

## 대단면 근접병설터널의 설계 및 안정성 평가기법에 관한 연구

김도형, 박준경, 김영근, 오세준, 이두화  
(주)삼보기술단 지반공학부

### 요 지

최근 용지매입의 제한과 자연환경훼손의 최소화를 도모하는 사회적 환경으로 인해 대단면 근접병설터널 계획이 점차 증가하고 있다. 지금까지는 주로 중앙벽체부의 지지기능을 활용한 2Arch터널의 형태로 도심지 지하철의 정거장이나 고속도로의 일부구간에 계획되고 있으나, 대단면 근접병설터널에 대한 시공실적 및 설계사례가 부족한 국내에서는 이에 대한 역학적 거동과 합리적 시공방안에 대한 연구가 미흡한 실정이다. 따라서, 대단면 근접병설터널에 대한 국내·외의 설계 및 시공사례를 정리·분석함으로써 차후 제한된 구간에서의 터널 계획시 합리적인 설계 및 시공이 되고자 하였다. 또한, 최근 도심지 구간에 계획중인 터널의 안정성 검토 사례를 중심으로 터널 및 인접구조물, 중앙필러부 및 콘크리트 라이닝에 대한 상세 안정성 검토방법을 고찰함으로써 기존 병설터널의 거동특성과는 구별되는 대단면 근접병설터널의 안정성 평가기법에 대한 방향을 제안하였다.

주요어 : 근접병설터널, 2Arch터널, 중앙필러부, 콘크리트 라이닝, 안정성 평가

### 1. 서론

최근 들어 터널계획시 도심지 지역에서의 용지매입의 제한과 산악지역에서의 주변지장물 보호 등과 같은 민원문제의 대두 및 자연환경훼손의 최소화를 요구하는 사회적 경향을 고려하여 병설터널간 이격거리가 상당히 근접된 형태로 터널이 계획되는 사례가 증가하고 있다. 국내에서는 주로 지반이 불량하고 용지매입이 극히 제한되는 도심지의 지하철 정거장 설계와 도로터널 계획시 지반조건이 불량하여 1Arch 대단면 터널로는 건설이 불가능한 구간이나, 2차로 병설터널과 비교하여 환경훼손을 최소화 할 수 있는 구간에 주로 중앙벽체의 지지기능을 활용한 2Arch터널의 형태로 계획·시공되었다. 그러나, 아직까지 국내에서의 시공실적 및 설계사례의 부족으로 자료의 체계적인 데이터화가 이루어지지 않은 실정이며 또한 근접병설터널의 역학적인 거동에 대한 연구가 미흡한 현실이다.

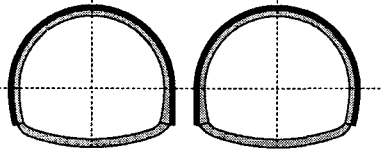
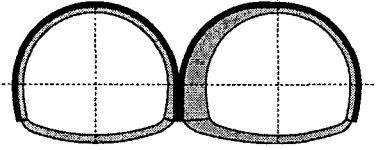
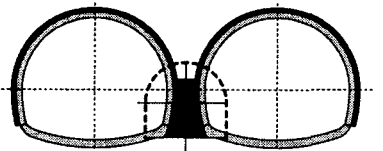
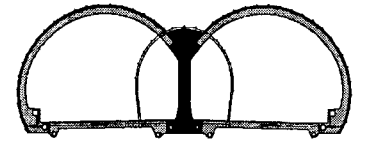
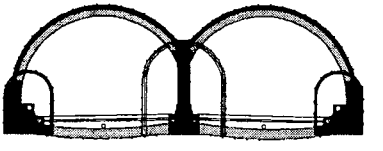
따라서 다수의 근접병설터널 시공경험을 바탕으로 다양한 형태의 터널시공이 시행되고 있는 일본을 중심으로한 설계·시공사례를 고찰함으로써 터널계획시 접근방법에 대한 사고의 폭을 넓히고, 기존 터널의 시공시 발생된 문제점들과 그에 대한 개선방안을 검토하여 앞으로 적용될 대단면 근접병설터널의 합리적인 설계 및 시공에 도움이 되고자 하였다. 또한, 충분한 이격거리를 확보한 병설터널의 거동특성과는 구별되는 근접병설터널의 거동에 대한 안정성 평가방안에 대하여 실제 국내 도심지구간에 시공계획중인 대단면 근접병설터널의 안정성 검토사례를 중심으로 고찰하였다.

또한, 2차원 및 3차원 연속체해석에 의한 터널 본선 및 주변지장물의 안정성을 검토하고, 터널 라이닝의 지보기능 확보를 위한 상세 라이닝 안정성 검토, 중앙필러부에 대한 정밀안정성 검토 및 터널보조공법의 적정성 검토를 통하여 근접병설터널과 인접구조물의 안정성을 검토기법에 대한 방향을 제안하였다.

## 2. 대단면 근접병설터널의 형식 및 특징

표 1에 국내외의 설계·시공사례 및 관련문헌을 참고하여 대단면 근접병설터널에 적용가능한 형식을 정리하였다. 국내에서는 도심지의 지하철 정거장이나 도로터널에서 주로 TYPE-4와 같은 중앙벽체부를 지지체로 하는 형태로 적용되었으나, 최근 들어 TYPE-3과 유사한 형식으로 중앙Pilot터널이 확대된 단면으로 계획중인 사례도 있는 것으로 조사되었다.

표 1. 대단면 근접병설터널의 적용형식 및 특징

구분	단면형식	주요특징
TYPE 1	근접분리터널	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 중앙Pilot터널 및 중앙필러부를 생략하여 원지반을 양터널사이의 지지체로 고려</li> <li>• 양쪽터널 사이에 별도의 지반보강필요</li> <li>• 중앙부 협소공간에서의 작업 불필요로 작업효율증대</li> <li>• 일본내 터널간 이격거리 3~7m인 7개의 소수 프로젝트에 적용됨</li> </ul>
		
TYPE 2	근접분리터널, 라이닝두께증가	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 중앙부라이닝의 두께를 증가시켜 양터널사이의 지반을 콘크리트로 대체</li> <li>• 후행터널 굴착시 선행터널 콘크리트 라이닝 선시공 필요</li> <li>• 도로와 다른 구조물의 교차구간 등 특수한 위치에 적용</li> <li>• 일본 이토즈터널 일부구간에 적용, 적용사례 거의 없음</li> </ul>
		
TYPE 3	2Arch 1-Pilot, 중앙필러부	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 중앙Pilot터널의 굴착후에 상부지반의 집중하중을 받게되는 중앙필러부에 매스콘크리트로 구조체를 형성</li> <li>• 중앙필러부의 보호를 위해 보호시설 및 방수공법 등의 조치필요</li> <li>• 일본의 경우 30개소 이상 다수의 프로젝트에 적용됨</li> <li>• 국내의 경우 서울시 도심지구간 OO터널과, 목포~광양간 고속도로 OO터널에 중앙Pilot터널 사이즈가 확대된 형태로 적용됨</li> </ul>
		
