

# 수치해석기법을 이용한 개착식 지반굴착공사의 영향인자 분석

## Analysis on Impact Factors of Open-cut Type Excavation Work using Numerical Analysis Method

성주현<sup>1</sup>, 김용수<sup>2\*</sup>, 신병길<sup>3</sup>  
Joo-Hyun, Seong<sup>1</sup>, Yong-Soo, Kim<sup>2\*</sup>, Byoung-Gil, Shin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Non Member, Senior Researcher, Korea Infrastructure Safety & Technology corporation, 315, Goyangdaero, Iisanseo-Gu, Goyang-City, Gyeonggi-Do, 411-758, Republic of Korea

<sup>2</sup>Member, Chief Researcher, Korea Infrastructure Safety & Technology corporation, 315, Goyangdaero, Iisanseo-Gu, Goyang-City, Gyeonggi-Do, 411-758, Republic of Korea

<sup>3</sup>Non Member, Researcher, Korea Infrastructure Safety & Technology corporation, 315, Goyangdaero, Iisanseo-Gu, Goyang-City, Gyeonggi-Do, 411-758, Republic of Korea

### ABSTRACT

In this study, an analysis about the causes of different types of excavation on accidents is required in order to prevent the frequently occurring accidents related to the earth retaining structure and excavation. Also, analysis of influence was performed by using numerical typical soil conditions and construction trend using numerical analysis method. According to the analysis results of 25 accident cases, the main influence factors were found as following: insufficient of soil survey, instability of temporary facility and lack of groundwater treatment, etc. Furthermore, in the numerical analysis result of 22 cases, drainage method was occurred larger settlement than waterproof method in the Inland. In case of applying the earth anchor method, it needs more detailed in the regions, which are discovered soft ground or rock discontinuities. Also, The consolidated clay absolutely needs further consideration of excess hydrostatic pressure.

### 요 지

우리나라 지반공학 기술의 발달로 지반굴착 공사가 대규모로 수행되고 있으나, 지반굴착시 공사현장 또는 인접구조물에 직,간접적인 피해를 유발하는 사고는 여전히 빈번히 발생하고 있다. 특히 주거시설이나 상업시설이 밀집해 있는 도심지의 지하터널, 도시철도 역사, 대규모 상업시설, 초고층 빌딩의 기초 공사 등으로 인한 지반굴착관련 사고가 빈번히 발생하고 있어 경제적인 손실 뿐 아니라 인명피해가 발생하여 사회적 비용이 급속히 증가하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 빈번히 발생하는 개착식 흙막이 굴착관련 사고를 방지하기 위하여 최근 발생한 개착식 흙막이 굴착공사로 인한 다수의 사고 및 인접시설물에 영향을 끼친 사례를 수집, 분석을 수행하여 사고발생 원인에 대하여 고찰하고, 수치해석기법을 사용하여 국내 대표적인 지반조건(내륙, 해안특성) 및 공사공법에 따른 굴착시 영향 분석을 수행하였다. 25건의 사고사례를 분석한 결과, 주요 영향요인으로 지반조사의 부실, 가시설 구조체의 불안정 및 지하수의 처리 미흡 등으로 나타났으며, 이 외 여러 요인들이 복합적으로 작용하여 굴착현장에 문제를 발생시키는 것으로 나타났다. 국내의 대표적인 지반조건 및 시공경향을 고려한 22개의 case에 대한 수치해석결과는 일반적인 내륙지역에서는 차수공법에 비해 배수공법에서 침하가 크게 발생하고, 연약지반 및 암반의 불연속면이 발달한 지역에서는 earth anchor 공법 적용시 면밀한 검토가 필요하며, 압밀이 진행 중인 점토지반에서는 과잉간극수압에 대한 고려가 반드시 필요한 것으로 나타났다.

**Keywords** : Ground excavation, Accident event, Safety management, Differential settlement, Angular distortion

Received 23 Aug. 2013, Revised 23 Sep. 2013, Accepted 23 Sep. 2013

\*Corresponding author

Tel: +82-31-910-4160; Fax: +82-31-910-4181

E-mail address: yskim@kistec.or.kr (Y. Kim)

## 1. 서론

토목기술의 발달로 건설공사 중 안전사고는 점차 감소하고 있으나, 최근까지도 흠막이 굴착관련 사고는 빈번히 발생하고 있다. 이는 타 구조물에 비하여 지반이 갖는 불확실성 및 굴착 공사의 대형화 등 여러 요인에 의해 발생되는 것으로 예상할 수 있다.

본 연구에서는 흠막이 굴착공사의 사고예방을 위한 안전관리를 제언하기 위하여 다음과 같은 연구를 수행하였다. 첫째, 최근 발생한 흠막이 굴착공사로 인한 사고 및 인접시설물에 영향을 끼친 다수의 사례를 수집하여 붕괴 원인에 대한 사례 분석을 수행하고, 둘째, 수치해석기법을 사용하여 국내 대표적인 지반조건 및 공사공법에 따른 굴착시 영향 분석을 수행하였다.

본 연구와 관련된 선행연구 중 사고사례 분석에 대한 연구로는 한국시설안전공단에서 수행한 기술검토사례집 - 옹벽 및 굴착분야(2007), 지반 굴착에 따른 인접시설물 안전관리 기준정립 연구(2010) 등에서와 같이 다양한 시설물별·공정별 사례에 대한 사고개요 수준의 분석·수집 연구가 수행되었으며, 이외 기술기사 형식의 개별 사례에 대한 분석이 다수 수행되었다. 본 연구와 같이 지반굴착 단일 공정에 대한 다수 사고사례의 면밀한 분석 연구는 사고에 대한 폐쇄적인 국내 건설문화로 인하여 거의 이루어지지 않았다.

지반굴착으로 인한 주변 지반의 변위 발생에 대한 연구는 Caspe(1966)의 점성토 지반에서 벽체 변위와 지반 poisson's ratio를 사용한 배면 지반의 침하량 추정연구, Peck(1969)의 실측결과를 토대로 한 배면지반의 침하특성 연구, Bowles(1988)의 간편법 연구가 널리 활용되어 왔으며, Clough·O'Rourke(1990)의 현장계측결과와 유한요소법을 이용한 지반별 이격거리에 따른 침하량 추정 연구 등 많은 연구가 수행되었다. 국내에서도 서민우외(2006)의 굴착 공정 3단계(굴토전, 굴착공정, 지보 해체)별 벽체 변위 및 주변지반의 거동 분석 연구가 수행되어 왔다.

