

## 경질점성토 지반에서 Trench 굴착시 지하수위 변동에 따른 가설구조체 안정해석 기법

### Stability Analysis Techniques of Bracing Structure in the Hard Clay Ground According to the Variation of the Groundwater Level at the Trench Excavation

허 창 환\* / 서 성 탁\*\* / 김 희 덕\*\*\* / 지 홍 기\*\*\*\*

Heo, Chang Hwan\* / Seo, Sung Tag\*\* / Kim, Hee Duck\*\*\* / Jee, Hong Kee\*\*\*\*

#### Abstract

In this study, lightening material weight and normalizing structure of preventing system of landslide soil-rock in trench excavation was tried with focusing in safety construction availability and workability. In other words, risk estimate, safety management method investigation, applicability of bracing material and mechanical stability of bracing structure was studied. From these result, structural stability and structural analysis of light weight bracing structure was carried out with common structural analysis program, for examining movement mechanism of bracing structure and normalization of standard. The result are summarized as following: (1) Mechanical ability of bracing members and soil pressure parameter acting to member for ensuring mechanical propriety of bracing structural and useful of new material considering soil mechanics boundary were proposed. Also theory and method of analysis of bracing structural were proposed. (2) As a result of the structure analysis of geographical profile for light pannel used FRP as hard clay mechanical characteristics(bending moment, shear force, axial force) of panel were changed according to groundwater level and it is proved that the result of mechanical analysis is within allowable stress. Thus, light pannel is available for bracing structure in trench excavation.

**Key words** : trench, landslide soil-rock, soil protect bracing structure, FRP, lightening panel

#### 요 지

본 연구에서는 트랜치 굴착시 토석붕괴 방지시설에 대한 시공상의 안전성과 시공성 그리고 작업성에 주안점을 두어 재료의 경량화 및 구조체의 표준화를 시도하였다. 즉, 위험도 사전평가와 안전관리 기법을 검토하고 흠막이 부재의 적용성과 흠막이 구조의 역학적 안정성을 검토하였으며, 이들 결과로부터 흠막이 구조체의 역학적 거동메카니즘 규명과 규격의 표준화를 위하여 경량흠막이 구조체의 구조안전성과 구조해석을 실시하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

\* 충주대학교 토목공학과 강사(chheo@yumail.ac.kr)

\*\* 경일대학교 토목공학과 강사(seosungtak@yumail.ac.kr)

\*\*\* 경일대학교 토목공학과 조교수(heeduck@bear.kyungil.ac.kr)

\*\*\*\* 영남대학교 토목공학과 교수(hkjee@yu.ac.kr)

1) 흙막이 구조의 역학적 타당성과 토질역학적 조건을 고려한 신소재 활용성을 확보하기 위하여 흙막이 부재의 역학적 성능과 부재에 작용하는 토압정수를 제시하였으며, 흙막이 구조체의 해석이론과 방법을 제시하였다. 2) 강화합성수지(FRP)를 사용한 경량판넬 부재의 지질구조가 경질점성토인 조건을 대상으로 구조해석 결과, 지하수위 조건에 따라서 판넬의 역학적(휨모멘트, 전단력, 축응력) 특성이 변화하고 있었으며, 역학적 해석결과가 허용응력 범위에 있음을 알 수 있어 이는 경량판넬이 트랜치 굴착시에 흙막이 구조로서 유용성을 알 수 있었다.

**핵심용어** : 트랜치, 토석붕괴, 흙막이 가설구조, 강화 합성수지(FRP), 경량판넬

## 1. 서 론

건설공사 현장에서 발생하는 중대 재해는 크게 추락재해, 붕괴재해 및 중기재해로 나눌 수 있는데, 그 중에서 붕괴재해는 토사붕괴, 암반붕괴, 타설 콘크리트 붕괴, 철골붕괴 등이 있다. 이들의 지하공사의 대부분이 도시주택지에 연결되는 지역에 있어 일반대중이 사용하는 장소를 굴착하여지고 있기 때문에 일반대중의 생명 신체 재산에 피해를 주는 사고의 위험이 중대하고 있다. 특히 가스 상하수도 전력 통신등의 관로가 종횡에 매설되어 있는 곳에는 이들의 지하매설물의 파손에 의해 생각지 않은 큰 사고가 되는 위험이 잠재하고 있다. 일반적으로 토사붕괴는 굴착규모가 클 경우에는 비교적 완벽한 사전준비와 붕괴방지에 필요한 설계기준과 재료의 선택이 어느 정도 표준화되어 있다. 그러나 굴착 규모(깊이와 폭)가 작고 신속한 매설이 요구되는 상수관, 하수관, 가스관 및 전력·통신선 관로 등을 도로 혹은 공공용지에 신속히 매설하고 되메우기 할 경우에는 토사의 붕괴를 막기 위한 가설공사의

구조물 설계 및 시공방법이 표준화되어 있지 않아서 건설현장에서는 토석붕락 사고 및 교통장애가 빈발하고 있다.

건설현장에서 트랜치 굴착은 흙막이 가설구조물에 의해서 진행이 되기 때문에 해체와 이동(재조립)이 용이해야 하고 가설구조물의 자중이 적어야 하는 요건이 필요로 하다. 뿐만 아니라 가설구조물 내에서는 관로 매설 등의 작업이 진행되어야 하므로 가능한 충분한 작업공간의 확보, 지하수에 의해서 부식이 되어지지 않아야하며, 상재하중 및 수압 등의 외력이나 국부적 응력집중에 충분히 저항할 수 있는 강도를 지녀야 한다.