TYPE 4	2Arch 1-Pilot, 중앙벽체부	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 중앙Pilot터널의 굴착후에 콘크리트 중앙벽체 설치</li> <li>• 중앙벽체의 보호를 위해 보호시설 및 방수공법등의 조치필요</li> <li>• 국내의 경우 대부분의 도심지 지하철 터널과 고속도로터널에 적용됨</li> </ul>
		
TYPE 5	2Arch 3-Pilot	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 중앙Pilot터널의 굴착후에 콘크리트 중앙벽체부를 설치하고 본선 굴착전에 사이드Pilot터널 굴착으로 초기 지반이완의 최소화를 도모</li> <li>• 일본 三川内터널에 유사한 형태로 적용</li> </ul>
		

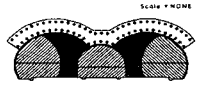


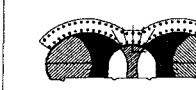


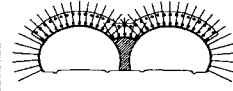
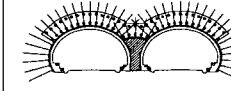
시공 순서	1	2	3	4
	강관다단그라우팅(2단) 설치	중앙Pilot터널 상,하부 분할 백파굴착 숏크리트, 강지보공, 록볼트 설치	중앙부 벽체 콘크리트 타설	중앙부 벽체 상부 그라우트 주입
단면 형상				
시공 순서	5	6	7	8
	좌,우측터널 상부분할 백파굴착 숏크리트, 록볼트 보강	좌,우측터널 하부분할 백파굴착 숏크리트, 록볼트 보강	좌,우측터널 기계굴착 숏크리트, 강지보공 설치	터널 굴착 완료 베수구, 공동구 및 라이닝 콘크리트로 시공
단면 형상				

그림 1. 근접병설터널 TYPE-3의 시공순서 사례

그림 1은 TYPE-3과 같은 2Arch 1-Pilot형식을 가지는 근접병설터널 시공순서를 나타내며, 각 현장의 지반조건이나 여러 제반요소를 고려하여 각 TYPE별로 다양한 형태의 시공순서로 터널계획이 이루어지게 된다.

### 3. 근접병설터널의 설계 및 시공사례 분석

일반적으로 근접병설터널은 일본 등과 같이 지반조건이 상대적으로 취약한 지역에서 시공 사례를 많이 볼 수 있으며, 현재는 다수의 시공경험을 바탕으로 시공성 및 유지보수에 유리한 다양한 형태의 근접병설터널이 시공되고 있다. 근래에는 중앙터널의 굴착단면적을 축소하여 시공초기에 대두되었던 시공성 및 누수 문제를 개선한 굴착단면을 적용하는 경향이 있으며, 굴착대상 지반조건에 따라 중앙벽체설치, 원지반 활용, 선행터널 라이닝 두께 증진 등의 방안을 적용하여 터널의 안정성을 확보하고 있다. 본 연구에서는 국내 및 해외에서 설계 또는 시공이 이루어진 근접병설터널의 대표적인 사례를 조사하여 그 특징과 문제점을 고찰하였다.

#### 3.1 국내사례

##### 1) 도심지 OO터널( TYPE-3, 2Arch 1-Pilot, 중앙필러부, 연장 320m )

- 서울시 도심지 지역에 도시계획폭 제약으로 대단면 근접병설터널로 계획
- 호상 혹은모 편마암과 규장질 편마암 및 화강편마암이 기반암을 형성
- TYPE-3의 2Arch 1-Pilot형식에서 중앙필러부가 확대된 형태로 중앙필러부를 매스콘크리트 구조체로 형성
- 중앙필러부와 본선라이닝이 분리구조
- 중앙필러부의 두께: 1.1~3.8m

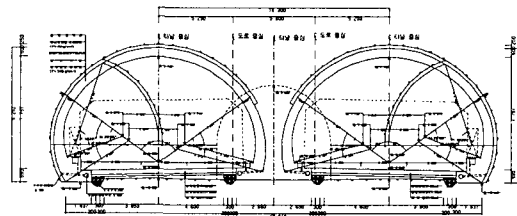


그림 2. 도심지 OO터널 표준단면

2) 고속도로 A터널( TYPE-3, 2Arch 1-Pilot, 중앙필러부, 연장 250m)

- 목포~광양간 고속도로
- 용지매입 및 자연환경훼손 최소화로 인한 대단면 근접병설터널로 계획
- 중생대 화강암류(각섬석 편마상 화강암, 흑운모 편마상 화강암) 분포
- TYPE-3의 2Arch 1-Pilot형식에서 중앙필러부가 확대된 형태로 중앙필러부를 매스콘 크리트 구조체로 형성
- 중앙필러부와 본선라이닝 구조체가 분리구조

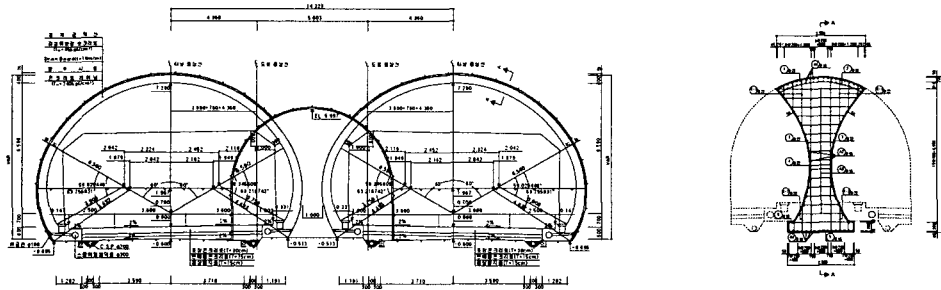


그림 3. 고속도로 A터널 표준단면 및 중앙필러부 철근배근도

3) 고속도로 B터널( TYPE-4, 2Arch 1-Pilot, 중앙벽체부, 연장 440m)

- 공주~서천간 고속도로
- 마을의 근접지양 및 편입용지 최소화를 위해 근접병설터널로 계획
- 암반분류 : II ~ IV등급
- 중앙Pilot터널 굴착후 TYPE-4의 형태와 같이 중앙벽체부를 설치하여 지반이완하중의 지지체로 사용

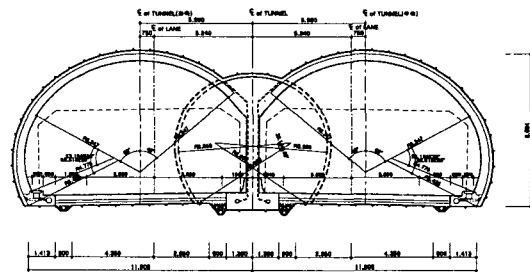


그림 4. 고속도로 B터널 표준단면도

4) 지하철터널

국내에서는 제2·3기 지하철, 대전지하철 등의 정거장 설계 및 시공시 TYPE-4와 같은 2Arch 내지 3Arch 대단면형태의 터널이 적용된 사례가 많이 있으며, 대부분의 터널에서 중앙필러부를 기둥 또는 벽체로 계획하여 구조부재로 활용하였다.