이러한 굴착에 따른 지반변위로 인한 인접구조물의 변형에 대한 연구로는 Boscardin and Cording(1989)의 수평 지반의 변위가 인접구조물의 변형에 미치는 연구, Son(2003, 2005)의 지반침하와 인접구조물의 변형율 및 손상도 관계 연구, 이선재외(2005)의 Peck의 방법과 Bowles의 방법을 조합한 굴착에 따른 인접건물의 손상위험도 평가 연구 등이 수행되어져 왔다.

구조물의 각변위에 대한 손상위험도에 대한 연구로는 3.2절에서 자세히 기술할 Skempton and MacDonald(1956)의 건물의 자중에 의한 침하손상의 허용한계 연구를 시작으로 다수의 연구가 수행되었다.

## 2. 사고사례 수집 및 자료분석

### 2.1 개요

본 연구에 수집된 사고사례로는 지반굴착 공사현장의 붕괴에 따라 대규모 파괴가 발생하여 인접구조물에 영향을 미친 사례, 지반굴착현장은 붕괴되지 않았으나 인접구조물의 안정성에 영향을 미친 것으로 판단되어 공사를 중단하고 원인을 찾아 공법을 변경했거나 대책공법이 수립된 사례 등 대규모 지반굴착 현장 중심으로 수집하였다. 붕괴 또는 영향의 원인을 공학적으로 규명할 수 있는 충분한 자료를 확보할 수 있는 사례를 선별하였으며, 본 연구에서는 경의선 ○○역 등 25건의 사례를 수집하여 분석자료(2011. Seong)를 활용 하였다.

사고사례를 분석한 결과, 붕괴에 결정적으로 영향을 끼치는 주요 요인은 아래와 같이 8가지로 분류할 수 있었다.

- ① 지반조사의 부실
- ② 가시설 구조체의 불안정
- ③ 보일링, 히빙 등 굴착바닥면의 불안정
- ④ 차수, 배수 등 지하수 처리에 따른 불안정
- ⑤ 시공상의 불안정
- ⑥ 과다굴착으로 인한 불안정
- ⑦ 사면활동으로 인한 불안정
- ⑧ 관리(계측) 소홀로 인한 불안정

이러한 요인들이 복합적으로 작용하여 굴착현장의 붕괴 또는 인접구조물에 영향을 끼치는 것으로 나타났으며, 위의 요인을 기초로 25건의 사고사례 주요 붕괴원인을 분석한 결과는 Table 1과 같다.

조사된 25건의 사고사례의 주요 영향 요인으로 분석된 지반조사 부실, 가시설 구조체의 불안정, 지하수처리(차수, 배수 등) 미흡 등에 대하여 상세히 분석한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

### 2.2 지반조사 부실

수집된 사고사례에서 지반조사의 불충분 또는 지반조

Table 1. Analysis by failure-factor type

	SITE	Bad geotechnical investigation	Instability on the structure of scaffolding	Boiling, Heaving	groundwater treatment	Instability on construction	Excessive excavation	Landslide	Negligence on management (measuring)
1	Gyeongui Line OO	0	0						
2	Daedeok OOCenter	0			0				
3	Library of Congress OO	0			0				
4	Mokpo OO office	0	0				0		
5	Busan OO World		0						0
6	Seoul OO center	0				0			
7	Pangyo OO Institute	0	0		0				
8	Seocho OO building	0	0						
9	Jung dong OO church				0	0			
10	Bundang OO station	0							
11	Banpo OO praza				0				0
12	Anyang OO tower		0						
13	Jeju Island OO building	0	0						
14	Sangdo dong OO APT				0				
15	Heukseokdong OO officetel					0	0		
16	Hannam OOAPT					0			
17	Incheon Juan OO APT			0					
18	Gwangyang OO facility			0	0				
19	Seongbukdong OO office				0				
20	Mapo Seokyo OO APT				0				
21	Suwon Sindong OO	0							
22	Gwanggyosan OO	0						0	
23	Guro OO site					0	0		
24	Bucheon OO site		0			0			
25	Pangyo OO site	0	0						
	Total	12	9	2	9	6	3	1	2

사에서 파악하지 못한 사실로 인하여 사고가 발생한 사고 사례는 12건으로 가장 많이 영향을 미친 요인이었다.

이는 다수의 국내 건설공사의 계획, 설계예산이 비용 절감의 이유로 최소한의 예산을 배정하기 때문에 필요한 물량의 지반조사가 제대로 수행되지 못하는 국내의 실정에 기인한 것으로 판단되며, 이로 인해 연약층, 암반의 불연속면, 인접구조물 및 매설물 등의 공사현장 인근 지반현황에 대한 정확성이 결여되는 것으로 보인다. 또한 건축물 지반굴착공사의 경우, 지반조사의 계획, 평가와 설계시 안정성 검토를 지반 전문가(토질 및 기초기술사 등)의 책임

하에 실시하지 않는 경우도 빈번한 것으로 조사되었다.

우리나라 내륙지방의 경우 대부분 지하 10m~20m 이내에서 기반암이 출현하고, 깊은 곳의 경우라도 30m 이내에서 기반암이 나타나고 있다. 그러나 대부분의 지반조사에서는 이러한 암반선의 확인에 그치고 암반이 내포하고 있는 각종 불연속면의 강도, 방향성 등에 대한 조사는 심도 있게 진행하지 않고 있다. Table 1의 사례 중 다수에서 암반의 불연속면에 의한 파괴 또는 절리층에 충전되어 있는 물질이 지반굴착시 흠막이벽 배면 지반의 활동을 일으키는 경우가 있었다. 또한 지형적인 특징으로 우수 또는

지하수가 모여들어 수압이 증가를 하거나 불연속면으로 지하수가 침투하여 anchor 천공시 지하수와 토사가 유출되어 흙막이벽의 붕괴로 이어지는 등의 사고 사례도 있었다. 지반조사부실로 인한 대표적인 사례로 판교 ○○현장 붕괴사고이다. 당초 설계시 불연속면을 고려하지 않았을 경우에는 허용치 이내였으나, 불연속면을 가정하였을 경우에는 일부 벽체 및 anchor가 불안정한 것으로 검토되었다.

