발 간 등 록 번 호
11-B554390-000012-01

기존 시설물(터널) 내진성능

향상요령

2022. 5.

국토안전관리원

국토안전관리원은 지진으로부터 국민의 안전을 확보하기 위하여 기존 터널의 내진보강을 체계적으로 수행할 수 있도록 “기존 시설물(터널) 내진성능 향상요령”을 2004년에 제정하고 2011년에 개정하여 운영 중에 있습니다.

이후, 행정안전부에서는 「국가지진위험지도(2013)」와 「내진설계기준 공통적용사항(2017)」을 제정·공표하였으며, 국토교통부에서는 이를 반영하여 ‘KDS 17 10 00 내진설계 일반’과 ‘KDS 27 17 00 터널 내진설계기준’을 제·개정하여 고시(2018)하였습니다.

이에 따라 터널의 내진성능 향상이 최신의 기준 및 연구결과, 기존 향상요령의 미비점에 대한 개선사항 등이 반영될 수 있도록 「기존 시설물(터널) 내진성능 향상요령」을 개정하여 발간하였으니 실무에 많은 활용 바랍니다.

다만, 「기존 시설물(터널) 내진성능 향상요령」은 실무자의 이해를 돕기 위한 참고도서로써 관계법상 구속력이 없으므로, 관련 기준이나 지침의 내용과 상이한 경우는 발주처와 협의하여 결정된 사항을 따르시길 바랍니다.

<목 차>

제1장 총 칙

1.1 일반사항 ····· 1

1.2 요령의 구성 ····· 2

1.3 용어 정의 ····· 3

1.4 기호 ····· 4

제2장 내진성능 향상기준지진과 향상절차

2.1 일반사항 ····· 5

2.2 내진성능기준 ····· 5

2.3 내진성능 향상절차 ····· 13

제3장 내진성능 향상방법

3.1 일반사항 ····· 15

3.2 자료조사 ····· 15

3.3 내진성능 향상방법 ····· 16

3.3.1 개착식 터널의 내진성능 향상방법 ····· 16

3.3.2 굴착식 터널의 내진성능 향상방법 ····· 37

3.3.3 개착식 터널의 액상화 보강방법 ····· 41

제4장 내진성능 향상보고서

4.1 일반사항 ····· 49

4.2 보고서 구성 ····· 49

부 록

A. 내진성능 향상예제 - 개착식 터널

A.1 개착식 터널의 지진피해 사례 ····· A-1

A.2 개착식 터널의 내진보강 사례 ····· A-8

A.3 개착식 터널의 내진보강공법 상세 ····· A-12

B. 내진보강 사례 및 예제 - 굴착식 터널

B.1 굴착식 터널의 내진성능 향상 관련 기준 검토 ····· B-1

B.2 굴착식 터널의 내진성능 향상 평가 방법 ····· B-6

B.3 굴착식 터널의 내진성능 향상 방법 ····· B-19

참고 문헌

<표 차례>

표 3.3.1 개착식 터널의 주요 부재별 내진성능 향상방법 ····· 17

<그림 차례>

그림 2.3.1 내진성능 향상절차 ····· 13

<해설표 차례>

해설표 2.2.1 구조물별 내진등급 ····· 6
해설표 2.2.2 내진성능 목표 (붕괴방지수준) ····· 7
해설표 2.2.3 내진성능 목표 (기능수행수준) ····· 7
해설표 2.2.4 지진구역 구분 ····· 8
해설표 2.2.5 지진구역계수(재현주기 500년에 해당) ····· 8
해설표 2.2.6 지진 위험도계수 ····· 9
해설표 2.2.7 장단주기 지반증폭계수 F_a와 F_v ····· 9
해설표 2.2.8 지반의 분류 ····· 10
해설표 2.2.9 기반면의 수평가속도 (K_h') ····· 10
해설표 2.2.10 지표면의 수평가속도 (K_h) ····· 10
해설표 2.2.11 감쇠보정계수 C_D ····· 12
해설표 3.3.1 내진성능 향상방법 개요 ····· 18
해설표 3.3.2 굴착식 터널의 지진 시 피해발생 구간(宮林, 2011) ····· 38
해설표 3.3.3 굴착식 터널의 지진 시 주요 피해(宮林, 2011) ····· 39
해설표 3.3.4 굴착식 터널의 지진 시 변형모드 및 응력발생 양상(宮林, 2011) ····· 40
해설표 3.3.5 굴착식 터널의 지진 피해 및 보강 사례(宮林, 2011) ····· 40
해설표 3.3.6 개착식 터널에 적용할 수 있는 액상화 대책공법 ····· 42
해설표 4.2.1 1단계: 정보 분석 ····· 50
해설표 4.2.2 2단계: 내진성능평가 ····· 51

<해설그림 차례>

해설그림 2.2.1 심도에 따른 수평가속도 ····· 11
해설그림 2.2.2 표준응답스펙트럼(감쇠비 5%) ····· 12
해설그림 3.3.1 슬래브 상·하부 두께증가 공법 ····· 20
해설그림 3.3.2 강판접착공법(주입법) ····· 21
해설그림 3.3.3 강판접착공법(압착법) ····· 22
해설그림 3.3.4 강재기둥 추가 설치공법 ····· 23
해설그림 3.3.5 테두리보 추가 설치공법 ····· 23
해설그림 3.3.6 기둥 보강공법 ····· 24
해설그림 3.3.7 벽체 보강공법 ····· 24
해설그림 3.3.8 기존 구조물의 증설공법 ····· 25
해설그림 3.3.9 현장 설치 볼트공법 ····· 26
해설그림 3.3.10 후크에 의한 철근 연결방법 ····· 26
해설그림 3.3.11 콘크리트 채움 합성강관을 사용한 공법 개요 ····· 27
해설그림 3.3.12 H-형강 증설공법 ····· 28
해설그림 3.3.13 H-형강 브레이싱 보강공법 ····· 29
해설그림 3.3.14 우각부 스트럿 내진보강공법 개요 ····· 30
해설그림 3.3.15 벽체부 강판 압착공법 ····· 31
해설그림 3.3.16 띠판 보강공법 ····· 32
해설그림 3.3.17 기둥 단부 섬유보강폴리머 부착공법 개념도(좌) 및 실제 개착식 터널 적용사례(우) ·· 33
해설그림 3.3.18 마찰진자형 면진받침 개요도 ····· 34
해설그림 3.3.19 측벽 철근 매립공법 ····· 35
해설그림 3.3.20 폴리머 파일의 내진격리공법(일본 Nakagawa 역) ····· 36
해설그림 3.3.21 굴착식 터널의 지진 시 주요 피해(宮林, 2011) ····· 39
해설그림 3.3.22 저유동성 모르타르 주입공법 (Hayward Baker, Inc) ····· 43
해설그림 3.3.23 고압분사교반공법 (Hayward Baker, Inc) ····· 44
해설그림 3.3.24 지중연속벽공법(CCC method Assoc.) ····· 44

해설그림 3.3.25 공기주입 불포화 공법(Toa Corp.) ····· 45
해설그림 3.3.26 굴착치환 공법 ····· 46
해설그림 3.3.27 D-BOX공법 (Mitanisekizai LLC.) ····· 46
해설그림 3.3.28 WIB공법 (ed-techno, Inc.) ····· 47
해설그림 3.3.29 팽이말뚝기초공법(Sanwakensetsu) ····· 48

제1장 총 칙

1.1 일반사항

1. 본 내진성능 향상요령은 개착 또는 굴착(비개착)공법으로 건설된 터널 구조물에 대하여 적용한다.

2. 본 요령의 내용은 기술수준이 향상되거나 필요에 따라 내용을 추가 또는 보완할 필요가 있을 때에는 개정하여 시행하는 것을 원칙으로 한다.

3. 본 요령은 터널의 내진성능 향상과 관련한 최소한의 사항을 규정하고 있다. 따라서 본 요령에서 규정하고 있지 않은 사항에 대해서는 관련 규정을 따른다. 따라서 내진성능 향상과 관련하여 본 요령에서 규정하고 있지 않은 사항에 대해서는 다음 기준(요령)을 참고하여 내진성능 향상을 적용한다. 또한, 관련 기준(요령)의 제·개정으로 인해 본 요령과 상이한 사항이 확인되면 최신 기준을 우선하여 따른다.

가. 기존 시설물(터널)의 내진성능 평가요령, 국토교통부/한국시설안전공단 (이하 내진성능 평가요령)

나. 기존 시설물(공동구)의 내진성능 평가요령, 국토교통부/한국시설안전공단

다. 기존 시설물(기초및지반)의 내진성능 평가요령, 국토교통부/한국시설안전공단

라. 내진설계기준 공통적용사항, 행정안전부

마. KDS 14 20 01 콘크리트구조 설계(강도설계법), 국토교통부

바. KDS 17 10 00 내진설계 일반, 국토교통부

사. KDS 27 17 00 터널 내진설계 기준, 국토교통부

아. KDS 29 17 00 공동구 내진설계 기준, 국토교통부

자. 도시철도내진설계기준, 국토교통부

4. 내진성능 향상은 본 요령에서 제시하는 바와 다르더라도 역학적으로 타당한 절차와 방법에 의해서 실시할 수 있다.

5. 지반액상화 내진성능 평가에 대해서는 「KDS 17 10 00」 또는 「기존 시설물(기초및지반) 내진성능 평가요령」을 따른다.

▌해설▐

1. 본 요령은 개착 또는 굴착공법으로 지중에 건설된 터널 구조물에 대한 내진성능 향상에 적용한다.

3. 일반적으로 설계기준의 개정은 기술 수준이 향상되거나 내용의 추가 및 보완이 필요한 경우에 이루어지며, 일부 내용이 개정되더라도 기준의 명칭을 변경하는 경우는 매우 드물다. 간혹 사회적 쟁점이 되어 내용을 전면 개정하는 경우나 법률에 따라 개정하는 경우에는 명칭도 변경하는 경우가 종종 있다. 그러므로 내진설계와 관련된 설계기준의 개정 여부를 검토할 때는 상세내용과 더불어 명칭 변경 여부도 확인하여야 한다.

