

# 아치형 복개터널의 설계

유 건 선 / 한라공과대학 교수



## 1. 복개터널 공법

개착 공법(Open cut)은 지표면에서 지반을 굴착하고 구조물을 구축한 후에 원상태로 지표면을 복구하는 방법으로, 도시의 지하철, 공동구, 지하도로, 지하보도, 상하수도, 전력통신구 등의 건설에 널리 적용되고 있다. 최근에는 각종 시설과의 입체 교차에 따른 문제점이 발생되고 노면 교통량이 증가하고 있으며, 상대적으로 노상 공사의 규제, 환경 보전 등의 문제로 굴착식 터널공법이 빈번히 이용되고 있으나, 평탄한 지형에 얕은 터널을 굴착할 경우에는 시공법, 안전성, 경제성 등의 측면에서 개착 공법이 가장 적합한 공법이라고 할 수 있다.

### 1.1 복개터널의 구조형식

우리 나라에서도 이미 개착식 구조물은 상당히 많은 시공 사례가 있으며 지금도 지하철 혹은 지중 구조물 설치시에 가장 많이 적용되는 공법 중의 하나이다. 국내에서 현재까지 개착공법에 적용된 구조물은 거의 대부분이 상자형(Box Type)으로 설계되어 상재하중 및 토압을 그대로 구조물이 받도록 설계되어 있다. 따라서 현재까지의 복개터널 구조체는 벽체 및 슬래브의 두께가 매우 크게 설치되어야만 하였다. 그러나 일회 콘크리트 타설 능력의 제한으로 말미암아 작업 속도가 늦고, 타설시에도 건조수축균열, 열팽창 등의 악영향으로 그 품질의 신뢰성이 크게 떨어진다. 또한 콘크리트는 자중이 큰 재료이므로 외력을 받아 주기 위하여, 부재의 치수를 크게 하면 자중도 또한 급격히 증가하여 부재가 커지기 때문에 일반적으로 구조적으로 바람직하지 못하다.

박스형 복개 구조물은 현장 시공에 간편한 단면인 사각형 박스 형태로 구성되어서 구조적으로 매우 불리한 큰 단면을 필요로 하고 또한 중량이 매우 커지므로 공장에서 제작하여 운반 설치하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 현장에서 콘크리트를 타설하여야 하는 관계로 콘크리트의 품질관리가 용이하지 않고, 콘크리트의 양생 기간이 길어서 전체 작업 공정에 지대한 영향을 미치고 있다. 특히 도로상의 지하차도나 지하보도 등 지하통로 신설이나 하천 횡단 또는 다른 도로나 철도 등과 입체로 교차해야 하는 경우에는, 통과 구조물을 설치한 후에 복개하는 복개터널의 개념을 주로 적용하고 있다. 그러나 이 경우에는 구조물 길이가 한정되고 단면이 단순하며, 토피가 크지 않기 때문에 설계 및 시공자의 능력에 따라 경제적이고 역학적으로도 문제가 없는 구조물을 건설할 수가 있다. 따라서 이 같은 경우에는 대부분의 작업이 지상이나 얕은 심도에서 이루어지기 때문에 전체 작용 하중에서 자중이 부담하는 몫이 작고 기존의 터널 개념 보다는 구조물 개념으로 접근할 수 있다. 특히 구조물을 아치형 등 구조적으로 유리한 단면으로 건설하면 구조물의 두께를 크게 줄일 수 있어서 구조체의 운반이 가능하여 프리캐스트 콘크리트 부재로 공장제작할 수도 있다.

선진 외국에서는 이미 오래전 부터 이러한 시도가 이루어져 왔으며 많은 성공적인 시공실례를 볼 수 있다. 즉 공장에서 엄격한 품질 관리하에 프리캐스트 콘크리트 부재를 제작하여 현장으로 운반해서 조립함으로써 구조물을 완성한 후 주변을 복개하면 기존 박스형으로 현장타설하는 방법보다 경제적이며, 또한 현장타설로 야기되는 교통장애, 분진, 소음, 일기의 영향과 각종 민원의 원인을 사전에 방지할 수 있다. 시공현장에서는 이러한 형태의 설계 및 시공법에 대한 요구가 날로 팽배해지고 있는 실정이다.

프리캐스트 콘크리트 아치형 복개터널(이하 아치형 복개터널로 칭함)공법은 인류의 역사와 함께 토목 구조물의 한 형식으로 발전하여 온 아치구조를 일반 산악터널구조와 유사하게 개착식 지하구조물에

적용한 공법으로서, 1960년대 유럽에서 개발되어 주로 도심지를 통과하는 일정 심도의 지하차도나 지하철, 항공기의 격납고나 주차장 등에 활용되었으며, 장기간의 시공 사례에 비추어 구조적 안전성과 시공성 및 경제성이 입증된 공법이다. 특히, 국내에서 적용되고 있는 기존 현장타설 상자형 콘크리트 구조물을 프리캐스트 콘크리트 아치구조물로 대체시킬 경우에 환경보호, 효과적인 현장 관리, 시공 기간 단축, 공사중 교통통제의 최소화, 공사비 감소, 추후 유지관리 양호 등의 효과를 유도할 수 있다.

## 1.2 프리캐스트 콘크리트 아치형 복개터널의 특징

프리캐스트 콘크리트 아치 구조물은 콘크리트 구조물의 프리캐스트 활용 장점과 아치구조물의 구조역학적인 장점을 효과적으로 결합한 구조물이라 할 수 있다.

### 1.2.1 프리캐스트 콘크리트 구조물로서의 특성

- ① 공장에서 제작되어 표면 처리가 좋은 고강도 프리캐스트 콘크리트 구조는 수밀성이 좋아서, 수분 침투나 부식 등에 대한 구체방수효과가 증대되므로 유지관리 측면에서 효과적인 구조물이다.
- ② 프리캐스트 콘크리트 구조물은 현장타설방식에 비해서 철근배근 및 콘크리트강도의 신뢰성으로 인하여 재질이 균등하고 충분한 소요강도를 보장할 수 있으며, 따라서 부실공사를 원천적으로 예방할 수 있다.
- ③ 프리캐스트 콘크리트 구조물은 시공후 최소의 보수와 유지관리만으로 비교적 영구적인 구조물로서의 설계수명을 갖는다.
- ④ 프리캐스트 콘크리트 구조는 현장타설 콘크리트 구조물에서 발생하는 건조수축을 효과적으로 조절할 수 있으며, 작은 값의 물/시멘트 비를 갖는 고강도 콘크리트를 사용하여 단기에 발생하는 크리프의 효과적 조절이 가능하다.
- ⑤ 공장제작된 프리캐스트 콘크리트 구조는 거푸집이 최소한으로 필요하며, 현장에서는 조립만 하므로 시공 현장이 깨끗하고, 시공 기간이 상당히 단축된다.

### 1.2.2 콘크리트 아치 구조물로서의 특성

- ① 아치 구조물은 균일한 상재하중하에서 축방향 압축력이 주로 작용하므로, 콘크리트의 장점인 높은 압축 강도를 최대한 활용할 수 있으므로 매우 경제적인 단면으로 설계가 가능하다.
- ② 콘크리트 아치 구조물은 뒷채움흙과 구조체 사이의 상호작용(soil-structure interaction) 효과로 인하여 상자형 단면보다 작은 단면적이 요구된다. 따라서 최소 두께의 아치 단면 구성이 가능하므로 프리캐스트 콘크리트로의 제작 및 설치가 용이하다.
- ③ 콘크리트 아치 구조물은 아치형의 압축 부재로서 고강도 콘크리트가 효과적이며, 따라서 주로 압축력을 지지하는 콘크리트의 특성상 균열 발생이 거의 없어 구조물의 유지관리가 용이하다.

### 1.2.3 프리캐스트 콘크리트 아치형 복개터널로서의 특성

- ① 프리캐스트 콘크리트 아치 구조물은 위에서 언급한 프리캐스트 콘크리트의 장점과 아치 구조물의 장점을 모두 갖고 있는 구조물이다.
- ② 완공후의 프리캐스트 아치형 복개터널 구조물은 구조적으로 안전하며, 구조설계 초과하중 작용시

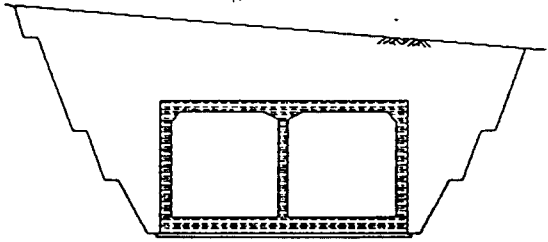
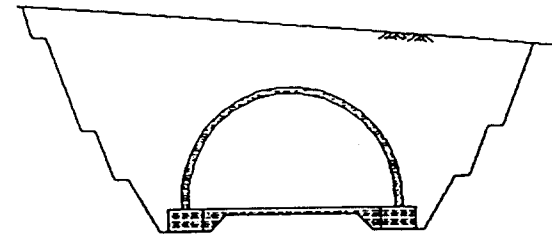
뒷채움흙에 따른 흙-구조물 상호작용으로 인하여 구조적으로 여유가 있다.

- ③ 국도상이나 일부 산간 지방에 설치될 경우에, 기존 절개에 의한 도로 개설에 비해서 복개로 인하여 생태계의 통로를 제공하여 자연 환경 보호에 효과적이다.
- ④ 국도상에 설치될 경우에 공사 중에 차량통행의 일부 허용이 가능함에 따라, 전면 교통통제 등을 피할 수 있다.
- ⑤ 그러나, 압축부재인 복개아치 구조물은 고강도 콘크리트 사용으로 인하여 단면이 비교적 작으므로, 복개시 다짐으로 인한 시공 단계별 편토압과 일부 정토압에 따른 아치 구조물의 거동 특성을 설계에서 반드시 고려하여야 한다.

특히, 고속도로 공사의 경우, 신설 도로상에 다수의 마을 진입로용 지하통로 BOX나 수로용 BOX 구조물이 산재하여 있어 공사기간이 많이 소요되는 BOX 구조물 공사중에는 다수의 공사용 차량이 마을 주변의 도로로 우회 통과하게 되므로 소음, 분진등 많은 민원을 유발하게 된다. 따라서 이와 같은 BOX 형태의 구조물을 프리캐스트 콘크리트 아치형 구조물로 대체하여 구조물 공사 기간을 대폭적으로 단축함으로써 공사용 차량이 신설 도로를 따라 통과하게 되므로 상기와 같은 민원 발생 요인을 최소화 할수 있다.

한편, 재래식 현장타설 콘크리트 상자형 구조물과 프리캐스트 콘크리트 아치 구조물과의 구조적 특성 및 장·단점을 비교하면 <표 1>과 같다.

표 1. 현장타설 콘크리트 상자형 구조물과 프리캐스트 콘크리트 아치 구조물의 비교.

