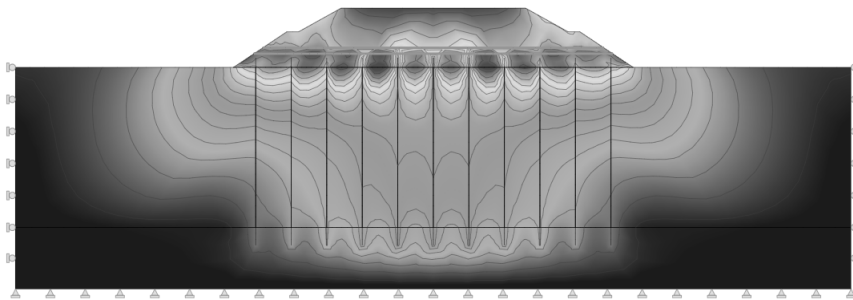


Fig. 15. Behavior of Pile Supported Embankment system

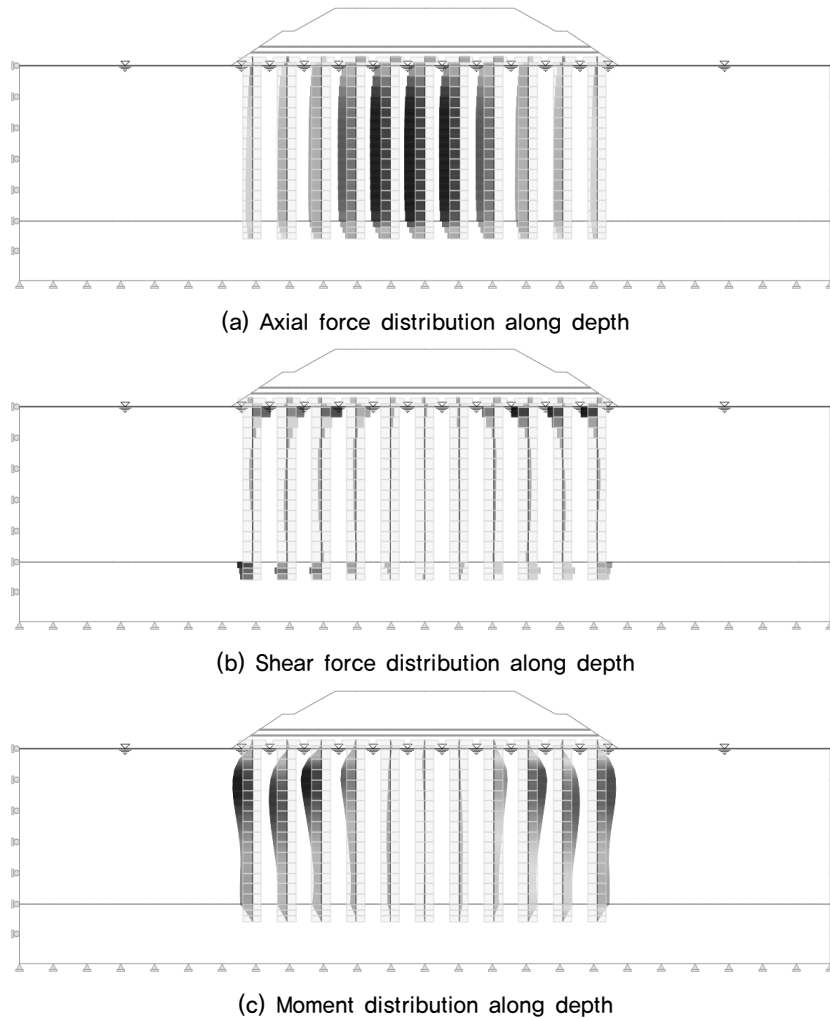


Fig. 16. Analysis results for PHC pile under embankment

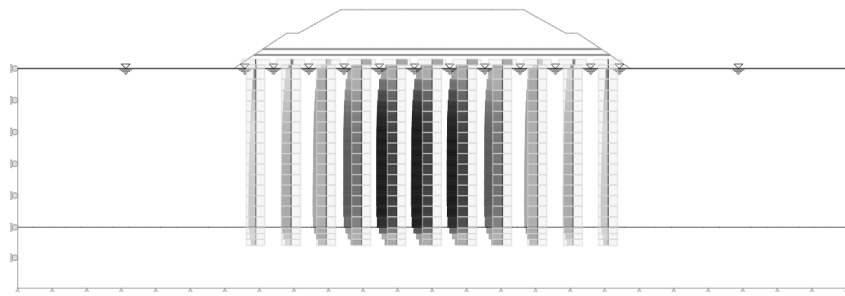
검토 결과 최대 휨응력은 4번 말뚝에서 발생하였다. 최대 휨응력의 크기는 PHC말뚝 적용시 3,818kPa로 본 연구에서 개발한 현장타설말뚝을 적용할 경우인 3,510kPa보다 크게 나타났다.