1.2 요령의 구성

본 요령의 구성은 다음과 같다.

1. 총칙
2. 내진성능 향상기준과 향상절차
3. 내진성능 향상방법
4. 내진성능 향상보고서

부 록 A. 내진보강 사례 및 예제 - 개착식 터널
B. 내진보강 사례 및 예제 - 굴착식 터널

참고문헌

1.3 용어 정의

본 요령에 사용되는 용어의 정의는 「KDS 17 10 00」, 「KDS 27 17 00」, 「KDS 29 17 00」, 「도시철도내진설계기준」, 「KDS 14 20 01」, 「기존 시설물(터널) 내진성능 평가요령」, 「기존 시설물(기초및지반) 내진성능 평가요령」에 따르고 이에 정의되지 않은 용어는 아래의 정의를 따른다.

(1) 가속도 계수 (Acceleration coefficient, A) : 구역계수(Z)에 지진 위험도계수(I)를 곱한 값(무차원량)

(2) 가속도 응답스펙트럼 (Acceleration response spectrum) : 주어진 가속도를 단자유도 구조물의 지지점에 작용하여 구한 절대가속도 응답의 최댓값을 단자유도 구조물 고유주기와 감쇠비에 따라 도표로 나타낸 스펙트럼

(3) 동적전단탄성계수 (Dynamic shear modulus) : 동적변형이 작용될 때 재료의 전단탄성계수 값으로서 질량밀도와 전단파속도를 이용하여 구할 수 있음

(4) 동적해석법 (Dynamic analysis method) : 시간에 따른 구조물(또는 지반)의 응답을 구하는 구조해석방법으로서, 시간영역해석법과 주파수영역해석법이 있음

(5) 부상 (Uplift) : 물 위로 떠오름

(6) 소산 (Dissipation) : 발생한 과잉간극수압이 작아지면서 정수압에 도달하는 현상

(7) 수제선 : 바다, 강, 호수의 물과 땅이 닿아서 이루는 선

(8) 신축이음 (Expansion joint) : 콘크리트로 성형된 교량 등의 각종 구조물은 온도변화에 따라 미량의 신축을 하게 되며 하중이 재하됨에 따라 각 단면은 변형을 받게 됨. 이러한 온도변화에 의한 신축작용과 하중재하에 의한 균열을 방지하기 위하여 일정 길이마다 이 힘들을 흡수할 수 있도록 단면을 횡단하여 설치하는 이음을 말함

(9) 양압력(Uplift pressure) : 물체를 밑에서 위로 올려 미는 압력

1.4 기호

B_v : 구조물 저판 폭 (m)
C_D : 암반지반에서 주기 T에 따른 감쇠보정계수
E_D : 지진하중 상태의 성능수준을 고려한 지반의 탄성계수
F_a : 토사지반의 단주기 지반증폭계수
f_{ck}, f_{ctk} : 콘크리트의 설계기준압축강도 및 인장강도(MPa)
F_v : 토사지반의 장주기 지반증폭계수
G_D : 지반의 동적전단탄성계수
H : 대상구조물의 최대 단면높이(m)
I : 위험도계수
K_h : 지표면에서의 수평가속도
K_h' : 기반면에서의 수평가속도
S : 내진성능 평가기준지진의 유효수평지반가속도
S_i : 국지적인 토질조건, 지질조건과 지표 및 지하 지형이 지반운동에 미치는 영향을 고려하기 위하여 분류한 지반의 종류, i=1, 2, 3, 4, 5, 6
T_L : 내진성능 평가기준지진의 응답스펙트럼에서 스펙트럼가속도가 주기 T의 제곱에 반비례하여 감소하기 시작하는 구간의 전이주기(sec)
T_S : 상한통제주기로 내진성능 평가기준지진의 응답스펙트럼에서 스펙트럼가속도가 상수인 구간의 최대주기(sec)
T_s : 표층지반의 고유주기(sec) $= 1.25T_G$
T_0 : 하한통제주기로 내진성능 평가기준지진의 응답스펙트럼에서 스펙트럼가속도가 상수인 구간의 최소주기(sec)
V_s : 전단파속도(m/s)
V_{si} : i층 지반의 평균전단파속도(m/s)
Z : 지진구역계수
Z_B : 개착터널 하부까지 깊이
Z_U : 개착터널 상부까지 깊이
ϕ : 강도감소계수
ξ : 감쇠비(%)

제2장 내진성능 향상기준지진과 향상절차

2.1 일반사항

내진성능 향상은 관련 기준에 따른다.

▌해설▐

지중에 건설되는 터널 구조물은 관련 기준(터널 설계기준(KDS 27 00 00), 공동구 설계기준(KDS 29 10 00), 도시철도 내진설계기준 등)에서 요구하는 구조물의 성능과 동등한 성능을 발휘할 수 있어야 한다는 것을 의미한다. 이를 위해 현행 기준에 규정된 지진구역계수, 지반계수, 설계응답스펙트럼 등이 사용되어야 하고, 당 기준에서 요구하는 강도 및 연성도를 달성할 수 있어야 한다. 따라서, 내진성능 향상은 기존 터널 구조물이 이러한 목표성능을 확보할 수 있어야 한다.

2.2 내진성능기준

1. 내진성능
   지중구조물의 내진등급은 시설물별 내진설계기준에서 정하는 바에 따라 설정한다.

2. 성능수준에 따른 지진세기
   가. 기존 터널 구조물의 소요내진성능수준은 [기능수행수준]과 [붕괴방지수준]에 대해서 고려한다.
   나. 내진성능평가에 이용하는 지진세기는 구조물의 내진등급과 성능수준에 따라 설정한다.

3. 지진구역은 2개 구역으로 설정하고, 각 지진구역별로 구역계수를 설정한다.

4. 유효지반가속도(수평가속도)는 지진하중을 산정하기 위한 지반운동수준을 나타낸다.

5. 지진 응답스펙트럼
   가. 표준응답스펙트럼은 관련 기준에서 규정하고 있는 기반면에서의 수평가속도 스펙트럼을 적용한다.
   나. 기반면에서의 가속도 스펙트럼은 감쇠율에 대한 보정계수를 곱하여 적용한다.

▌해설▐

1. 시설물의 내진등급은 시설물의 중요도에 따라 내진특등급, 내진I등급, 내진II등급으로 구분된다. 시설물의 내진등급은 시설물별 내진설계기준에서 정하는 바에 따라 설정하며, 터널 구조물은 대부분 내진I등급 구조물에 속한다. 시설물별 내진설계기준에서 정하는 바가 명확하지 않은 경우, <해설표 2.2.1>을 참조하여 정할 수 있다.

<해설표 2.2.1> 구조물별 내진등급

구조물 종류	내진 I 등급	내진 II 등급
주거・문화 시설	지하박물관, 지하음악당, 도서관, 지하상가, 위락시설	지하사무실, 스포츠센터
교통시설	도시철도, 철도・도로시설	지하주차장, 지하보도
라이프라인 시설	가스・석유 수송시설, 상수도, 전력・통신관로	하수도, 도수터널
산업시설	식수・정수처리장, 지하발전시설, 핵폐기물 처리시설	폐하수처리장, 산업폐기물 처리장
에너지 저장시설	전력시설, 전기공급시설, 열저장・지역냉난방공급시설, 지하원유・LNG・LPG 비축시설	곡물・식품저온 저장소, 수산물 냉장・냉동 저장소, 압축공기저장시설
방어시설	지하대피소, 지휘・통신시설, 군사기지, 해안방어기지	

2. 성능수준과 목표

① 터널의 내진성능목표는「KDS 17 10 00」(4.1.4)의 표 4.1-1 최소 내진성능목표 중 기능수행수준과 붕괴방지수준으로 한다.

② 현행 기준에서는 터널 구조물의 내진등급별 내진성능목표에 따라 <해설표 2.2.2> ~ <해설표 2.2.3>와 같은 지진세기를 규정하고 있다.

<해설표 2.2.2> 내진성능목표(붕괴방지수준)

관련기준 / 재현주기	도시철도 내진설계기준	KDS 27 10 00	KDS 29 17 00
500년	내진Ⅱ등급	내진Ⅱ등급	-
1,000년	내진Ⅰ등급	내진Ⅰ등급	내진Ⅰ등급
2,400년	내진특등급	-	-

<해설표 2.2.3> 내진성능목표(기능수행수준)

관련기준 / 재현주기	도시철도 내진설계기준	KDS 27 10 00	KDS 29 17 00
50년	내진Ⅱ등급	내진Ⅱ등급	-
100년	내진Ⅰ등급	내진Ⅰ등급	내진Ⅰ등급
200년	내진특등급	-	-

3. 관련 기준에서는 지진구역을 <해설표 2.2.4>와 같이 2개 구역으로 설정하고 있고, 각 지진구역에서의 평균재현주기 500년의 지진지반운동에 해당하는 구역계수는 <해설표 2.2.5>와 같이 규정하고 있다. 따라서, 본 요령에서도 이를 준용한다. 단, <해설표 2.2.4>의 지진구역에서 구분된 행정구역의 경계를 통과하는 평가대상 구조물에는 상위 지진구역계수를 적용한다.