구 분	현장타설 콘크리트 BOX 형	프리캐스트 콘크리트 ARCH 형
표준단면		
구조적 특 성	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 복개구조물로서는 일반적인 단면임.</li> <li>• 비교적 균일한 상재하중을 구조물 하단의 지반에 균일하게 전달하는 단면으로 구조적으로 안정함.</li> <li>• 구조적으로는 힘을 받는 구조인 슬래브나 골조(Frame) 구조이므로 콘크리트 단면이 과다하게 되며 따라서 경제성이 떨어짐.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 비교적 균일한 상재하중을 아치형의 구조로 지반에 직접 전달하는 단면으로서 복개 구조물에서는 매우 안정함.</li> <li>• 구조적으로 압축력을 주로 받는 아치 구조이므로 콘크리트의 주요 특성인 압축강도를 최대한 활용하여 매우 경제적인 단면이 가능함.</li> </ul>
장 단 점	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 복개구조물로서는 안정한 단면임.</li> <li>• 균일한 하중에 비하여 휨부재로서의 과다한 단면이 소요되며, 따라서 경제성이 떨어짐</li> <li>• 현장타설 작업으로 시공속도가 늦고 품질 관리 불량.</li> <li>• 휨부재로서 균열 발생시 방수문제 야기.</li> <li>• 공사중 기존도로 차단이 불가피함.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 균일한 하중에 유리한 아치형 단면으로서 압축력에 유효한 만큼의 최소단면의 소요로 경제성이 좋음.</li> <li>• 프리캐스트 제작설치로 급속 시공이 가능하고, 품질관리 용이 .</li> <li>• 프리캐스트 제작으로 콘크리트의 수밀성이 좋아 구체 방수효과가 크며 압축 부재로서 균열 발생이 적어 방수에 효과적.</li> <li>• 공사중 기존도로의 차량통행 가능.</li> </ul>
공 기	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1회 타설길이 : 20~30m</li> <li>• 타 설 주 기 : 평균 20일/회</li> <li>• 시 공 속 도 : 평균 40m/월</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 세그먼트 길이 : 2~4m</li> <li>• 세그먼트 설치주기 : 3~5세그먼트/일</li> <li>• 시 공 속 도 : 평균 200m/월</li> </ul>
공 사 비	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2차선 도로기준, 1,100만원/m (토공포함) (기존 도로복개 경우, 굴착비 제외)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2차선 도로기준, 870만원/m (토공포함) (기존 도로복개 경우, 굴착비 제외)</li> </ul>

## 2. 아치형 복개터널의 설계방법

비교적 얇은 두께로 제작 가능한 프리캐스트 콘크리트 복개아치 구조물은 완공 상태에서는 되메움 흙의 지지효과(토압)에 의해서 구조적으로 상당히 안정된 구조물이지만, 시공 도중에는 구조물 설치 후 되메움흙의 다짐시, 터널 좌우측을 동시에 같은 높이로 되메움할 수도 있지만 그렇지 못할 경우, 좌우측 중 한 부분이 일부 되메움된 후에 반대편 측에서 되메움이 이루어지므로, 이와같은 좌우측 되메움 높이 차로 인한 편토압에 의해서 아치 구조물의 거동은 비교적 복잡하게 나타나게 된다. 따라서 프리캐스트 콘크리트 복개아치 구조물은 시공단계별 편토압에 의한 단면력 산정 방법이 설계에서 아주 중요한 과정 이라고 할 수 있다.

### 2.1 아치형 복개터널의 거동 특성

본 설계에 적용하는 아치구조물은 아치 평면에 직각인 방향으로의 길이, 즉 아치폭이 2~3m 크기의 한 단위 아치 부재를 여러개 연결하여 사용하게 되므로 아치평면에 대한 2차원 해석만을 수행하게 된다.

아치구조물은 양단 힌지, 3점 힌지, 양단고정 등 3종류의 구조형식이 주로 사용된다. 본 설계에서는 양단 힌지와 양단 고정인 형식을 사용하게 된다. 양단힌지와 양단고정인 아치구조물은 1차 및 2차의 부정정구조물로서 단순 정정구조에 비해서 부정정 여력이 있어 비교적 경제적인 구조물이라고 할 수 있다. 또한, 아치구조물은 부재 축력에 의해서 외력을 지지하는 특성을 갖고 있어, 고강도 콘크리트 부재를 사용할 경우에 그 효과는 더욱 확대된다고 할 수 있다.

아치구조물의 해석은 주로 Energy Method에 의해서 일정한 곡률을 갖는 경우에 비교적 간단한 수식으로 가능하나, 실제 사용되는 아치구조물은 이와같이 단순한 수식으로 표현할 수 없다. 즉, 아치구조물 형상은 현장 조건 및 Clearance 등의 제약조건으로 인하여 단순 곡률을 갖는 형상으로 유도하기가 어려워 단순 수식으로 표현하기에는 무리가 있다. 따라서 실제 적용구조물로서 아치형상은 여러 수치해석 방법 등을 이용하여 단면력 해석이 가능하며, 특히 유한요소법이나 유한차분법의 사용은 그 표현방법의 다양성으로 인하여 매우 효과적이라고 할 수 있다. 더구나 본 설계에 작용하는 하중은 수평토압 및 상부하중까지 각각 또는 동시에 지지할 수 있는 구조물을 요구하고 있다. 이와같이 하중이 복잡할 경우에 유한요소법이나 유한차분법에 의한 아치구조물의 해석은 더욱 효과적이라고 할 수 있다.

양단힌지인 아치구조물에 토압이 작용할 경우에 아치구조물의 거동특성은 <그림 1>~<그림 4>와 같다. 이때 편토압과 균형토압 그리고 상재하중에 의하여, 아치구조물은 힘에 의한 인장영역이나 압축영역 구분없이 횡방향 거동 및 아치 크라운부의 상하 거동을 나타낸다. 따라서, 되메움흙에 의한 수평하중과 수직하중 등이 작용하는 아치구조물에서의 토압은 기존 상자형 구조물과 같이 정지토압만으로 적용할 수가 없게 된다. 즉 토압과 아치구조물의 거동이 상호의존적인 관계(soil-structure interaction)를 나타내고 있어 실모형 실험에 의한 구체의 안전성 검증과 설계자료 확보가 요구된다고 할 수 있다.

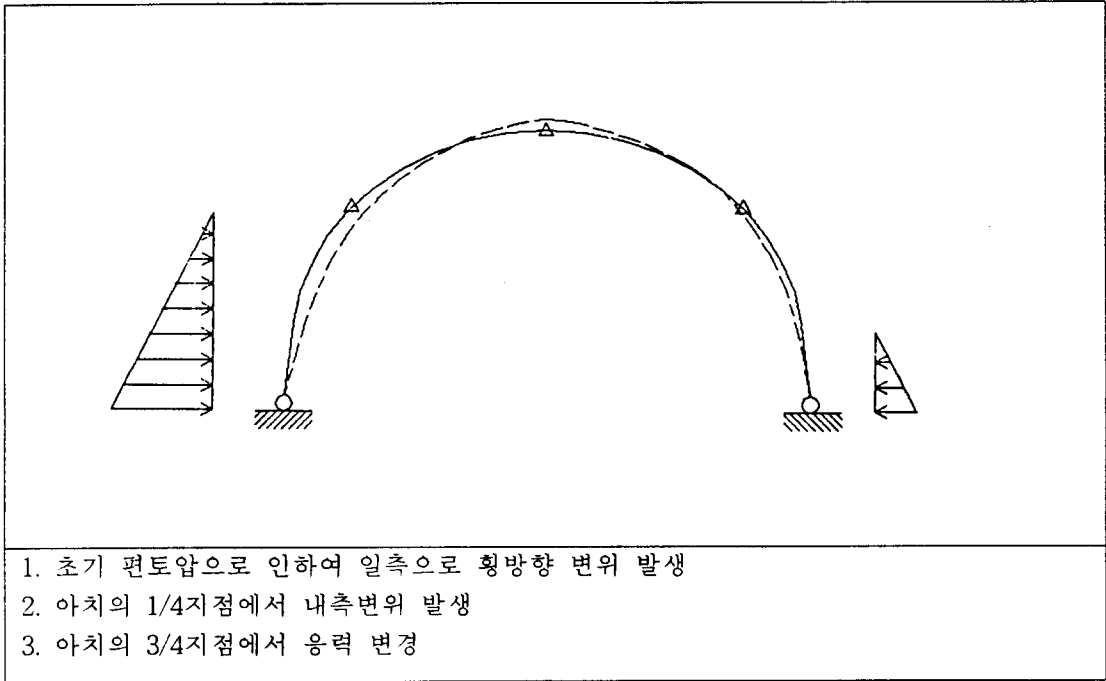


그림 1. 편토압이 작용하는 경우 (시공 초기 단계)

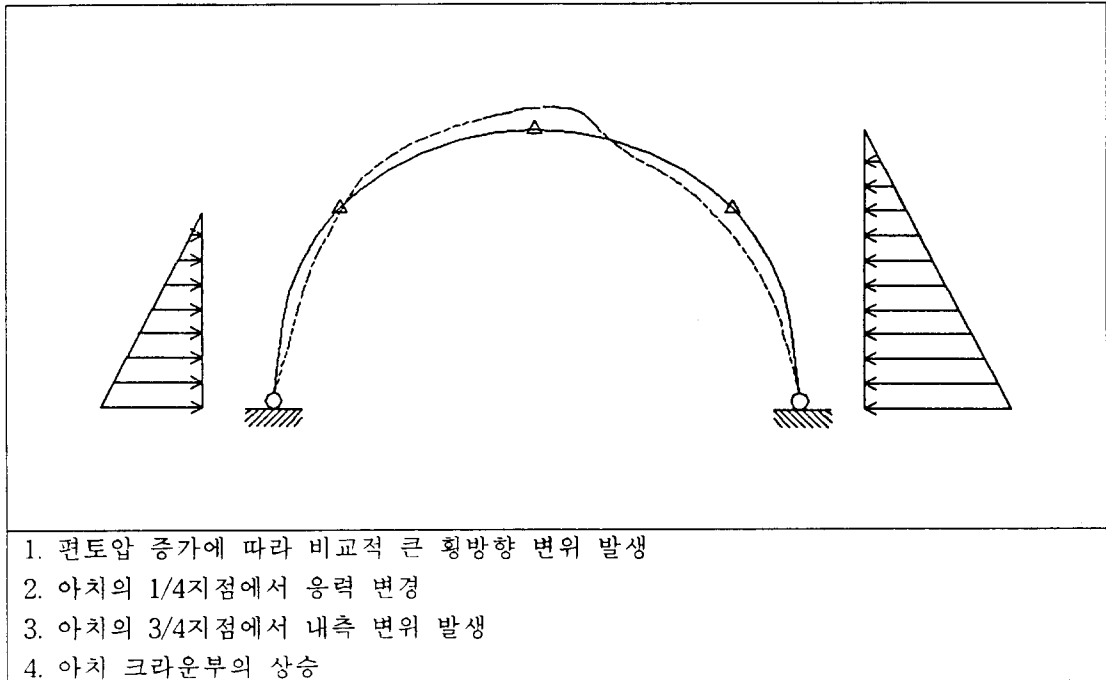


그림 2. 편토압이 작용하는 경우 (시공 중간 단계)