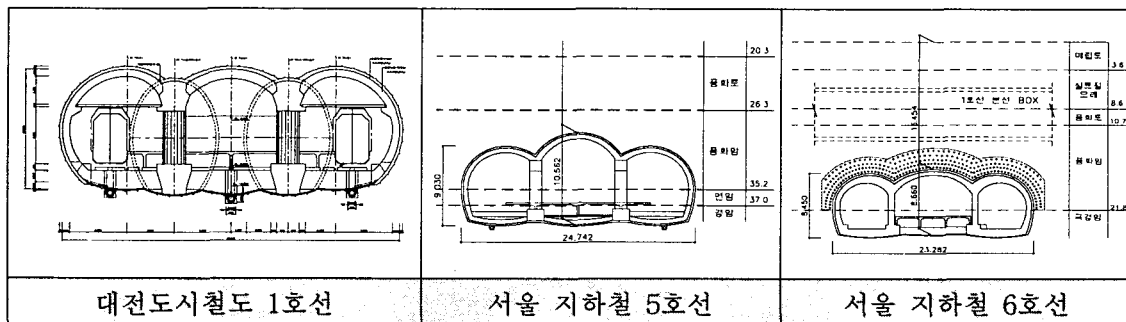


그림 5. 국내 지하철 적용사례

### 3.2 국외사례

#### 1) 도큐도요코선 철도터널(일본)

- 기존철도 직하부에 새로운 철도를 개설한 사례
- 복선터널, 단선병렬형, 안경형, 버섯형 등 다양한 종류의 단면이 적용됨
- 양질의 세사층과 역학적으로 안정한 고결 실트층으로 구성됨
- 사층부에는 지하수가 모여있는 대수층이 형성되어 터널굴착시 막장 안정을 위해 별도의 대책공법을 적용
- 상부에 위치한 기존철도에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 한번에 굴착되는 단면을 최소화하여 지반변형에 단계적으로 대처할 수 있도록 함

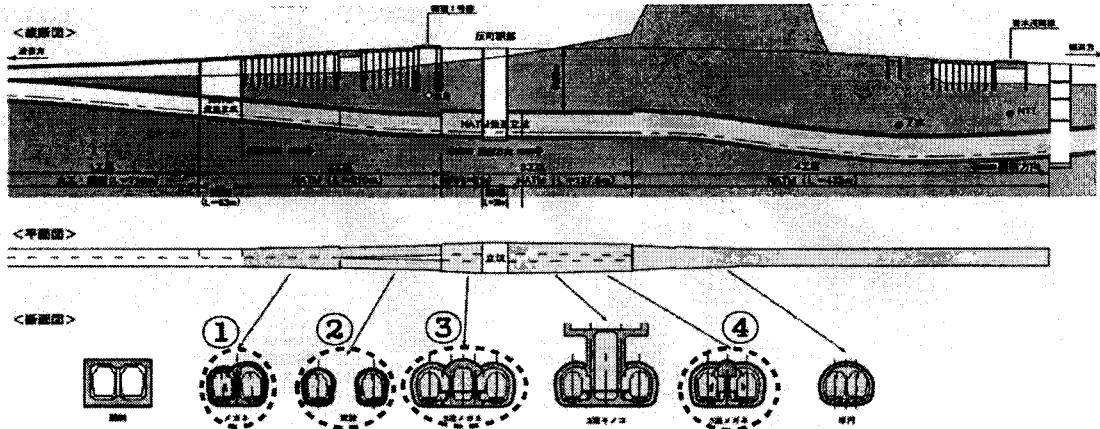


그림 6. 도큐도요코선 철도공사 개요도



그림 7. 적용된 터널단면별 시공사진

#### 2) 이토즈터널(일본, TYPE-1, TYPE-2, TYPE-3, 연장 280m)

- 후쿠오카현의 기타큐슈시에 도시계획선 제한으로 인해 병설터널간의 이격거리가 1m 정도내외인 근접병설터널
- 고생대 제3기의 강풍화된 사암 및 역암이 주를 이루며, 부분적으로 세일 및 얇은 석탄층이 협재하고 있음
- 표 1의 TYPE-1, 2, 3형태의 터널단면이 모두 적용됨
- 기계굴착공법과 Short bench 공법적용
- 토피고가 대략 20~30m 정도이며, 터널통과구간 상부에 많은 지장물(빌딩, 주거지역, 학교, 사원등)이 분포

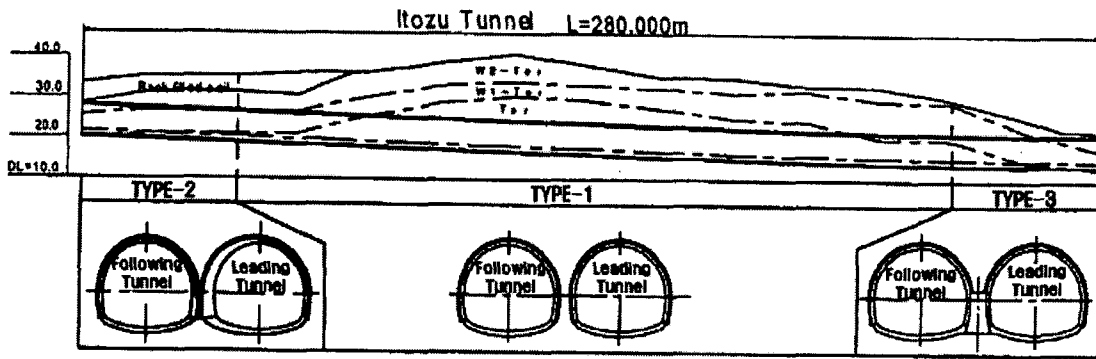


그림 8. 이토즈터널의 근접분리터널 적용현황

3) 鷲羽山터널(일본, TYPE-4, 연장 230m/205m)

- 도로와 철도가 겹치는 곳에 2층으로 터널이 계획된 프로젝트
- 하부에 철도터널이 비대칭 2Arch터널의 형태로 계획되었고 바로 직상부에 2.2~6.1m의 이격거리를 두고 도로터널이 TYPE-4와 같은 중앙벽체부를 가지는 2Arch터널이 계획
- 또한, 하부에 위치한 철도터널 좌우에 현수교 케이블 고정을 위한 교량구조물(앵커터널)이 계획