4. 본 요령에서는 기존 구조물에 대해서도 신설구조물과 동일한 지진세기에 대하여 동일한 성능을 만족하도록 요구하고 있다. 따라서, 평균재현주기가 다른 지진의 유효지반가속도(수평가속도)는 <해설표 2.2.6>의 위험도계수(I)를 <해설표 2.2.5>의 지진구역계수(Z)에 곱하여 계산한다. 한편, 지중구조물의 가속도는 지진해석시 기반면에서의 수평가속도(K_h')와 지표면에서의 수평가속도(K_h)를 사용하며 대상 깊이의 수평가속도는 지표면과 기반면의 수평가속도를 직선 보간하여 구할 수 있다. 기반면이라 함은 전단파속도 V_s = 760 m/s 이상의 보통암 수준을 의미하며 개략적으로 20~30m의 심도에 해당되나, 지반조사에 의하여 산정토록 한다. 유효지반가속도(수평가속도), S는 다음 식과 같이 구하고, 지표면에서의 수평가속도(K_h)는 <해설표 2.2.7>을 이용하여 구할 수 있다.

$$S = Z \times I \qquad \text{해설식(2.2.1)}$$

여기서, Z : 지진구역계수

I : 위험도계수

<해설표 2.2.4> 지진구역 구분

지진구역	행정구역	
I	시	서울, 인천, 대전, 부산, 대구, 울산, 광주, 세종
	도	경기, 충북, 충남, 경북, 경남, 전북, 전남, 강원 남부[1]
II	도	강원 북부[2], 제주

1) 강원 남부(군, 시) : 영월, 정선, 삼척, 강릉, 동해, 원주, 태백

2) 강원 북부(군, 시) : 홍천, 철원, 화천, 횡성, 평창, 양구, 인제, 고성, 양양, 춘천, 속초

<해설표 2.2.5> 지진구역계수(재현주기 500년에 해당)

지진구역	I	II
지진구역계수, Z	0.11	0.07

<해설표 2.2.6> 지진 위험도계수

평균재현주기 (년)	50	100	200	500	1,000	2,400	4,800
위험도계수, I	0.40	0.57	0.73	1	1.4	2.0	2.6

<해설표 2.2.7> 장단주기 지반증폭계수 F_a와 F_v

지반분류	단주기 지반증폭계수, F_a			장주기 지반증폭계수, F_v		
	S ≤ 0.1	S = 0.2	S = 0.3	S ≤ 0.1	S = 0.2	S = 0.3
S_2	1.4	1.4	1.3	1.5	1.4	1.3
S_3	1.7	1.5	1.3	1.7	1.6	1.5
S_4	1.6	1.4	1.2	2.2	2.0	1.8
S_5	1.8	1.3	1.3	3.0	2.7	2.4

지진계수 결정을 위한 지반 분류는 <해설표 2.2.8>과 같이 분류한다. 지진구역에 따른 기반면 및 지표면의 수평가속도의 값은 <해설표 2.2.9>와 <해설표 2.2.10>과 같으며 심도에 따른 설계수평가속도는 <해설그림 2.2.1>과 같다.

<해설그림 2.2.1>은 구조물 상판과 저판의 수평가속도 K_{h1}, K_{h2}가 기반면의 수평가속도 K_h'와 지표면에서의 수평가속도 K_h에 따라 결정됨을 나타낸 것이다.

<해설표 2.2.8> 지반의 분류

지반분류	지반분류의 호칭	분류기준	
		기반암 깊이, H (m)	토층 평균전단파속도, $V_{s,soil}$ (m/s)
S_1	암반 지반	1 미만	-
S_2	얕고 단단한 지반	1~20 이하	260 이상
S_3	얕고 연약한 지반		260 미만
S_4	깊고 단단한 지반	20 초과	180 이상
S_5	깊고 연약한 지반		180 미만
S_6	부지 고유의 특성평가 및 지반응답해석이 요구되는 지반		

주 : 1) 기반암(Bed rock)은 전단파속도가 760 m/s 이상인 지층으로 정의한다.

2) 토층의 평균전단파속도($V_{s,soil}$)는 탄성파시험 결과가 있을 경우 이를 우선적으로 적용한다.

3) 기반암 깊이와 무관하게 토층 평균전단파속도가 120 m/s 이하인 지반은 S_6 지반으로 분류한다.

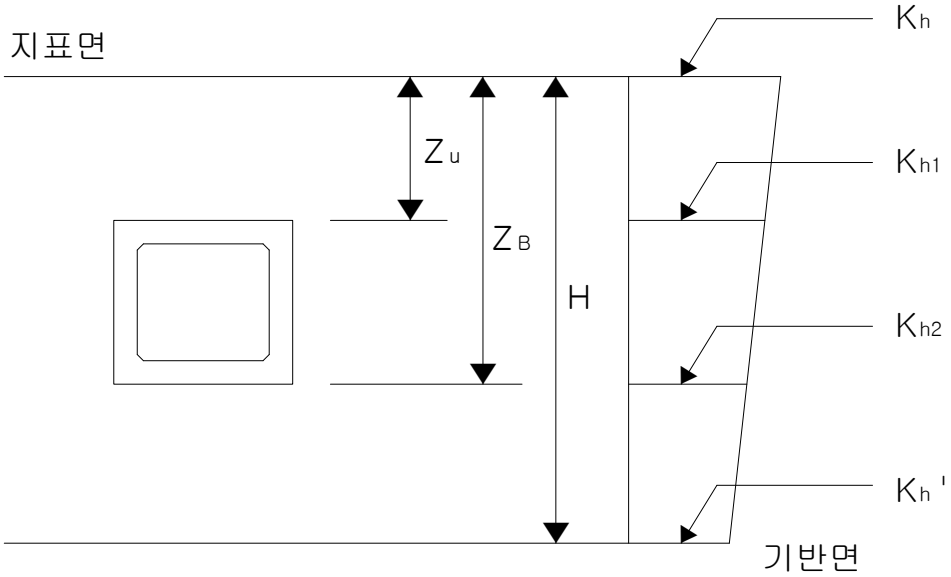
<해설표 2.2.9> 기반면의 수평가속도 (K_h')

구 분	내진I등급(붕괴방지, 1000년)	
	지진구역 I	지진구역 II
수평가속도	0.154	0.098

<해설표 2.2.10> 지표면의 수평가속도 (K_h)

지반분류	지진구역 I		지진구역 II	
	내진I등급 S=0.154	내진특등급 S=0.22	내진I등급 S=0.098	내진특등급 S=0.14
S_1	0.154	0.220	0.0980	0.1400
S_2	0.216	0.308	0.137	0.196
S_3	0.262	0.374	0.167	0.238
S_4	0.246	0.352	0.157	0.224
S_5	0.277	0.396	0.176	0.252

주 : 예로써 S ≤ 0.1인 경우 단주기 지반증폭계수(F_a)를 적용하여 산정한 값임



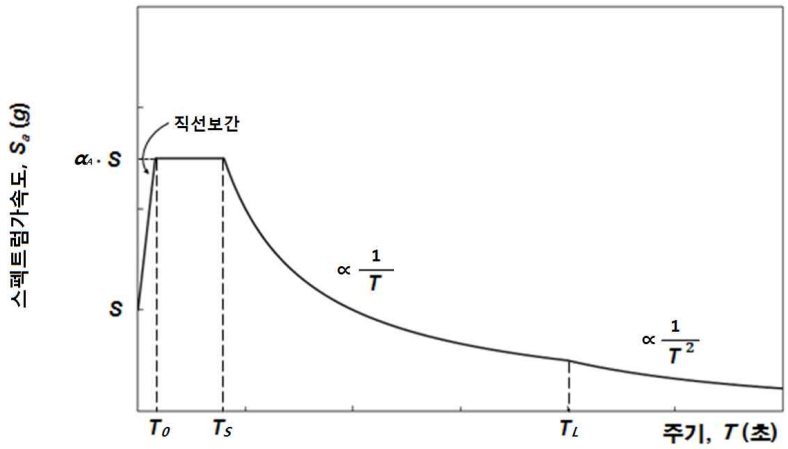
<해설그림 2.2.1> 심도에 따른 수평가속도

여기서, Z_U, Z_B : 구조물 상부, 하부까지 깊이

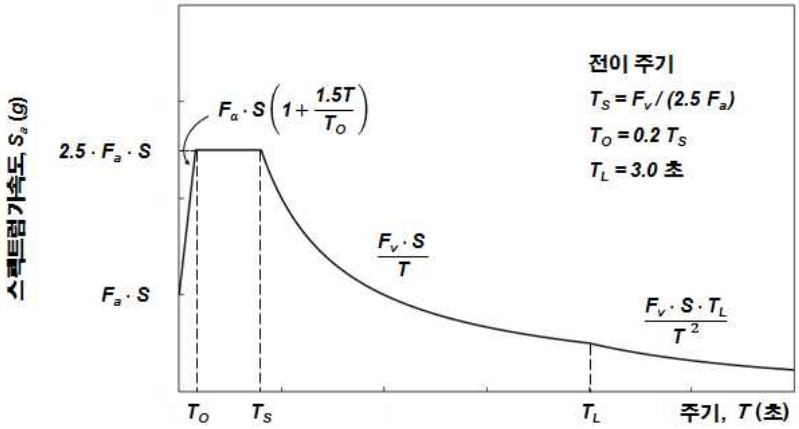
H : 기반면까지 깊이

K_h, K_{h1}, K_{h2}, K_h' : 각 깊이에서 수평가속도

5.가. 본 요령에서는 성능수준별 감쇠율에 대한 보정계수를 적용한 응답스펙트럼을 사용하도록 한다. 5% 감쇠비에 대한 표준응답스펙트럼은 <해설그림 2.2.2>와 같다.



<암반지반>



<토사지반>

<해설그림 2.2.2> 표준응답스펙트럼(감쇠비 5%)

5.나. <해설그림 2.2.2>에서 규정하고 있는 표준응답스펙트럼은 감쇠비가 5%인 경우이다. 이는 지표상 콘크리트 구조물의 탄성상태의 감쇠를 적용한 값이므로 지중구조물의 경우 이와 다른 값을 적용하여야 하며, 내진성능수준에 따른 감쇠비값을 적용하여 응답스펙트럼의 보정을 다음과 같이 수행한다.