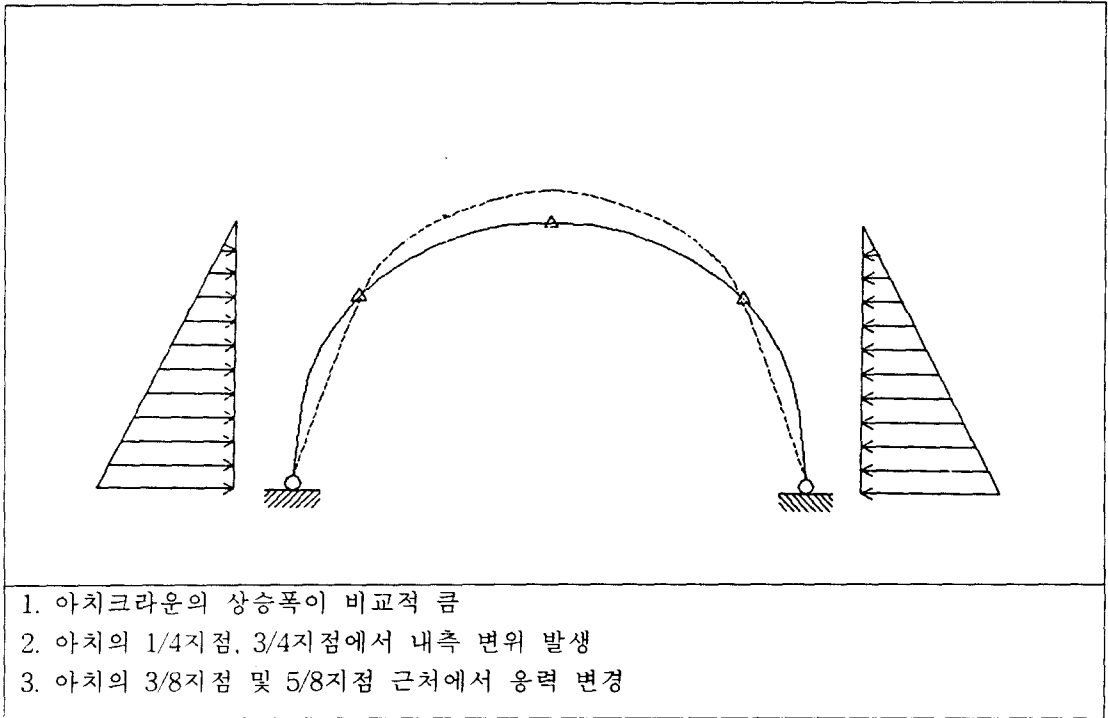


그림 3. 균형토압이 작용하는 경우 (시공 중간 단계)

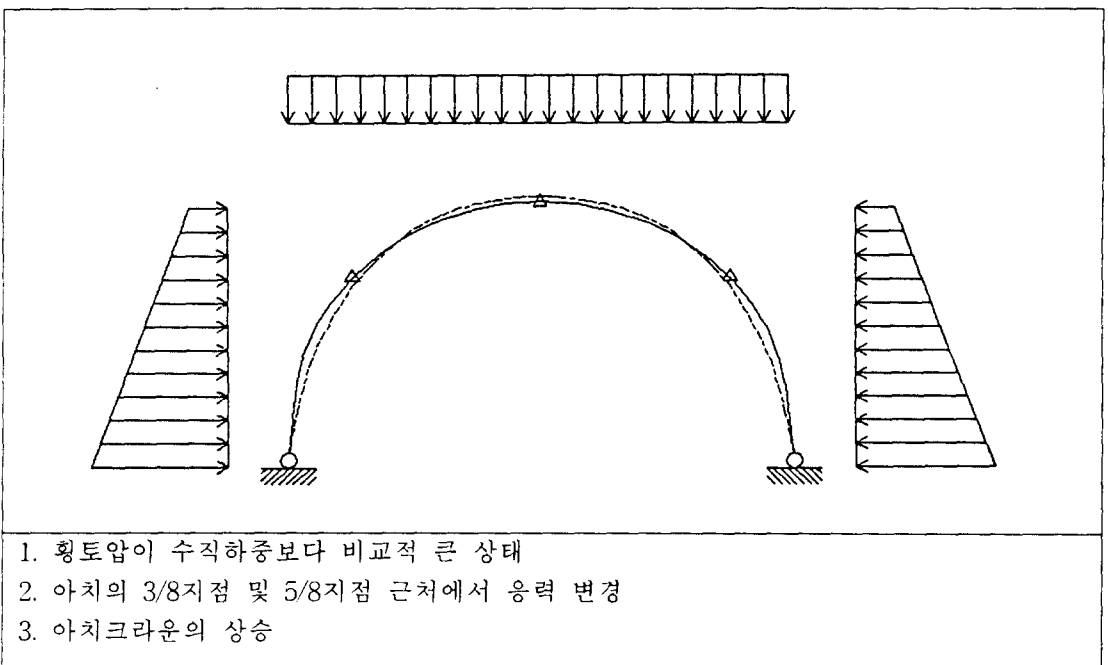
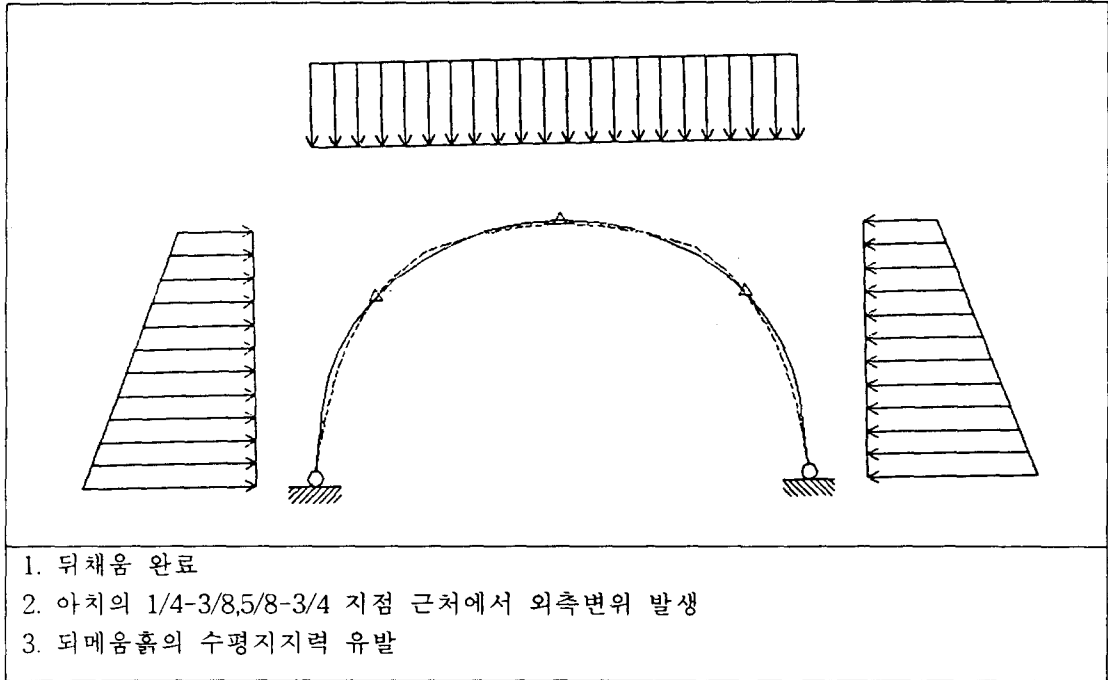


그림 4. 균형토압 + 상재하중이 작용하는 경우 (시공 중간 단계)



1. 뒤채움 완료
2. 아치의  $1/4-3/8, 5/8-3/4$  지점 근처에서 외측변위 발생
3. 뒤메움흙의 수평지지력 유발

그림 5. 균형토압 + 상재하중이 작용하는 경우 (시공 완료 단계)

## 2.2 설계단면력 산정방법

콘크리트 아치 구조체의 정역학적인 특징은 되메움이 단계적으로 진행됨에 따라 구조체가 형성되며, 매 단계마다 하중이 재하된다는 점이다. 되메움과 콘크리트 아치 구조체의 상호의존적 작용이 수반되는 이러한 과정을 수치적으로 재현하기 위하여, 콘크리트 아치 구조체의 중심축에 연직인 평면단면을 고려하여 해석한다. 이러한 평면변형을 해석조건은 되메움 단계가 콘크리트 아치 구조체의 축을 따라 최소한 아치 정상까지 작은 단계로 수행되기 때문에 타당한 것으로 판단된다.

### 2.2.1 비선형 스프링계수를 이용한 FEM 해석

토압-구조물의 상호작용에 의한 거동특성을 판단하기 위해서 되메움측과 프리캐스트 아치 구조물에 대하여 상호작용을 표현하는 인터페이스 요소를 모델링하여 유한차분법이나 유한요소법을 이용하여 해석을 수행할 수 있다. 그러나 이와 같은 인터페이스 요소를 이용한 수치해석에서는 많은 컴퓨터 실행시간이 소요되고, 더구나 설계실무에 적용하기에는 모델링 작업의 난이도 및 출력결과 검토, 그리고 기타 여러 하중에 대한 재하 등에서 많은 어려움이 예상되므로, 본 설계에서는 실모형 실험에 근거한 각종 실험자료를 바탕으로 지반반력계수 의미로서의 비선형 스프링이 포함된 2차원 프레임해석을 수행한다.

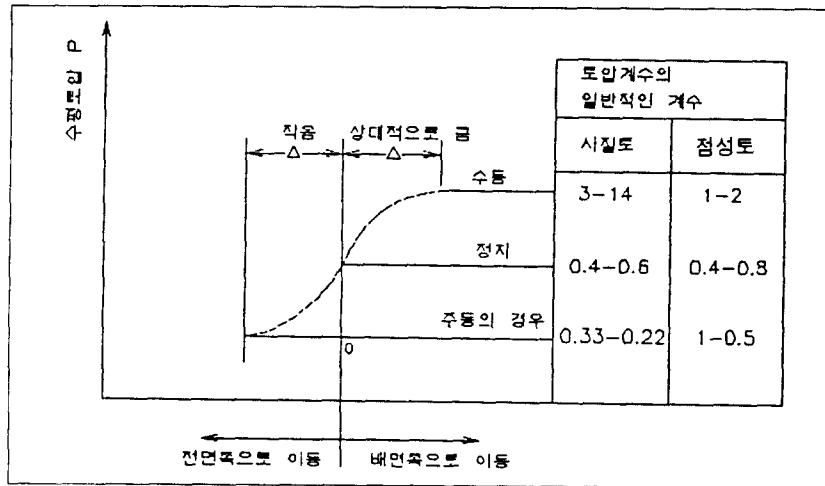


그림 6. 정지토압-수동토압, 정지토압-주동토압의 관계

<그림 6>에서 알 수 있듯이 구조물 변형의 크기 및 방향에 따라서, 구조물에 작용하는 토압은 주동 또는 수동토압으로 변화하게 된다. 그리고 되메움공정에 따라 프리캐스트 콘크리트 복개아치 구조물은 토압분포에 따라서 전면이동(터널내부로의 변형)과 배면이동(터널외부로의 변형) 현상이 나타나게 된다. 즉 토압-구조물의 상호의존작용에 의해서 토압은 정지 및 주동 또는 수동토압으로 구분이 가능하나 그 크기는 예측할 수 없게 된다. 그러나 일정한 크기의 정지토압계수로부터, 구조물 변형의 크기 및 방향에 따라 정지-수동토압 관계, 정지-주동토압 관계를 비선형적인 토압스프링(지반반력계수의 일종)으로 처리하여, <그림 7>과 같이 구조물-토압 관계를 모델링함으로써 구조물을 해석하게 된다.

스프링계수를 이용한 비선형 해석을 통하여 되메움 단계별로 아치형 복개터널 구조물의 설계단면력 산정방법을 정리하면 다음과 같다.

