

# 지하공간하부 지하저류공동에서의 필라 보강효과에 관한 수치해석적 연구

서형준<sup>1</sup>, 이강현<sup>2</sup>, 한신인<sup>3</sup>, 이인모<sup>4\*</sup>

## A numerical study of pillar reinforcing effect in underground cavern underneath existing structures

Hyung-Joon Seo, Kang-Hyun Lee, Shin-In Han, In-Mo Lee

**ABSTRACT** Usage of underground space is increasing at metropolitan city. More than 90% of flood damages have occurred at downtown of metropolitan cities. In order to prevent and/or minimize the flood-induced damage, an underground rainwater detention cavern was proposed to be built underneath existing structures. As for underground caverns to be built for flood control, multi-caverns will be mostly adopted rather than one giant cavern because of stability problem. Because of the stress concentration occurring in the pillars between two adjacent caverns, the pillar-stability is the Achilles' heel in multi-caverns. So, a new pillar-reinforcing technology was proposed in this paper for securing the pillar-stability. In the new pillar-reinforcing technology, reinforced materials which are composed of a steel bar and PC strands are used by applying pressurized grouting, and then, by applying the pre-stress to the PC strands and anchor body. Therefore, this new technology has an advantage of utilizing most of the strength that the in-situ ground can exert, and not much relying on the pre-cast concrete structure. The main effect of the pressurized grouting is the increase of the ground strength and more importantly the decrease of stress concentration in the pillar; that of the pre-stress is the increase of the ground strength due to the increase of the internal pressure. In this paper, ground reinforcing effects were verified the stress change in pillar is obtained by numerical analysis at each construction stage. From these results, the effects of pressurized grouting and pre-stress are verified.

**Keywords:** Underground rainwater detention cavern, pillar, pressurized grouting, pre-stress

**요약** 공간이 한정된 도심지에서 인구가 밀집되는 가운데 도심의 복합지하공간에 대한 개발은 날로 늘어나고 있다. 이러한 가운데 홍수피해의 90% 이상이 도심지 홍수피해라고 할 만큼 도심지의 수재해에 대한 대비가 필요한 실정이다. 이러한 요구에 따라 도심지 복합지하공간 하부에 지하저류공동 시설물을 시공하여 도심지 홍수피해 시 복합지하공간에 대한 안정성을 확보하고자 한다. 지하저류공동에서 저장된 빗물을 원활히 제어하기 위해서는 한 개의 공동보다 다수의 저류공동 시설로 설계하는 것이 유리하다. 다수의 저류공동으로 시공을 할 경우 공동과 공동 사이의 필라 구조물에 상부의

접수일(2012.07.02), 수정일(2012.08.27), 게재확정일(2012.09.04)

<sup>1</sup>정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 박사과정

<sup>2</sup>정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 박사과정

<sup>3</sup>정회원, (주)서영엔지니어링

<sup>4</sup>정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 교수

\*교신저자: 이인모 (E-mail: inmolee@korea.ac.kr)

하중이 집중되기 때문에 필라 구조물에서 안정성 확보 방안이 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 필라부의 안정성을 확보하기 위한 필라부 보강공법을 개발하였다. 필라부 보강공법은 철근과 PC강연선으로 구성된 보강재를 필라부에 삽입한 후 가압 그라우팅을 하고, 프리스트레스를 가하는 공법이다. 따라서 기존의 프리캐스트 콘크리트 구조물로 필라부를 보강하는 것과 달리 원지반을 직접 보강하는 공법으로 원지반의 강도를 최대한 활용할 수 있다는 장점이 있다. 먼저, 가압 그라우팅을 하였을 경우 지반 보강효과뿐만 아니라 필라부에 가해지는 상부의 하중을 경감시킬 수 있는 효과가 있다. 또한 프리스트레스를 가하게 되면 필라부에 내압을 가하는 효과로 인하여 지반강도를 증가시키는 역할을 기대할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 보강효과를 통해서 필라부 주변지반의 거동이 어떻게 변화할 것인지를 판단하고자 한다. 먼저, 수치해석을 통해서 각 시공단계별 필라부 지반의 응력 변화 양상을 판단하였다. 이를 통해서 가압 그라우팅과 프리스트레스에 의한 효과를 검증할 수 있었다.

**주요어:** 지하저류공동, 필라, 가압 그라우팅, 프리스트레스

## 1. 서론

도심지 복합지하공간 개발은 지속적으로 발전하고 있으며, 기후의 변화에 따라 집중호우 및 홍수에 대비하여 복합지하공간을 보호하기 위한 지하저류공동 개발이 요구되고 있다. 본 논문에서는 이러한 요구에 따라 복합지하공간 하부에 그림 1과 같이 지하저류공동 구조물을 시공할 때 필요한 필라부 보강공법을 제안하였다. 또한 각 시공단계에 따른 지반의 거동을 수치해석을 통해서 분석하고자 한다. 도심지 복합지하공간 하부에 지하저류공동을 시공할 경우 근접시공에 대한 문제와 터널 시공 공간이 협소하다는 문제점이 있다. 근접시공 시에는 사전보강 공법을 통해서 지반을 보강할 수 있으며, 터널 시공 공간이 부족할 경우 터널간의 이격거리를 좁힐 수 있는 필라부 보강이 필요하다.