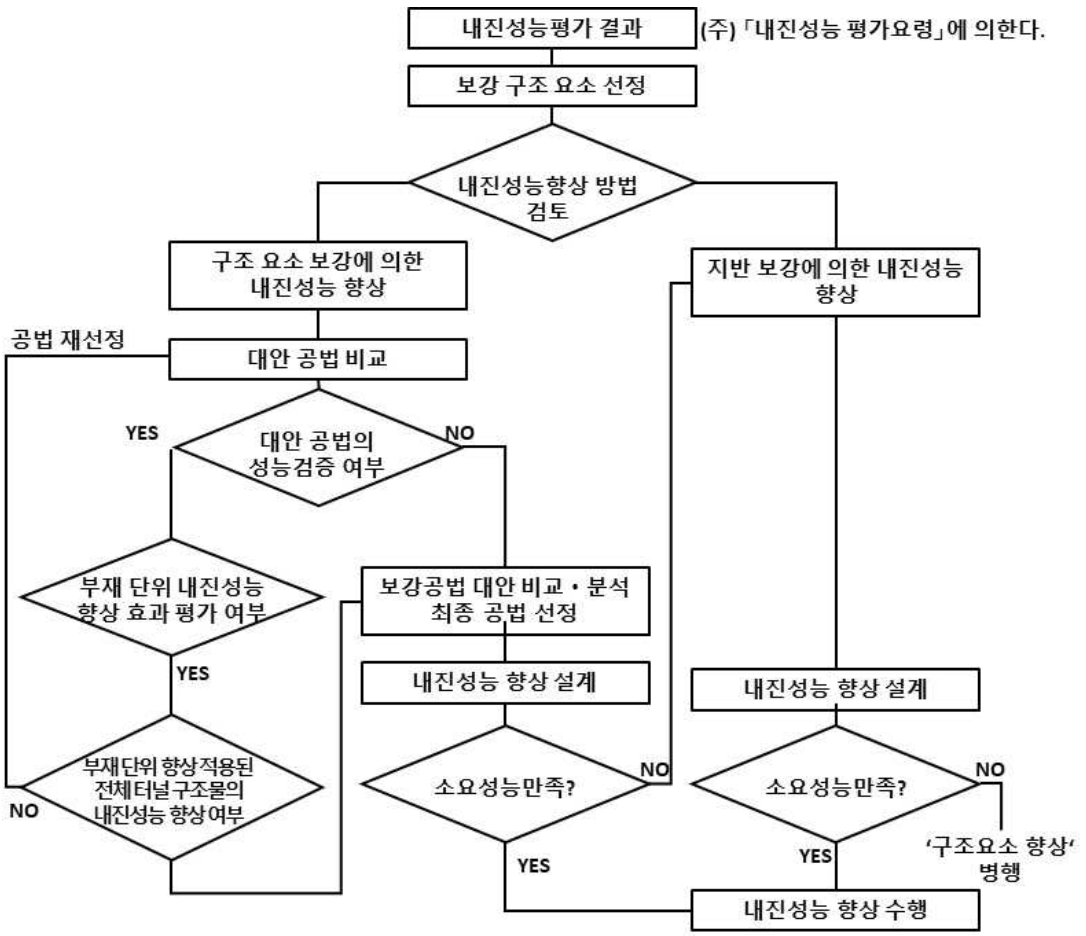
<해설표 2.2.11> 감쇠보정계수 C_D

주기(T, sec)	$T=0$	$0 \le T \le T_o$	$T_0 \le T$
C_D	1.0	$T=0$일 때, 1.0 $T=T_o$일 때, $\left(\frac{6.42}{1.42+\xi}\right)^{0.48}$ 그 사이는 직선보간	$\left(\frac{6.42}{1.42+\xi}\right)^{0.48}$

2.3 내진성능 향상절차

1. 개착식 터널 구조물의 내진성능 향상(또는 내진보강) 필요 여부의 판정은 「내진성능 평가요령」을 따른다.

2. 이에 따라 내진보강이 필요하다고 판정된 경우, 본 요령에서 제시하는 내진성능 향상절차는 <그림 2.3.1>과 같다.



※ 내진보강에 의하여 내하력 향상이 있는 경우에는 지진하중을 다시 산정하여 구조요소별 내진성능을 다시 평가하여야 한다.

<그림 2.3.1> 내진성능 향상절차

3. 동일한 보강공법이라 하더라도 터널의 구조 상세에 따라 향상효과가 상이할 수 있으므로, 각 보강공법의 부재단위 내진성능(휨 또는 전단강도, 변형능력, 연성도 등) 향상효과는 관련 실험결과와 전문가 의견을 토대로 결정해야 한다.

4. 부재단위 내진성능 향상효과가 검증된 후, 선정된 보강공법은 구조해석 모델에 반영하여, 보강 후 전체 터널 구조물의 내진성능 향상 여부를 검토해야 한다.

5. 활성단층지역에는 터널을 건설하지 않는 것이 바람직하지만, 불가피하게 이를 통과하는 터널 구간에 대해서는 지진발생이력, 활단층 확실도, 단층 활동도 등에 대해 면밀히 조사하여 지진발생에 따른 손상이 최소화되도록 내진성능 향상을 실시하여야 한다.

▌해설▐

3. 내진성능 향상에 적용되는 보강공법은 실험을 통해 성능 보강 효과를 검증하여야 하고, 실험을 수행하지 않는 경우 보강공법에 대한 전문기관의 기술인증 또는 전문가 검토를 통해 성능 보강 효과를 입증하여야 한다.
4. 보강공법을 선정한 후에는 보강으로 인한 향상 효과를 반영한 전체 터널 구조물의 내진성능 평가를 통해 그 성능을 확인하여야 한다.

제3장 내진성능 향상방법

3.1 일반사항

내진성능 향상의 주요 목표는 내진성능 평가에서 지진에 대한 강도가 약한 부재에 대하여 구조요소보강 또는 지반보강을 통하여 구조물 피해를 방지하는 것이다.

▌해설▐

일반적인 구조물의 노화, 균열 등에 대한 보수·보강은 별도 검토에 따르며, 여기서는 내진성능 향상에 국한하여 기술한다.

3.2 자료조사

내진성능 향상을 위한 자료조사에는 설계도서에 나타난 구조물의 직접 정보뿐만 아니라 현장조사를 통하여 구조물의 보수·보강이력 및 상태, 구조물의 현재 여건, 구조물 주위의 환경적 요인 등을 함께 조사하여 정리한다.

1. 일반사항 조사
   가. 터널명, 위치, 관리주체 등을 조사한다.
   나. 터널 구조물이 위치한 지진구역, 시설물의 내진등급, 지반조건 등을 조사한다.
   다. 준공년도, 준거 시방서, 내진설계의 유무 등을 조사한다.
2. 설계도서 조사
   가. 구조물 구조형식 및 제원, 각 구성부재의 제원 및 재료 특성 등을 조사한다.
   나. 구조물의 제원, 평면도, 종·횡단면도, 지반지질도, 상세도 등을 조사한다.

다. 보수・보강 등에 따른 내진성능의 변화 요인을 조사한다.

3. 현장조사

가. 구조물의 현재 상태 등을 조사하여 설계도서와의 차이점을 조사한다.

나. 중요 연결시설물, 주변 현황 등을 조사한다.

4. 환경조사

가. 재료 및 제원의 특성값에 영향을 주는 환경요인을 조사한다.

나. 지진 외적인 보수·보강계획 등을 조사한다.

다. 평균 이용객 현황 및 교통량 등과 같은 교통환경, 사회경제적 여건을 고려한 터널 구조물의 중요도 또는 특이사항 등을 조사한다.

3.3 내진성능 향상방법

3.3.1 개착식 터널의 내진성능 향상방법

1. 개착식 터널의 보강설계 시에는 해당 부재(슬래브, 벽체, 기둥 등)의 내진성능을 직간접적으로 높이는데 적용 가능한 다양한 보강공법을 비교, 분석해야 하며, 충분한 안전성 및 경제성을 고려하여 보강공법을 선정해야 한다.

2. 개착식 터널 구조물의 상·하부/중간 슬래브, 기둥 및 벽체 등에 대한 내진성능 향상은 지하구조물의 특성상 대체로 지반굴착을 하지 않은 상태로 구조물 내부에서 보강작업이 이루어져야 하는 제한조건을 가지고 있다. 이러한 조건 아래에서 개착식 터널의 주요 부재별로 적용 가능한 내진보강 방법은 아래 <표 3.3.1>에 제시되어 있다.

<표 3.3.1> 개착식 터널의 주요 부재별 내진성능 향상방법

주요 부재		보 강 공 법
슬래브	상부	• 슬래브 하부 두께증가 보강공법 • 강판접착공법(주입법, 압착법) • 브레이싱 증설에 의한 보강공법
	하부	• 슬래브 상부 두께증가 보강공법 • 강판접착공법(주입법, 압착법)
	중간	• 강판접착공법(주입법, 압착법) • 개구부 보강공법(강재기둥 또는 테두리보 추가 설치) • 두께증가 보강공법
벽체 또는 기둥		• 벽체(기둥) 두께증가 보강공법 • 부재증설 보강공법 - 타설 콘크리트에 의한 벽체증설 방법 - 콘크리트채움 합성강관을 이용한 기둥증설 방법 • 브레이싱 증설에 의한 보강공법 - 우각부 H형강 증설 보강공법 - 우각부 스트럿 보강공법 • 벽체부 강판 압착공법 • 기둥의 띠판 보강공법 • 기둥 단부 섬유보강폴리머 부착공법 • 기둥의 면진 또는 제진장치 적용을 통한 보강공법 • 측벽 철근 매립공법
주변 지반보강		• 지반보강을 통한 지진격리공법

3. 슬래브의 휨강도(또는 종방향 철근비)가 부족한 경우, 아래와 같은 슬래브의 두께 증가나 강판 보강 공법을 적절히 적용할 수 있다.

가. 슬래브 상·하부 두께증가 보강공법

나. 강판접착공법(주입법, 압착법)

다. 부재증설 보강공법

라. 브레이싱 증설에 의한 보강공법

4. 개착식 터널 구조물에 가해지는 지진력 감소를 위해 아래와 같이 중앙 기둥에 면진 또는 제진장치 적용, 측벽 철근 매립, 또는 주변 지반보강을 통한 지진격리공법을 사용할 수 있다.
   가. 기둥의 면진 또는 제진장치 적용을 통한 보강공법
   나. 측벽 철근 매립공법
   다. 주변 지반보강을 통한 지진격리공법

▌해설▐

2.가. 위의 <표 3.3.1>에서 설명한 각 내진성능 향상방법에 대한 개요는 다음 <해설표 3.3.1>과 같다.