### 1) 아치 구조물의 2차원 보요소 모델링

평면내 거동이 주도적인 프리캐스트 복개 아치 구조물을 2차원 보요소로 모델링한다. 보요소길이를 구조물 전체 크기에 비해서 상대적으로 작은 크기로 모델링하면, 본 아치 구조물의 경우 보요소의 연속으로 인한 곡류효과 및 보요소 상호간의 적합성에는 별문제가 없게 된다.

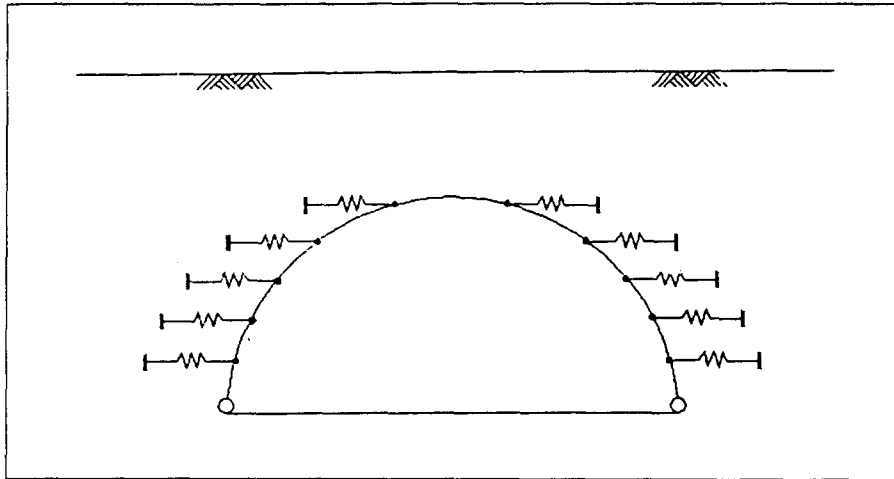


그림 7. 아치구조물의 되메움흙에 대한 비선형 스프링 모델

### 2) 주동 및 수동 스프링계수

되메움이 진행되어감에 따라, 아치 구조물은 편토압 및 균형토압에 의해서 일정한 단면 또는 절점에서 전면이동이나 배면이동을 반복하게 된다. 이와 같은 경우에 토압계수는 주동, 정지, 수동토압계수를 선택적으로 적용하게 된다.

정지토압을 아치 구조물에 재하시킨 후 구조물 변형의 방향 및 크기에 따라, 구조물에 작용하는 토압을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{주동 거동 스프링} : K_o \cdot \gamma h - K_a \cdot \gamma h = (K_o - K_a) \cdot \gamma h$$

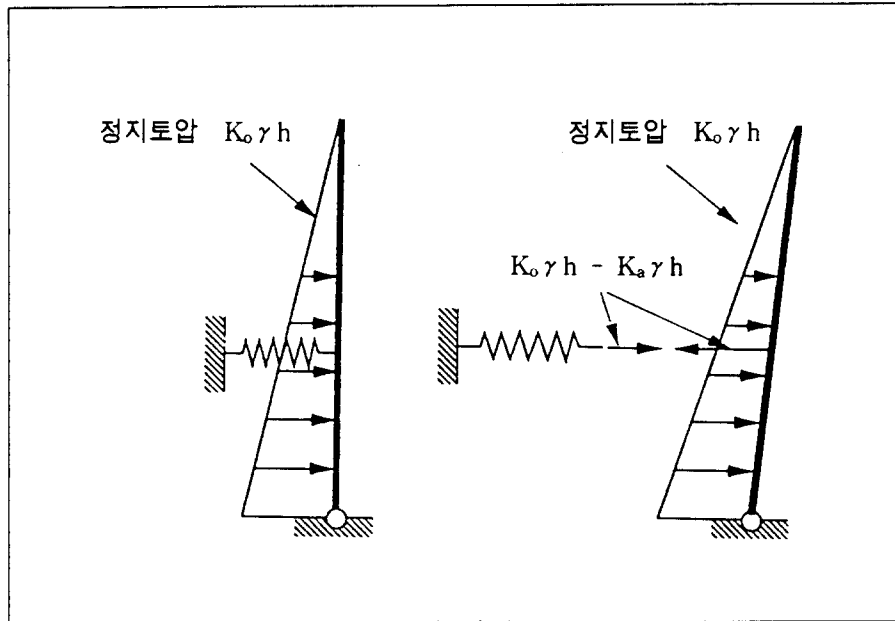
$$\text{수동 거동 스프링} : K_p \cdot \gamma h - K_o \cdot \gamma h = (K_p - K_o) \cdot \gamma h$$

즉, 되메움흙의 정지토압에 의하여 발생한 아치 구조물 변형의 방향과 크기에 따라, <그림 8> 및 <그림 9>와 같이 아치 구조물의 절점에 연결된 주동 및 수동 토압스프링이 작동하게 된다. 아치 구조물이 되메움흙 방향으로 변위를 일으키면 수동스프링이 작동하여 구조물에 추가적으로 토압이 작용하게 되고, 반면에 아치 구조물이 되메움흙 반대방향으로 변위를 일으키면 주동스프링이 작동하게 된다.

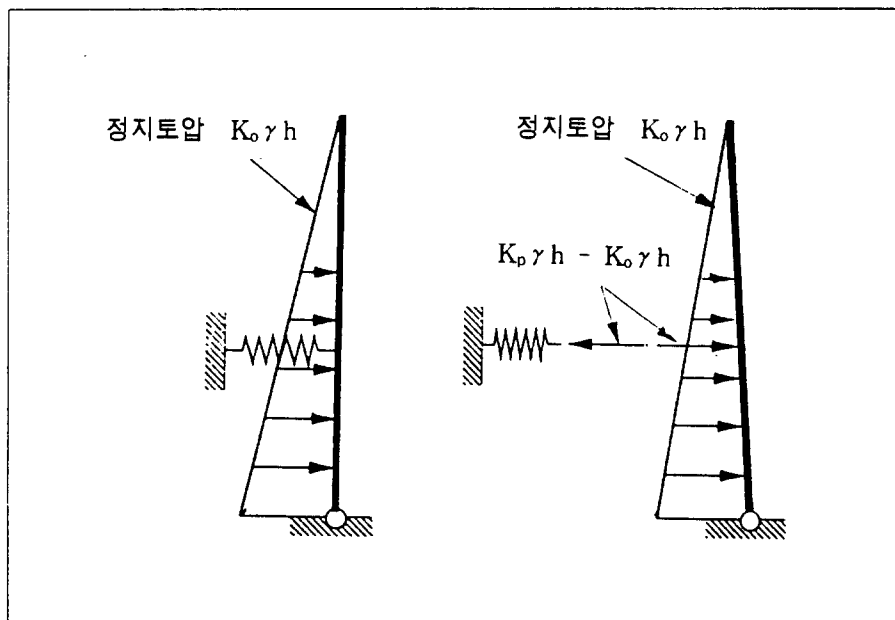
따라서 아치 구조물에 작용하는 주동토압( $P_a$ ) 및 수동토압( $P_p$ )은 다음과 같다.

$$P_a = K_o \cdot \gamma h - (K_o - K_a) \cdot \gamma h = K_a \cdot \gamma h$$

$$P_p = K_o \cdot \gamma h + (K_p - K_o) \cdot \gamma h = K_p \cdot \gamma h$$



(a) 주동 스프링



(b) 수동 스프링

그림 8. 비선형 스프링에 의한 주동토압과 수동토압의 모델링

## 2.2.2 되메움흙과 아치구조물 사이에 인터페이스 요소를 고려한 FDM 해석

아치 구조체의 측벽을 따라 되메움되는 흙이, 구조체 상부에 놓이는 토피의 자중에 의해 유발되는 측방변위를 구속하게 된다. 따라서 설계단면력 계산과정에서 이에 상응하는 흙과 아치 구조체 사이의 상호작용(soil-structure interaction)을 고려하여야 한다. 또한 설계단면력 산정시 <그림 9>와 같이 실제로 예상되는 다음과 같은 여러가지 현장조건을 고려한다.

- 원지반의 굴착면 경사,
- 되메움흙의 다짐도,
- 되메움 완료후 형성되는 지표면 경사 등.

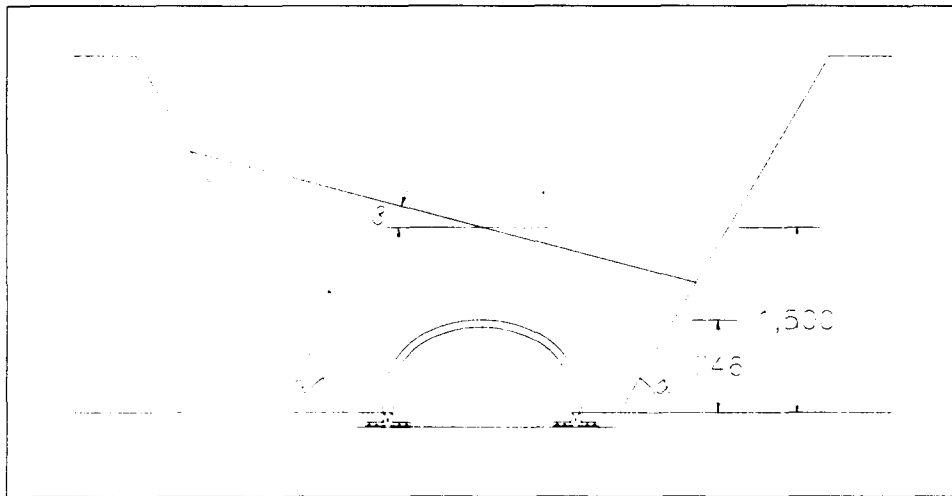


그림 9. 프리캐스트 아치형 복개터널의 단면 및 고정상태

이외에 굴착사면과 아치 구조체 사이를 되메움할 때 발생할 가능성이 있는 편토압을 고려하게 된다. 본 수치해석결과에 의하여 시공 단계별 되메움에 따른 콘크리트 아치 구조체와 되메움의 상호작용에 따른 토압의 변화와 이에 상응하는 구조물의 거동을 파악하고 안정성을 검토하게 된다.

콘크리트 아치구조체의 단면력과 변형을 계산하기 위하여, 기초지반과 콘크리트 아치구조체 및 되메움흙 사이의 상호작용을 다음과 같이 가정한다.

- 콘크리트 아치 구조체의 기초는 원지반에 의해 지지되어 있고, 시공조건에 따라 원지반에 고정되거나 힌지로 연결된다.
- 이미 되메움이 완료된 흙은 구조체의 일부로서 작용한다. 즉, 이 되메움흙은 아치를 측면에서 지지하는 반력을 생성하므로써 콘크리트 아치 구조체의 변형에 저항한다.
- 매 단계마다 되메움되는 성토층의 영향을 고려한다. 이 층은 두께가 상대적으로 얇아서 주로 하중(수직 및 수평)으로 작용한다.