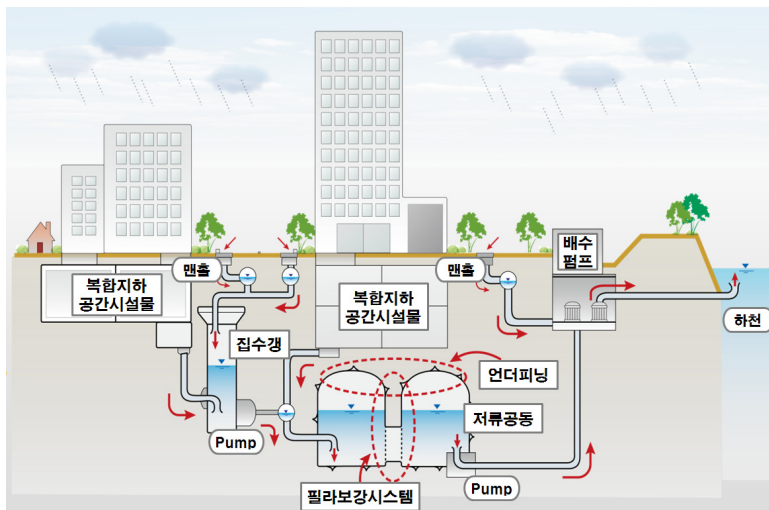


그림 1. 지하저류공동 구조물의 시공 개요

김도형 등(2003)은 근접 병설 터널의 설계 및 안정성에 대한 국내 및 해외 시공사례를 제시하였으며, 대부분의 경우 중앙에 Pilot 터널을 굴착한 후 중앙벽체를 설치하는 방식을 택하고 있었다. 또한 일본의 경우 지반의 특성에 따라 다양한 형태의 근접병설터널에 대한 상세한 검토를 수행하여 다양한 설계경험과 시공경험을 축적하고 있다(Kobayashi, 1994). 또한 굴착대상 지반조건에 따라 중앙벽체 설치, 원지반 암반 활용, 선행터널 라이닝 두께 증진 등의 방안을 적용하여 터널의 안정성을 확보하고 있다(Kamimura, 2002). 국내에서는 최근 2아치 터널(김상균 등, 2003) 및 3아치 터널(장석부 등, 2004)에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 이에 대한 연구 역시 각각의 터널 중앙에 콘크리트 벽체를 설치하여 상재하중을 견디도록 설계되어 있다. 또한 필라부의 안정성에 대한 연구도 진행되고 있으며, 유광호와 김종규(2011)는 필라폭의 변화에 따라 필라부의 안정성을 평가하는 연구를 진행하였다. 본 연구에서는 두 터널 사이에 필라보강을 콘크리트 벽체를 사용하는 것이 아니라 가압 그라우팅과 프리스트레스를 가할 수 있는 필라부 보강 공법을 제안하고자 한다.

터널 굴착에 따른 필라부에서 응력변화 및 안정성 검토는 그림 2에서 보는 것과 같이 Hoek-Brown 파괴기준(1980)을 통해서도 설명할 수 있다. 그림 2의 A점은 지반의 초기응력 상태이며, B점은 병설터널 시공 후의 필라 응력상태이다. 병설터널 굴착에 의해 필라부에 응력이 집중되며(최대주응력 증가), 필라부 측벽에서 응력해방이 발생하므로 필라부에서의 응력은 점차 Hoek-Brown의 파괴 포락선에 근접하며(A→B) 암반의 불안정성이 증가하게 된다. 이외에도 필라의 안정성 평가를 위한 기법들로는 Matsuda(1998)의 방법 및 경험식에 의한 개략검토인 지류론(tributary theory) 등이 이미 제안된 바 있으나, 제안된 기법들로는 병설터널의 다양한 지반조건 및 시공조건 등을 합리적으로 반영하기에는 한계가 있다. 국내에서는 신영완과 김영근(2010)이 대단면 근접병설터널에서의 필라부 보강에 따른 거동특성에 대해 연구를 수행하였다.

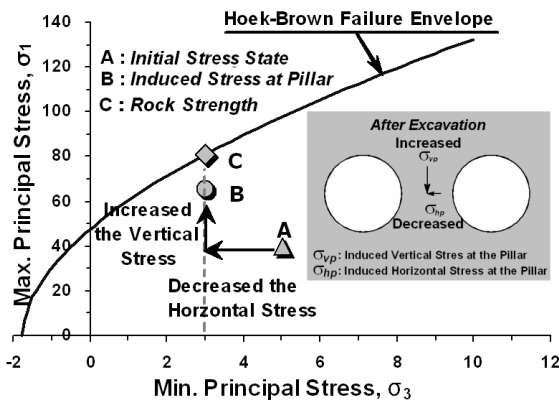


그림 2. Hoek-Brown의 파괴기준을 통한 필라부 안정성 검토 (1980)

---

본 연구에서는 그림 1과 같이 복합지하공간 하부에 근접하여 지하저류공동 구조물이 시공될 때, 근접시공 시 필요한 사전보강에 이은 필라부 보강을 위한 가압 그라우팅 및 프리스트레스를 가하는 공법을 제안하였다. 또한 숏크리트 지보, 전방향 필라부 보강, 상방향 필라부 보강으로 나누어 각각의 시공단계에 따라 필라부 주변지반의 거동을 수치해석을 통해 분석하였으며, Mohr-Coulumb 파괴이론을 통해 제안된 공법의 타당성을 입증하였다.

## 2. 필라부 보강공법

도심지 복합지하공간 하부에 지하저류공동을 시공할 경우 터널과 터널 사이에 필라부가 존재하게 된다. 일반적으로 필라부 보강은 콘크리트 벽체를 두는 것이 일반적이지만 이러한 경우 다단계의 굴착 및 콘크리트 구조물 설치에 따른 시공기간이 길어지게 된다. 따라서 본 연구에서는 원지반의 지반강도를 유지함과 동시에 필라부를 보강할 수 있는 공법을 제안하였다. 필라부 보강공법은 크게 가압 그라우팅을 하는 단계와 프리스트레스를 주는 단계로 나눌 수 있다. 먼저, 그림 3(a)에서 보는 것과 같이 필라부를 천공한 후 철근 또는 강관, PC강연선으로 구성된 보강재를 삽입한다. 철근 또는 강관은 필라부에 가해지는 하중을 견딜 수 있게 하기 위해 지반의 상태에 따라 선택적으로 시공하게 되며, PC강연선은 그라우팅 후에 프리스트레스를 가하기 위해 삽입하게 된다. 또한 보강재의 선단에는 후행터널 굴착 시에 프리스트레스를 가하기 위해 PC강연선을 보호할 수 있는 캡을 설치하게 된다. 보강재를 삽입한 후 패커를 설치하여 가압 그라우팅을 하게 된다(그림 3(a) 참조). 가압 그라우팅은 전방향으로 가압하는 것 뿐만 아니라 그림 3(b)에서 보는 것과 같이 전면판을 고정지점으로 하여 상방향으로 가압이 가능하도록 하였다. 따라서 가압 그라우팅은 필라부의 지반보강효과를 가져올 수 있을 뿐만 아니라 필라부에 집중되는 하중을 감소시킬 수 있게 된다. 마지막으로 그림 3(c)에서 보는 것과 같이 PC강연선을 이용하여 프리스트레스를 가하게 된다. 프리스트레스를 가하게 되면 터널 벽면에 내압을 가하는 효과와 동일한 효과를 얻을 수 있기 때문에 필라부의 보강이 가능할 것으로 판단된다. 본 논문에서는 이러한 보강공법의 장점을 이용하여 필라 보강을 하였을 경우 필라부 주변지반의 거동특성을 판단하고자 하며, 제안된 보강공법의 전체적인 개요는 그림 3(d)에 나타나 있다.