따라서, 가시설 벽체 설계에 가장 중요한 지반 정수의 산정 및 지질학적인 특성에 대한 정보를 알 수 있는 지반 조사를 제대로 수행하는 것이 흙막이 벽체의 붕괴사고를 예방하는데 가장 중요한 항목으로 판단된다. 이를 위하여 지반조사에 관한 지침 또는 규정을 제대로 이행할 수 있도록 허가관청 또는 관리주체 등의 적극적인 사업관리가 필요한 것으로 판단된다.

### 2.3 가시설 구조체 불안정

anchor(ground anchor 또는 earth anchor), H-pile, rock bolt, strut 등 가시설 벽체를 지탱하여 주는 구조체의 결합 또는 설계 결함으로 발생하는 붕괴유형이 있다. anchor의 경우 정착장의 위치가 배면의 활동 파괴면 안쪽에 설치되어 있어 사실상 흙막이 벽체 배면지반의 활동을 억지하지 못하는 경우가 대표적이라고 할 수 있다.

가시설 구조체의 결함으로 나타나는 형태로는 anchor, H-pile 등의 근입심도 부족에 의한 굴착바닥면 파괴, 버팀보 시스템의 파괴 또는 좌굴, 과도한 휨모멘트에 의한 엄지말뚝 파괴, 2단 흙막이벽 설치 시 연결부위 파괴 등으로 붕괴유형을 구별할 수 있다. 대표적 사례로는 서울 여의도 ○○현장 사고로 태풍과 집중강우로 인한 유효응력 감소와 수압 증가로 지반활동력이 증가된 것에 비하여 코너버팀보의 전단력이 부족하여 발생한 것으로 추정되는 사례이다.

### 2.4 차수, 배수 등 지하수 처리 미흡에 따른 불안정

지반관련 공사에서 주요 불안정요인은 간극수압과 관련된 지하수 부분으로 직간접적으로 거의 모든 사고현장에 영향을 미치는 요소이다. 태풍이나 집중강우에 의한 지하수위 증가 또는 공사장 인근을 지나고 있는 상수도관 또는 오수관 같은 매설물의 위치를 제대로 파악하지 못하여 공사도중 관로의 파열로 인해 물이 유입되어 수압이 증가

하는 문제와 지하수의 배출에 따른 지반 침하 또는 배면의 토사가 유출되어 지반이 함몰되는 사례이다. 대표적 사례로는 서울 ○○역사 지반침하사례로 인근 지반굴착공사 현장에서 지하수의 배수로 주변지반의 지하수위가 약 15m이상 하강되어 역사에 침하를 발생시킨 사례이다. N치 20이상의 단단한 지반에서는 지하수위의 변화는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났지만, N치 10이하의 연약층(도심지에서는 과거 하상퇴적층의 경우가 많음)에서는 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 지반조사시 지하수위의 변화가 예상되는 구간에 연약층이 존재시 차수 또는 지반보강에 유의해야 할 것으로 판단된다.

## 3. 국내대표 지반조건에 대한 굴착시 영향 분석

현행 건축물시공 굴착공사시 면밀한 해석적 분석없이 간략한 지지력평가만을 수행하는 상황임을 고려할 때, 앞서 기술한 사고사례에 대한 분석과 함께 국내 대표적인 지반 및 시공조건에서의 굴착 영향에 대한 수치해석 분석은 유사한 굴착공사에 활용시 사고예방에 효과적일 것으로 판단된다.

Table 2와 같이 국내의 대표적인 지반조건과 최근 시공 경향을 고려하여 22개 case로 분류하고, 수치해석 방법을 사용하여 굴착에 따른 영향을 분석하였다. 굴착에 따른 배면지반의 침하량을 산정하고 인접구조물의 안정에 가장 밀접한 부등침하로 인한 각변위 등을 기준으로 영향을 비교하였다.

### 3.1 국내 대표지반 및 시공조건 선정

대표지반의 선정은 152개의 시추조사 자료 및 현장시험 자료(전단파속도) 등을 기초로 한 지반의 층상구조 및 지반물성 산정방법에 대한 연구결과(2008. Kim, 2006. Youn)를 활용하였다. 지반의 층상구조는 내륙특성지반 4 case와 해안특성지반 2 case로 크게 구분하며, 16m의 일반굴착 및 30m의 깊은 굴착의 경우를 고려하여 구분하였다. 시공 방법으로는 국내에서 많이 사용하는 Diaphragm wall과 같은 차수가 되는 차수벽체, 비차수 흙막이 가설 벽체로 나누어 구분하였고, 보조공법에 의한 분류(anchor 및 rock-bolt, strut 등) 해석을 수행하였으며, 암반 및 연약점토 특성에 따른 분석도 추가로 실시하였다.

Table 2. Outline of analysis

Section	Layer structure	case No.	Depth for excavation	Construction method
Soil characteristic of the Inland #1	16m Buried layer(2)→Weathering Soil (8)→Weathering rock(6)→bedrock	Case 1	16m	Diaphragm wall + Strut
		Case 2	16m	Strut + H-Pile
		Case 3	16m	Earth anchor + H-Pile
	30m Buried layer(2)→Alluvial layer(5)→Weathering Soil(7)→Weathering rock(6)→bedrock	Case 4	30m	Diaphragm wall + Strut
		Case 5	30m	Strut + H-Pile
		Case 6	30m	Earth anchor + H-Pile
Soil characteristic of the Inland #2	16m Buried layer→Sedimentary layer→Weathering Soil→bedrock	Case 7	16m	Diaphragm wall + Strut
		Case 8	16m	Strut + H-Pile
		Case 9	16m	Earth anchor + H-Pile
	30m Buried layer→Sedimentary layer→Sandy soil→Weathering Soil→bedrock	Case 10	30m	Diaphragm wall + Strut
		Case 11	30m	Strut + H-Pile
		Case 12	30m	Earth anchor + H-Pile
Soil characteristic of the coast	16m Buried layer→Soft clay layer →Weathering rock→bedrock	Case 13	16m	Diaphragm wall + Strut
		Case 14	16m	Strut + H-Pile
		Case 15	16m	Earth anchor + H-Pile
	30m Silty sand→Silty clay→Soft clay →Weathering rock→bedrock	Case 16	30m	Diaphragm wall + Strut
		Case 17	30m	Strut + H-Pile
		Case 18	30m	Earth anchor + H-Pile
Impact on rock mass characteristic	The interior ground(Anchor + H-pile)	Case 19	discontinuities(absence)	
		Case 20	discontinuities(existence)	
Impact on soft clay characteristic	The coast ground(Strut + H-pile)	Case 21	Mohr-Coulomb model application of a weak stratum	
		Case 22	Modified Cam-Clay model application of a weak stratum	