굴착깊이가 얇고 교통흐름의 방해로 가져올수 있는 현장에 적합한 몇몇 공법들이 10여년 전부터 연구 개발되어 왔으며, 그 중에서도 고밀도 폴리에틸렌 파이프를 이용하여 굴착 없이 수평드릴로써 상수관, 가스관 등을 매설하는 연구(Mark Knight, et al., 2001), 굴착없이 관로를 매설하는 시스템으로서, 먼저 굴착하고자하는 지점의 중앙선을 따라 작은 직경의 유도공을 굴착한 뒤, 유도공을 목표로

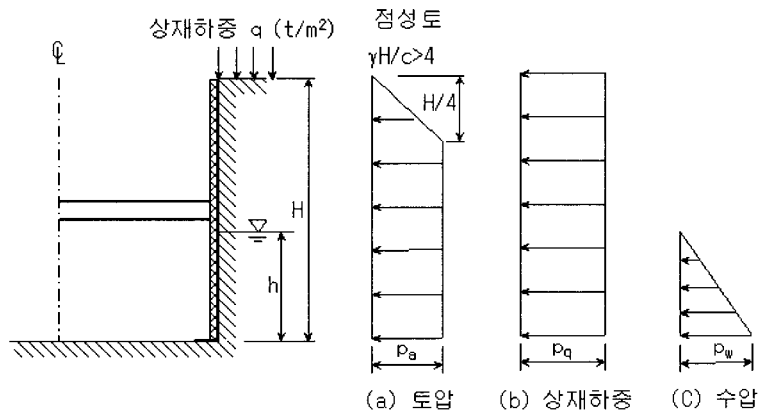


Fig. 1 버팀굴착시의 경질점성토 지반에 있어서 토압분포 모델

Table 1. 토질상수

토질상수		경질 점성토(ML)
단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma$	17.64
	$\gamma_{sat}$	20.58
	$\gamma = \gamma_{sat} - 1$	10.78
내부마찰각	$\phi$	25°
점착력(kN/m <sup>2</sup> )	C	39.20
주동토압계수	Ka	0.405
상재하중(kN/m <sup>2</sup> )	q	9.80
$\gamma H/C$		1.35(>4)

Table 2. 지하수위 변화에 따른 토질상수

토질상수		h=0	h=H/4	h=H/4	h=3H/4	h=H
경질 점성토 (CL)	$\gamma_{av}$ (kN/m <sup>2</sup> )	17.640	15.925	14.210	12.495	10.780
	$p_a$ (kN/m <sup>2</sup> )	15.876	14.239	12.789	11.250	9.702
	$p_q$ (kN/m <sup>2</sup> )	3.969	3.969	3.969	3.969	3.969
	$p_w$ (kN/m <sup>2</sup> )	0.000	7.350	14.700	22.050	29.400

하는 크기의 관경으로 확장하고, 이를 상수관, 가스관, 전력 및 통신관으로 이용하는 수평방향굴착(Horizontal directional drilling, HDD)에 관한 연구(Mohammad Najafi and Brett Gunni), 건설재해의 예방, 건설비의 절감등의 관점으로부터 건설, 채광 및 도로작업과 같은 산업분야에 로봇을 이용한 연구(Hemami), 트랜치 굴착에 있어서 가설벽의 붕괴, 무거운 물건의 개착부로 낙하, 굴착기 및 기타장비의 매몰 등의 사고를 예방하기 위해서 Computer Aided Design(CAD)을 이용한 굴착과 파이프의 배근 시스템에 관한 연구(Huang and Bernold, 1997), H형의 상호 연결된 콘크리트 블록이 전단과 압축에 저항하며, 콘크리트 블록사이의 적당한 공간은 비블록화된 배수로 역할을 하도록 하는 공법으로서, 깊은 굴착과 얇은 굴착에 사용할 수 있고, 특히 신속하고, 배수에 유리한 신속성 있는 옹벽시스템에 관한 연구(Huang, 1997) 등이 있다. 최근 선진국에서는 트랜치 굴착시 토석붕괴 방지를 위한 가설구조로서 SS 패널, 스피드 패널 및 슈퍼 패널 등이 많이 사용되고 있으며, 이들 구조의 특징은 백호, 크레인만으로 굴착, 삽입, 판매설, 되매우기, 뽑기까지 반복할 수 있고, 또한 알루미늄 합금을 사용하여 경량화를 꾀하였기 때문에 좁은 장소등에서 유리하며, 운반의 경제성도 우수하고 인력과 공기가 대폭 절감될 수 있는 특징을 가지고 있다.

본 연구에서는 건설현장에서 트랜치를 굴착할

때, 흔히 발생하기 쉬운 토석붕괴를 방지하기 위하여 섬유강화 플라스틱(Fiberglass Reinforced Plastics : FRP)과 같이 내구성, 내식성, 강도, 일시적인 충격이나 압력에 대한 복원력과 기능성이 우수하고, 경량화된 소재(제품)를 이용한 간이 흠막이 구조체를 제안하며, 경질점성토 지반에서 지하수위 변동에 따른 가설구조체 안정해석 기법에 관하여 검토한다. 즉, 먼저 기존 가설구조체 재료에 대한 문제점을 파악 및 경량흠막이 구조체를 제안한다. 그 다음 가설 구조체의 평가기법에 대한 검토 및 경량흠막이 구조체에 대한 3차원 FEM 해석을 수행하였으며 가설구조체의 안정성평가 및 고찰에 대해서도 검토하였다.

## 2. 지하수위 변동에 따른 토압분포특성

버팀굴착부에 작용하는 토압분포를 Fig. 1에 나타냈다. 경질점성토지반에서 작용하는 토압은  $p_a = 0.65 \gamma H K_a$ 로 계산되며,  $K_a$ 는 Rankine의 주동토압계수로서  $K_a = \tan^2(45 - \phi/2)$ 이다. 점성토지반에서,  $(\gamma H)/c \leq 4$ (단단한 점토지반),  $p_a = (0.2 \sim 0.4) \gamma H$  (평균값:  $0.3 \gamma H$ )을 사용했다. 여기서,  $\gamma$ 는 흙의 단위중량,  $c$ 는 비배수 점착력,  $H$ 는 흠막이 벽의 높이,  $h$ 는 지하수위이다. 또한 지하수위( $h$ )가 존재하는 경우, 위식의 흙의 단위중량( $\gamma$ )는 아래의 평균 단위중량  $\gamma_{av} = \{ \gamma(H-h) + \gamma'h \} / H$ 를 사용

한다. 여기서,  $\gamma'$  는 흙의 포화상태 단위중량( $\gamma_{sat}$ )에서 물의 단위중량( $\gamma_w$ )을 뺀 유효단위중량으로서  $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$ 이다. 또한, 상재하중에서는  $p_a = K_a q$ , 수압에서는  $p_w = \gamma_w h$ 를 사용했다.