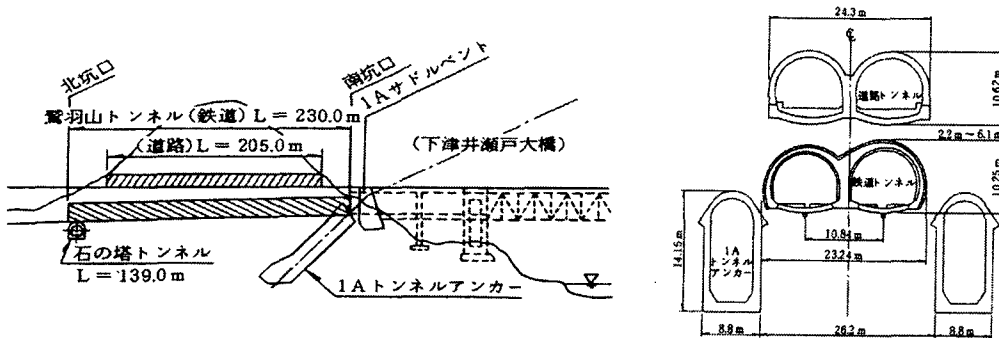


그림 9. 鷲羽山 터널 개요도 및 터널단면도

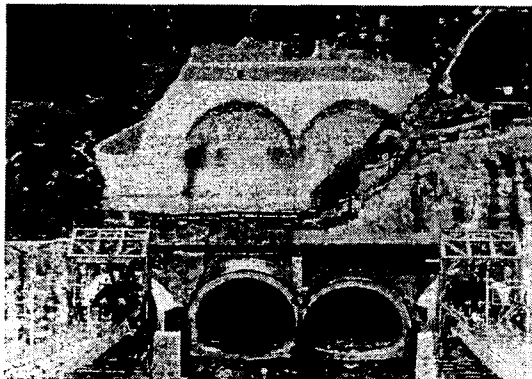


그림 10. 鷲羽山터널 시공중 사진

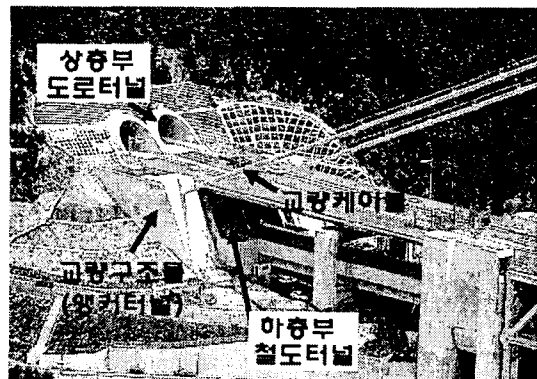


그림 11. 鷲羽山터널 운영중 사진

4) 오야마다이리터널 (일본, TYPE-1, 연장 389m)

- 동경도 도심지의 용지폭제한(30m)으로 인해 근접병설터널로 계획
- 토피고는 3~26m의 비교적 얇은 심도
- 신생대 제4기 홍적세의 자갈질이 포함된 사질토층을 통과
- 표 1의 TYPE-1과 같이 원지반을 지반보강용 수평 PC 록볼트로 보강하여 양터널사이를 지지하는 구조체로서 활용

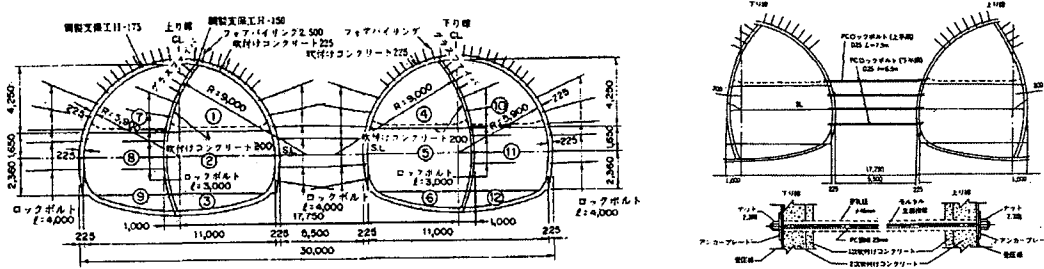


그림 12. 오야마다이리 터널의 표준단면 및 중앙부 보강계획

5) 三川内터널 (일본, TYPE-5, 2Arch 3-Pilot )

- 長崎縣 佐世保市에 위치
- 연장: 상행선 194.9m, 하행선 197.1m
- 터널 갱구부는 성토, 애추, 간풍화된 사암지반을 통과
- 표 1의 TYPE-5와 유사한 형태로 초기 지반이완을 최소화하기 위하여 2Arch터널을 3개의 Pilot터널로 선굴착하는 것으로 계획

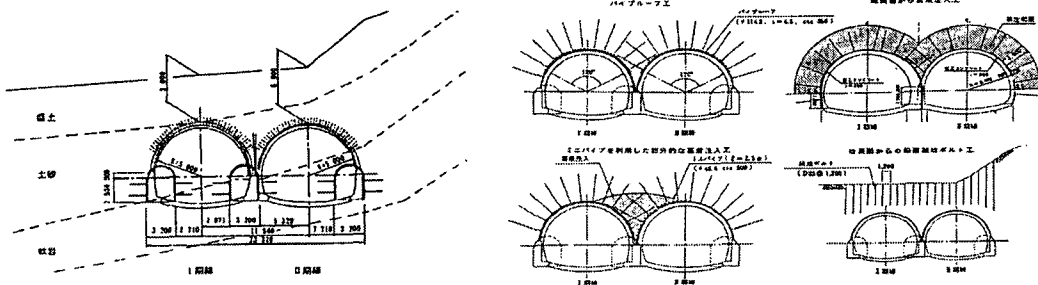


그림 13. 터널 단면도 및 보조공법도

6) Tsumalai 터널(대만, TYPE-4, 2Arch 1-Pilot, 중앙벽체부, 연장 333m)

- 이암층에 계획된 2차선의 고속도로 터널
- TYPE-4의 형태로 중앙Pilot터널 굴착면적을 줄여 지반이완을 최소화함
- 터널공사기간동안 이암층이 포어폴링이나 슛크리트와 같은 별도의 보강없이 자립함

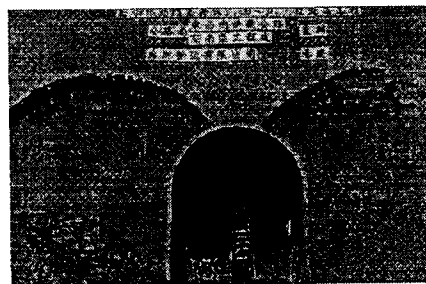


그림 14. Tsumalai 터널의 갱구부

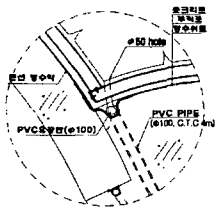
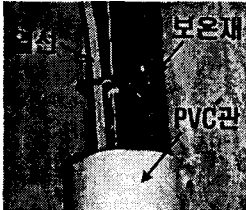
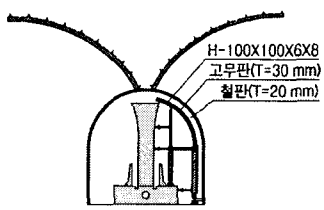
#### 4. 기존 근접병설터널의 문제점 및 개선 사례

지금까지는 국내에서 근접병설터널 시공경험의 부족으로 여러가지 문제점들이 발생되고 있다. 특히, 중앙벽체부 상단과 본터널 상단부 라이닝 콘크리트 연결부로 터널 배면수가 유입되어 누수되면서 노면 결빙 및 천단부에 고드름 발생으로 통행 차량의 안전운행 저해 및 주변부 콘크리트의 추가적인 부식을 유발하게 된다. 그림 15는 기존 2Arch터널 시공시 발생된 문제점의 현장사진을 보여주며, 표 2는 고속도로 2Arch터널 시공시 발생된 문제점을 개선한 사례를 나타낸다.