PHC말뚝(B종)의 허용 휨응력이 13,050kPa이고 본 연구에서 개발한 현장타설말뚝의 허용 휨응력이 4,500kPa이므로 허용 휨응력 대비 최대 휨응력은 각각 27.5%, 78.0%로 성토지지용 현장타설말뚝이 재료의 강도 측면에서 약 2.8배 효율적인 것으로 나타났다.

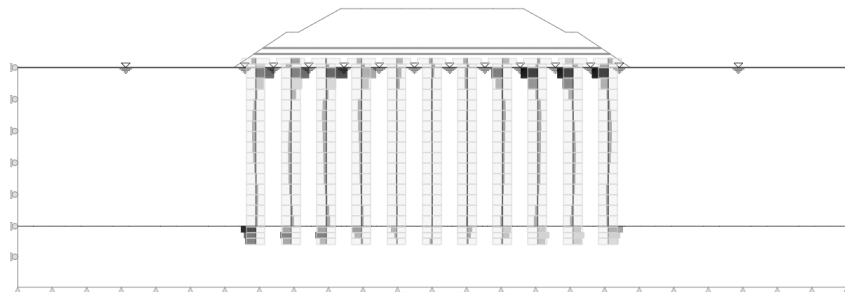
## 6. 결론

연약지반에 건설된 철도의 잔류침하를 제어할 수 있는 방법인 토목섬유로 보강된 성토지지말뚝 구조에 적용하기 위한 효율적인 말뚝재료 개발 연구를 수행하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

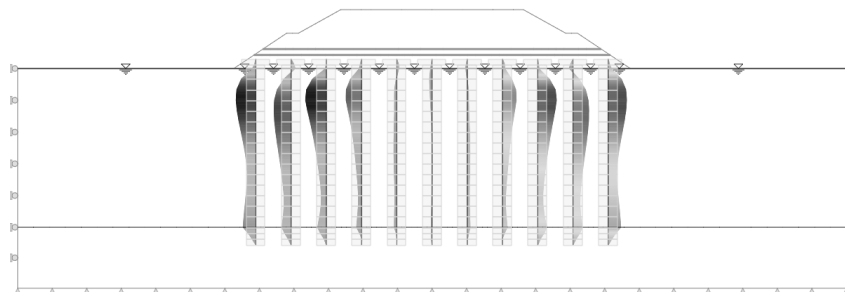
- (1) 국내외 성토지지말뚝 적용사례 조사 결과 VCC 및 CFA 말뚝 등 현장타설말뚝 형식이 성토지지를 위한 목적으로 가장 높은 빈도로 사용되었다.
- (2) 연구사례 조사 및 말뚝의 허용지지력 검토 결과 본 연구의 검토대상 단면에 대해 적용된 현장타설말뚝은 3.0m의 말뚝중심 간격을 적용할 경우 말뚝작용축력이 1,332kN, 지반의 허용지지력이 1,508kN으로 지반의 지지력 측면에서 가장 효율적인 것으로 나타났다.
- (3) 순환골재를 이용한 콘크리트의 배합설계 및 압축강도 시험을 수행한 결과 플라이애쉬 50%, 순환골재 30% 대체시 재료비가 일반 콘크리트 대비 81%로 비용 측면에서 최적의 배합조건을 갖는 것으로 나타났다.
- (4) 기존의 토목재료인 PHC말뚝(B종)과 본 연구에서 개발한 성토지지용 콘크리트 말뚝으로 구분하여 수행한 유한요소해석 방법을 이용한 수치해석 결과, 말뚝에 발생하는 부재력에 대한 성토지지용 현장타설말뚝 재