흙막이 구조체의 뒷채움흙을 경질점성토를 채택하였으며, 토질상수는 Table 1 및 2와 같이 정하였다. 또한, 지하수위는  $h=0m$ , 구조체높이(H)에 대하여  $h=1/4H, 1/2H, 3/4H$  및  $H$  등의 5개 경우를 채택하여, 구조해석을 수행 한다. 단, 상재하중  $q$ 는 충격을 포함한 값으로 한다.

### 3. 경량흙막이 구조체의 제안 및 안정성 평가에 대한 이론

#### 3.1 경량흙막이 구조체의 제안

##### 1) 경량흙막이 구조체의 형상

본 연구에서 대상으로 하고 있는 흙막이 구조체는 Fig. 2과 같이 FRP재질의 흙막이용 경량판넬과 횡방향 강재 지지봉으로 구성되어 있다. 지지봉은 연결판과 일체로 용접되어 볼트 또는 적당한 연결장치를 사용하여 경량판넬의 중앙부에서 접합된다. 또한, 토압으로 인한 판넬하부의 전도를 방지하기 위하여 2개의 지지말뚝을 설치하여 토압으로 인한 하부 횡방향 변위를 구속하였다.

##### 2) 섬유강화 플라스틱(FRP)의 성질 및 대상구조물의 제한

구조재료용 FRP는 불포화 폴리에스텔수지와 유리섬유를 조합한 것으로 최근에 들어 고분자재료의 연구발전과 제조기술의 발달에 힘입어 초고강도의 FRP제품이 등장하고 있으며, 토목건축분야에서도 널리 사용되고 있다. FRP재료의 구조재료용으로

특징은 다음과 같다. ①내부식성이 우수하며, 가볍고 강하다. ②ION 용출이 전무하며, 접착성이 강해 타재료와의 접착이 양호하다. ③성형, 착색, 설계, 가공이 자유롭고 현지 시공이 용이하다. ④전기절연성 및 내열, 내후성이 좋아 수명이 반영구적이다. ⑤외관이 미려하여 치장이 불필요하다. ⑥하자발생 시 그 수리가 간단하고 흔적이 거의 남지 않는다. FRP와 각종 구조재료의 역학적 성질을 Table 3에 나타내었다. FRP재료(고급유리직포)는 구조용강재(SS41)에 비교하여 인장강도는 78.6%이지만, 비중은 약23%에 불과하다.

본 연구에서 대상으로 하는 경량 흙막이 구조체를 구성하고 있는 부재의 제한과 단면치수는 Fig. 3에 나타냈다. 경량판넬의 높이  $H=3m$ , 경량판넬의 전체 두께  $t=15cm$ , 상·하부판넬의 두께  $t_u=t_l=1cm$ , 리브의 두께  $trib=0.5cm$ , 리브의 높이  $hr=13cm$ , 리브의 간격  $ar=20cm$  로 한다. 또한 지지봉의 단면제원은, 지지봉단면의 직경  $\phi=100mm$ , 두께  $t=10mm$ 의 원형 파이프, 단면적  $A=28.27cm^2$ , 단면 2차모멘트  $I=289.3cm^4$ , 회전반경  $r=3.20cm$ , 지지봉의 재질이 SM490, 지지조건 양단단지 ( $K=1$ ), 기둥길이  $L=2.7m$  (최우측 경량판넬 0.3m), 설계력  $M_d = 0.294kN\cdot m$ ,  $P_d = 196kN$  로 한다.

#### 3.2 안정성 평가에 대한 이론

흙막이 구조체의 안전도 평가과정을 Fig. 4에 나타냈다. 첫째, 흙막이 구조체에 작용하는 외력 즉 토압계수, 굴착깊이, 지하수위, 상재하중을 산정한다. 둘째, 패널, 지지봉의 형상, 재료의 역학적특성 등 재료특성에 대해서 검토한다. 셋째, 외력과 재료를 고려한 흙막이 구조체의 모델링 및 구조해석을

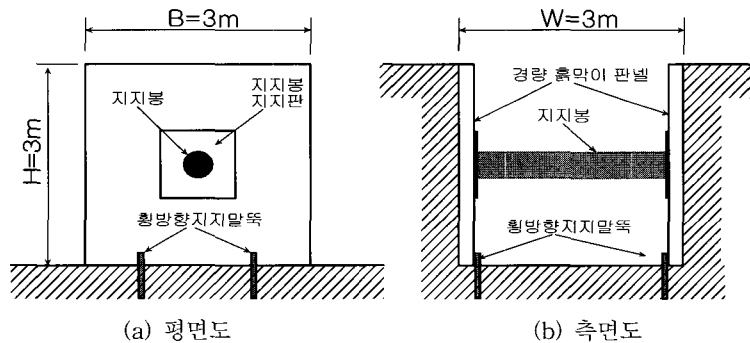
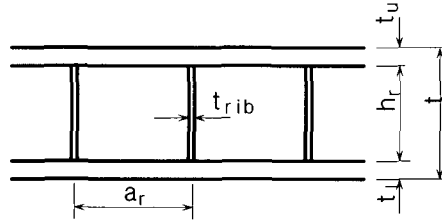


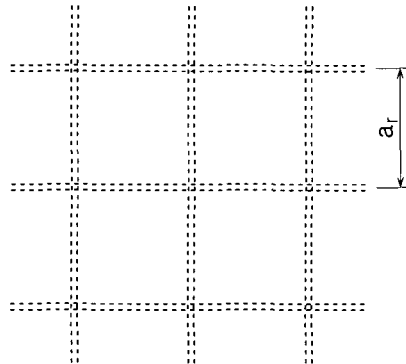
Fig. 2 경량 흙막이구조체의 단면형상

Table 3. FRP와 각종 구조재료의 기계적 성질

재료		인장강도	압축강도	휨강도	전단강도	탄성계수	샤르피	비중	용도
						충격계수			
		(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )		
금속 재료	구조용강 SS41	411.6	-	-	-	2095.800	14,7090	7.8	주구 조체
	알루미늄합금 24S-T	4609.6	-	-	274.4	68,600	1960~2842	2.8	
	알루미늄합금 52S-O	186.2	-	-	124.46	68,600	8134	2.8	
FRP	고급유리직포	323.4	274.4	490	78.4~98	19,600	1274	1.8	부구 조체
	로빙직포	267.54	163.66	230.3	159.74	19,600	-	1.8	
	평직직포	196	147	254.8	78.4~98	15,680	980	1.7	
	유리매트	98	98	14~18	78.4~98	15,680	980	1.6	
플라 스틱	불포화 폴리에스테르	40.18	154.84	112.7	64.68	3724	30.38	1.12	구조
	경질염호비닐수지	58.8	98	98	39.2	2940	29.4	1.4	부속
	아크릴수지	70.56	98	98	43.12	2744	29.4	1.4	부분