		
중앙벽체부 작업공중 복잡	중앙거더와 라이닝 연결부 방수막 손상	누수로 인한 동계기간 노면결빙

그림 15. 기존 2Arch 터널시공시 문제점

표 2. 기존 고속도로 2Arch 터널시공시 문제점 및 개선사례

구 분	문 제 점	개 선 방 안
중앙벽체부 배수시스템	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 중앙벽체 수직 배수관 설치후 시공성을 고려한 철근배근 검토</li> <li>• 종배수관-수직배수관 연결부 누수</li> <li>• 중앙거더부 배수관 동결우려</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 구조물 안정성과 수직배수관 설치의 원활성을 기하기 위해 연속벽체식 구조물로 설계</li> <li>• 종배수관과 수직배수관을 깔대기(방수막 이용)를 이용하여 연결하고 방수막과 깔대기를 정밀하게 봉합</li> <li>• 수직배수관의 동결방지를 위해 PE관에 정온전선(열선)을 설치하고 보온재 및 PVC관으로 보호</li> </ul>
발파에 의한 영향	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 본선터널 굴착시 중앙터널 천단부의 방수슈트 및 배수관 손상</li> <li>• 본선발파시 중앙벽체 손상</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 본선터널 굴착시 부직포 방수막 및 배수관이 설치된 부위를 기계굴착으로 확장하여 시설물 손상방지</li> <li>• H-Pile을 이용한 가설벽체(지지대)설치</li> </ul>
강재거푸집 변형	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 좌·우측 상이한 라이닝 폼 형태에 의한 거푸집 변형 발생</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 좌·우측 동일한 라이닝 거푸집 적용으로 거푸집의 균형유지(Hydraulic Jack Type 사용)</li> </ul>
강관다단 그라우팅 타설각도	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 기존의 강관다단그라우팅 타설 각도 시공시 강지보재 설치영향</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 선지보 개념으로 강관타설하고 막장굴진을 완료한 후 강관을 절단하고(두부에서 강지보 타설위치까지) 강지보재 타설</li> </ul>
		
중앙벽체부 배수시스템 개선	수직배수관 보온처리	중앙필러부 보호시설



## 5. 근접병설터널의 안정성 평가기법

### 5.1 개요

현재 국내 도로터널에 시공된 근접병설터널의 경우는 주로 중앙벽체의 지지기능을 활용한 표 1의 TYPE-4와 같은 2Arch 1Pilot터널의 형태로 시공되었으며, 아직까지 국내에서의 시공실적 및 설계사례의 부족으로 근접병설터널의 거동에 대한 체계적인 데이터화 및 연구가 미흡한 실정이다. 실제 고속도로상의 근접병설터널에 적용된 콘크리트 라이닝에 대한 철근 보강사례를 보아도 지반조건에 따라 라이닝 철근보강이 달라지겠지만 D13~H22까지 매우 넓은 범위에서 콘크리트 라이닝 철근보강이 이루어지고 있는 실정이며 산출근거 역시 상당히 미흡한 현실이다. 표 3은 기존 고속도로 2Arch터널 설계 및 라이닝 콘크리트 보강현황을 나타낸다.

표 3. 기존 고속도로 2Arch 터널설계 및 라이닝 보강현황

고속도로명	터널명	연장 (m)	차로 형식	암반분류	철근 소요량(m)	콘크리트 라이닝 두께	콘크리트 압축강도	터널형식
서울외곽	소래	446	일방향 4차로	Ⅲ~Ⅴ	D13~D22 2.326ton	60cm	$\sigma_{28}=240$ kgf/cm <sup>2</sup>	TYPE-4 + 인버트
강릉~동해	산성우	210	양방향 4차로	Ⅳ~Ⅴ	H13~H22 2.659ton	40cm	$\sigma_{28}=270$ kgf/cm <sup>2</sup>	-
	정착	140	"	Ⅳ~Ⅴ	H13~H22 2.659ton	40cm	$\sigma_{28}=270$ kgf/cm <sup>2</sup>	-
구미~옥포	신기	225	"	-	D13~D22 3.182ton	40cm	$\sigma_{28}=240$ kgf/cm <sup>2</sup>	-
공주~서천	신성	178	"	-	D13~D32 3.880ton	40cm	$\sigma_{28}=240$ kgf/cm <sup>2</sup>	TYPE-4
	서천	440	"	Ⅱ~Ⅳ	D13~D19 2.424ton	40cm	$\sigma_{28}=240$ kgf/cm <sup>2</sup>	TYPE-4
대전~당진	유성	315	"	-	D13~D22 2.326ton	40cm	$\sigma_{28}=240$ kgf/cm <sup>2</sup>	-
목포~광양	영암3	250	"	-	D13~D22 3.399ton	40cm	$\sigma_{28}=240$ kgf/cm <sup>2</sup>	TYPE-3 + 중앙필러부

따라서 실제 도심지 구간에 도시계획선의 제약으로 표 1의 TYPE-3과 유사한 형태의 근접병설터널로 계획중인 OO터널에 대한 안정성 검토 사례를 통하여 근접병설터널에 대한 역학적 거동을 고찰하고, 앞으로 계획될 터널에 대한 안정성 평가기법에 대하여 방향을 제안하고자 한다. 그림 16은 근접병설터널에 대한 안정성 검토의 개략적인 수행 흐름도를 나타내며, 그림 17은 검토대상 도심지 OO터널의 개요도를 나타낸다.



## 5.2 2차원 연속체 해석을 통한 터널 및 주변지장물 안정성 검토

일반적인 터널해석의 경우와 같이 주요구간에 대한 2차원 연속체 해석을 실시하여 시공단계에 따른 터널의 변위량 및 지보재 응력검토 검토를 통해 터널의 안정성을 검토하였다. 그러나, 기존 병설터널과는 달리 중앙필러부에 대한 하중전달 메커니즘이 불명확하므로 중앙필러부에 대한 상세한 검토가 반드시 수행되어야 할 것으로 판단된다.

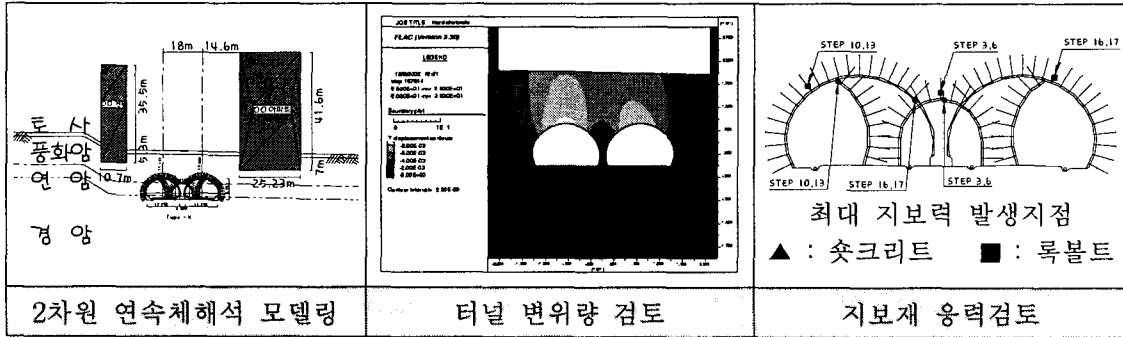


그림 18. 터널 및 주변지장물의 안정성 검토

또한, 주변에 지장물이 존재하는 구간에 대해서는 터널 시공에 따른 인접구조물에 대한 안정성 평가를 수행하였다. 해석구간 인근에 향후 신축 예정인 구조물이 위치하므로 터널굴착시 구조물에 대한 최대침하량 및 부등침하량, 각변위량 등을 검토하였다.(표 4)