본 해석에서는 유한차분법을 이용한 지반해석 범용 프로그램인 FLAC을 사용하여 시공단계별로 해석하게 된다. <그림 10>과 같이 되메움흙은 Mohr-Coulomb의 탄소성구성식을 갖는 2차원 평면변형요소로, 콘크리트 아치구조체는 Beam 요소로 모델링한다. 또한 Large strain mode 기법을 도입하여, 시공단계별로 발생하는 구조체의 변위가 누적되도록 한다. 그리고 시공단계에 따른 되메움흙과 콘크리트 구조물 사이 및 되메움흙과 굴착사면 사이에 인터페이스(Interface)를 고려하므로써, 이질적인 물질 사이에서 상호간에 발생하는 힘의 전달과정을 가능한 한 정확히 재현하게 된다. <그림 11>과 같이 두 접촉면 (A,B) 사이에 있는 인터페이스는 마찰력, 점착력, 인장강도, 연직강성 및 전단강성을 갖는다. 여기서  $S$ 는  $cL + F_n \cdot \tan \phi$ 의 Coulomb 전단강도식을 따르며,  $c$ 는 접촉면 사이의 점착력,  $L$ 은 접촉면 길이,  $F_n$ 은 접촉면 사이의 연직력,  $\phi$ 는 접촉면 사이의 마찰각을 나타낸다. 되메움흙과 콘크리트 아치구조체 사이 및 되메움흙과 굴착사면사이에 인터페이스를 두게 되면, 이들 사이에서 발생하는 벽면 마찰력을 고려하므로써 콘크리트 아치 구조체와 굴착사면 사이에서 발생하는 토압의 아칭현상을 파악할 수 있다.

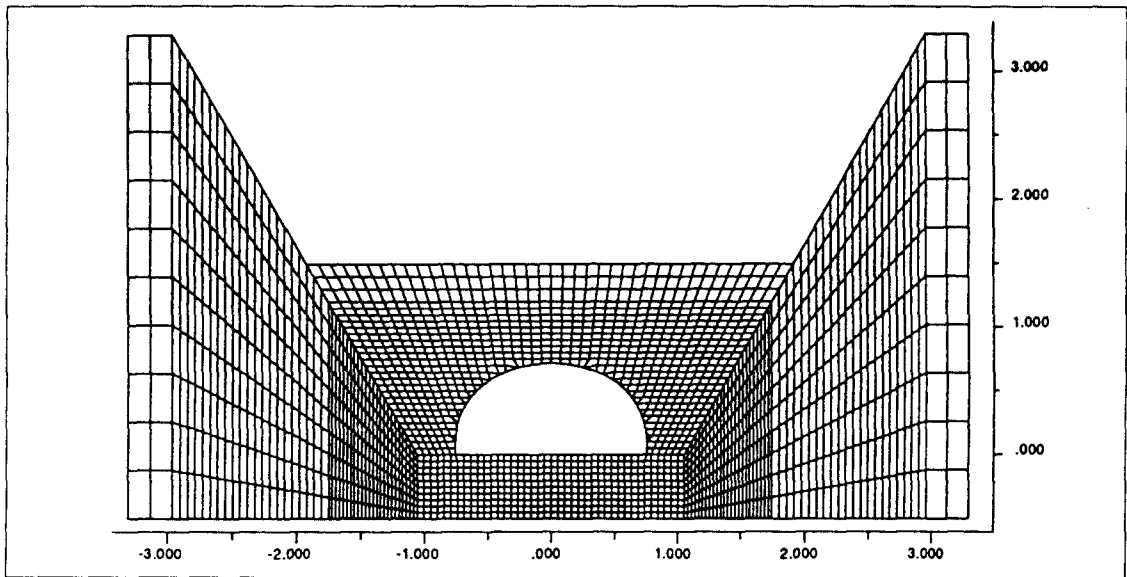


그림 10. 수치해석에 사용된 FDM 해석망

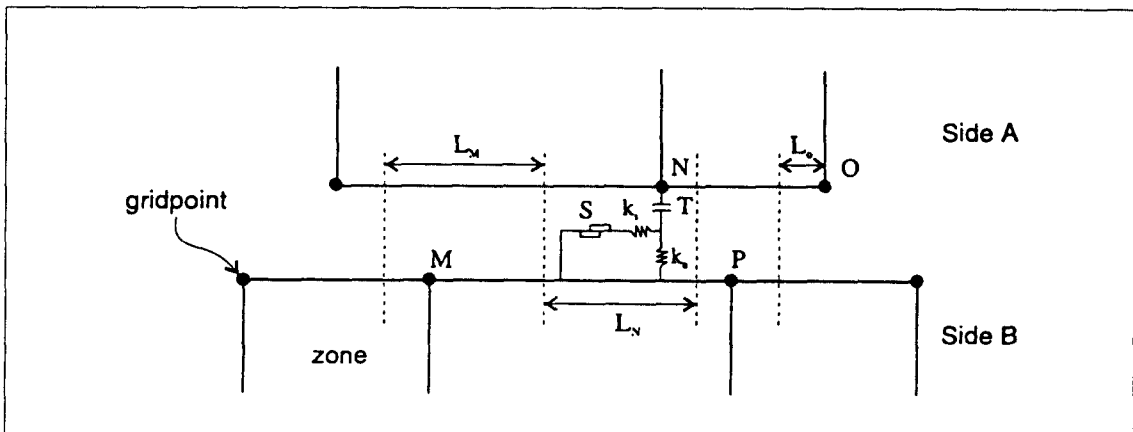


그림 11. 전단 및 연직 강성스프링으로 연결된 인터페이스 개념도

### 2.2.3 설계시 중요 고려사항

복개아치 구조물의 시공성은 경제성을 감안하여 굴착사면의 안정성이 보장되는 한, 굴착사면의 경사는 급하고 굴착폭은 좁게 굴착하여 토공량을 최대한 줄여야 한다. 그러나 이러한 굴착사면의 경사와 굴착폭은 아치 구조체와의 상관적인 기하학적 관계에 따라, 되메움흙 내부에 아칭현상을 일으켜 아치 구조물의 측방변위를 구속하는 수평토압의 감소를 야기하므로써 아치 구조체에 불안정성을 초래하기도 한다. 또한 되메움 완료후 형성되는 지표면 경사는 아치 구조체에 편토압을 유발하기도 한다. 따라서 아치 구조체의 설계단면력 산정시에 이러한 영향인자들을 적절히 반영하여야 한다.

이러한 영향인자들이 콘크리트 아치형 복개터널의 역학적 거동에 미치는 영향을 FDM 수치해석으로 분석한 결과는 다음과 같다.

1) 되메움흙에서 발생하는 아칭효과는, 원지반의 굴착사면과 아치 구조체 사이의 기하학적 관계 즉, 굴착사면의 경사, 굴착깊이, 굴착폭, 터널높이, 터널폭, 터널형태 등과 밀접한 관계가 있다. 일반적으로 굴착사면의 경사가 급할수록, 굴착깊이/굴착폭의 비가 클수록 또한 벽면 마찰계수가 클수록 아칭효과는 크게 유발되었다.

2) 아치 구조체에 작용하는 되메움흙의 토압은, 되메움시 굴착사면 및 아치 구조체의 벽면과 되메움 흙 사이의 마찰력에 의하여 되메움흙 내부에서 발생하는 아칭효과로 인하여, 아치 구조체 측벽에 작용하여 측벽을 지지하는 수평토압은 감소하였다. 아칭효과를 고려하지 않은 경우에 비하여, 굴착사면의 경사가  $30^\circ$  에서  $90^\circ$  로 증가함에 따라 측벽에 작용하는 수평토압의 합력은 약 15% ~ 46% 까지 감소하였다. 또한 굴착폭이 0.70H 에서 0.14H 로 좁아짐에 따라 수평토압의 합력은 약 17% ~ 37% 까지 감소하였다.

3) 아치 구조체 천장의 수직토압(주로 되메움 지반의 자중)에 의한 수직변위(침하)는 구조적으로 아치 구조체 측벽의 수평변위를 수반한다. 이때 구조체 측벽에 작용하는 수평토압은 측벽의 수평변위를 억제한다. 따라서 아치 구조체 측벽에 작용하는 수평토압이 감소하게 되면 측벽의 수평변위는 증가하게 된다. 이에 따라 천장의 침하 또한 증가하게 되어, 전반적으로 터널 라이닝의 변위와 응력은 증가하게 된다. 굴착사면의 경사가  $30^\circ$  인 경우에 비하여 굴착사면의 경사가  $90^\circ$  로 증가함에 따라 수평토압의 합력은 약 37% 감소하였다. 이와같은 수평토압의 감소로 인하여 천장 및 측벽의 변위는 약 19%, 모멘트는 약 17%, 전단력은 약 6% 증가하였다.

4) 되메움 완료후 형성되는 지표면의 경사가 증가할수록, 아치 구조체의 좌우 측벽에 작용하는 편토압(수평토압의 차이)에 의하여, 전반적으로 구조체의 변위와 응력은 급격히 증가한다. 지표면 경사가  $0^\circ$  인 경우에 비하여, 경사가  $15^\circ$  ~  $30^\circ$  로 증가함에 따라 수평변위는 약 318% ~ 896%, 모멘트는 약 67% ~ 203%, 전단력은 약 38% ~ 109% 까지 각각 증가하였다.

그러나 되메움흙에서 발생하는 이러한 아칭효과는 되메움시 적절한 다짐을 실시하므로써 상당히 감소될 것으로 판단된다. 또한 아치 구조체 좌우에 되메움되는 흙에 대한 적절한 다짐은 구조체에 마치 프리스트레스를 도입한 것과 같은 효과를 갖게 되어, 향후 아치 구조체 상부를 되메움할 경우 발생하는 아치 정상의 침하를 상쇄시키므로써 아치 구조체의 구조적 안정에 큰 기여를 하는 것으로 평가된다.



## 2.2.4 시공 계측

앞서 언급한 바와 같이 프리캐스트 콘크리트 복개아치 구조물은 시공단계별 안전성 유지와 구조물 주변의 되메움흙의 영향을 정확히 검토하여 설계하게 된다. 시공현장에서도 이에 대한 고려를 충분히 하여 시공을 해야 하지만, 현장특성 및 안전장치로서 시공단계별로 현장계측을 실시하여 계측치와 설계치 사이에 많은 차이가 발생할 경우에 계측치를 이용한 설계치의 보정이 이루어져야 한다. 따라서 프리캐스트 콘크리트 복개아치 구조물 설치후, 토압계, 내공변위계 등의 계측기기를 설치한 다음에 되메움흙의 성토 및 다짐을 수행하여야 한다.

### 3. 프리캐스트 콘크리트 아치형 복개터널의 시공방법

#### 3.1 프리캐스트 아치 세그먼트 제작

- 프리캐스트 아치 세그먼트 제작은 현장위치, 지역현황, 제작물량등 현장여건에 따라 공장제작과 현장제작으로 구분하여 시행한다.
- 공장제작은 현장에의 접근이 용이하여 프리캐스트 세그먼트의 운반이 가능한 지역에 적용하며, 특히 제작 물량이 많은 경우 경제성이나 시공성 측면에서 유리할 뿐만 아니라 공장에서의 제작과정에 철저한 품질관리를 시행할수 있어 고품질의 구조물 시공이 가능하다.
- 현장제작은 대형 트레일러의 접근이 어려운 산간지역이나 공장에서의 운반이 비경제적인 경우, 또한 소규모 구조물로 제작 물량이 적은 경우에 적용하며, 아치형의 강재 거푸집을 현장에 운반하여 세그먼트를 제작한 후 양생이 완료되면 그 자리에서 바로 설치한다.
- 프리캐스트 세그먼트는 아치형의 강재 거푸집을 수직으로 세워서 설치한 후 그 사이에 철근 Cage를 삽입하고 콘크리트를 타설하여 제작하며, 공장제작의 경우에는 세그먼트 생산 주기를 단축하기 위해 증기 양생을 실시한다.
- 보관 방법은 프리캐스트 아치 세그먼트의 두께가 비교적 얇고 곡선형이므로 눕혀 쌓기는 매우 불리하며, 반드시 세워쌓기로 <그림 12>와 같이 보관하여야 한다.