필라부 보강 공법은 크게 선행터널을 굴착하기 전에 사전보강하는 단계, 선행터널 굴착 단계, 가압 그라우팅 단계를 반복적으로 수행하며 굴착을 하게 된다. 그리고 이와 병행하여 일정한 간격을 두어 후행터널을 굴착하게 되며, 후행터널을 굴착한 후 프리스트레스를 가하게 된다. 선행터널을 굴착할 경우 일반 터널의 굴착과 유사하지만 굴착에 따른 터널의 안정성에 문제가

발생할 수 있기 때문에 가압 그라우팅을 수행하여 안정성을 확보하게 된다. 후행터널을 굴착하게 되면 필라부로 응력이 집중될 뿐만 아니라 후행터널 측벽에서 최소주응력이 급격히 감소하기 때문에 터널 붕괴의 위험성이 있다. 따라서 프리스트레스를 가해서 터널 벽면에서 내압을 가하는 효과를 얻을 수 있게 된다. 터널굴착에 있어서 일반적으로 숏크리트를 가하여 내압을 주는 것이 일반적이나 이는 수동적인 보강공법이라고 볼 수 있다. 특히 필라 구조물은 터널 굴착 시에 최소주응력의 감소로 인한 터널 측벽에서 붕괴가 발생할 수 있으므로 본 연구에서는 터널 측벽에서 프리스트레스를 가하여 보다 능동적으로 내압을 가할 수 있도록 하였다. 필라부 보강공법의 전체적인 시공과정은 그림 4에 나타나 있다.