표 4. 인접구조물 안정성 검토기준

구분	허용기준	적용근거	적용 검토 구조물
최대침하량	25mm	최대 허용 침하량(Sowers, 1962)	일반 건물(민가 등) 고층아파트
부등침하량	0.003S	철근콘크리트 구조(Sowers, 1962)	
각변위량	1/750	예민한 기계기초의 한계(Bjerrum, 1963)	3차원 해석시
뒤뜸각	1/300	Skempton, MacDonald(1957), Bjerrum(1963)	
수평변형률	2.5mm	Litteljohn(1975)	3차원 해석시

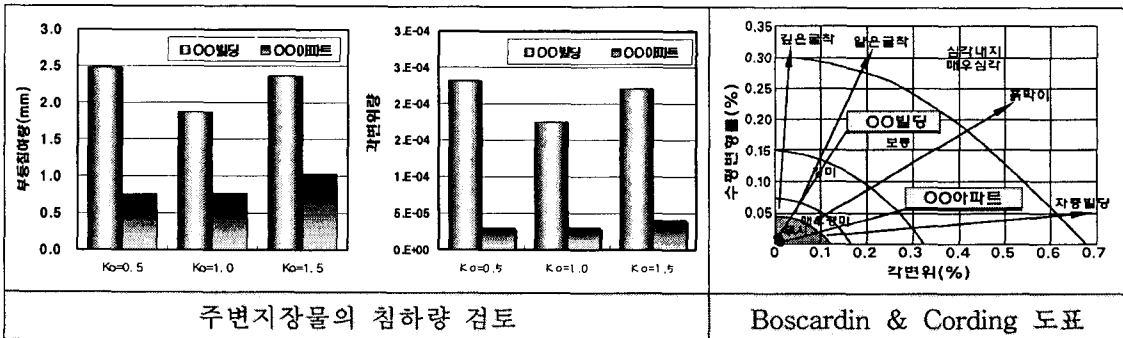


그림 19. 주변지장물에 대한 안정성 검토

### 5.3 3차원 연속체 해석에 의한 안정성 검토

일반적으로 갱구부는 3차원 응력거동으로 횡방향 및 종방향의 원지반 아치형성에 불리하다. 계획된 보조공법 및 시공계획에 대한 안정성 검토를 위해 유한요소해석 프로그램을 이용하여 3차원 해석을 수행하였으며, 모델링 개요와 해석결과는 그림 20과 그림 21과 같다.

중앙필러부가 존재하는 근접병설터널의 경우 선형터널 및 후행터널의 굴착에 따른 3차원 응력거동이 전체터널의 안정성에 중요한 영향을 미치므로 시공단계에 따른 중앙필러부의 3차원 거동의 상세검토가 요구된다.



그림 20. 3차원 해석영역 및 지보재 모델링

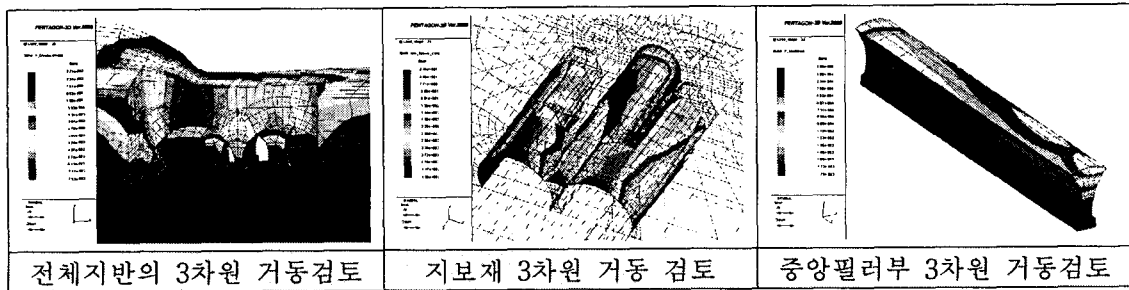


그림 21. 3차원 연속체해석

### 5.4 콘크리트 라이닝 안정성 검토

일반적인 병설터널의 콘크리트 라이닝에서와 같이 터널굴착에 따른 변형 수립후에 시공되므로 하중을 받지 않은 구조물로 설계하는 것과는 달리 근접병설터널에서는 라이닝을 지보재로 활용하여 설계가 수행되고 있어, 특히 콘크리트 라이닝에 대한 안정성이 매우 중요하다 할 수 있다.

#### 1) 라이닝 구조체 모델링

본선 라이닝과 중앙필러부가 분리 구조로서 설계된 근접병설터널의 경우에는 2차원상의 FRAME로 모델링하여 구조해석을 수행하는 것은 본선 라이닝과 콘크리트 중앙필러부의 연결부분의 역학거동을 실제거동과 유사하게 모델링하기 어려우며, 매스콘크리트 구조체인 중앙필러부 자체를 FRAME요소화하는 것 역시 상당한 모순점을 가지고 있다. 따라서 2차원 라이닝 구조검토시 중앙필러부의 콘크리트 구조체를 2차원상의 SHELL요소를 이용하여 축력 및 전단력이 전달될 수 있는 구조로 설정하는 경우와 FRAME요소로 모델링하여 축력만이 전달되는 구조로 설정하는 경우에 대하여 본선라이닝과 중앙필러부의 거동을 검토하였다.(그림 22 참조)

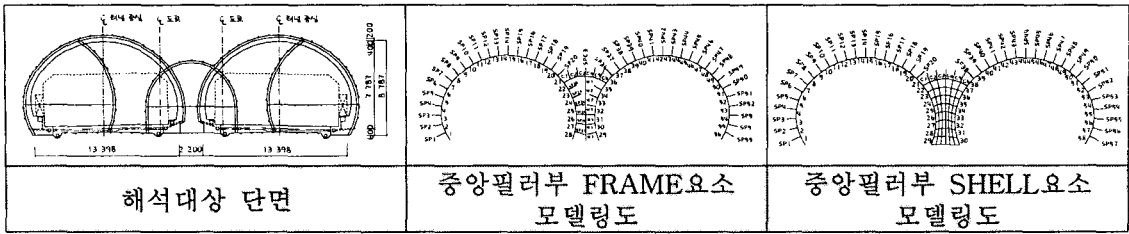


그림 22. 근접병설터널 라이닝의 모델링

### 2) 적용하중 산정 및 라이닝 설계

계획된 터널현황을 바탕으로 하중조건을 산정하며, 특히 이완하중의 산정에 있어서는 터널구조물의 중요도 및 근접병설 터널의 시공단계에 따른 응력거동의 불확실성등을 고려하여 적용하였다. 또한 적용하중의 종류와 크기가 산정된 후에는 합리적인 하중조합을 통하여 시공중이나 시공완료후의 장기적 측면에서 가장 불리한 경우에 대하여 허용응력설계법과 강도설계법을 통하여 합리적인 라이닝에 대한 설계가 이루어지도록 하였다.