Table 3. Input soil properties of numerical analysis

Stratum	Wet unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion (kPa)	Angle of friction (Deg.)	Modulus of elasticity (kPa)	Poisson's ratio
Reclamation Soil	18.0	3.0	28.0	25,000	0.33
Silty clay	18.0	15.0	22.0	10,000	0.35
Silty sand	18.5	1.0	27.0	20,000	0.33
sand	18.0	0.1	31.0	80,000	0.34
Soft clay	15.0	35.0	13.0	1,000	0.30
Sedimentary soil	17.5	5.0	28.0	30,500	0.32
Weathering Soil	19.0	10.0	33.0	45,000	0.32
Weathering rock	20.0	30.0	35.0	150,000	0.26
Soft rock	22.0	70.0	40.0	500,000	0.20
Fracture Zone	20.0	35.0	26.0	222,000	0.30

### 3.2 해석 개요 및 영향에 대한 평가기준

수치해석 프로그램으로는 FLAC 2D와 PLAXIS를 사용하였으며, 사용 물성치는 사고사례에서 획득한 자료와 Table 3과 같이 일반적으로 사용되는 국내 지반물성 적용 범위를 고려하여 선정하였다.

해석 case로는 앞서 기술한 내륙지반과 해안지반, 굴착 깊이, 시공방법 등을 고려하여 18가지의 case와 암반불연

속면에 대한 영향 고려 2가지의 case, 연약지반에 적합한 모델의 적용 여부에 따른 2가지의 case의 해석을 수행하였다.

지반굴착에 의한 영향 평가기준으로는 다양한 연구와 기준에 대한 조사 결과, 구조물에 큰 영향을 미치는 각변위 (angular distortion)를 주로 활용하였다. 각변위에 대한 연구는 여러 학자들(Skempton과 MacDonald 1956; Bjerrum 1963; Polshin과 Tokar 1957; Burland와 Wroth 1974; Son 2003)에 의해 연구되어 일반적으로 1/300을 구조물 손상

Table 4. Critical damage of structure (Skempton and MacDonald, 1956)

Section	Angular distortion	Note
Bearing wall of frame structure or partition wall	1/300	Critical crack size
Structured critical damage of partition wall	1/150	
Beam of steel-frame structure	1/200	
Building	30mm (Sandy soil) 45mm (Cohesive soil)	amount of maximum differential settlement
	50mm (Sandy soil) 75mm (Cohesive soil)	maximum settlement

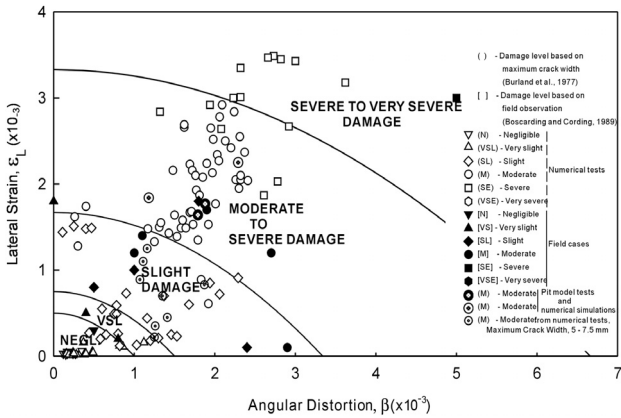


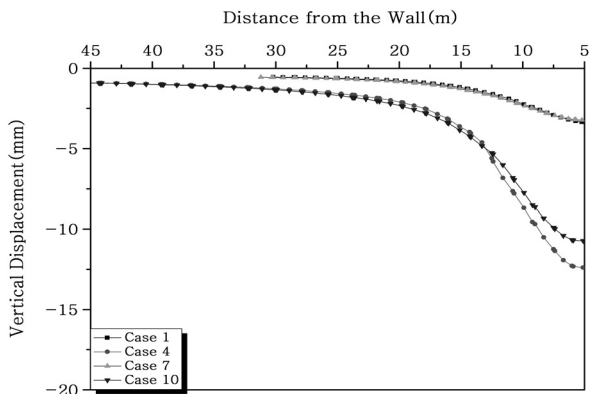
Fig. 1. Angular distortion-Lateral strain relation (Son, 2003)

의 한계로 적용하고 있어 본 검토에서도 Table 4와 같은 기준을 사용하였고, 일반적으로 굴착면과 구조물의 이격거리가 5m이상인 점과 영향반경이 굴착깊이의 2배 이내인 점을 고려하여 검토 영향범위는 5m~45m로 설정하였다. Fig. 1은 각변위에 대한 횡방향 변형률을 나타낸 그림이다.

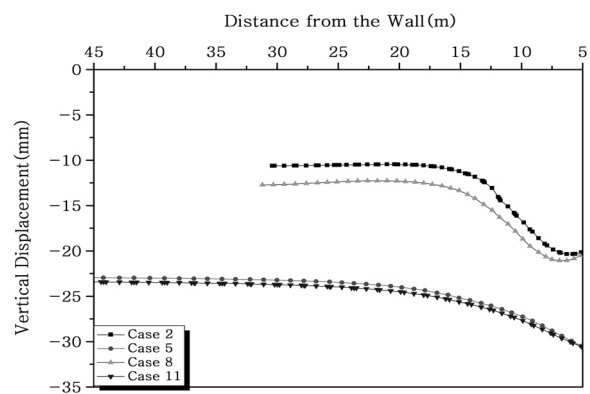
### 3.3 해석결과 분석

#### 3.3.1 내륙지반에서 층상구조에 따른 인접시설물의 영향 검토

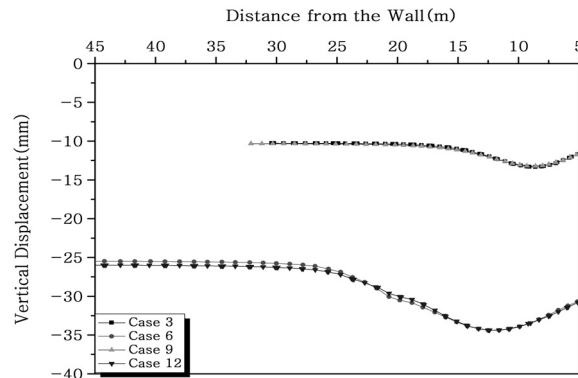
Fig. 2에서 보듯이 내륙지반의 동일한 굴착 심도 굴착시



(a) Diaphragm wall



(b) Strut + H-Pile



(c) Earth anchor + H-Pile

Fig. 2. Comparison of analysis results of the interior ground characteristic according to layer structure