(a) 단면도



(b) 평면도

Fig. 3 경량판넬의 세부형상

수행한다. 넷째, 각종 외력에 의한 토류판에 작용하는 단면력을 해석하며, 이를 토대로 경량판넬의 안전도에 대해서 평가한다.

1) 2축 휨에 대한 안전성 평가

2축 휨을 받는 단면의 휨응력은 각 축에 대한 휨응력의 중첩으로 생각할 수 있으며, 안전조건은 아래와 같다.

$$f_b = \frac{M_{xx}}{I_x} y + \frac{M_{yy}}{I_y} x \leq f_{ba} \quad (1)$$

구조해석 결과 x 및 y방향의 최대휨모멘트는 단면 중앙에서 동시에 발생하고, 대상 단면의 2차모멘트 및 상·하연 거리가 x 및 y축에서 동일하므로 상기 식을 아래와 같이 변환할 수 있다.

$$(f_b \frac{I}{y} = M) = M_{xx} + M_{yy} \leq (f_{ba} \frac{I}{y} = M_a) \quad (2)$$

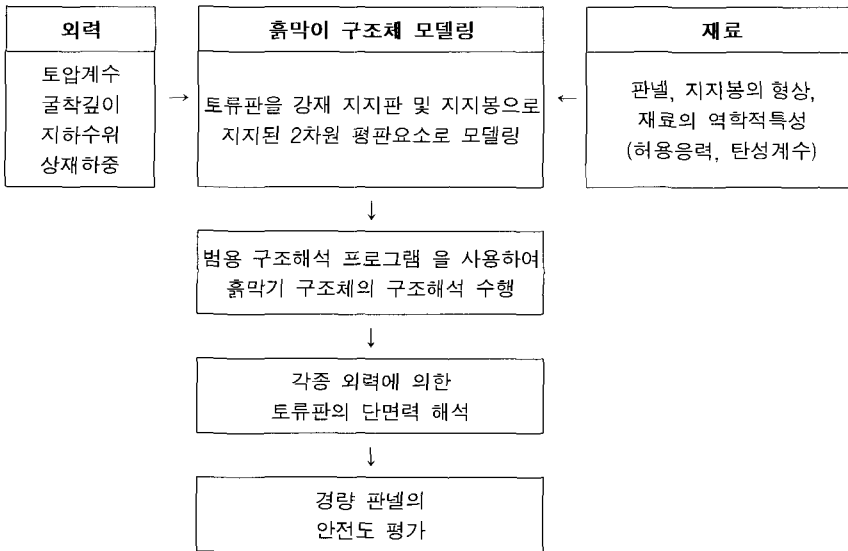


Fig. 4 가설흠막이공 구조해석 및 안전도평가 흐름도

따라서 본 연구에서는 힘에 대한 안전율을 아래와 같이 정의한다.

$$F.S.M = \frac{M_a}{M_{xx} + M_{yy}} \geq 1.0$$

### 2) 2축 전단에 대한 안전성 평가

동일한 방법으로 전단에 대해서도 아래와 같은 안전율을 정의할 수 있다.

$$F.S.v = \frac{V_a}{V_{xx} + V_{yy}} \leq 1.0 \quad (3)$$

한편 전단의 경우는 동일한 위치에서 x축과 y축에 대한 최대전단력이 발생하지 않았으나 안전측으로 위치에 관계없이 최대전단력으 절대값을 합산하여 안전계수를 구하였으며, x축에 비해서 y축의 응력이 상대적으로 작기 때문에 간략하게 중첩하는 응력을 산술합으로 산정하였다.

### 3) 경량판넬의 횡변위 고찰

판넬의 응력(휨응력, 전단응력)도에 여유가 있어도, 그 변위량이 크게되면 판넬뒤틀림의 지반침하가 생기며, 주변의 건축물이나 도로 등의 시설에 영향을 미치므로 변위량(사용성)에 대해서 검토할 필요성이 있다. 구조해석의 모델링에서 판넬을 두께 5cm의 충실판으로 하여 단면력을 산정함으로 실제

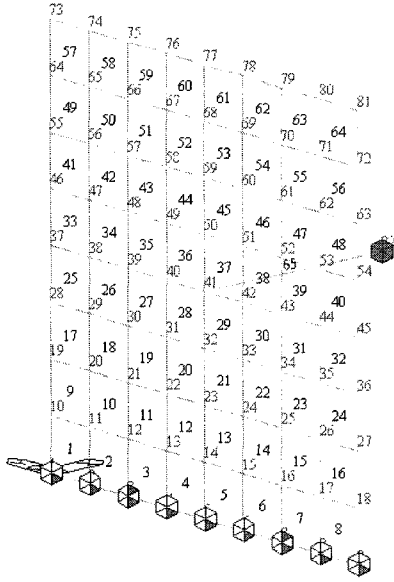
변위는 단면 2차모멘트의 비를 사용하여 다음과 같이 환산하여 평가한다.

$$\delta_o = \frac{I_{model}}{I_{actual}} \delta_x = \frac{1041.7}{10274} \delta_x = \frac{\delta_x}{9.86} \quad (4)$$