<해설표 3.3.1> 내진성능 향상방법 개요

주요 부재	공법명		공법개요
슬래브	슬래브 상·하부 두께 증가 보강공법		상부 또는 하부 슬래브의 휨모멘트 및 전단내하력 등이 부족하여 이에 대한 보강이 필요하고, 구조물의 특성상 부득이 부재하부 또는 상부에서 보강조치가 가능한 경우에 적용하는 공법이다.
	강판접착공법 (주입법, 압착법)		콘크리트 슬래브(상・하부 및 벽체슬래브)의 인장면에 강판을 접착하고 기존 콘크리트 슬래브와 일체화시켜서 지진하중에 대한 부재저항력을 증진시키는 공법이다.
	개구부 보강 공법	강재기둥 추가설치	기존 내부슬래브 개구부 설치에 따른 구조적 안정성 확보를 위한 개구부 보강이 필요하며, 구조물 특성상 깨기 시의 소음, 진동을 최소화하는 경우에 적용하는 공법이다.
		테두리보 추가설치	기존 내부슬래브 개구부 설치에 따른 구조적 안정성 확보를 위한 개구부 보강이 필요하며, 개구부 하부에 보강 기둥을 설치하지 못하는 경우에 적용하는 공법이다.
벽체 또는 기둥	벽체(기둥) 두께 증가 보강공법		기존구조물의 두께를 증가시킴에 따라 내하력을 증진시키는 공법이다.
	부재증설 보강공법		기존구조물에 기둥 또는 벽체를 추가로 설치함으로서 강성 및 강도 증대에 의한 구조물의 내진성능을 향상시키는 공법이다.

	H형강 증설공법	벽체 연결부 내부계단 등에 의한 슬래브 개구부 위치의 측벽부 등에 내하력 부족 시 H형강을 추가로 설치하여 부재의 구조적 성능을 향상시키는 공법이다.
	브레이싱 증설에 의한 보강공법	수평부재와 수직부재가 연결되는 우각부에 지진력에 의한 전단력 및 휨모멘트가 크게 발생하므로, 이들 부분에 H형강 브레이싱을 설치함으로서 부재 내하력을 증진시키는 공법이다.
	벽체부 강판 압착공법	구조물내 토압을 받는 측벽부 중간 슬래브 개구부 설치에 따른 구조적 안정성 확보를 위하여 측벽슬래브 상·하면에 강판을 접착하고 기존 콘크리트와 일체화시켜 내하력을 증진시키는 공법이다.
	기둥의 띠판 보강공법	지진에 의해 발생되는 전단력에 대하여 기존 기둥에 급격한 전단파괴가 발생하지 않도록 기둥의 인성(Toughness)을 증진시키는 공법이다.
	기둥 단부 섬유보강폴리머 부착공법	인장강도가 우수한 판형의 섬유보강폴리머(Fiber Reinforced Polymer, FRP)를 기둥의 상하 단부에 부착하여, 휨강도/전단강도 및 연성능력을 증진시키는 공법이다.
	기둥의 면진 또는 제진장치 적용을 통한 보강공법	주로 기둥 상부에 면진 또는 제진장치를 적용하여 기둥에 발생하는 지진응답을 감소시키는 공법이다.
	측벽 철근 매립공법	강판이 정착된 전단보강 철근을 벽체에 매립하여 측벽의 전단성능을 향상시키는 공법이다.
주변 지반보강	지반보강을 통한 지진격리공법	구조물 주변 지반에 파일벽체를 시공하여 지진격리장치로 활용함으로써 터널에 미치는 지진력을 감소시키는 공법이다.

2.나. 2.가.항에서 제시한 개착식 터널 구조물의 슬래브, 기둥 및 벽체의 내진성능 향상방법들에 대한 상세한 설명은 다음과 같다.

(1) 슬래브 두께증가 보강공법

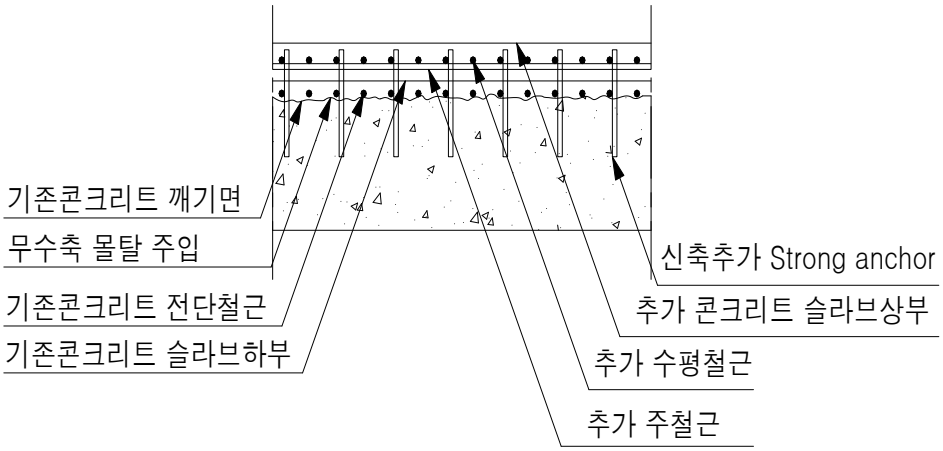
① 공법개요

터널 구조물의 상부 및 하부 슬래브의 휨모멘트 및 전단 내하력 등이 부족하여

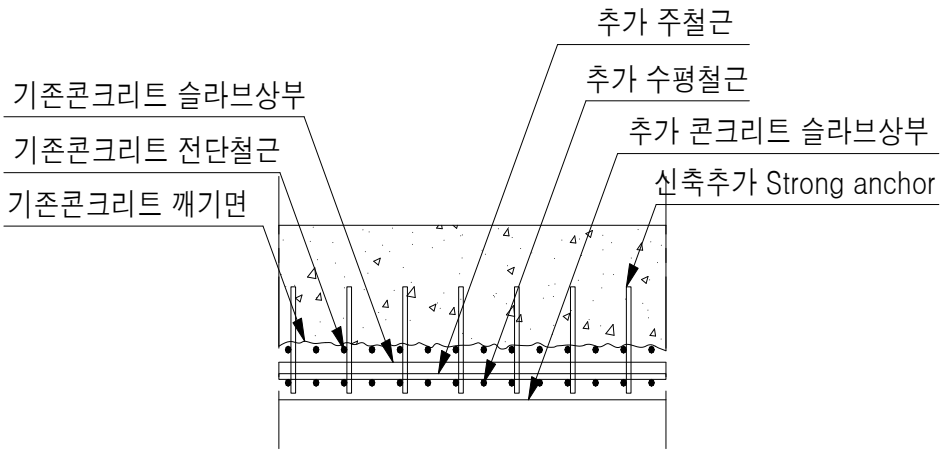
이에 대한 보강이 필요하고, 구조물의 특성상 부득이 부재의 하부 또는 상부에서만 보강조치가 가능한 경우에 적용한다. 부재 하부에 추가적으로 철근을 배근하고 콘크리트를 타설하는 경우에는 추가 타설된 콘크리트의 수축 등으로 신·구 콘크리트의 접합이 불확실해지기 쉬우므로 이에 대한 확실한 대책이 필요하다. 상부 슬래브에 대한 두께 증가 보강의 경우 숏크리트(shotcrete)를 타설함으로써 효율적인 시공이 가능하다.

이 공법에서 유의할 점은 기존 슬래브와 새로 타설하는 콘크리트의 일체화를 위해서 충분한 단면적과 정착길이를 갖춘 앵커철근(dowels)을 조밀한 간격으로 설치해야 한다.

② 공법개요도



(a) 하부 슬래브 보강



(b) 상부 슬래브 보강

<해설그림 3.3.1> 슬래브 상·하부 두께증가 공법

(2) 강판접착공법

강판접착공법에는 주입법과 압착법 두 가지가 있다.

① 공법개요

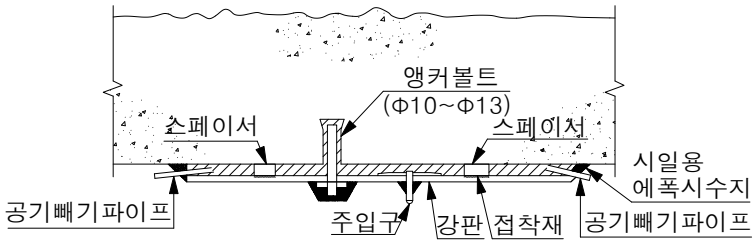
콘크리트 슬래브(상・하부 및 벽체슬래브)의 인장면에 강판을 접착하고 기존 콘크리트 슬래브와 일체화시켜서 지진하중에 대한 부재저항력을 증진시킨다.

접착하는 강판으로는 두께 4.5~6mm 정도가 일반적으로 사용된다. 강판의 접착길이는 소요 휨모멘트보다 휨모멘트강도가 큰 영역까지 충분히 길게 연장한다. 강판접착공법은 주하중 단면 방향뿐만 아니라 배력철근 방향에 대하여도 부재저항력을 증진시키는 효과를 가져온다.

이 공법에서 유의할 점으로는, 우각부 근처의 최대 모멘트 구간이 발생하는 벽체와 슬래브에 이 공법을 적용하기 위해서는 우각부에 접착된 강판의 정착길이 확보가 매우 중요하다. 또한 이 공법은 슬래브의 휨강도 증가에는 사용할 수 있으나, 전단강도를 증가시킬 수 없다.

② 주입법

콘크리트면과 강판면의 사이에 스페이서 등에 의해 빈 공간을 지지시키고, 주위를 시일(Seal)해서 한편으로 주입용 에폭시계 수지를 주입함과 동시에, 공기를 빼면서 접착하는 공법이다. 약간의 기포가 남아 있을 위험이 있고, 주입에 상당한 시간을 요하지만 콘크리트면이 평활하지 않고 일부 또는 전체 면에 곡면이 포함되어 있는 경우에 적용시키고 있다.