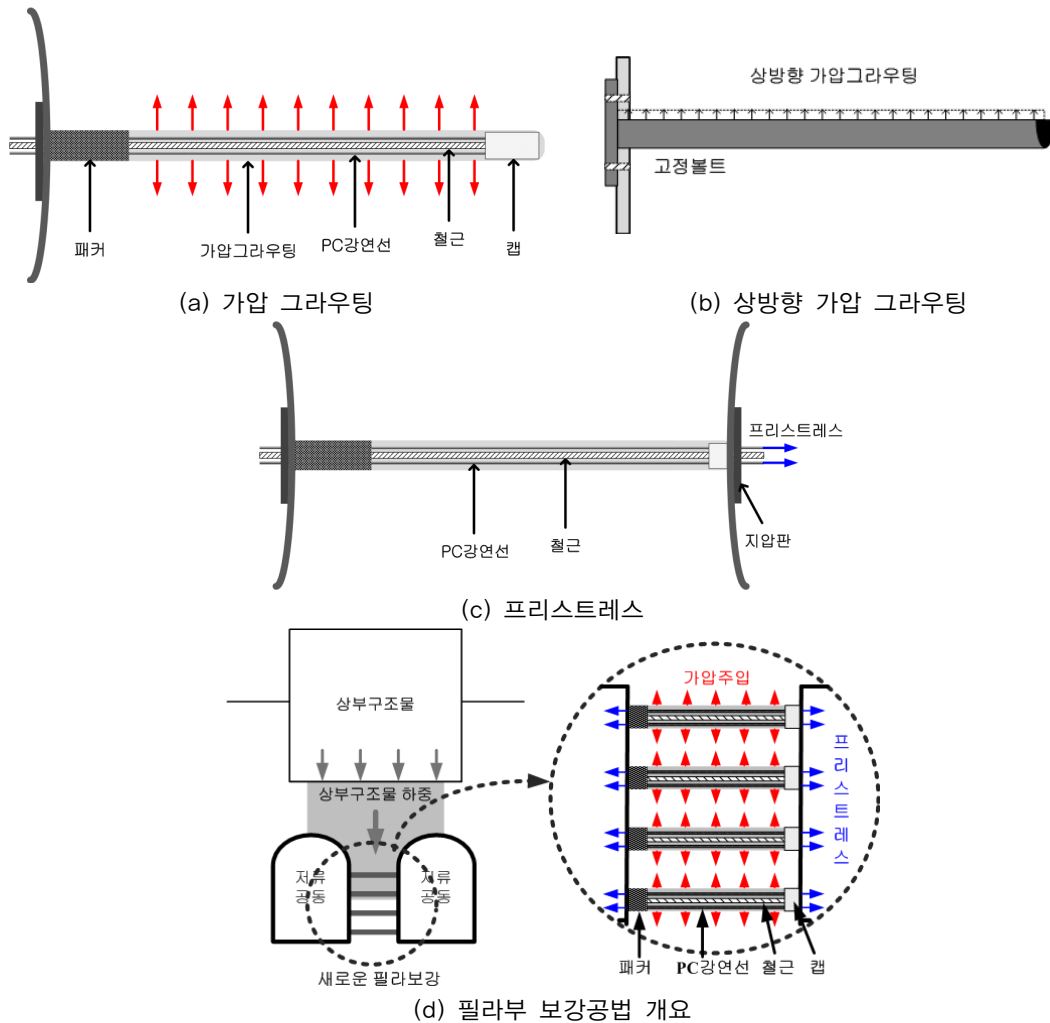


그림 3. 제안된 필라부 보강공법

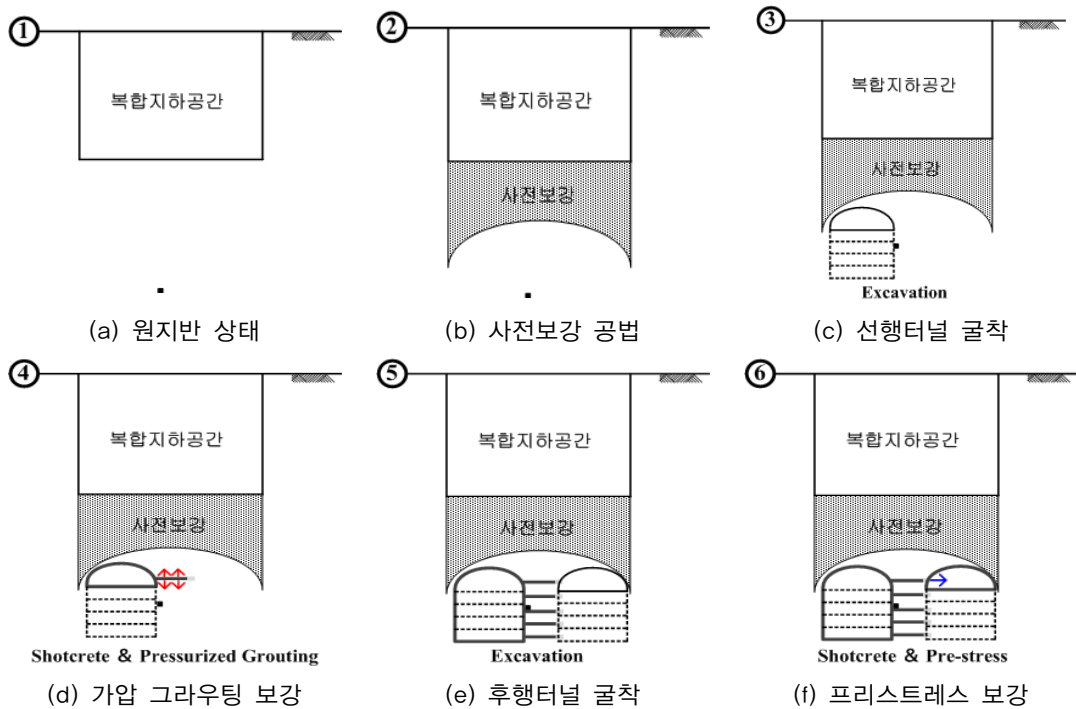


그림 4. 필라부 보강공법의 시공단계

### 3. 필라부 보강 효과 검증을 위한 수치해석

#### 3.1 수치해석 개요

본 논문에서는 복합지하공간 하부에 지하저류공동을 시공할 경우, 각각의 시공단계에 따른 필라부 보강공법의 거동특성을 파악하기 위해서 수치해석을 실시하였다. 수치해석은 크게 세 가지 케이스로 나누어 수행하였다. 숏크리트 지보만을 실시한 1차 보강, 숏크리트 지보뿐만 아니라 가압 그라우팅과 프리스트레스를 가하는 록필라 보강으로 나뉘며, 록필라 보강은 가압 그라우팅의 방향성에 따라 크게 두가지로 나누어 해석을 실시하였다. 굴착공 반경방향으로 전체적으로 가압 그라우팅을 실시한 경우와 상방향으로 가압 그라우팅을 실시한 경우로 해석을 실시하였다. 가압 그라우팅을 실시하게 되면 필라부에 집중되는 하중을 어느 정도 경감시킬 수 있을 것으로 판단되며, 전방향 가압 그라우팅과 상방향 가압 그라우팅의 경우 최대 주응력의 크기 및 방향성에 차이가 발생할 것으로 판단되며, 본 논문에서는 이를 규명하고자 해석 케이스를 표 1과 같이 나누어 해석을 실시하였다.

표 1. 록필라 보강 효과 검증을 위한 수치해석 케이스

	1차보강	록필라 보강공법 I	록필라 보강공법 II
주요 보강 공법	- 슛크리트	- 슛크리트 - 전방향 가압 그라우팅 - 프리스트레스	- 슛크리트 - 상방향 가압 그라우팅 - 프리스트레스

본 논문에서는 가상의 복합지하공간을 설정하여 하부에 지하저류공동을 시공하는 과정을 묘사하였다. 적용된 해석 요소망은 그림 5에 나타나 있으며, 터널의 양 측벽 간격은 8.5 m이며, 천단에서 바닥까지의 거리는 10.5 m로 지표에서부터 약 20~30 m사이에 존재한다. 일반적으로 복합지하공간은 지표와 가까이 위치하게 되며 지하저류공동은 복합지하공간과 근접하게 시공하게 된다. 본 해석에서는 이격거리를 12.5 m로 적용하였으며, 따라서 복합지하공간은 풍화대 구간에 위치하며, 지하저류공동은 연암구간을 통과하는 것으로 해석을 실시하였다. 적용된 지반물성치는 표 2에 나타나 있으며, 사전 보강영역은 2.0 m로 설정하였다.

도심지 복합지하공간 하부에 근접하여 지하저류공동 시설물을 시공할 경우, 사전보강 공법 및 필라부 보강은 굴착터널의 안정성뿐만 아니라 상부의 복합지하공간의 안정성을 위해서 필수적이다. 특히 필라부 주변지반에서의 안정성이 가장 중요하며, 본 논문에서는 각각의 시공단계별로 필라부 주변지반의 응력 및 지반 물성치 변화에 대해서 Mohr-Coulomb 파괴 기준을 적용하였다.

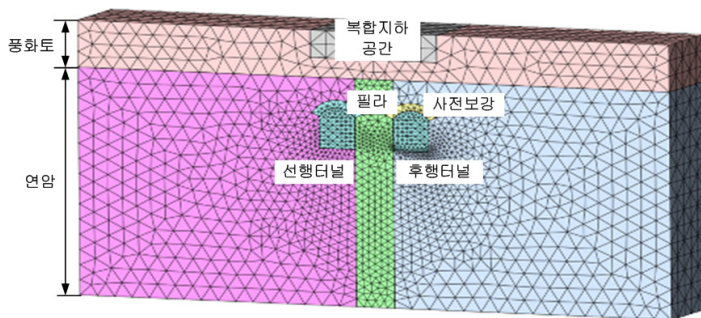


그림 5. 3차원 해석 요소망

표 2. 적용지반 물성치

대상지반	탄성계수 (MPa)	포아송비	단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	점착력 (kPa)	내부마찰각 (°)	측압계수
풍화토	50	0.3	20.0	26	33	0.5
연암	1500	0.27	24.0	139	34	1.0
사전보강영역	6400	0.22	26.2	339	40	1.0

터널은 1막장당 2 m씩 굴착을 실시하였으며, 필라부의 안정성을 확보하기 위해 먼저 선행터널을 굴착하고 선행터널이 10 m 굴착한 후에 후행터널이 따라가는 형식으로 해석을 실시하였다. 1차 보강을 하는 경우 굴착 후에 슛크리트를 치게 되는 것에 그치지만 필라부 보강공법을 적용한 경우 선행터널 굴착 후에 가압 그라우팅을 실시하고 후행터널 굴착 후에 프리스트레스를 가하게 되며, 상세한 시공단계는 표 3에 나타나 있다. 지하저류공동은 복합지하공간 건설과 동시에 개착식으로 시공될 수도 있지만 도심지에 이미 시공되어 있는 지하구조물 하부에 시공되는 경우가 대다수이다. 따라서 상부구조물과 근접하게 시공되기 때문에 터널에 이완하중이 과하게 작용하는 문제가 발생할 수 있다. 따라서 상부에서 과한 하중이 작용할 때 언더피닝(Underpinning)과 같은 공법으로 즉각 대처할 수 있도록 탑-다운(Top-down)방식으로 터널을 2.0 m씩 5단계로 굴착해 나가도록 하였다.