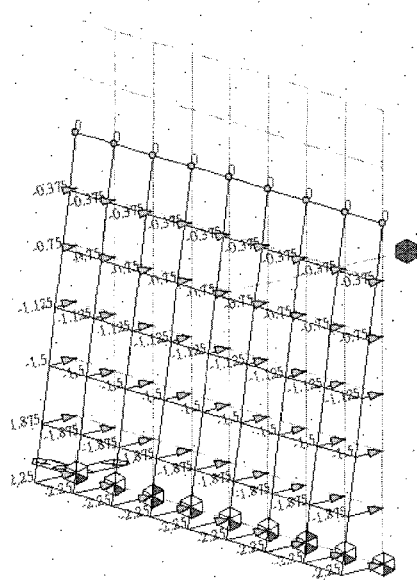
## 4. 실제 흠막이 구조체의 적용분석

### 4.1 대상모델

본 연구에서는 범용구조해석 프로그램인 MIDAS을 사용하였으며, 흠막이 구조체를 8×8개의 판(plate) 요소로 분할하여 Fig. 5(a)와 같이 모델링하였다. 여기서, 설계과정상의 효율성을 제고하기 위하여 본 구조계산시의 판의 단면은 실제 형상과는 다른 두께 50mm 충실판으로 모델링하였다. 실제와 다른 변형에 대한 문제는 후처리과정에서 실제단면의 단면 2차모멘트를 사용하여 환산하는 것으로 대처하기로 한다. 지지봉은 평판 중앙 절점인 41 절점에 연결하였으며, 다른 단(절점 82)은 모든 변위를 구속하였다. 흠막이 구조체 하부에서 모든 절점(절점 1-9)의 Z 방향의 변위를 구속하였고, 절점 3과 7에서는 X방향의 변위를 구속하였다. 외력으로서 진술한 상재하중, 토압 및 수압을 각 해석 case별로 달리 입력하여 판요소의 단위길이당 휨모멘트, 전단력, 축방향력 및 반력을 구하였다. Fig. 5(b)는 흠막이 구조체의 해석모델과 수압에 의한 외력의 예로서 지하수위  $h = \frac{1}{2}H$ 에 대한 것이다.



(a) 흠막이 구조체 모델링



(b) 수압 (지하수위  $h=3/4H$ )

Fig. 5 흠막이 구조체의 모델링 및 외력

#### 4.2 판이론

구조해석 모델에 사용된 판 요소는 평면 shell에 해당하는 요소로서, 다음 그림과 같이 평면응력 요소와 평판휨 요소의 조합에 의해 구성된다. 면 내의 두 변위 자유도에 대한 강성 항들은 평면응력 요소의 구성과 같은 방법을 사용하고, 면 외의 변위 자유도와 휨에 대한 두 자유도는 평판휨 요소의 구성 방법을 사용한다. 여기서는 휨을 받는 판을 모델링하기 위한 평판휨 요소에 대해서 기술한다. 전단 변형을 갖는 판 이론 (Reissner 혹은 Mindlin 판 이론) 은 다음과 같다. 판의 변형되지 않은 중립면에 대한 법선 상의 지점들은 변형 후에, 직선상에 있지만 변형된 중립면에 대해 반드시 수직은 아니다. 이 가정을 사용하면, 요소 내의 임의의 지점  $x, y, z$ 에서의 변위 성분은 다음과 같다.

$$u = z\beta_x(x, y), v = z\beta_y(x, y), w = \omega(x, y) \quad (5)$$

여기서,  $\beta_x, \beta_y$ 는 각각  $x-z$ 와  $y-z$ 평면에서 변형되지 않은 중립면에 대한 법선의 회전각이다.

전단변형을 무시하는 kirchoff 판 이론에서는,

$$\beta_x = \frac{\partial w}{\partial x}, \beta_y = \frac{\partial w}{\partial y} \text{ 이다.}$$

선형 휨 변형도의 식은 다음과 같다.

$$\underline{\epsilon}_b = z \underline{k} = z \begin{bmatrix} \frac{\partial \beta_x}{\partial x} \\ \frac{\partial \beta_y}{\partial y} \\ \frac{\partial \beta_x}{\partial y} + \frac{\partial \beta_y}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서,  $z$ 는 중립면으로부터의 거리이고,  $\underline{k}$ 곡률의 벡터이다. 그리고 전단 변형도에 대한 식은 다음과 같다.

$$\underline{\gamma} = \begin{bmatrix} \frac{\partial w}{\partial x} + \beta_x \\ \frac{\partial w}{\partial y} + \beta_y \end{bmatrix} \quad (7)$$

판의 응력도 상태는 plane stress 요소와 같은 것으로 가정된다. 따라서 등방성 요소에 대해 요소의 휨 응력도는 다음과 같다

$$\underline{\sigma}_b = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = z D \underline{k} = z \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu^2)/2 \end{bmatrix} \underline{k} \quad (8)$$

그리고 전단 응력도는 다음과 같다.

$$\sigma_s = \begin{bmatrix} \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{bmatrix} = E\gamma = \frac{E}{2(1+\nu)} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \gamma \quad (9)$$

이제 변형 에너지는 다음과 같이 구해진다.

$$U = U_b + U_s = \frac{1}{2} \int_A k^T D_b k dA + \frac{1}{2} \int_A \bar{\gamma}^T D_s \gamma dA \quad (10)$$

여기서 등방성 재료에 대해  $D_b$ 와  $D_s$ 는 다음과 같다.

$$D_b = \int_{-h/2}^{h/2} D_z^2 dz = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu^2)/2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$D_s = \int_{-h/2}^{h/2} Edz = \frac{kEh}{2(1+\nu)} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서,  $k$ 는 전단 응력도의 불-균일성을 고려하기 위한 전단 보정 계수로써, 보통 5/6으로 간주된다.

그러면, 정의에 의해 휨 모멘트  $M$ 과 전단력  $Q$ 는 두께에 대한 응력도의 적분에 의해 다음과 같이 얻어진다.

$$M = \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma z dz = D_b k \quad (13)$$

$$Q = \begin{bmatrix} Q_x \\ Q_y \end{bmatrix} = k \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_s dz = D_s \gamma \quad (14)$$

## 5. 안정성 평가 및 고찰

### 5.1 경량판넬의 단면상수 및 내하력

상기 판이론에 의해 해석된 판넬의 단면력은 단위길이당 단면력으로 주어지므로, 본 연구에서 채용된 판넬의 단위길이당 단면상수를 아래와 같이 구한다. 여기서, FRP 리브의 면적은 계산의 편의를 도모하기 위하여 아래 Fig. 6과 같이 등가단면적으로 환산하였다.