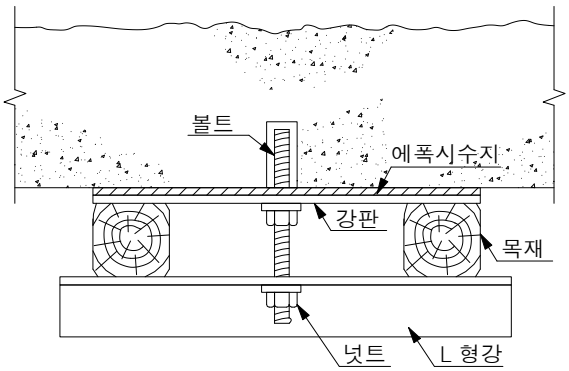
<해설그림 3.3.2> 강판접착공법(주입법)

③ 압착법

콘크리트면 및 강판면에 에폭시계 수지를 도포하고, 다시금 콘크리트 면에 고정해 있는 앵커류를 이용해서 강판을 콘크리트면에 압착하는 공법이다.

에폭시계 수지의 일부를 압착에 의해 압출함과 동시에 접착면에 포함된 공기를 빼내면서 시공한다. 이 공법은 콘크리트면이 평활해서 콘크리트면에 압착용

앵커볼트를 고정시킬 수 있는 경우에 적용할 수 있다. 강판압착공법을 효과적으로 시공하기 위해서는 적절한 에폭시계 수지의 선정과 충분한 시공관리가 필요하다.



<해설그림 3.3.3> 강판접착공법(압착법)

(3) 개구부 보강공법

① 공법개요

- 강재기둥 추가 설치공법

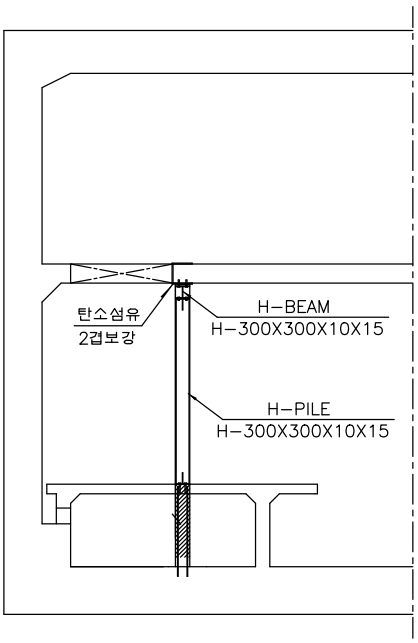
기존 내부 슬래브 개구부 설치에 따른 구조적 안정성 확보를 위한 개구부 보강이 필요하며, 구조물 특성상 깨기 시의 소음, 진동을 최소화해야 하는 경우에 적용할 수 있다. 강재기둥 및 보를 주철근 절단 예상 위치 하부에 밀착이 되도록 설치한 후 개구부 주변을 절단한다. 개요도는 <해설그림 3.3.4>와 같다.

- 테두리보 추가 설치공법

기존 내부 슬래브 개구부 설치에 따른 구조적인 안정성 확보를 위해 필요한 경우 테두리보 추가 설치공법을 적용하여 안정성을 확보할 수 있다. 또한, 개구부 하부에 보강 기둥을 설치하기 어려운 경우에 적용한다. 개구부 주변의 콘크리트만을 깨어낸 후 보 철근을 추가 배근하고 콘크리트를 타설 하는 공법이며, 개요도는 <해설그림 3.3.5>와 같다.

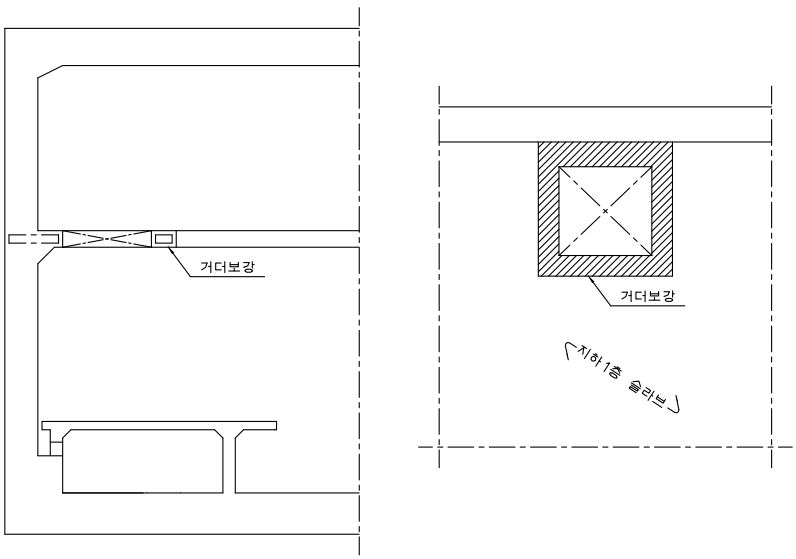
② 공법개요도

- 강재기둥 추가 설치공법



<해설그림 3.3.4> 강재기둥 추가 설치공법

- 테두리보 추가 설치공법



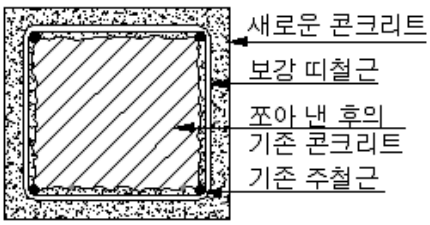
<해설그림 3.3.5> 테두리보 추가 설치공법

(4) 벽체/기둥 두께 증가 보강공법

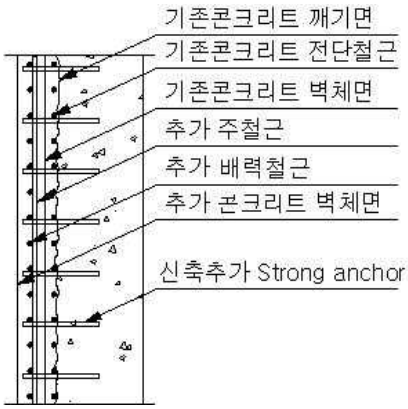
① 공법개요

구조물의 벽체, 기둥부재 등의 내하력, 연성도 및 전단강도를 향상시키기 위하여 기존부재 주위에 띠철근 및 주철근을 추가 배근하고 콘크리트를 덧씌우는 공법이다. 즉, 기존 구조물의 단면을 증가시켜 구조내하력을 증진시키는 공법이다.

② 보강개요도



<해설그림 3.3.6> 기둥 보강공법



<해설그림 3.3.7> 벽체 보강공법

(5) 부재 증설 보강공법

이 공법에는 타설 콘크리트에 의한 벽체 증설 방법, 콘크리트 채움 강관을 이용한 기둥 증설 방법 등이 있다.

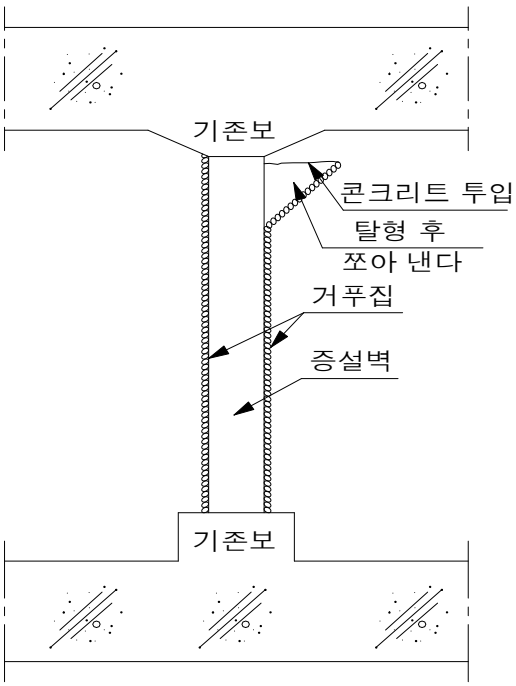
① 공법개요

기존 구조물에 기둥 또는 벽체를 추가로 설치함으로써 지진하중에 대한 구조물의 내진성능을 향상시키는 공법이다. 해당 보강 부위는 강도와 함께 강성이 증가되면서 전체 구조계의 강성 분포(하중 배분)에 변화를 일으키므로 균형 있는 증설 배치에 대한 고려가 필요하다.

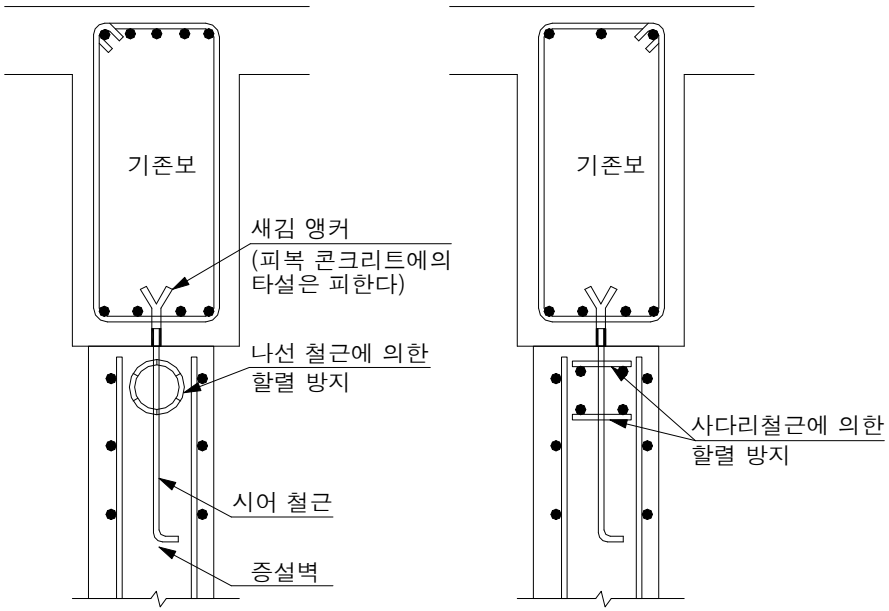
이 공법을 활용하는 경우, 중앙 기둥의 휨 및 전단 내하력이 증가함에 따라 슬래브에 전달되는 휨모멘트 및 전단력의 증가를 고려해야 한다.