필라부 보강공법은 일반적인 터널보강에서 가압 그라우팅을 하는 것과 프리스트레스를 가하는 두 가지 과정이 추가된다. 본 논문에서는 무엇보다 이 두 시공과정에서 지반의 응력변화 양상을 파악하는 것을 목적으로 하고 있다. 먼저 그림 6(a)와 그림 6(b)에서 보는 것과 같이 가압 그라우팅은 전방향과 상방향으로 가압하도록 모사했다. 가압 그라우팅은 1,000 kPa 정도로 주입하도록 모사하였다. 가압 그라우팅은 필라부의 중앙에 위치하게 되며, 직경은 20 cm, 수직 및 수평 간격은 2.0 m로 모사하였다. 그림 6(c)에서 보는 것과 같이 후행터널을 굴착하고 나면 프리스트레스를 가하게 된다. 프리스트레스는 선행터널과 후행터널에 설치된 전면판을 통해서 100 kN으로 가하도록 모사하였다.

**표 3.** 지하저류공동의 시공단계

시공 단계	작업
1단계	지반조성
2단계	상부구조물 시공
3단계	선행터널 사전보강공법 / 선행터널 1막장 1번 굴착
4단계	선행터널 1막장 2번 굴착 / 선행터널 1막장 1번 슛크리트
5단계	선행터널 1막장 3번 굴착 / 선행터널 1막장 2번 (스�크리트 +가압 그라우팅)
6단계	선행터널 1막장 4번 굴착 / 선행터널 1막장 3번 (스�크리트 +가압 그라우팅)
7단계	선행터널 1막장 5번 굴착 / 선행터널 1막장 4번 (스�크리트 +가압 그라우팅)
8단계	선행터널 2막장 1번 굴착 / 선행터널 1막장 5번 (스�크리트 +가압 그라우팅)
(9~27) 단계	선행터널 5막장까지 반복 수행
28 단계	후행터널 사전보강공법 / 후행터널 1막장 1번 굴착
29 단계	후행터널 1막장 2번 굴착 / 후행터널 1막장 1번 슛크리트
30 단계	후행터널 1막장 3번 굴착 / 후행터널 1막장 2번 (스�크리트 +프리스트레스)
31 단계	후행터널 1막장 4번 굴착 / 후행터널 1막장 3번 (스�크리트 +프리스트레스)
32 단계	후행터널 1막장 5번 굴착 / 후행터널 1막장 4번 (스�크리트 +프리스트레스)
33 단계	후행터널 2막장 1번 굴착 / 후행터널 1막장 5번 (스�크리트 +프리스트레스)
(34~52) 단계	후행터널 5막장까지 반복 수행



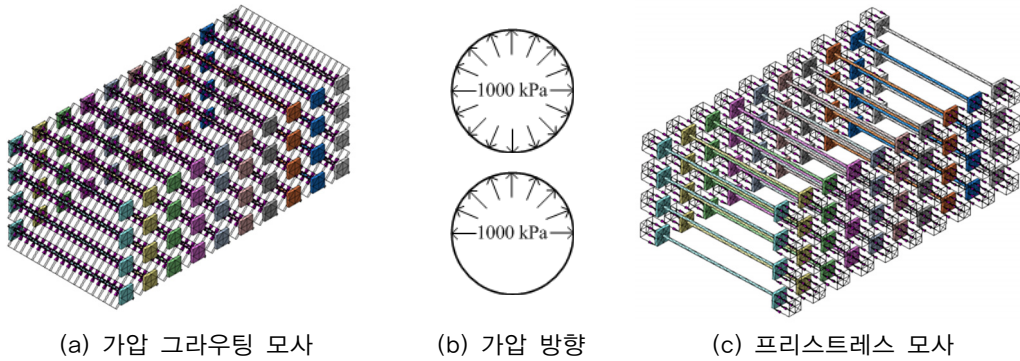


그림 6. 록필라 보강공법의 주요 보강 방법

### 3.2 수치해석 결과

본 논문에서는 필라부 보강공법에 대한 보강효과를 규명하기 위하여 수치해석을 실시하였으며, 각각의 시공단계별로 필라부에서의 거동특성을 판단하였다. 선행터널 및 후행터널을 굴착함에 따라 필라부의 안정성을 판단하는 것이 수치해석에서 가장 중요한 부분이다. 또한 선행터널과 후행터널을 굴착함에 따라 선행터널 측벽 필라부와 후행터널 측벽 필라부의 거동 특성이 다를 것으로 판단된다. 따라서 이러한 필라부 거동특성 및 안정성을 파악하기 위해서 그림 7에서 보는 것과 같이 각 터널의 측벽 중심부에서 최대 및 최소 주응력 변화양상을 판단하였다.

먼저 선행터널의 측벽에서 계측한 결과를 보게 되면, 초기 지반 조건은  $K_0$ 가 1인 인 지반거동을 보이게 된다(그림 8(a) 참조). 터널 측벽 중앙지점을 굴착하게 될 때 슛크리트만을 지보한 경우와 가압 그라우팅을 한 경우 모두 소성영역에 접어들게 되지만 응력거동을 보게 되면 차이가 있다. 상방향 가압 그라우팅을 한 경우 선행터널 중심부(측점지점)를 굴착하기 전에 상부지반에서 상방향으로 가압 그라우팅을 실시하게 된다. 따라서 실제로 중심부(측점지점)에서 굴착을 실시하여도 다른 경우와 비교하여 최대주응력이 감소하는 양상을 보인다(그림 8(b) 참조). 즉, 상부에서 가압 그라우팅한 효과가 하부 굴착지반까지 영향을 주어 최대주응력 감소효과가 있는 것을 알 수 있다.