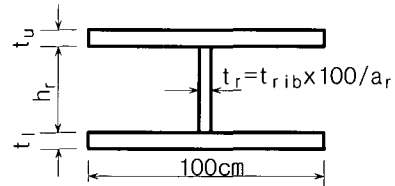


Fig. 6 단위길이당 리브의 등가단면적

단위길이당 단면2차모멘트는  $I_{yy} = I_{xx} = 10,274 \text{ cm}^4/\text{m}$ , 단위길이당 단면계수는  $S_{yy} = S_{xx} = 1,370 \text{ cm}^3/\text{m}$ , 단위길이당 허용휨모멘트는  $M_a = (M_{ya} = M_{xa}) = f_b a S_{yy} = 134.26 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}$ , 단위길이당 복부의 면적은  $A_w = t_r \times h_r = 30 \text{ cm}^2/\text{m}$ , 단위길이당 허

Table 4. 경질점성토 지반에서 지하수위 변화에 따른 경량판넬의 구조해석 결과

	h=0	h=1/4H	h=1/2H	h=3/4H	h=H
$M_{xx}(\text{kNm}/\text{m})$	-49.294	-46.06	-46.158	-51.548	-65.562
$M_{yy}(\text{kNm}/\text{m})$	-46.648	-43.414	-42.434	-45.668	-58.506
$M_a(\text{kNm}/\text{m})$	13.7				
F.S.M	1.40	1.5	1.52	1.38	1.08
$V_{xx}(\text{kN}/\text{m})$	52.234	48.706	48.706	54.488	69.384
	-52.234	-48.706	-48.706	-54.488	-69.384
$V_{yy}(\text{kN}/\text{m})$	49.196	46.256	47.53	53.41	67.522
	-52.43	-48.706	-47.334	-50.862	-65.366
$V_a(\text{kN}/\text{m})$	15				
F.S.M	1.4	1.51	1.52	1.36	1.07
$\delta_x(\text{m})$	0.127	0.118	0.108	0.108	0.14
$\delta_{xle}(\text{m})$	0.013	0.012	0.011	0.011	0.014
$R_{pile}(\text{kN})$	-0.176	-3.606	-11.152	-18.728	-22.207



용 전단력은  $V_a (=V_{ya}=V_{xa}) = \tau aAw = 147\text{kN/m}$  로 계산된다.

### 5.2 휨에 대한 안정성 평가

해석결과, 평면 모멘트도로부터  $M_{xx}$ 는 외력이 횡적으로 변화없는 좌우대칭이므로 지하수위에 관계없이 좌우대칭인 단면력을 보이고 있음을 알 수 있었고,  $M_{yy}$ 는 횡방향 지지말뚝의 구속효과에 의해 지하수위가 높아질수록 하부의 모멘트가 (-)에서 (+)로 전환되어 증가하고 있음을 확인했다 (Fig.7).

또한, 해석된 결과에서 도출한 단위길이당 최대 모멘트로부터 휨에 대한 안전율을 구하여 Table 3 및 Fig.8에 정리하였다. x 및 y방향의 최대 모멘트의 발생 위치는 평판의 중심이며, 지하수위의 위치  $h=0$  일 경우, 순수한 상재하중과 토압에 대한 휨모멘트  $M_{xx}$ ,  $M_{yy}$ 는  $47.92\text{kN}\cdot\text{m/m}$ 가 발생되며, 그 후 지하수위(h)가 1.5m 상승할 때까지 조금씩 감소하는 경향을 나타내지만, 다시 1.5m 부터 휨모멘트가 급격히 증가한다. 이것은, 지하수위 1.5m 지점에서 횡방향 지지말뚝에 의한 변위가 구속되었기 때문이다. 그러나, 최대 휨모멘트  $M_{xx}$ ,  $M_{yy}$ 는 지하수위(h)가 3m에서 발생되며, 크기는 각각  $62.72\text{kN}\cdot\text{m/m}$  및  $57.72\text{kN}\cdot\text{m/m}$  이다. 또한, 안전율은 지하수위가 상승할수록 감소하는 경향을 나타내지만, 전체 해석Case에서 안전계수가 모두 1.0을 초과함을 알 수 있다. 최저값으로서는 지하수위가 3m일 때, F.S.M = 1.12이다.

### 5.3 전단에 대한 안정성 평가

해석결과, 평면 전단력도로부터  $V_{xx}$  및  $V_{yy}$ 는 각각 x축 및 y축에 대하여 역대칭적인 관계를 가짐을 알 수 있었으며, 최대값의 발생위치는  $V_{xx}$ 의 경우 지하수위의 변화와 관계없이 중앙 단면( $x=0$ )의  $y=\pm 1/4B$ ,  $V_{yy}$ 의 경우 최대값 발생위치는 중앙단면( $y=0$ )의  $x=\pm 1/4H$ 에서 발생하고 있음을 확인했다(Fig. 9). 전단의 경우는 동일한 위치에서 x축과 y축에 대한 최대전단력이 발생하지 않았으나, 안전측으로 위치에 관계없이 최대전단력의 절대값을 합산하여 안전계수를 구하여 Table 3 및 Fig. 10에 정리하였다. 전단력  $V_{xx}$  및  $V_{yy}$ 의 절대값은 모멘트의 경우와 동일하게 지하수위가  $h=1/2H$  부터 H에 이르는 동안 급격히 증가하여, 최대 전단력

$V_{xx}$ ,  $V_{yy}$ 는 지하수위(h)가 3.0m에서 발생되며, 크기는 각각  $66.15\text{kN/m}$  및  $65.07\text{kN/m}$ 을 나타냈다. 안전율의 최저값은 휨모멘트와 동일하게 CL의 지하수위 3m일 때, 1.12로 나타났다. 위치에 관계없이 최대전단력의 절대값을 합산한 점을 고려할 때, 실제로는 이 값을 상당히 상회하는 값이 될 것이라 유추할 수 있다.