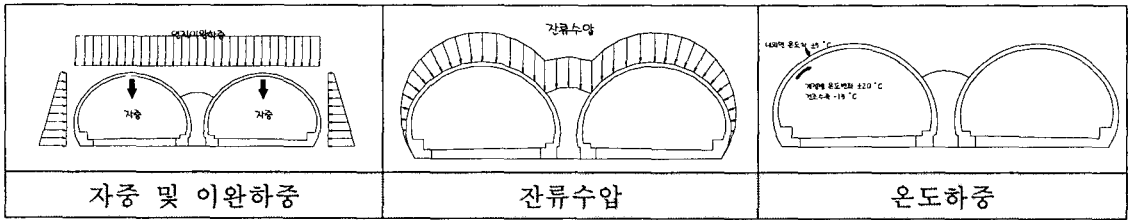


그림 23. 적용하중 산정

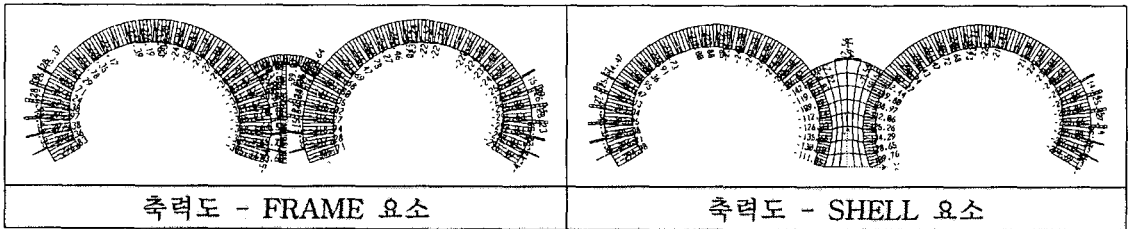


그림 24. 2차원 라이닝 해석결과

### 3) 라이닝 지보기능 및 인버트 설치 필요성 검토

산정된 장기적인 이완하중에 의해 터널라이닝의 지보기능 확보방안 검토 및 중양부 벽체의 하중분담여부를 검토하고, 지반강도의 평가 및 터널 안정해석 결과, 라이닝 안정성 해석결과를 토대로 인버트 설치 필요성 유·무를 검토하였다.

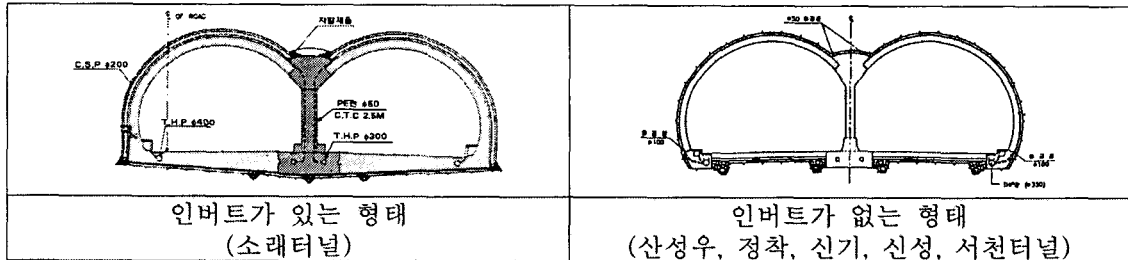


그림 25. 인버트 설치 유·무에 따른 2Arch 터널사례

## 5.5 중앙필러부 정밀 안정성 검토

### 1) 중앙필러부 정밀구조 검토

응력집중이 예상되는 중앙필러부에 대한 구조적 안정성 검토를 위해 SHELL요소를 이용한 정밀 해석을 수행하여 국부적 응력집중구간의 파악 및 철근보강 여부등을 검토하였다.

또한, Matsuda등(1997)에 의하면 상재하중이  $1D$ ( $D$ =병설터널의 전체폭)보다 작은 경우에는 아래의 그림 26에 음영으로 표시된 영역의 전하중이 중앙필러부영역의 지반에 작용하는 것으로 제안되었다. 이러한 경우에 계획된 중앙필러부 구조체의 강도가 예상되어지는 응력보다 크면 충분한 안정성을 확보할 수 있는 것으로 제안되었다. OO터널의 안정성 검토에서는 터널이 도심지 지역을 통과하는 지역적인 중요도를 감안하여 라이닝 해석시 Matsuda에 의해 제안된 하중을 고려하여 다소 보수적인 안정성 평가를 수행하였다.

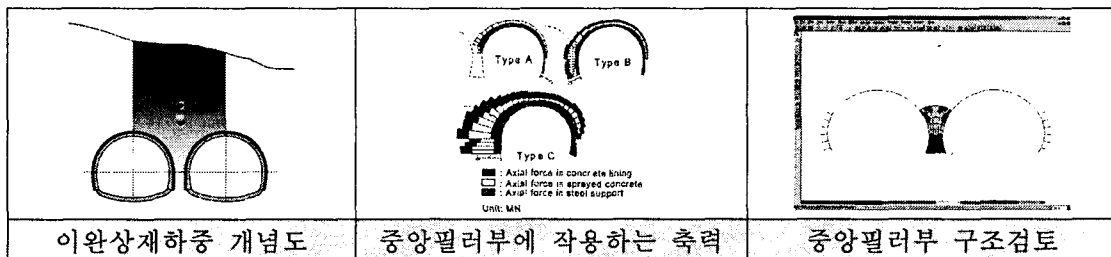


그림 26. 중앙필러부 정밀구조검토

### 2) 중앙필러부 기초지지력 및 침하검토

중앙필러부의 기초부 지반조건 및 강도특성을 고려하여 주어진 하중상태에서 지지력 확보여부 및 침하에 대한 안정성을 검토하였다. 일반적으로 얕은기초의 하중 및 침하량 산정에 이용되는 이론식 및 경험식등을 이용하여 개략적인 검토를 수행하고, 수치해석결과와 비교하여 최종적인 안정성을 평가하였다.

## 5.6 보조공법 적용의 적정성 검토

근접병설터널의 안정성 확보에 문제가 있는 구간에서는 터널 굴착전 굴착단면 상단에 강판과 같은 보강재를 적절한 간격으로 배열·설치하고 관 주변을 그라우팅하여 지반을 개량시켜 지반강도를 증대시키고 터널주변 지반에 Beam Arch를 형성시키는 별도의 터널보조공법이 적용되게 된다. 지반 개량영역의 횡방향 단면은 아치형상에 의하여 상재하중 재하시 압축을 받게 되고 종방향으로는 강관이 휨인장을 받게 되는 특성을 고려하여 횡방향 및 종방향 보강영역의 적정성 여부를 판단한다.

### 1) 터널횡방향 보강영역 검토

일본의 일반국도 41호선 横山터널의 주입범위 산정에 적용된 단순보 이론을 적용(본 이론식은 두께  $t$ 의 아치형상의 개량영역을 길이가 터널폭( $D$ )과 같고 폭이  $1m$ (단위길이)인 단순보로 가정하여 이 보에 상재하중( $W$ )이 작용하는 조건에 대하여 휨응력을 산정하여 개량영역의 휨응력과 비교하는 것)하여 적절한 지반개량 두께를 산정할 수 있다.