층상구조의 변화에 따른 침하 특성은 큰 차이가 없으므로 나타났다. 이는 국내 내륙지반의 특성은 물성치에 있어서 큰 차이를 보이지 않기 때문으로 분석되고, 동일 심도 굴착일 경우 토압이 비슷하게 작용한다는 것으로 분석할 수 있다. 따라서 지반굴착시 내륙지반의 일반적인 층상구조인 매립층, 퇴적층, 풍화토, 풍화암, 연암 등으로 구성된 지반의 경우 층상구조에 따른 인접시설물에 대한 영향은 제한적인 것으로 판단된다.

### 3.3.2 차수공법에 따른 인접시설물의 영향 검토

차수 공법인 Diaphragm wall + strut 공법과 비차수 공법인 H-pile + strut 및 H-pile + earth anchor 공법에는 지반변위 및 지하수위 하강 등 많은 차이가 발생하였다. 차수공법일 경우 전반적으로 지반굴착 심도의 1.0배~2배 이내에서 안정적인 침하가 발생하였고 부등침하량이 상대적으로 작게 나타났다. 반면 비차수 벽체의 경우 굴착심도 1.5배~2배 이내에서 광범위한 침하가 발생하였다. 그러나 비차수 공법의 경우도 부등침하량은 크게 산정되지 않아 인접구조물이 손상을 받을 만한 각변위는 발생하지 않았다. 대부분의 해석결과에서 인접구조물의 각변위( $\delta/L$ )

는 1/2500 ~ 1/750 사이의 값을 가지는 것으로 해석되었으며, 허용치인 1/300 보다 적은 값이나, 굴착심도의 0.5배~1배에서 부등침하가 크게 발생하는 경향을 고려하여 면밀한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 3과 Fig. 4에서 보듯이 굴착심도 16m일 경우 벽체로부터의 이격거리 5m~15m 사이에서 부등침하가 주로 발생하였고, H-pile + strut 공법에서 가장 크게 발생하는 경향을 보였다. 굴착심도 30m의 해석결과에서는 벽체로부터의 이격거리 5m~30m 사이에서 부등침하량이 주로 발생하였고, H-pile + earth anchor 공법에서 가장 크게 발생하는 경향을 보였다. 일반적으로 가설벽체 배면지반의 가상 파괴면을 벽체에서 30° 각도로 존재한다고 가정하는데, 파괴면의 형상을 참고하면 가상 파괴면 이내에 인접구조물이 있을 경우에 해당한다.

국내 일반적인 지반에 대한 해석결과, 지반굴착 공사시 인접구조물의 영향 범위를 선정할 때 굴착심도의 1배 이내에 대하여 집중적으로 모니터링을 하는 것이 합리적인 것으로 판단된다. 특히, 비차수 공법을 이용할 경우 상대적으로 부등침하가 크게 발생할 수 있으므로, 굴착심도의 0.5배~1배 이내일 경우 인접한 지반의 중요시설 또는 중

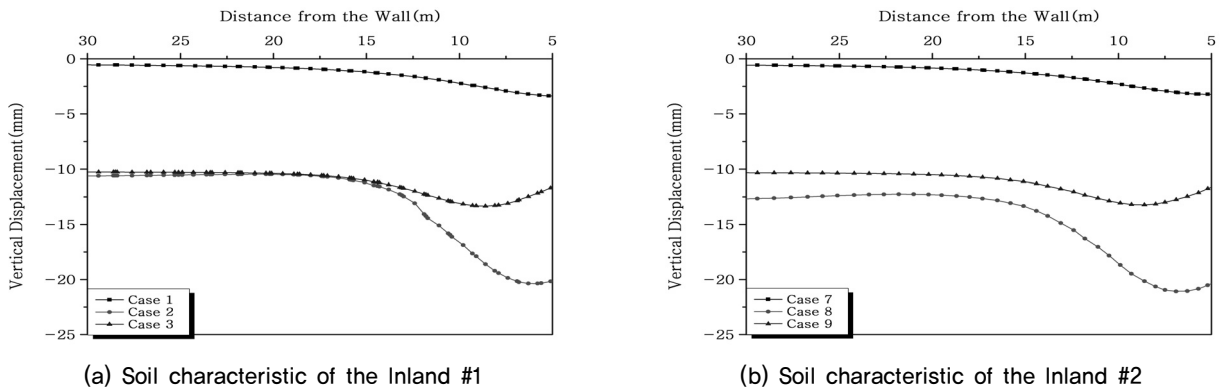


Fig. 3. Analysis results of excavation depth 16 m according to construction method