### 5.4 경량판넬의 횡변위 고찰

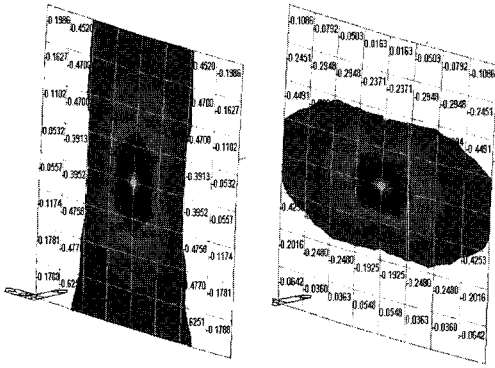
FRP의 탄성계수는 강재의 약 1/10 정도인  $1.96 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 이므로 강재에 비해 변위가 크게 나타날 것으로 판단되었으나, 하부 전도방지용 말뚝을 설치한 영향으로 상부변위가 상당히 줄어들었다. 구조용 FRP에 대한 허용처짐량에 대한 규정은 아직 제정된 것이 없으나, 환산한 변위의 최대값은 상부에서 1.45cm로서,  $\delta_{\max}/H = 1/207$  정도인 점을 미루어 유연성이 풍부한 FRP의 특성상 무리가 없는 것으로 사료되며, 전체 구조물에도 큰 영향이 미치지 않을 것으로 판단된다. Fig. 11에서 지하수위의 위치  $h=0$  일 경우, 순수한 상재하중과 토압에 대한 판넬의 변위는 1.5cm 가 발생하며, 그 후 지하수위(h)가 1.5m상승할 때까지 선형으로 감소하는 경향을 나타내며, 다시  $h=3/4H$ 부터 수직적으로 상승한다. 최대 변위는  $h=0$  및  $h=3m$ 에서 발생하며, 크기는 0.143cm이다.

### 5.5 횡방향지지말뚝의 지지력

경량판넬의 면내방향으로 설치된 2개의 지지말뚝에 대하여 요구되는 횡방향지지력을 평가하기 위하여 절점 3, 7의 반력( $R_x$ )을 구했다(Fig. 12). 지하수위가  $h=0$ 일 때 지지력  $R_{\text{pile}}=0$ 이며, 그 후 지하수위가 증가할수록 말뚝의 지지력은 증가하여, 지하수위  $h=3m$ 에서 최대지지력  $R_{\text{pile}}=-22.21\text{kN}$ 을 나타냈다. 그러므로, 횡방향 지지말뚝은 안전율을 고려하여 29.4kN이상의 지지력을 가지도록 설계하는 것이 필요하다.

### 5.6 지지봉의 안정성 검토

상기 경량판넬의 2차원 평판해석 결과로부터 각 해석 Case별로 지지봉에 작용하는 축방향력과 휨모멘트를 Table 5 및 Fig. 13에 정리하였으며, 지하수위의 위치  $h=0$  일 경우, 순수한 상재하중과 토압에 대한 지지봉의 축방향력은  $-137.69\text{kN}$ 가 발생되



(a) Mxx모멘트 (b) Myy모멘트  
Fig. 7 평면 모멘트도(Mxx, h=1/4)

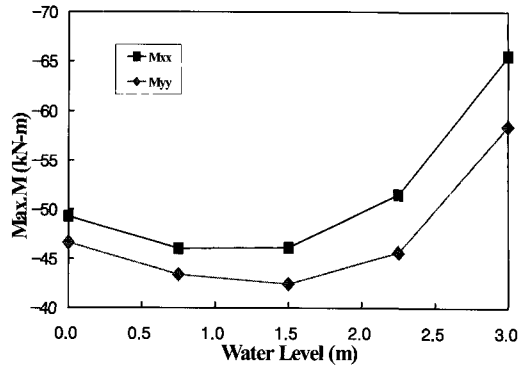
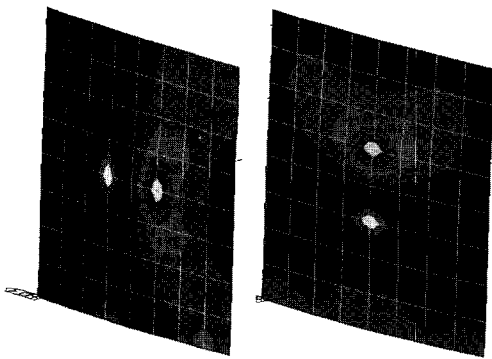


Fig. 8 지하수위의 변화에 따른 M의 변화



(a) Vxx모멘트 (b) Vyy모멘트  
Fig. 9 평면 모멘트도(Vxx, h=1/4H)