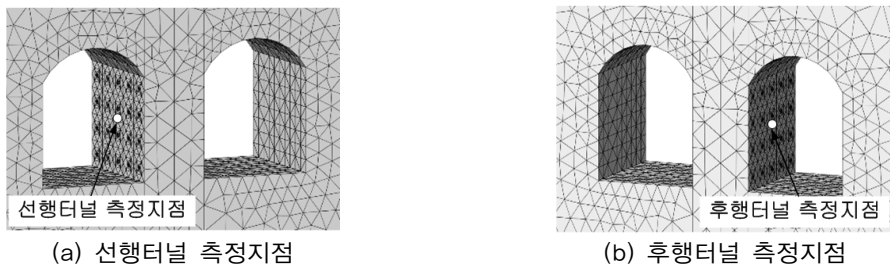
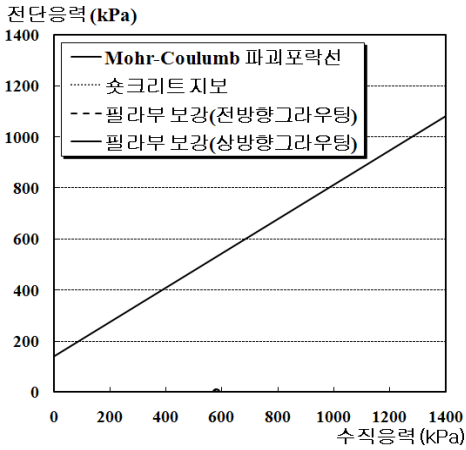
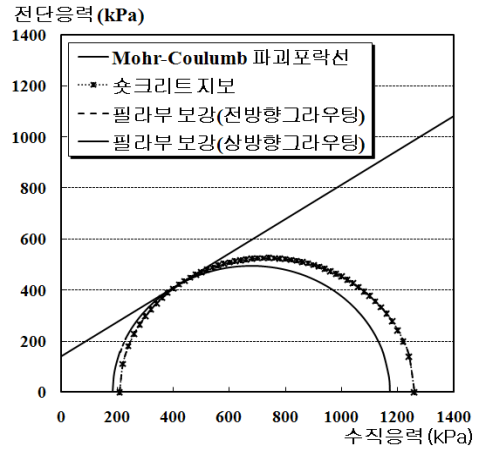


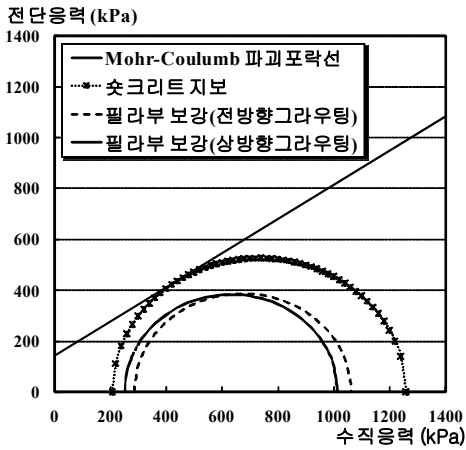
그림 7. 수치해석 결과 측정지점



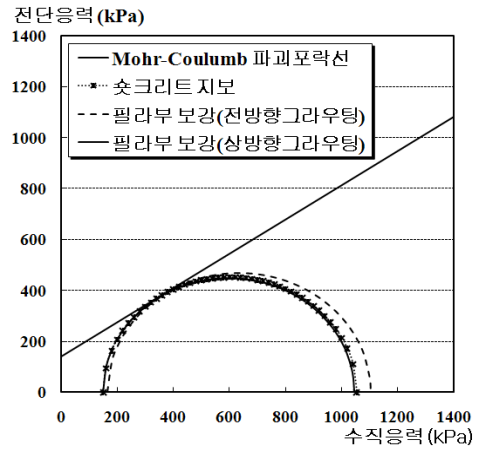
(a) 초기 지반조건



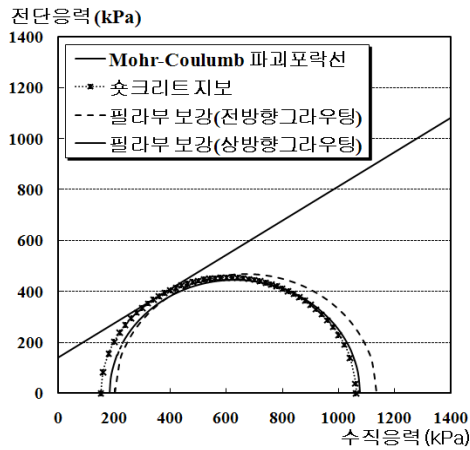
(b) 선행터널 굴착단계



(c) 가압 그라우팅 단계



(d) 후행터널 굴착 단계

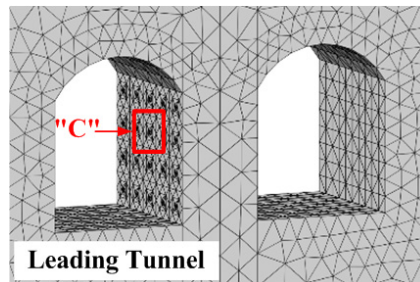


(e) 프리스트레스 단계

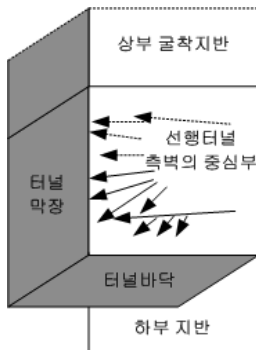
그림 8. 선행터널 측벽에서 해석결과

그림 8(c)는 측점지점 하부지반을 굴착함과 동시에 숏크리트 지보 및 전방향 또는 상방향으로 가압 그라우팅을 하는 단계이다. 그림에서 보는 것과 같이 오직 숏크리트로 지보하는 경우와 달리, 록팔라 보강공법의 경우 모두 Mohr-Coulumb 파괴포락선 안쪽으로 들어오는 것을 알 수 있다. 하지만 이 경우에서도 상방향으로 가압 그라우팅을 하게 되면 최대 주응력의 감소양상이 확연히 드러나는 것을 알 수 있다. 전방향으로 가압 그라우팅을 하게 되었을 경우 상방향 뿐만 아니라 하방향에도 가압 그라우팅 하는 응력이 전달되기 때문에 상방향 가압 그라우팅에 비해 최대주응력이 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