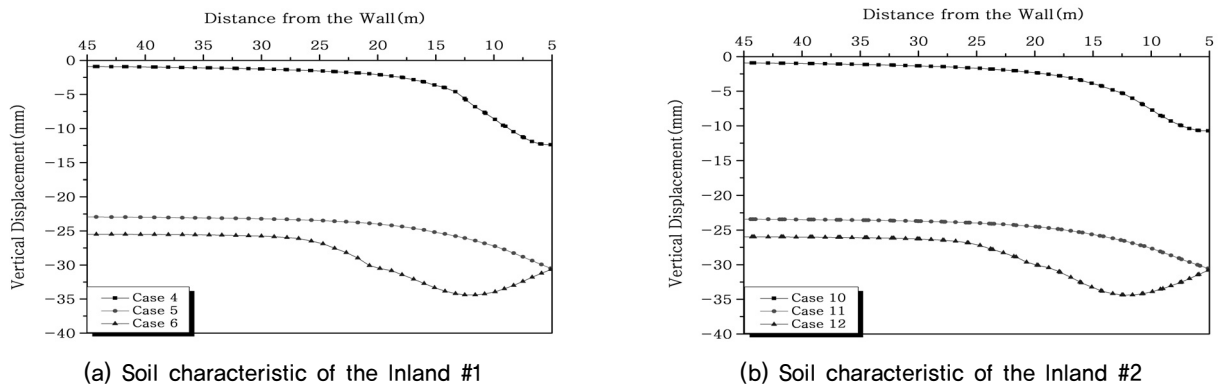
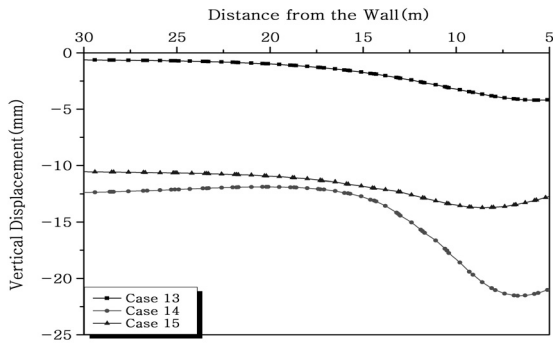
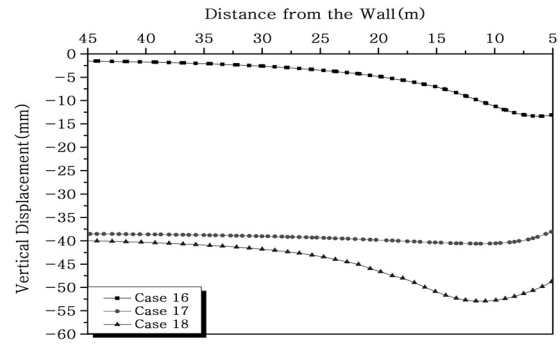


Fig. 4. Analysis results of excavation depth 30 m according to construction method



(a) excavation depth 16 m



(b) excavation depth 30 m

Fig. 5. Analysis results according to construction method

요구조물이 있을 경우 구조물 경사계를 이용하여 모니터링을 실시할 것을 추천한다.

대부분의 굴착현장에서는 가시설 해석시 대부분 1차원적인 해석을 실시하여 설계를 하고 있으나, 본 해석사례와 같이 2차원 이상의 해석을 이용할 경우 파괴면에 대한 정확한 추정이 가능하고 인접시설물에 대한 부등침하 정도를 쉽게 파악할 수 있다. 따라서 도심도 굴착공사 또는 인접시설물에 중요한 시설이 있는 경우 2차원 해석을 실시하여 설계에 반영하고, 부등침하 취약지역에 대하여 구조물 경사계 또는 지중경사계 등의 모니터링을 실시하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

### 3.3.3 연약지반에서의 시공공법 및 굴착깊이에 대한 검토

Fig. 5에서 국내 내륙지반에 대한 해석결과와 해안지반에 대한 해석결과에서 가장 큰 차이를 보이는 부분이 H-pile + earth anchor 공법이다. 내륙지반의 H-pile + strut 공법이나 H-pile + earth anchor 공법에서 큰 차이가 발생하지 않았으나, 연약지반에서는 earth anchor를 사용할 경우 상대적으로 배면지반에서 지반의 소성거동이 많아지는 것으로 나타났다. 이는 earth anchor의 정착장이 충분한 저항력을 발현하도록 주변지반의 강도와 깊은 연관이 있기 때문으로 분석된다. 특히, 굴착심도가 깊고 연약지반이 깊이 발달된 지역의 경우 earth anchor를 이용하는 데는 신중한 검토가 필요하다.

earth anchor를 이용할 경우 Fig. 6의 해석사례와 같이 2차원적인 해석기법을 이용하여 굴착 배면 지반의 소성거동 특성을 파악하고, anchor 정착장 주변의 소성거동 특성 및 파괴토체 내부에 인접시설이 있을 경우 부등침하량을 산정하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

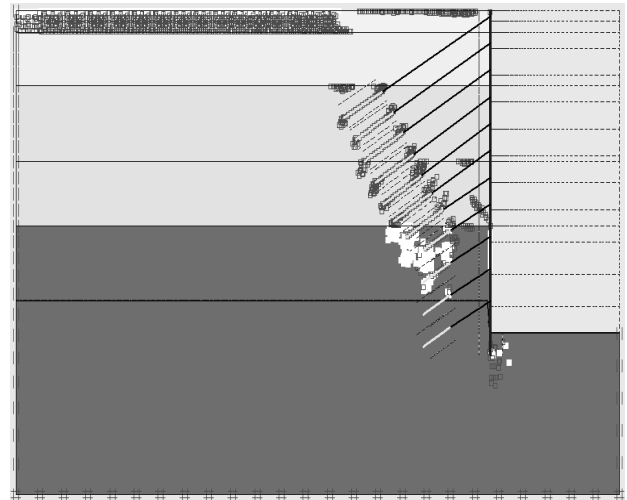


Fig. 6. Occurrence tendency of plastic deformation in anchorage

### 3.3.4 암반의 불연속면 고려에 대한 영향 검토

Fig. 7의 해석을 통해 암반상태를 제대로 파악하지 못하여 암반의 파쇄대 또는 절리면을 고려하지 않을 경우, 해당 부분에서 파괴가 발생하거나, 설계시 예상하였던 파괴면과 달라 anchor나 rock bolt와 같은 보강재가 파괴면 안쪽에 있어 파괴의 원인이 되는 것을 Table 5의 해석결과를 통해 확인 할 수 있었다. 따라서 공사장 인근에 인접시설이 있을 경우 지반조사에 대한 정확성을 높일 수 있는 조치 및 설계, 해석이 필요하다고 판단된다.

본 연구에서는 파쇄절리대의 강도특성만 반영하여 비교검토를 수행하였으나, 파쇄절리대 내 우수유입에 따른 수압, 파쇄절리대 충전물 특성(풍화도 및 두께), 파쇄절리대의 규모, 불연속면의 방향 및 연장성에 따라 그 결과에 차이가 있음을 확인하였다.