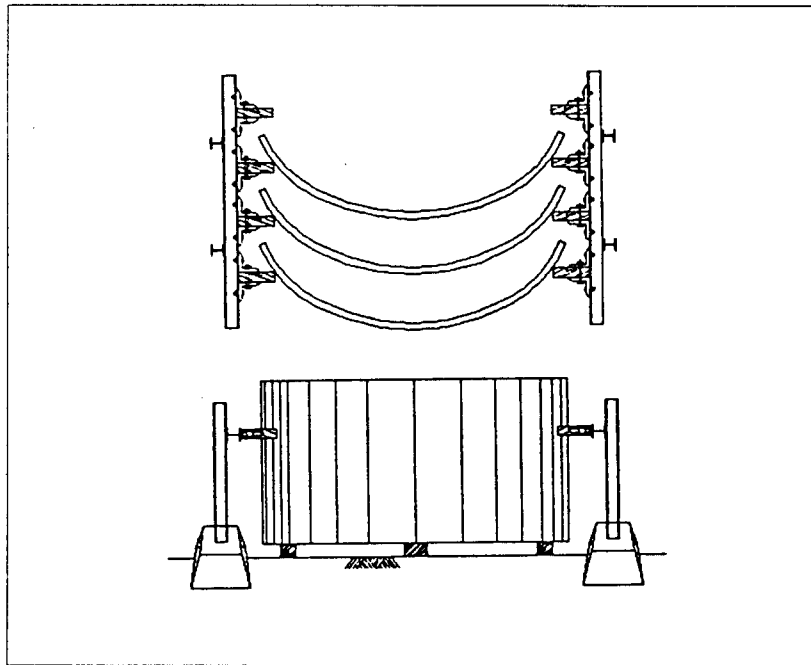


그림 12. 프리캐스트 아치 세그먼트의 보관

### 3.2 프리캐스트 아치 세그먼트 운반

- 공장에서 제작된 프리캐스트 아치 세그먼트는 제품 Type No, 수량, 균열발생 여부 및 부분적인 파손 여부 등의 확인 검사를 마친후 트레일러에 적재하여 현장으로 운반한다.
- 곡선형 단면의 프리캐스트 아치 세그먼트를 들어 올릴 때에는, <그림 13>과 같이 곡선 단면에 불리한 수평력이 발생하지 않도록 반드시 Spreader Beam을 사용하여 2-Point Pick-Up으로 시행하여야 한다.

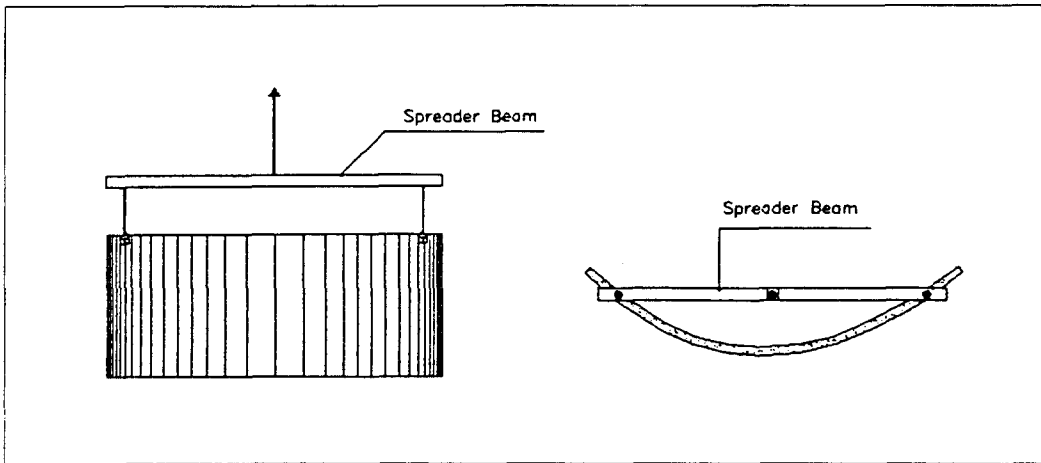


그림 13. 프리캐스트 아치 세그먼트의 PICK-UP

- 운반 트레일러에 적재할 때에는, <그림 14>와 같이 프리캐스트 아치 세그먼트의 과도한 변형을 방지하도록 수직으로 세워서 3점 지지토록 하며 운반시의 안전을 위해 와이어 로우프로 트레일러에 견고하게 고정한다.

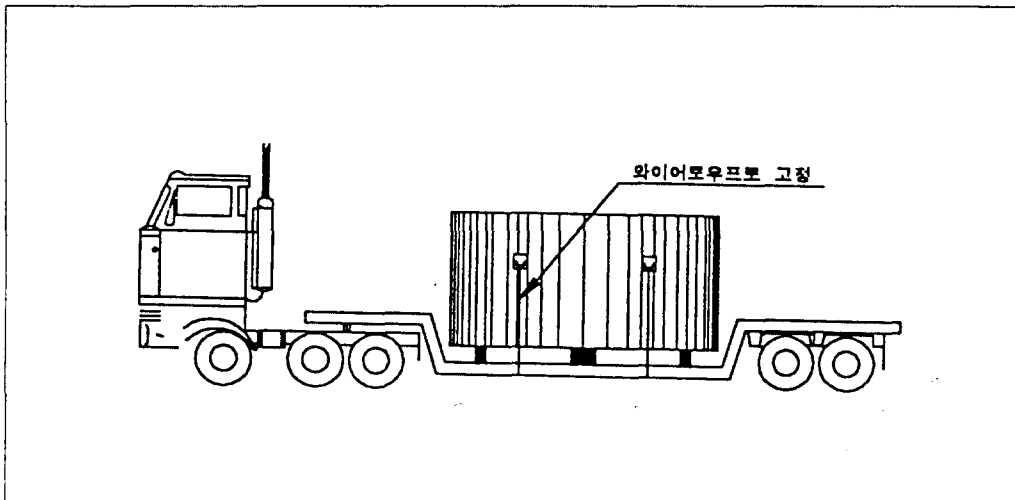
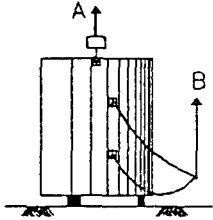
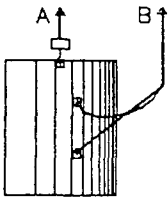
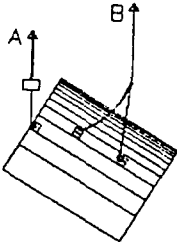
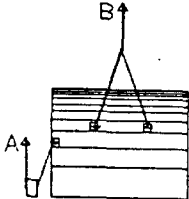


그림 14. 프리캐스트 아치 세그먼트의 운반

### 3.3 프리캐스트 아치 세그먼트 설치

- 트레일러 위에 적재되어 현장 반입된 프리캐스트 아치 세그먼트는 크레인으로 들어 올려서 기현장 타설 시공된 기초콘크리트 위에 바로 설치하거나 또는 설치 위치에 인접한 평탄한 장소에 일시 보관한다.
- 현장에서 제작되는 프리캐스트 아치 세그먼트는 강재 거푸집을 탈형한 후 크레인으로 들어올려서 기현장 타설 시공된 기초콘크리트 위에 바로 설치한다.
- 수직으로 세운 상태로 현장 반입되거나 현장보관, 또는 현장 제작된 프리캐스트 아치세그먼트는 1대 또는 2대의 그레인으로 들어 올려서 90° 회전하여 눕힌 상태로 설치되어야 한다.
  - A 크레인(또는 Aux. Hook) : Spreader Beam을 사용하여 세운상태로 2-Point Pick-Up.
  - B 크레인(또는 Main. Hook) : 와이어 로우프를 사용하여 눕힌 상태로 4-Point Pick-Up.

순서	개요도	작업순서
1		<ul style="list-style-type: none"> <li>· 세그먼트 이음부의 2-Point에 A Hook 로 Spreader Beam 연결 설치.</li> <li>· 세그먼트 곡면부의 4-Point에 B Hook로 와이어 로우프 연결 설치.</li> </ul>
2		<ul style="list-style-type: none"> <li>· A Hook로 세그먼트를 수직상태로 들어올림.</li> </ul>
3		<ul style="list-style-type: none"> <li>· 세그먼트를 A Hook로 들고 있는 상태에서 B Hook를 들어올려 90° 회전시킴.</li> </ul>
4		<ul style="list-style-type: none"> <li>· B Hook로 세그먼트를 눕힌 상태로 들어올림.</li> <li>· A Hook를 풀어서 Spreader Beam을 해체.</li> </ul>

- 프리캐스트 아치 세그먼트는 두께가 비교적 얇은 부재로 제작, 설치되므로 들어올린 상태에서의 하중 조건뿐만 아니라 90° 회전시 힘의 전달과정을 세밀히 고려하여 구조 설계를 시행하고 또한 Hook 부착 위치의 보강상세등을 설계에 충분히 반영하여야 한다.
- 현장 타설 콘크리트 기초 위에 프리캐스트 아치 세그먼트를 설치하기 위해, 사전에 기초의 홈바닥 부분이 정확한 Level을 유지하도록 세그먼트당 2 개소에 철판을 이용하여 <그림 15>와 같이 Levelling Pad를 설치하고 그 위에 프리캐스트 아치 세그먼트를 설치한다.

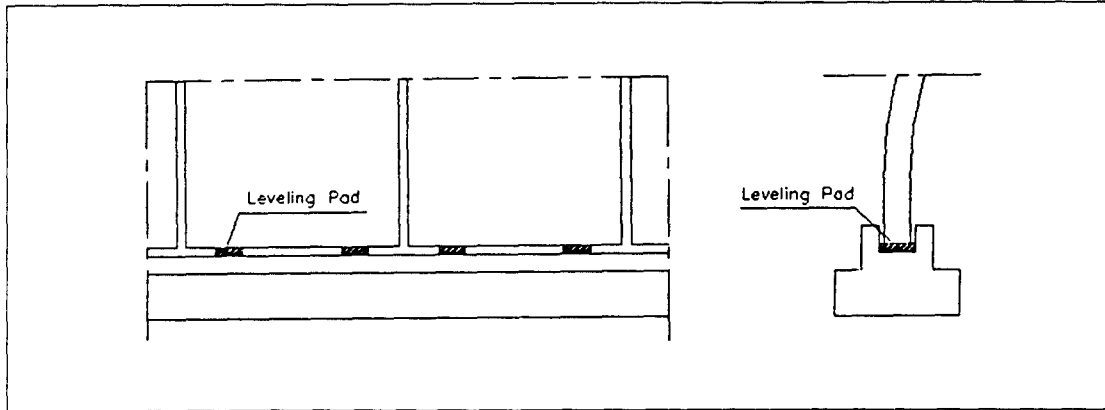


그림 15. 프리캐스트 아치 세그먼트의 Levelling Pad 설치

- 아치 단면이 2세그먼트로 구성된 경우에는 아치 크라운에 현장 타설 이음부가 위치하게 되며, 설치시 중간 지보공 없이 아치 단면 가설이 가능하도록 하기 위해, <그림 16>과 같이 세그먼트 길이의 50% 정도가 아치 크라운에서 항상 중첩되도록 번갈아 가면서 설치하고 이음부 콘크리트를 타설하기 전까지 구조물의 안정성을 확보한다.(아치 크라운 현장타설 이음부 상세는 다음절 참조)