(a) Axial force distribution along depth

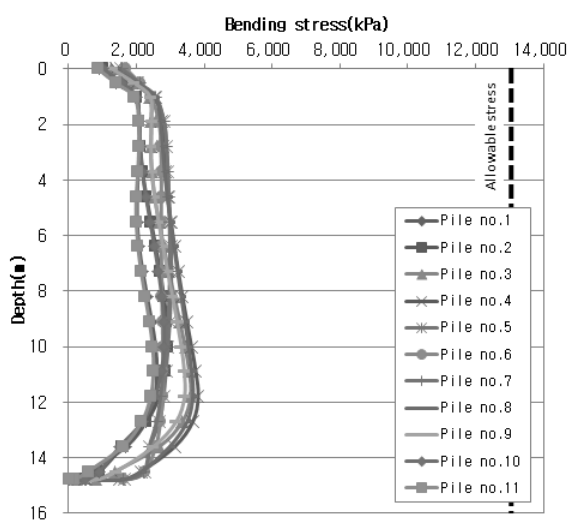


(b) Shear force distribution along depth

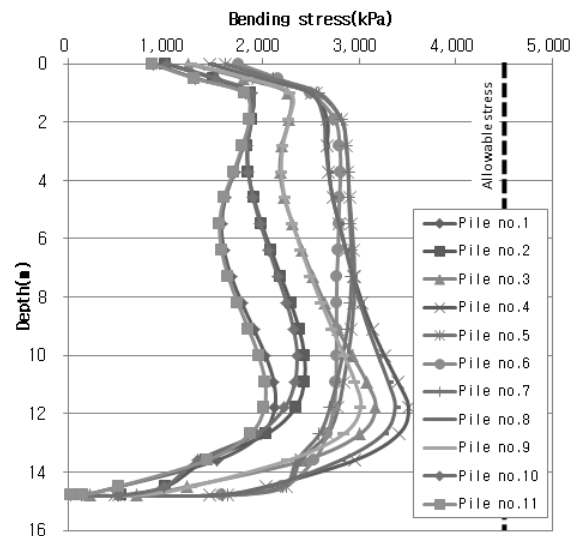


(c) Moment distribution along depth

Fig. 17. Analysis results for new concrete pile by optimal mixing condition under embankment



(a) Analysis results of PHC pile



(b) Analysis results of new concrete pile

Fig. 18. Analysis results of bending stress for pile materials

Table 20. Allowable bending stress and maximum bending stress by numerical analysis

Type	Pile material	Allowable bending stress (kPa)	Maximum bending stress (kPa)
Case 1	PHC pile(type-B)	13,050	3,818
Case 2	Drilled shaft supporting embankment (Aimed pile in this study)	4,500	3,510

료의 효율은 78.0%로 PHC말뚝 재료의 효율인 27.5%에 비해 약 2.8배 향상되는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 기존의 PHC말뚝보다 성토지지 목적으로 적합한 말뚝재료에 대한 개발을 위해 사례조사, 배합설계 및 압축강도 시험, 수치해석 등의 방법을 사용하였으며 그 결과 비용 및 압축강도 측면에서 가장 효율적인 성토지지용 현장타설말뚝을 개발하였다. 개발된 성토지지용 현장타설말뚝의 실제 적용을 위해서는 축소모형말뚝시험 및 현장 재하시험 등을 통한 추가적인 검증이 필요할 것이다.

### Acknowledgement

This research was supported by a grant(Development of settlement restrain method to substitute the bridge on soft ground, 15RTRP-B067919-03) from Railroad Technology Research Program funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean government.

### References

- Alexiew, D. and Gartung, E. (1999), "Geogrid reinforced railway embankment on piles-performance monitoring 1994-1998." *Proc. of Geosintéticos'99*, Rio de Janeiro, Brazil, 403-411.
- Canadian Geotechnical Society (2006), *Canadian Foundation Engineering Manual 4th Edition*, BiTech Publishers Ltd..
- David (2005), "The Overriding Aspects of the Design of Geosynthetic-Reinforced Pile Supported Embankments." *American Society of Civil Engineers*.
- Kim, H.-S. and Jin, C.-S. (2000), "Fundamental Properties of Concrets Using Casting Foundry Fly Ash as an Admixture", *Journal of Korea Concrete Institute*, Vol.12, No.3, pp.87-94.
- Kim, J.-J. (2014), "Field application cases of carbon reduction purposed concrete using industrial by-product", *Technical lecture for field application cases of industrial by-product and recycled coarse aggregate*, *Korean Recycled Construction Resource Institute*, pp.41-95.
- Korean Concrete Institute (2012), *Structural Concrete Design Code*, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs.
- Korean Geotechnical Society (2009), *Design criteria of structure foundation*, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs.
- Lee, J.-Y., Choi, S.-H., Kang, S.-H. and Lee, K.-M. (1999), "Influence of Fly Ash Content with Respect to the Fresh and Mechanical Properties in Concrete", *Journal of Korea Concrete Institute*, Vol.11, No.6, pp.25-33.
- Lee, K.-W. (2006), *Design method of the geosynthetic-reinforced and pile-supported embankment system to control lateral flow in soft grounds*, Ph.D Thesis, University of Chung-Ang.
- Lee, M.-W., Heo, Yol. and Shin, E.-C. (2000), "Effectiveness of Reinforcement by Geogrid & Pile in Soft Clay", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.20, No.5-C, pp.453-460.
- Lin, K.Q. and Wong, I.H. (1999), "Use of deep cement mixing to reduce settlements at bridge approaches." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 125(4), 309-320.
- Tsukada, Y., Isoda, T., and Yamanouchi, T. (1993), "Geogrid Subgrade Reinforcement and deep foundation Improvement: Yono City, Japan." *Proceedings, Geosynthetics Case Histories*, International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, Committee TC9, 158-159.