표 5. 횡방향 보강영역 적정성 검토

상재하중 및 보강영역	본 구간의 상재하중 및 기타 인자 계산 ㉠ Bierbaumer 이론식에 의한 지반이완하중 : 14.451 tonf/m <sup>2</sup> ㉡ 주차장 설치로 인한 노면활하중 : 1.5 tonf/m <sup>2</sup> ㉢ t=3.0 m, D=12m 이고, 개량영역의 일축압축강도를 50 kgf/cm <sup>2</sup>
횡방향 보강영역 적정성 검토	$M = \frac{WD^2}{8} = \frac{15.951 \times 12^2}{8} \approx 287.12 \text{ (t} \cdot \text{m)}$ $Z = \frac{1 \times t^2}{6} = \frac{1 \times 3.0^2}{6} \approx 1.5 \text{ (m}^3\text{)}$ $\sigma = \frac{M}{Z} = \frac{287.12}{1.5} \approx 191.41 \text{ (t/m}^2\text{)} < 200 \text{ (t/m}^2\text{)} \rightarrow \text{O.K.}$

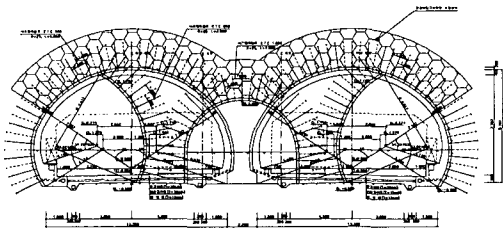


그림 27. 도심지 OO터널 갱구부 보강도

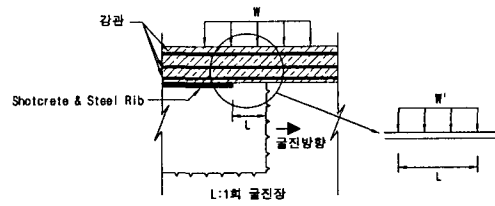


그림 28. 터널 종방향 지반보강 검토 개요

2) 터널종방향 보강영역 검토

터널막장부의 무지보 구간의 하중을 강관이 부담할 수 있는 최소굴진장을 산정함으로써 종방향 보강영역의 적정성을 검토하였다.

표 6. 종방향 보강영역 적정성 검토

상재하중 및 강관제원	개별 강관이 부담하는 하중(W') = 1.35tf/m <sup>2</sup> (W/14) (※ 단위두께당 평균 14개가 강관이 위치) 구조용 탄소강관(φ60.5mm, t=4mm) : Z=9.41cm <sup>3</sup> , 허용응력 2100kgf/cm <sup>2</sup>
종방향 보강영역 적정성 검토	단순보로 가정하여 무지보 최소굴진장(L) 산정 $\sigma = \frac{M}{Z} = \frac{W' L^2}{8 Z}$ $L = \sqrt{\frac{8 Z \sigma}{W'}} = \sqrt{\frac{8 \times 9.41 \times 10^{-6} \times 21000}{1.35}} = 1.08 \text{ m}$

3) 강관다단그라우팅보강 적정성 검토

3차원 유한요소 해석프로그램을 이용하여 시공단계에 따른 3차원 유한요소해석을 실시하고 강관의 발생응력과 강관보강영역의 발생응력을 계산하고 허용응력검토를 실시하여 설계의 적정성을 검토하였다.

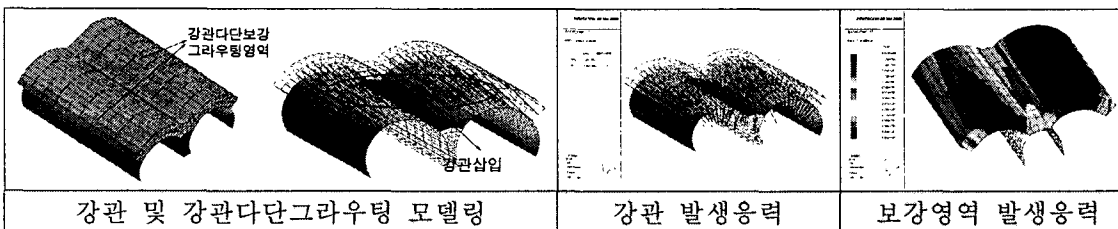


그림 29. 강관다단그라우팅보강 적정성 검토

## 6. 결론 및 제언

1) 대단면 근접병설터널의 시공실적 및 설계사례의 부족으로 기존 병설터널의 거동과는 구별되는 근접병설터널의 역학적 거동에 대한 연구가 평가방법이 정립되지 못한 실정으로, 이에 국내·외의 설계 및 시공사례와 문제점 개선방안을 체계적으로 검토하여 차후 근접병설터널 계획시 접근방법에 대한 사고의 폭을 넓히고 합리적인 터널설계·시공이 이루어질 수 있도록 도움이 되고자 하였다.

2) 근접병설터널 시공시 예상되는 터널 및 지보재의 거동을 수치해석적으로 분석하여 터널과 지보재의 안정성을 검토하고 중앙필러부 및 라이닝 콘크리트의 구조적 안정성, 인접구조물에 대한 영향성 등을 체계적으로 검토하여 근접병설터널의 역학적인 거동을 분석하기 위한 안정성 평가기법에 대하여 제안하였다.

그러나, 지질 및 지반특성, 지반물성치의 추정, 시공시 변화되는 상황들 때문에 실제 시공 중의 터널 거동을 완전하게 예측할 수는 없으므로 대단면 근접병설터널의 일반적인 거동을 파악하는데 그 목적을 두고 이러한 미비점을 시공시 계측과 관찰을 통해 보완 및 역해석을 실시하도록 하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. M.Kamimura, T.Sugiyama, S.Ishikawa, H.Yoneda, K.Nakagawa(2002), "Discussion on the behaviours of parallel tunnel with a small clearance", AITES - ITA DOWNUNDER 2002 Congress and Abstract Book, Vol. 1, pp. 898~906
2. T.T.Wang and T.H.Huang(2002), "An experience of tunneling in mudstone area in southwestern Taiwan", Article in Press, Tunneling and Underground Space Technology, pp. 1~22
3. NATM補助工法選定マニュアル 研究報告書(平成 4年 5月), pp. 163~182, 社団法人日本トンネル技術協會
4. 鷲羽山トンネル(1996), Vol. 5, pp. 112~115, 海峽横断
5. 도로공사 설계실무자료(2002), "2-Arch터널 시공방안검토", 건설정10308-121, 한국도로공사
6. 목포~광양간 고속도로 건설공사 실시설계(제O공구) 터널해석보고서(2002), 한국도로공사
7. 서울시 도심지 도로개설공사중 터널안정성 검토 연구(OO터널 안정성 검토연구)(2002), 한국터널공학회
8. 윤석열(2002), "시공사례 분석을 통한 대단면 Twin터널의 설계방법 연구", 한양대학교 산업대학원 석사학위 논문
9. 유태호, 권오근(2002), "2-Arch터널(소래터널) 누수 발생에 대한 고찰", 도로와 공항, Vol. 9, No. 2, pp. 38~44, 도로 및 공항기술사회
10. 장석부, 문상조, 권승, 허도학, 배규진(2002), "대전역사 하부통과 3-arch 터널의 설계사례 연구(I)", 터널기술, Vol. 4, No. 3, 한국터널공학회