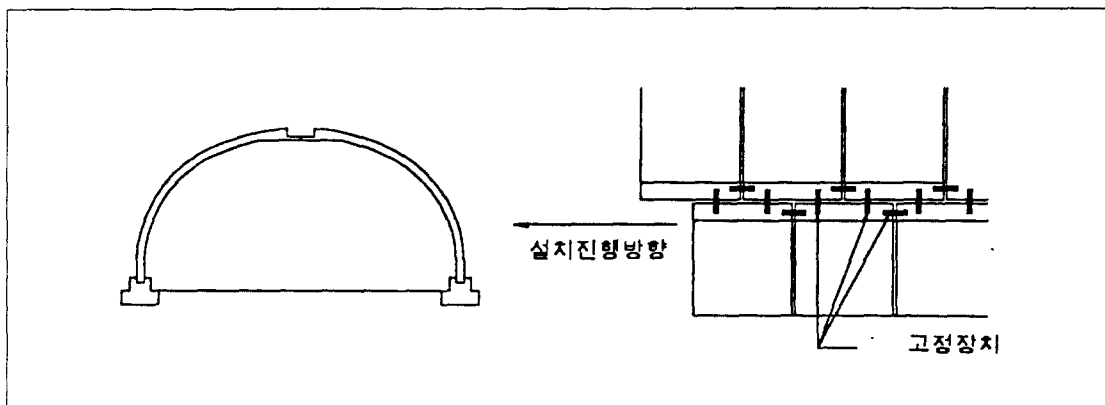


그림 16. 2세그먼트로 구성된 경우의 현장 설치 순서

- 아치 단면이 2세그먼트로 구성된 경우에, <그림 17> 및 <그림 18>과 같이 각 세그먼트간의 종방향 변위를 방지하기 위하여 아치 크라운부와 아치 1/4점에 영구 고정장치를 설치한다. 횡방향 변위는 철근배근 및 이음, 그리고 아치 크라운부의 현장타설 콘크리트에 의해 방지되므로, 세그먼트 설치과

정 중에만 필요한 임시 고정장치를 설치한다.

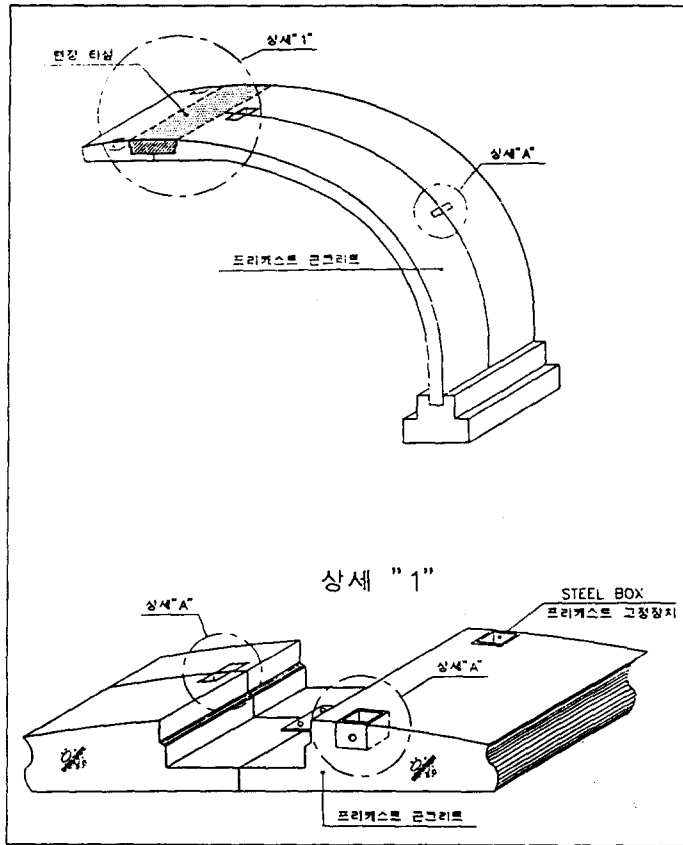


그림 17. 영구 고정장치

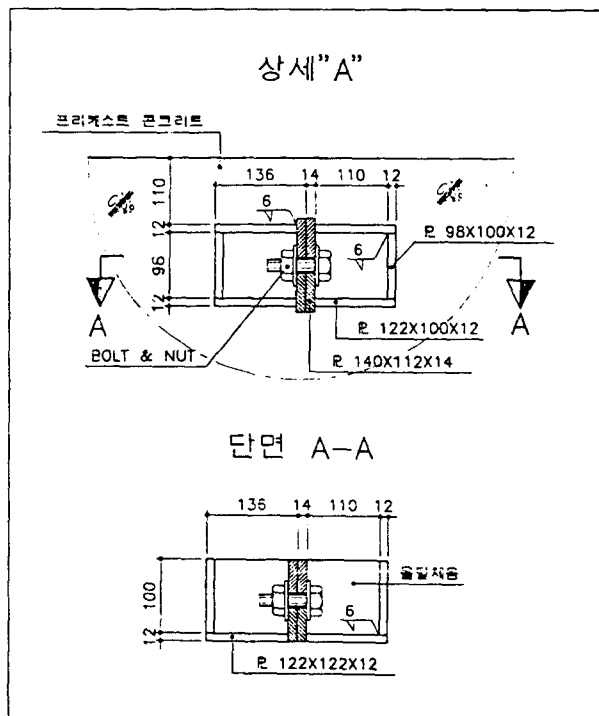
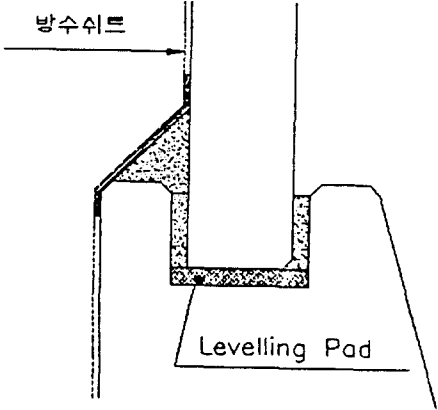
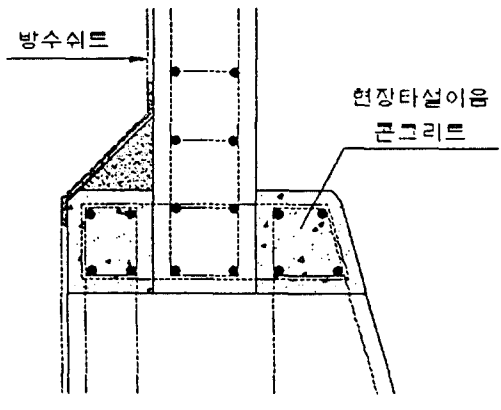


그림 18. 영구 고정장치 상세

### 3.4 현장타설 이음부 시공

- 프리캐스트 콘크리트 복개아치터널은 구조물의 성격, 굴착 또는 성토조건, 지하수위 존재여부 등 현장 여건에 따라 구체방수의 적용여부를 구분하여 현장타설 이음부를 시공한다.
- 현장타설 이음부는 반드시 무수축 콘크리트 또는 무수축 고강도 몰탈로 시공하여야 한다.

구 분	현 지 식 이 음	고 정 식 이 음
적 용 조 건	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 순성토 구간으로 지하수위가 존재 하지 않는 경우.</li> <li>· 배수형 구조물로 구체방수를 요하지 않는 경우.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 절토구간으로 굴착심도가 깊은 경우.</li> <li>· 지하수위가 높은 경우.</li> <li>· 비배수 완전 방수 구조물로 구체 방수를 요하는 경우.</li> </ul>
적 용 방 안	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 순성토 구간의 도로 복개 구조물</li> <li>· 고속도로상의 지하 통로용 구조물</li> <li>· 수로용 구조물</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 지하철 개착 구조물</li> <li>· 절토구간의 도로 복개 구조물</li> </ul>
기 초 이 음 부 상 세		

- 아치 단면이 2세그먼트로 구성된 경우 일정 깊이의 프리캐스트 아치 세그먼트 설치가 완료되면, <그림 19> ~ <그림 21>과 같이 아치 크라운의 이음부에 종방향으로 철근을 조립하고 연속으로 콘크리트를 타설하여 이음부를 시공한다. 이는 아치 크라운부에 연속부를 설치하는 효과를 얻음으로써 프리캐스트 아치 구조체로서 매우 안전하고 또한 상재하중의 종방향 분배에도 도움을 주는 구조적으로 유리한 부재역할을 한다.