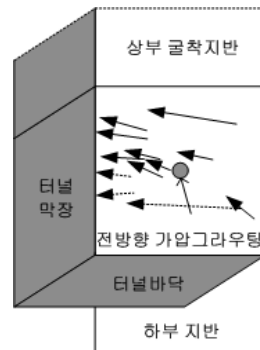
선행터널이 10 m 굴착한 후에 후행터널을 굴착하게 된다. 후행터널을 굴착하게 되면 그림 8(d)에서 보는 것과 같이 모든 해석 케이스에서 소성영역을 나타내는 것을 알 수 있다. 하지만 후행터널 굴착 후 프리스트레스를 가하게 되면 그림 8(e)에서 보는 것과 같이 제안된 필라부 보강공법 모두 Mohr-Coulumb 파괴포락선 안쪽으로 들어오는 것을 알 수 있다. 숏크리트 지보를 한 경우 터널 벽면의 변위를 억제하는 수동적인 보강공법이기 때문에 최소주응력 증가효과가 크지 않다. 하지만 전면판을 통해 프리스트레스를 가하게 되면 가하는 하중만큼 터널 벽면에서 내압을 가하는 능동적인 보강이 가능하므로 터널의 안정성을 확보할 수 있게 된다.



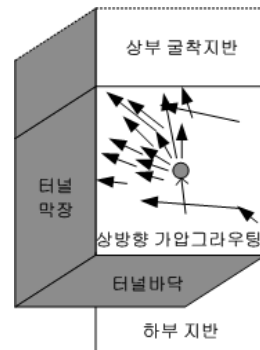
(a) 선행터널 중심부 측벽



(b) 무보강

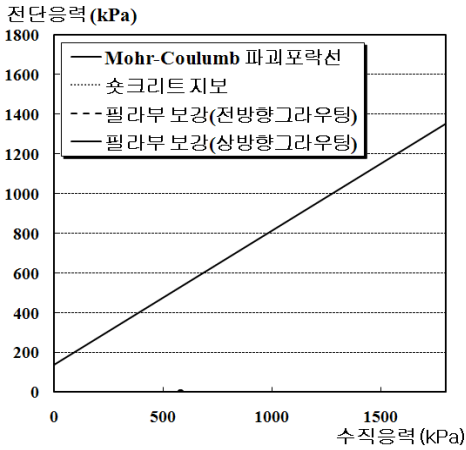


(c) 전방향 가압 그라우팅

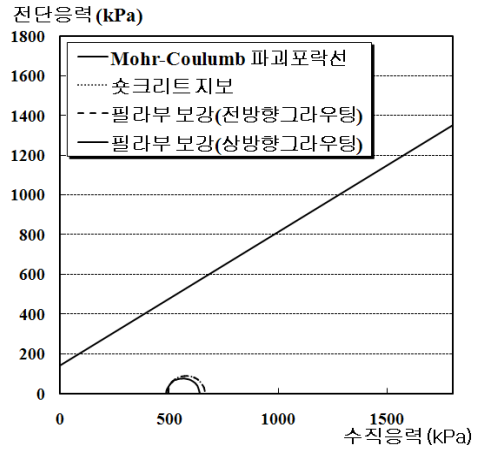


(d) 상방향 가압 그라우팅

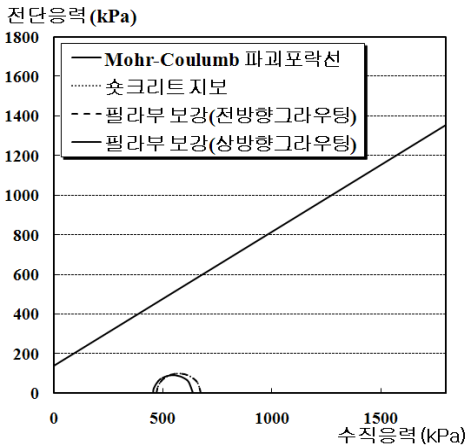
그림 9. 선행터널 중심부 측벽에서의 최대주응력 분포양상



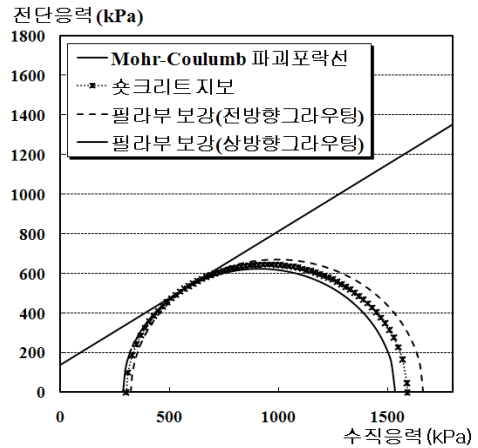
(a) 초기 지반조건



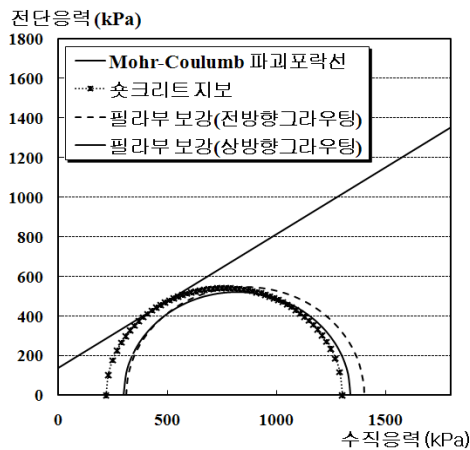
(b) 선행터널 굴착단계



(c) 가압 그라우팅 단계



(d) 후행터널 굴착 단계



(e) 프리스트레스 단계

그림 10. 후행터널 측벽에서 해석결과

본 논문에서는 필라부 보강공법 중 가압 그라우팅 효과를 검증하기 위하여 그림 9(a)에서 보는 것과 같이 선행터널의 측벽 중심부에서 가압을 하는 시공단계에서의 최대주응력의 크기 및 방향성을 검토하였다. 그림 9(b)에서 보는 것과 같이 슛크리트만 지보한 경우 터널 굴착면 및 하부방향으로 최대주응력이 작용하였다. 이는 선행터널 굴착에 따라 터널의 막장 및 접선방향으로 하중이 집중되기 때문이다. 상방향 가압 그라우팅의 경우 그림 9(d)와 같이 최대주응력이 상방향으로 형성되면서 상부에서 작용하는 하중을 가압 그라우팅에 의해 받아주는 효과를 볼 수 있었다. 또한 전방향 가압 그라우팅의 경우 슛크리트에 의한 지보와 상방향 가압 그라우팅의 중간지점으로 방향성을 나타냈다 (그림 9(c) 참조).