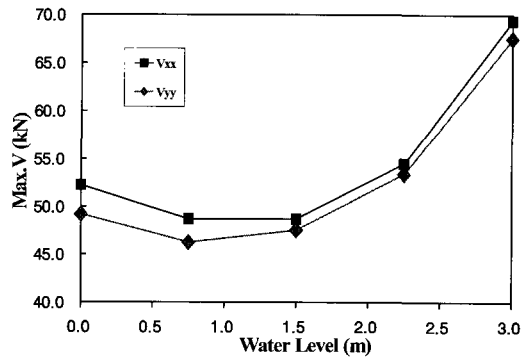


Fig. 10 지하수위의 변화에 따른 V의 변화

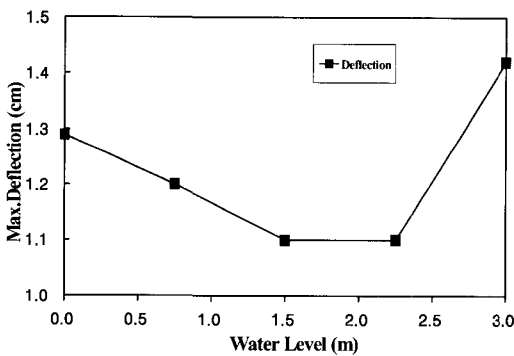


Fig. 11 지하수위 변화에 따른 최대변위의 변화

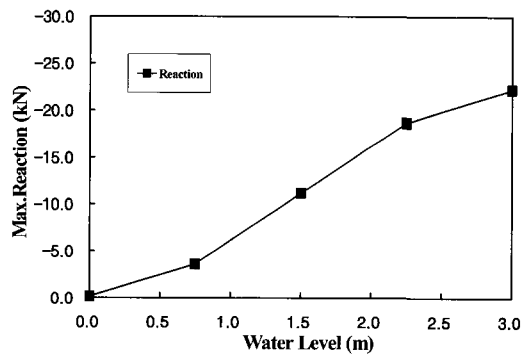


Fig. 12 지하수위 변화에 따른 지지말뚝의 반력 변화

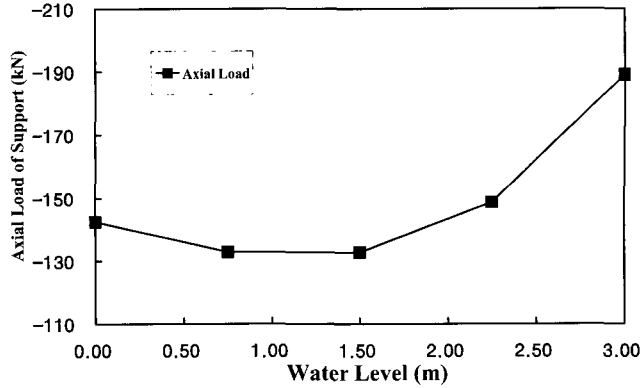


Fig. 13 지하수위의 변화에 따른 지지봉의 축하중변화

Table 5. 지지봉에 해석결과

지하수위	h=0	h=1/4H	h=1/2H	h=3/4H	h=H
Rx(kN)	-142.49	-132.89	-132.79	-148.67	-189.04
My(kNm)	0.272	0.248	0.208	0.182	0.246

며, 그 후 지하수위의 상승에 따라 조금씩 감소하는 경향을 보이며, 지하수위  $h=1/2H$ 을 기점으로 급격히 증가한다. 축방향력과 모멘트의 최고치는 각각  $-180.22\text{kN}$  및  $0.319\text{kN}\cdot\text{m}$ 을 보였다.

## 6. 결 론

지금까지 트렌치 굴착시 굴착지반의 토질조건과 지하수위의 변동에 따른 토석붕괴 방지를 위한 가설구조물의 시공상 안전성과 편이성 그리고 작업성에 주안점을 두어 재료의 경량화 및 구조체의 표준화를 시도하였다. 즉, 흙막이 구조체의 역학적 거동 매카니즘 규명과 규격의 표준화를 위해서 경량흙막이 구조체의 구조안전성과 구조해석을 범용구조해석 프로그램으로 수행하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 토석붕괴 방지시설에 사용할 수 있는 기존부재의 대체재료로서 불포화 폴리에스텔 수지와 유리섬유를 조합한 강화합성수지(FRP)의 역학적 성능을 검토하고 그 결과로부터 초경량재로서의 성형성과 부재로서의 사용성을 제시하였다.
- 2) 흙막이 구조의 역학적 타당성과 토질역학적 조건을 고려한 신소재 활용성을 확보하기 위하여 흙막이 부재의 역학적 성능과 부재에 작용하는 토압정수를 제시하였으며, 흙막이

구조체의 해석이론과 방법을 제시하였다.

- 3) 흙막이 구조체의 경량화를 위한 강화합성수지(FRP)를 대상으로 흙막이판 구조체의 형상과 제원 및 경량 재료의 재료역학적 우수성을 제시하였다.
- 4) 흙막이 판에 작용하는 토질정수와 토압분포를 검토하고 부재의 단면해석과 구조체의 안정성을 범용프로그램에 의해서 수행하여 부재의 각 부에 대한 안정성을 확인할 수 있는 해석결과를 제시하였다.
- 5) 강화합성수지(FRP)를 사용한 경량판넬 부재의 지질구조가 경질점성토를 대상으로 구조해석 결과, 지하수위 조건에 따라서 판넬의 역학적(휨모멘트, 전단력, 축응력)특성이 변화하고 있었으며, 역학적 해석결과가 허용응력 범위에 있음을 알 수 있었으며, 이는 경량판넬이 트렌치 굴착시에 흙막이 구조로서 유용성이 확인되었다.

## 감사의 글

본 연구는 한국산업안전공단의 2002년 사업의 일환으로서 본 연구를 가능하게 한 지원에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 가설구조물위원회(1997) 토압을 받는 구조물의 설계와 시공, 탐구문화사.
- 건설교통부(2001) 도로교설계기준 해설(하부구조편), 건설교통부.
- 마이더스아이티(2001) 마이더스로 배우는 구조역학.
- 하수도가설구조물설계연구회(1994) 하수도공사 사설구조물의 설계법과 계산례, 탐구문화사.
- Addenbrooke, T. I., Potts, D. M. and Dabee, B.(2000) Displacement Flexibility Number for Multipropped Retaining Wall Design, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. pp. 718-726.
- Charles, W.W. and Lings, M. L.(1996) Effects of Modeling Soil Nonlinearity and Wall Installation on Back-Analysis of Deep Excavation in Stiff Clay, *Journal of Geotechnical Engineering*. pp. 889-905.
- Hemami, A.(1995) Fundamental Analysis of Robotic Excavation, *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 8, No. 4, pp. 175-179.
- Huang, T. K.(1997) Mechanical Behavior of Concrete Block Retaining Wall, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. pp. 197-203.
- Huang, X. and Bernold, L. E.(1997) CAD-Integrated Excavation and Pipe Laying, *Journal of Construction Engineering and Management*. pp. 318-323.
- Knight M., et al.(2001) Excavation of Surface Installed Pipeline, *Journal of Infrastructure Systems*, pp. 23-129.
- Leung C.F., Chow Y. K., and Shen R. F.(2000) Behavior of Pile Subject to Excavation-Induced Soil Movement, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. pp. 947-954.
- Li, Y., Buchberger, S. G. and Sansalone, J. J.(1999) Variably Saturated Flow in Storm-Water Partial Exfiltration Trench", *Journal of Environmental Engineering*. pp. 556-565.
- Ou, C. Y. et. al.(1996) Analysis of Deep Excavation with Column Type of Ground Improvement in Soft Clay, *Journal of Geotechnical Engineering*. pp. 709-716.
- Poulos, H. G. and Chen, L. T.(1997) Pile Response Due to Exacvation-Induced Lateral Soil Movement, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. pp. 94-99.