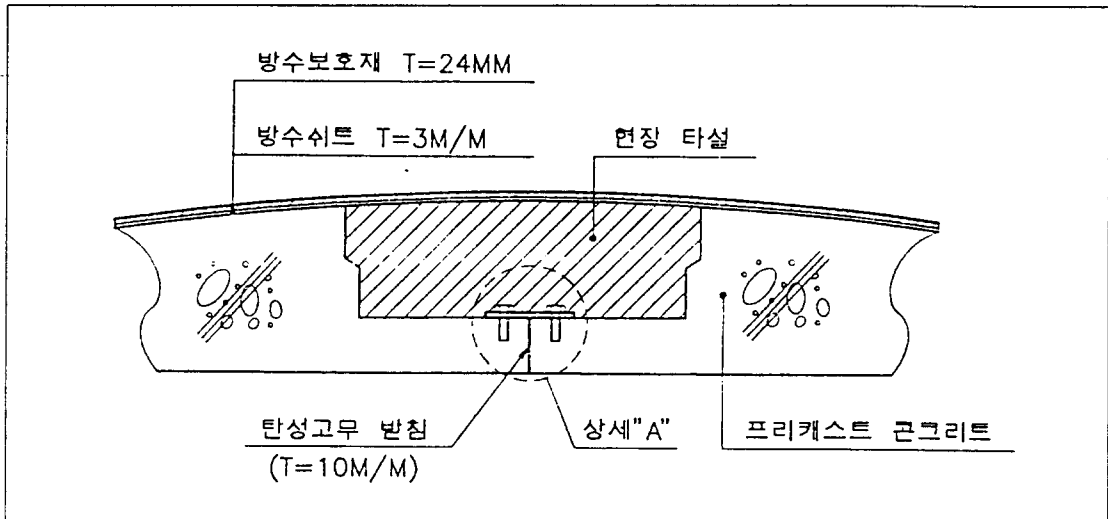


그림 19. 2세그먼트 이음부 단면도

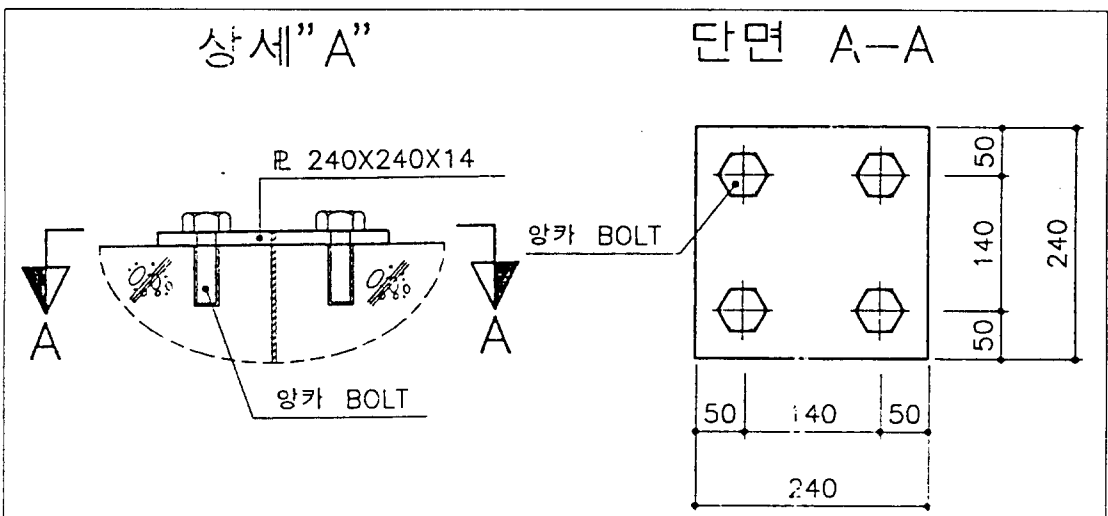


그림 20. 임시 고정 장치 상세

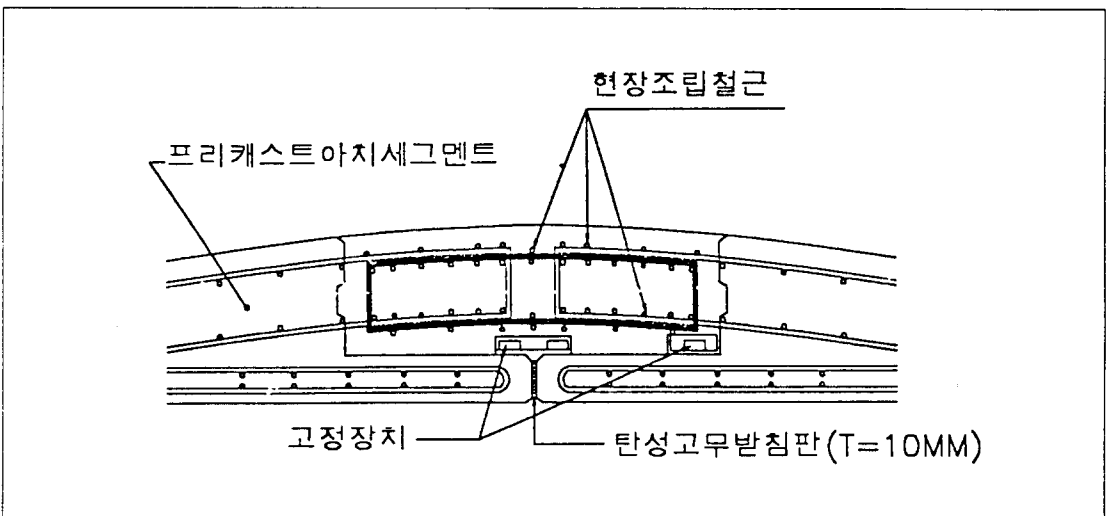


그림 21. 2세그먼트 이음부 철근 배근



### 3.5 프리캐스트 아치 구조물의 방수시공

- 프리캐스트 콘크리트 아치 구조물은 지하에 설치되는 일반 콘크리트 구조물과 마찬가지로 사용성 및 유지관리 측면에서 완벽한 방수시공을 하여야 하며, 단면이 곡선 형상으로 구성되어 있으므로 이에 적합한 쉬트식 방수공법이나 침투식 방수공법을 적용한다.
- 프리캐스트 콘크리트 아치 구조물은 원칙적으로 벽체면이 일부 수직인 경우를 제외하고는 곡면에서의 벽돌 쌓기 등 방수층 보호가 시공측면에서 매우 어려우며, 특히 아치 단면의 구조적 특성상 구조체 주위의 되메움 시공이 중요한 관계로 방수층 인접부의 되메움시 주의를 기울여 방수층에 손상이 없도록 하여야 한다.
- 쉬트식 방수공법은 국내에서 일반적으로 사용하고 있는 부착성이 좋은 고무화 아스팔트계열이나 합성수지계열의 노출형 멤브레인을 적용하며, 이는 수밀한 방수층을 형성할 뿐만 아니라 되메움시의 인장 및 내충격성이 우수한 보호재로서의 역할도 수행할 수 있도록 충분한 두께의 재질을 사용한다.
- 프리캐스트 콘크리트 아치 구조물의 횡방향 이음부는 <그림 22>와 같이 부등침하, 온도변화, 지진이나 진동에 의한 종방향 거동 및 상대변위(엇갈림)를 흡수할 수 있는 변형능력과 지하구조물로서의 기능을 유지하기 위한 방수 또는 지수능력을 극대화시킨 구조로 한다. 각 구성 부품들의 특징을 정리하면 다음과 같다.

구 성 부 품	특 징
방수 쉬트	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 1차 방수, 외벽 방수</li> <li>■ 팽창성 우수제품 적용</li> </ul>
방수 고무	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 2차 방수</li> <li>■ 방수조각쉬트 효과</li> <li>■ 부등침하, 진동에 의한 세그먼트의 수직방향 상대변위를 고려한 방수방법</li> </ul>
수팽창성 지수제	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 3차 방수</li> </ul>
전단키	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 부등침하, 진동에 의한 세그먼트의 수직방향 상대변위에 저항하기 위한 구조</li> </ul>
종방향 부재 연결재	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 부등침하, 진동에 의한 세그먼트의 수직방향 상대변위에 저항하기 위한 구조</li> </ul>

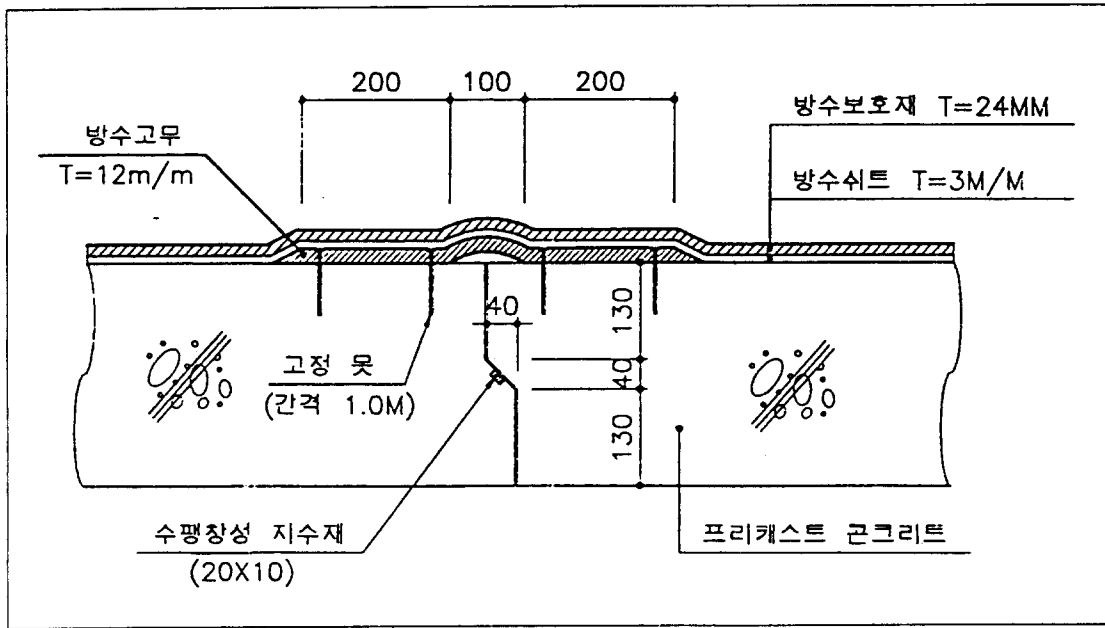


그림 22. 프리캐스트 아치 세그먼트의 횡방향 이음부

### 3.6 프리캐스트 아치 구조물의 되메움 시공

- 프리캐스트 아치 구조물은 비교적 얇은 구조체로서 되메움이 완료된 상태에서는 매우 안정적인 구조물이지만 되메움 단계에서의 과도한 편토압은 구조물에 심각한 손상을 줄 우려가 크므로 되메움 시공에 세밀한 주의를 기울여야 한다.
- 프리캐스트 아치 구조물의 되메움은 구조물의 편토압이 최소로 작용하도록 양측면에서 번갈아 시행하여야 하며, <그림 23>과 같이 양측 되메움의 최대 높이 차이는 시공성을 감안하여 50cm 내외로 하고 되메움 단계별 구조해석을 시행하여 결정하여야 한다.
- 되메움층의 다짐은 1층의 높이가 30cm 이하이어야 하며, 다짐시 아치 구조체에 무리한 영향을 주지 않도록 구조체 주위의 0.3H ~ 0.5H 범위(H=구조물 높이 또는 폭의 1/2중 큰 값)는 Hand Compacter를 사용, 수동으로 다짐을 하고 그 이상의 범위는 Roller로 기계다짐을 시행한다.

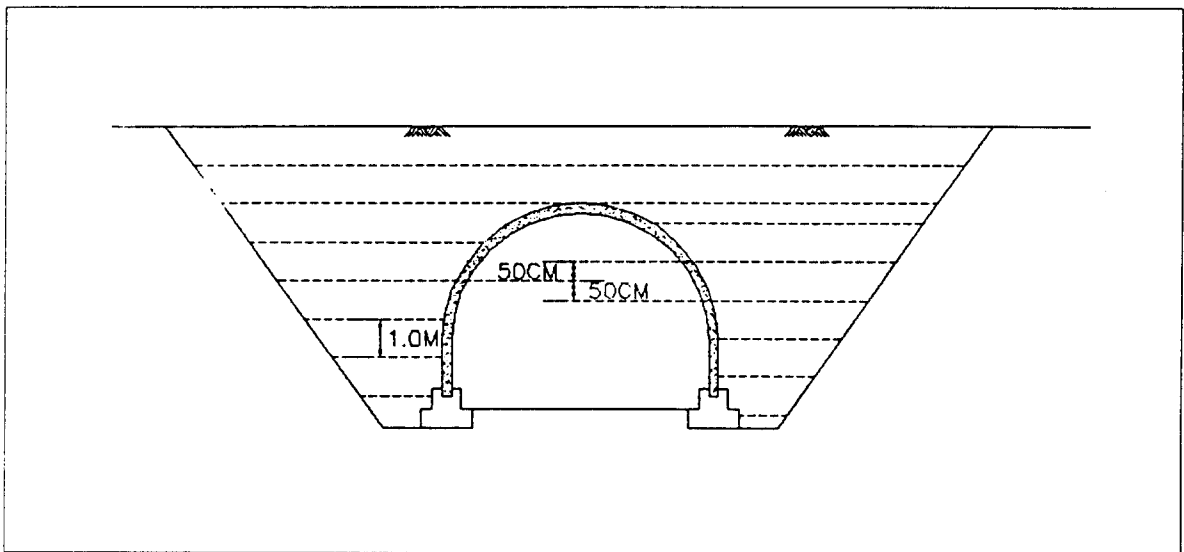


그림 23. 프리캐스트 아치 구조물의 층다짐 되메움 시공