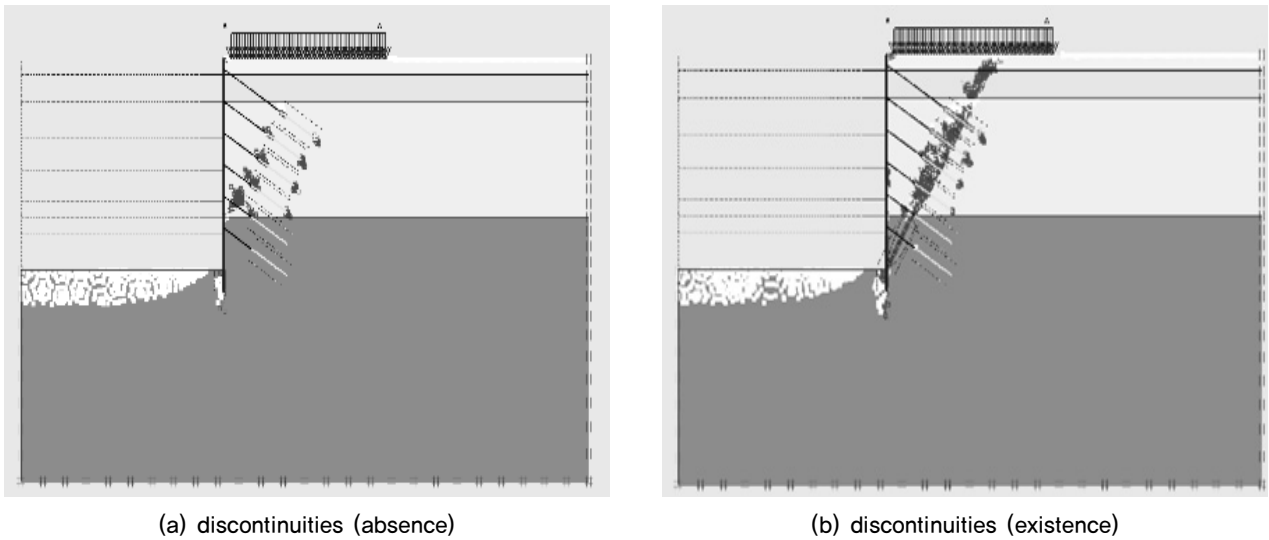


Fig. 7. Distribution chart of plastic zone

Table 5. Maximum Displacement amount of temporary facility wall

H-PILE	Final excavation		
	Case 19	Case 20	Rate of increase
Maximum Displacement	14.21 mm	24.48 mm	1,723

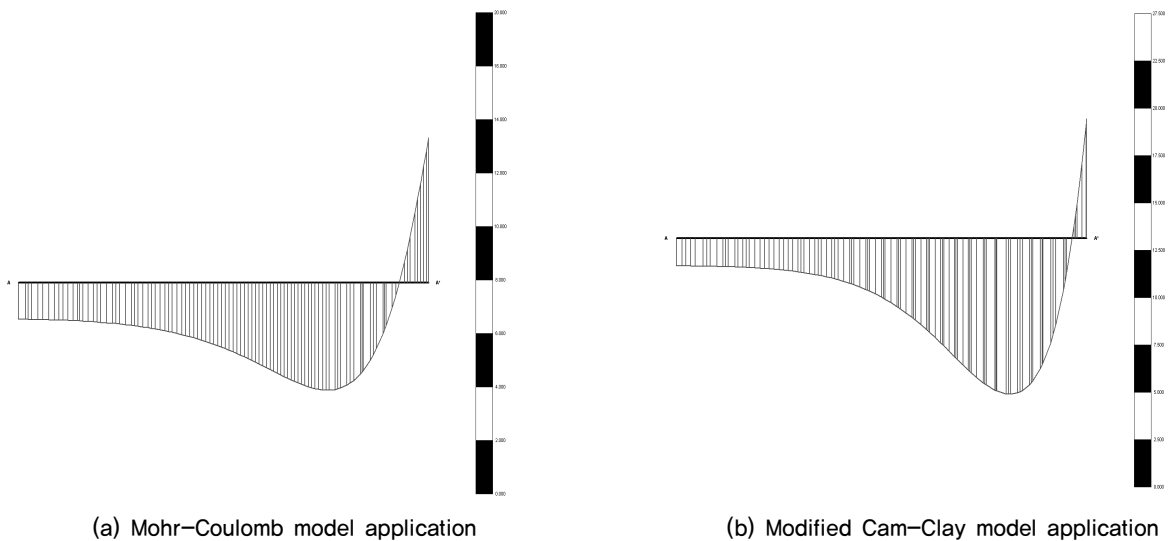


Fig. 8. Settlement distribution of the rear

### 3.3.5 점토지반에서 과잉간극수압 고려에 대한 영향 검토

압밀중인 점토지반의 과잉간극수압으로 인하여 발생하는 점토지반의 유효응력 저하 및 벽체에 작용하는 정수압 증가분을 고려한 경우와 고려하지 못한 경우에 대한 해석을 Fig. 8과 같이 수행하였다. Table 6의 해석결과를 보면 압밀중인 점토지반의 과잉간극수압을 고려한 해석을 수행

시, 그렇지 않은 경우에 비하여 배면침하량은 151%, 벽체 변위는 192% 큰 변위를 나타냈다. 따라서 점토지반의 경우 과잉간극수압을 고려한 해석 수행시 인접시설물에 대한 영향 평가를 더욱 엄격하게 할 수 있음을 알 수 있다.

국내에서 압밀중인 지반에서 차수벽을 이용한 굴착공사 시설 설계시 일반적으로 압밀중인 지반의 과잉간극수압을 고려하지 않는 실정을 고려시, 유사한 지반에 굴착공사가

Table 6. Comparison of analysis results

Analysis condition	Settlement of the rear (mm)	Ratio	Displacement of wall (mm)	Ratio
Excess hydrostatic pressure (non-reflection) – case 21	5.42	100%	17.98	100%
Excess hydrostatic pressure (reflection) – case 22	8.20	151%	34.64	192%

시행될 경우 모델지반과 유사하게 실제 굴착시 가시설 벽체변위가 크게 발생할 수 있으며 이로 인하여 배면지반의 침하 및 가시설 안정에 문제를 야기할 소지가 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는, 지반굴착공사의 안전관리를 위하여 관련된 사고사례와 수치해석기법을 활용한 다양한 지반조건 및 시공조건을 고려한 분석을 실시하였으며, 그 결과를 간략히 정리하면 다음과 같다.