② 보강개요도 - 타설 콘크리트에 의한 벽체 증설 방법

<해설그림 3.3.8>에 보이는 바와 같이 거푸집의 상단에 투입구멍을 두어 콘크리트를 타설 한다. 기존 구조물과 증설 벽체와의 전단력 전달을 위하여 다양한 상세가 있으나 다음과 같이 현장설치볼트(<해설그림 3.3.9>)를 이용하는 방법과 후크에 의한 철근을 연결하는 방법(<해설그림 3.3.10>)이 많이 사용된다.

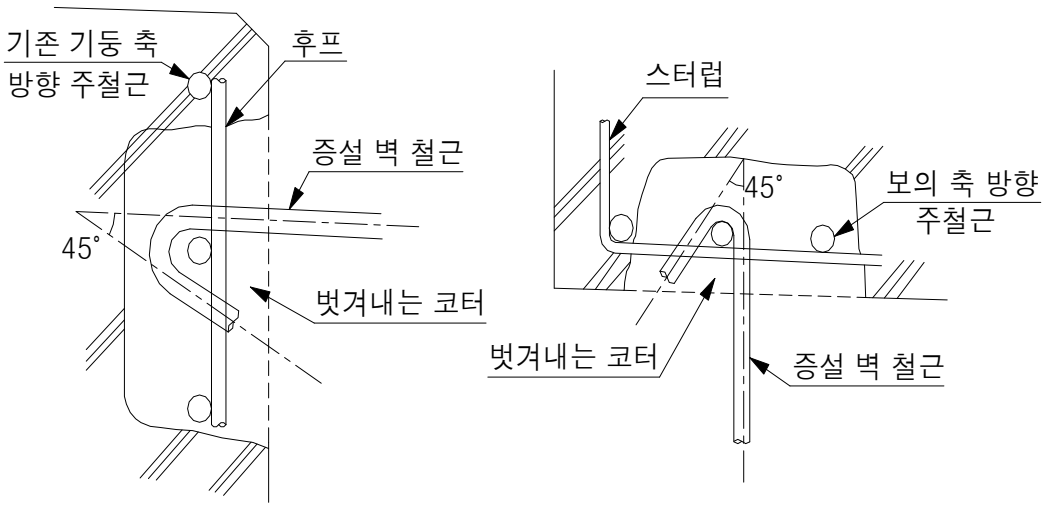


<해설그림 3.3.8> 기존 구조물의 증설공법



(a) 나선 철근 사용 (b) 사다리 철근 사용

<해설그림 3.3.9> 현장 설치 볼트공법

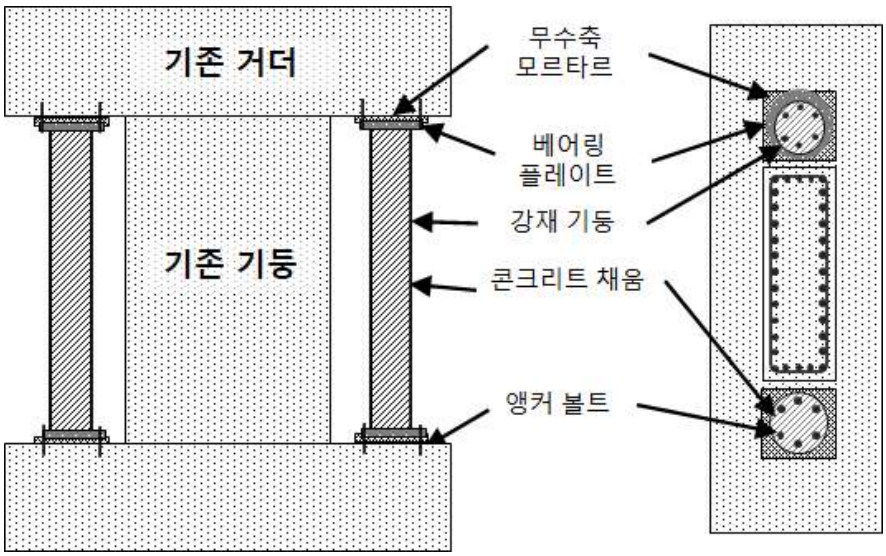


(a) 기둥 (b) 보

<해설그림 3.3.10> 후크에 의한 철근 연결방법

③ 보강개요도 - 콘크리트 채움 강관을 이용한 기둥증설 방법

한편 <해설그림 3.3.11>과 같이 콘크리트 채움 강관을 사용하여 개착식 터널의 중앙 기둥을 증설하는 보강기법도 연구된 사례가 있다 (Morisaki et al. 2000). 해당 기법은 강재 기둥의 단부에는 베어링 플레이트가 설치되며, 기존 거더와 베어링 플레이트, 그리고 강재 기둥 내의 콘크리트는 앵커볼트를 사용하여 연결된다.



<해설그림 3.3.11> 콘크리트 채움 합성강관을 사용한 공법 개요

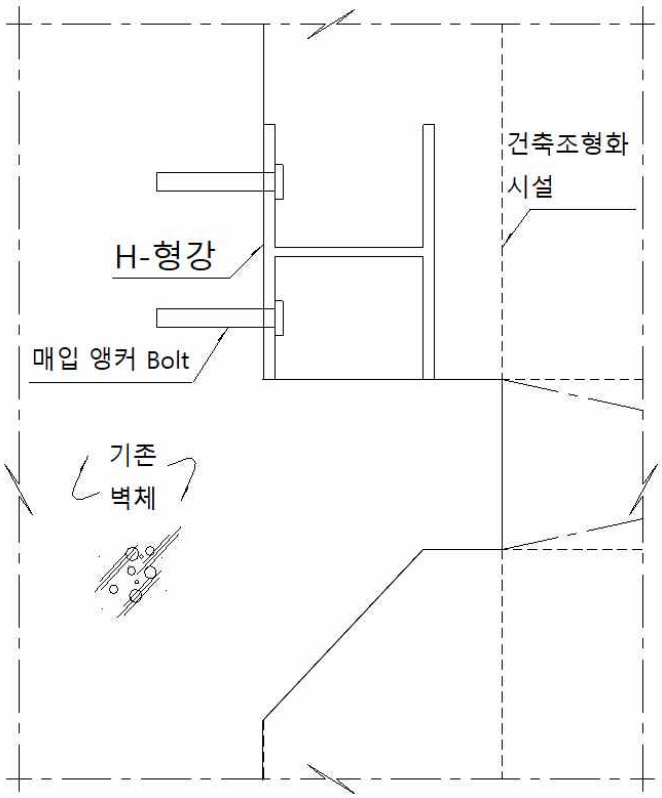
(6) H-형강 증설 공법

① 공법개요

벽체 연결부 내부계단 등에 의한 슬래브 개구부 위치의 측벽부 등에 내하력 부족시 H-형강을 추가로 설치하여 부재의 구조적 성능을 향상시키는 공법이다. 개구부로 인한 벽체의 종방향에 대하여 지진력에 의해 증가된 휨모멘트와 전단력에 저항하기 위한 목적으로 설치한다.

② 보강개요도

기존 콘크리트 벽체면에 H-형강을 부착시켜 벽체의 구조적 성능을 효과적으로 발휘하기 위해서는 소요되는 부분보다 H-형강을 충분히 연장하여야 한다. 설치방법은 앵커 볼트를 천공 삽입하여 H-형강과의 연결 이음과 무수축 에폭시 모르타르를 주입함으로써 H-형강과 콘크리트 부재가 확실한 부착을 통한 일체 거동이 이루어지도록 한다. 공법개요도는 <해설그림 3.3.12>와 같다.



<해설그림 3.3.12> H-형강 증설공법

(7) 브레이싱 증설에 의한 보강공법

이 공법에는 우각부 H형강 증설 보강공법, 우각부 스트럿 보강공법 등이 있다.

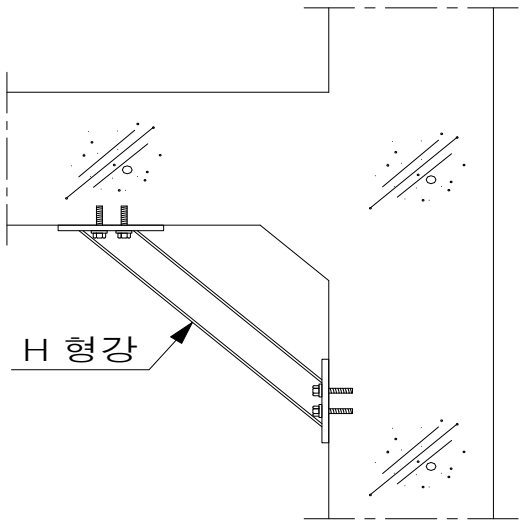
① 공법개요

수평부재와 수직부재가 연결되는 우각부에 지진력에 의한 전단력 및 휨모멘트가 크게 발생하므로, 이들 부분에 H-형강 브레이싱을 설치함으로써 부재 내하력을 증진시키는 공법이다. 우각부에 설치하는 브레이싱 부재는 수평방향 지진하중에 대하여 효과적인 내하력을 발휘한다.

이 공법을 적용하는 보강설계에서 유의할 점은, 우각부 스트럿이 설치된 단면과 그렇지 않은 단면 사이에 불균일한 변형 형상 및 힘의 분배가 발생할 수 있으며, 이로 인한 전체 구조물의 파괴모드를 예측하기 위해서는 3차원 모델링과 구조해석이 필요하다. 또한, 스트럿 장치가 우각부의 양방향 변형(열림모멘트 및 닫힘모멘트)에 모두 유효하기 위해서는 압축력과 인장력 성능을 모두 검증하여야 한다.