후행터널의 측벽에서 측정한 결과는 그림 10에 나타나 있다. 그림 10(a), (b), 및 (c)에서 보는 것과 같이 초기지반 조건, 선행터널 굴착, 그리고 가압 그라우팅 단계에서는 후행터널이 굴착되지 않은 지반 상태이기 때문에 각 시공단계에 큰 영향을 받지 않고 안정적인 지반 상태를 나타낸다. 하지만 그림 10(d)에서 보는 것과 같이 후행터널을 굴착하게 되면 필라부가 형성이 되면서 필라부로 하중이 집중하게 된다. 따라서 최대주응력이 급격하게 증가할 뿐만 아니라 최소주응력도 감소하게 되어 3가지 경우 모두 소성영역에 들어오게 된다. 따라서 후행터널 굴착 단계가 필라부 시공단계에 있어서 가장 위험한 단계라고 할 수 있으며, 이후의 터널보강 공법이 전체 터널의 안정성에 있어서 매우 중요한 것을 알 수 있다. 그림 10(e)에서 3가지 터널보강 공법을 비교해 보았을 때, 먼저 슛크리트만을 지보한 경우, 하부지반의 굴착으로 인해 최대주응력은 조금 감소하게 되지만 최소주응력의 감소로 인하여 여전히 소성영역에 머무는 것을 알 수 있다. 하지만 필라부 보강공법은 프리스트레스를 가함에 따라 최소주응력이 증가하여 Mohr-Coulumb 파괴포락선 안쪽으로 Mohr 원이 위치하여 터널의 안정성이 확보되는 것을 알 수 있다.

본 논문에서는 시공단계에 따라 필라부의 안정성을 최대주응력과 최소주응력의 변화양상을 통해서 판단하였다. 본 논문의 해석 결과를 보았을 때, 후행터널을 시공하기 전에 가압 그라우팅을 하는 것과 후행터널을 굴착함과 동시에 프리스트레스를 가하는 것이 필라부의 안정성 확보에서 중요한 요소인 것을 검증하였다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 복합지하공간 하부에 근접하여 지하저류공동 구조물이 시공될 때, 필라부 보강공법을 제안하였다. 제안된 공법을 검증하기 위해 슛크리트 지보, 전방향 필라부 보강, 상방향 필라부 보강으로 나누어 각각의 시공단계에 따라 필라부 주변지반의 거동을 수치해석을 통해 분석하였으며, 이에 대한

---

결론은 다음과 같다.

1. 전방향 가압 그라우팅을 실시한 경우 상부의 하중을 받아주기도 하지만 가압 그라우팅에 의한 하중이 하부에도 작용하여 최대주응력의 감소양상이 상방향 그라우팅에 비해 크지 않았다. 하지만 쏬크리트만을 지보한 경우와 비교해 보았을 때 최대주응력 감소효과가 있는 것으로 나타났다. 상방향 가압 그라우팅은 상부의 하중을 받쳐주는 효과가 있기 때문에 최대주응력이 감소하는 양상을 보였다.
2. 가압 그라우팅의 정도 및 방향성에 따라 최대주응력의 방향성이 변화하는 것을 알 수 있었다. 쏬크리트만 지보한 경우 터널 굴착면 및 하부방향으로 최대주응력이 작용하고, 상방향 가압 그라우팅의 경우 최대주응력이 상방향으로 형성되면서 상부에서 작용하는 하중을 가압 그라우팅에 의해 받아주는 효과를 볼 수 있었다. 또한 전방향 가압 그라우팅의 경우 쏬크리트에 의한 지보와 상방향 가압 그라우팅의 중간지점으로 방향성을 나타냈다.
3. 후행터널을 굴착하게 되면 필라부가 형성되면서 필라부로 하중이 집중되어 소성영역이 발생하게 된다. 따라서 후행터널 굴착 후 프리스트레스를 가하게 되며, 최소주응력 증가로 인하여 필라부의 안정성이 확보되는 것을 알 수 있었다. 쏬크리트 지보를 한 경우 터널 벽면의 변위를 억제하는 수동적인 보강공법이기 때문에 최소주응력 증가효과가 크지 않았다. 하지만 전면판을 통해 프리스트레스를 가하게 되면 가하는 하중만큼 터널 벽면에서 내압을 가하는 능동적인 보강이 가능하므로 터널의 안정성을 확보할 수 있다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업 (과제번호: 10기술혁신E04)의 연구지원에 의하여 수행된 결과의 일부로서 관계당국에 심심한 사의를 표합니다.

## 참고 문헌

1. 김도형, 박준경, 김영근, 오세준, 이두화 (2003), “대단면 근접병설터널의 설계 및 안정성 평가기법에 관한 연구”, 한국암반공학회 춘계학술발표회, pp. 51-66.
2. 김상균, 김태혁, 이인모 (2003), “2arch 도로터널 설계 및 시공 개선방안 고찰”, 한국터널공학회논문집, 제5권, 제1호, pp. 29-38.

3. 신영완, 김영근 (2010), “대단면 근접병설터널에서의 필러부 거동특성 검토”, 한국암반공학회지, 제20권, 제3호, pp. 131-144.
4. 유광호, 김종규 (2011), “필라폭이 병설터널의 안정성에 미치는 영향 평가”, 한국터널지하공간학회 논문집, 제13권, 제2호, pp. 115-131.
5. 장석부, 문상조, 권승, 김준구, 권기대 (2004), “철도역사 및 선로 하부를 통과하는 대단면 3-Arch 터널의 설계”, 한국철도학회 2004년도 춘계학술대회, pp. 210-215.
6. Hoek, E., Brown, E. T. (1980), “Underground excavation in rock”, Institution of Mining and Metallurgy, London, pp. 527.
7. Kamimura, M. (2002), “Discussion on the behaviors of parallel tunnel with a small clearance”, Proc. of the 28th ITA General Assembly and World Tunnel Congress, pp. 898-906.
8. Kobayashi, M. (1994), “Observational construction of a large sectional minimum interval twin road tunnel in urban alluvial loose sand soil”, Tunneling and Ground Conditions, Balkema, Rotterdam, pp. 157-164.
9. Matsuda, T., Terada, K., Igarashi, M., Miura, K. (1998), “Ground behavior and settlement control of twin tunnels in soil ground”, Tunnels and Metropolises, Vol. 2, pp. 1193-1198.