- (1) 대형 지반굴착 사고사례 25건의 분석을 실시한 결과 주요 영향요인은 다음과 같다.
  - ㉠ 지반조사 부실로 인한 지반 정보의 부정확성
  - ㉡ 설계오류로 인한 가시설 구조체의 불안정
  - ㉢ 지하수 처리 미흡으로 인한 침하발생 등
 이 외 여러 요인들이 복합적으로 작용하여 굴착현장에 문제를 발생시키는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 볼 때, 현재 지반굴착공사에서 조사 및 설계단계에 대한 면밀한 검토가 필요함을 알 수 있었다.
- (2) 국내의 대표적인 지반조건 및 시공경향을 고려한 22개의 case에 대한 수치해석결과는 다음과 같다.
  - ㉠ 내륙지반의 일반적인 층상구조인 매립층, 퇴적층, 풍화토, 풍화암, 연암 등으로 구성된 지반의 경우 층상구조에 따른 인접시설물에 대한 영향은 미미한 것으로 나타남
  - ㉡ 차수공법에 따른 영향은 차수 공법인 Diaphragm wall + strut 공법에 비해 배수 공법인 H-pile + strut 및 H-pile + earth anchor 공법에서 인접 구조물에 영향을 미치는 부등침하량은 대체적으로 허용치 이내이나 굴착심도 2배 이내에서 광범위한 침하가 발생하는 것으로 나타남
  - ㉢ 연약지반에서는 earth anchor를 사용할 경우 상대적으로 배면지반에서 지반의 소성거동이 많아지

는 것으로 나타났으며, 특히 굴착심도가 깊고 연약 지반이 깊이 발달된 지역의 경우 면밀한 검토가 필요한 것으로 나타남

- ㉠ 암반의 불연속면 고려 유무에 따른 검토에서는 anchor 정착장의 위치에 따라 크게 영향을 받는 것으로 나타남
  - ㉡ 점토지반의 과잉간극수압을 고려한 해석을 수행 시, 그렇지 않은 경우에 비하여 배면침하량은 151%, 벽체변위는 192% 큰 변위를 나타남
- 위의 연구결과를 토대로 국내에 지반굴착공사를 수행할 때, 일반적인 내륙지역에서는 차수공법에 비해 배수공법 적용시 면밀한 검토가 필요할 것으로 판단되고, 연약지반 및 암반의 불연속면이 발달한 지역에서는 earth anchor 공법 적용시 유의하여야 하며, 암질이 진행중인 점토지반에서는 과잉간극수압에 대한 고려를 반드시 하여야 할 것으로 판단된다.

#### References

1. Bjerrum, L. (1963) Discussion on: *Proceedings of the European conference on soil mechanics and foundation engineering, volIII*, Norwegian Geotechnical Institute, Publ. No 98, Oslo, Norway, 1-3.
2. Boscardin, M.D. and Cording, E.J. (1989), "Building response to excavation-induced settlement", *Journal of Geotech. Engineering, ASCE*, Vol.115(1), pp.1-21.
3. Bowles (1988), *Foundation Design and Analysis*, 4th Ed., McGraw-hill, pp.658-661.
4. Burland, J. B. and Wroth. C. P. (1974) Settlement behavior of buildings and associated damage, *Proc., Conf. on Settlement of Structures*, Pentech Press, London, England, pp.611-654.
5. Caspe, M.S. (1966), "Surface settlement adjacent to braced open cuts", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE*, Vol.92, pp.51-59.
6. Clough, G. W., and O'Rourke, T. D. (1990) Construction induced movements of insitu walls, *Geotechnical special publication, ASCE*, No.25, pp.439-470.
7. Kim, D.-S., Lee, S.-Y., and Youn, J.-G. (2008), "Development

- of Site Classification System and Modification of Site Coefficients in Korea Based on Mean Shear Wave Velocity of Soil and Depth to Bedrock”, *Journal of the Korea Society of Civil Engineers*, Vol.28, No.1C, pp.63-74.
8. Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation (2010), “Establishment of the Safety Management Standards of Adjacent facilities according to ground excavation”
  9. Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation (2007), “Technical review case: Retaining wall and excavation”
  10. Lee, S.-J., Song, T-W., Lee, Y.-S., and Kim, J.-G. (2005), “A Case Study of Building Damage Risk Assessment Due to the Struttred Excavation: Design Aspects”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.21, No.10, pp.99-112.
  11. Peck, R.B. (1969), “Deep excavations and tunneling in soft ground” *Proc. 7th Int. Conf. on Soil Mech. and Foundation Eng.*, State of the art volume. Sociedad Mexicana de Mecanica de Suelos, A.C., pp.225-290.
  12. Polshin, D. E. and Tokar, R. A. (1957) Maximum allowable nonuniform settlement of structures, *Proc., The 4th Int'l Conf. on Soil Mech. and Foun. Engr.*, Butterworth, England, Vol.1, pp.402-405.
  13. Seo, M.-U., Seok, J-U., Yang, G.-S., and Kim, M.-M. (2006), “Sequential Analysis of Adjacent Ground Behaviors Caused by Deep Excavations”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.22, No.2, pp.19-28.
  14. Seong, J.-H. (2011), “A Study for Safety Management on Ground Excavation by Analysis of Accident Events”, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*, Vol.15, No.6, pp.175-183.
  15. Skempton, A.W. and Macdonald, D.H. (1956), “Allowable settlement of buildings” *Proc. Inst. Civ. Eng.*, Vol.5, pp. 727-768.
  16. Son, M. (2003). *The response of buildings to excavation-induced ground movements*, Ph.D. dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL. USA.
  17. Son, M.-R. (2005), “Building Response and Damage Estimation to Excavation- and Tunneling-Induced Ground Movements in Urban Area”, *Journal of the Korea Society of Civil Engineers*, Vol.25, No.3C, pp.189-199.
  18. Youn, J.-G. and Kim, D.-S. (2006), “Development of Site Classification System and Modification of Design Response Spectra considering Geotechnical Site Characteristics in Korea”, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol.10, No.2, pp.39-50.