② 보강개요도 - 우각부 H형강 증설 보강공법

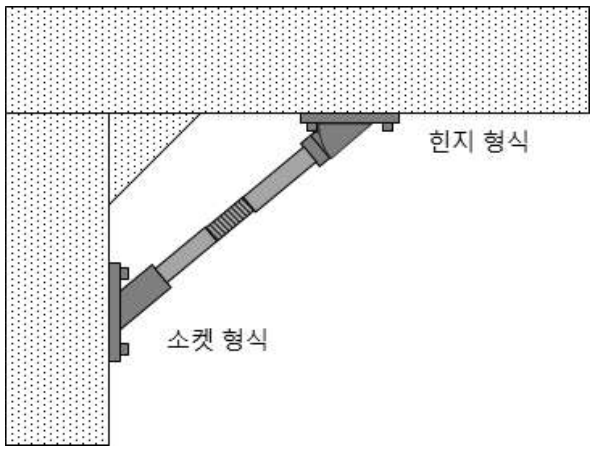
우각부의 기존 콘크리트 수평부재(슬래브)와 수직부재(벽체)에 앵커볼트를 견고하게 매입한 후, H-형강 브레이싱 부재를 설치한다. 앵커볼트와 H-형강 브레이싱부재 간에 확실한 연결과 함께 H-형강의 베이스 플레이트(Base plate)는 기존 콘크리트 면에 균등하게 밀착시킨다. 강재도장은 강교의 도장에 준하여 시행한다.



<해설그림 3.3.13> H-형강 브레이싱 보강공법

③ 보강개요도 - 우각부 스트럿 보강공법

개구부에 가압력 도입이 가능한 보강 장치를 설치하여 구조물의 전단력 및 휨모멘트를 감소시킴으로써 보강효과를 얻을 수 있는 공법이다. <해설그림 3.3.14>와 같이 소켓과 고정너트, 고정핀을 사용함으로써 우각부의 인장력 발생을 방지하고 가압력 손실 또한 막을 수 있다.



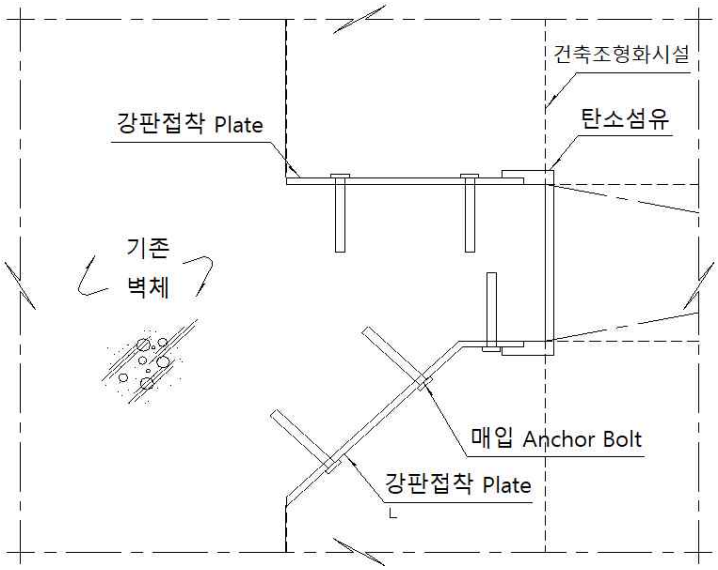
<해설그림 3.3.14> 우각부 스트럿 내진보강공법 개요

(8) 벽체부 강판 압착공법

① 공법개요

구조물 내 토압을 받는 측벽부 중간 슬래브 개구부 설치에 따른 구조적 안정성 확보를 위하여 측벽슬래브 상·하면에 강판을 접착하고 기존 콘크리트와 일체화시켜 내하력을 증진시키는 공법이며, 개요도는 <해설그림 3.3.15>와 같다.

② 보강개요도



<해설그림 3.3.15> 벽체부 강판 압착공법

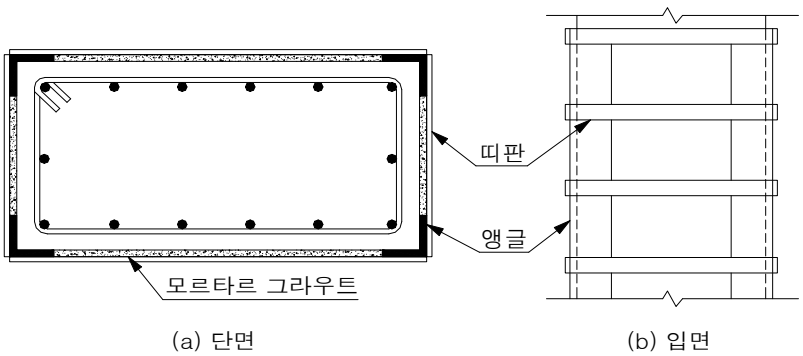
(9) 기둥의 띠판 보강공법

① 공법개요

지진에 의해 발생되는 전단력에 대하여 기존 기둥에 급격한 전단파괴가 발생하지 않도록 기둥의 인성(toughness)을 증진시키는 공법으로 기둥의 띠철근을 보강시키는 효과를 갖도록 기둥 주위에 강제 띠판을 설치한다. 적용대상으로는 도시철도 승강장층 중앙기둥인 구형기둥을 비롯하여 대합실층의 원형기둥 모두가 될 수 있다. 특히 도시철도 승강장층 중앙기둥의 경우는 보강 시의 두께 선정에 있어서 열차 운행에 필요한 건축한계에 저촉되지 않도록 주의가 필요하다.

② 보강개요도

전단에 대한 저항을 위하여 설치되는 기존 횡철근 이외에 추가로 소요되는 철근량에 해당되는 띠판의 보강량을 산정하여 적정한 두께와 폭 및 간격을 결정한다. 띠판을 이용하여 기존 기둥의 바깥쪽 둘레에서 <해설그림 3.3.16>과 같이 보강한다.



<해설그림 3.3.16> 띠판 보강공법

기둥 네 모서리의 수직앵글은 현장용접을 용이하게 하는데 유용하다. 띠판과 기존 기둥과의 유격은 무수축 모르타르로 채움으로써, 기존 기둥과 띠판이 일체 거동이 되도록 한다. 일반적으로 띠판의 두께는 3.2mm 이상을 적용하고 간격과 띠폭은 10cm 정도로 하는 것이 적당하다.

(10) 기둥 단부 섬유보강폴리머 부착공법

① 공법개요

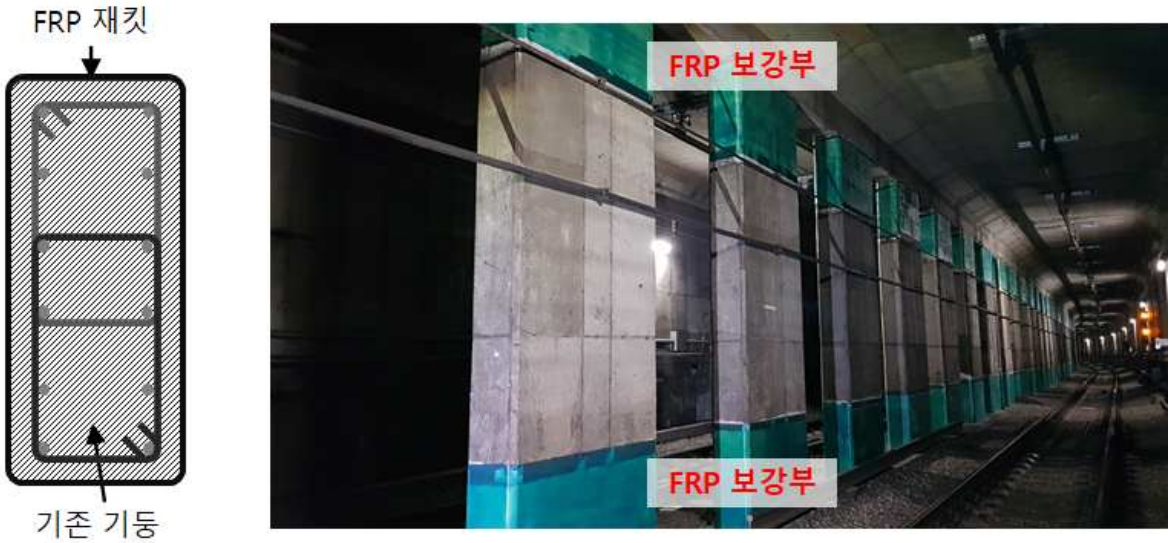
철근콘크리트 기둥 부재의 휨강도 또는 전단강도와 연성능력을 증진시키기 위하여 인장강도가 높은 복합재료인 섬유보강폴리머(Fiber Reinforced Polymer, FRP)를 사용하는 공법이다. 기둥 단부 주변의 표면에 판형의 FRP를 접착하여 콘크리트에 대한 구속효과를 주며, 이를 바탕으로 휨/전단강도 및 연성능력의 증대 효과를 가져올 수 있다.

해당 공법은 그 특성상 기둥의 단면을 크게 증가시키지 않으면서도 휨/전단강도의 증대를 얻을 수 있으며, 부가적으로 보강 위치의 내부식성을 향상시킬 수 있다. 일반 시설물의 경우 기둥 및 보 등에 널리 적용되어 왔으며 개착식 터널에서의 주요 적용대상은 중앙 기둥의 단부이다.

다만, 이 공법은 기둥 단면의 폭이 두께의 2배 이상인 경우 철근콘크리트 단면에 대한 섬유보강폴리머의 구속효과(즉, 휨강도 및 연성도 증가)뿐만 아니라 전단강도에 기여하는 정도가 제한적인 것으로 알려져 있다. 따라서 적용 대상 기둥에 대한 각 공법의 내진성능 향상효과는 세밀한 실험 결과를 토대로 판단해야 한다.

② 보강개요도

해당 공법이 적용된 기둥은 <해설그림 3.3.17>과 같은 단면을 가진다.



<해설그림 3.3.17> 기둥 단부 섬유보강폴리머 부착공법 개념도(좌) 및 실제 개착식 터널 적용사례(우)

4. 최근 추가로 연구되고 있는 개착식 터널의 내진보강 공법들은 다음과 같다.

4.가. 기둥의 면진 및 격리 장치 적용을 통한 보강공법

① 공법개요

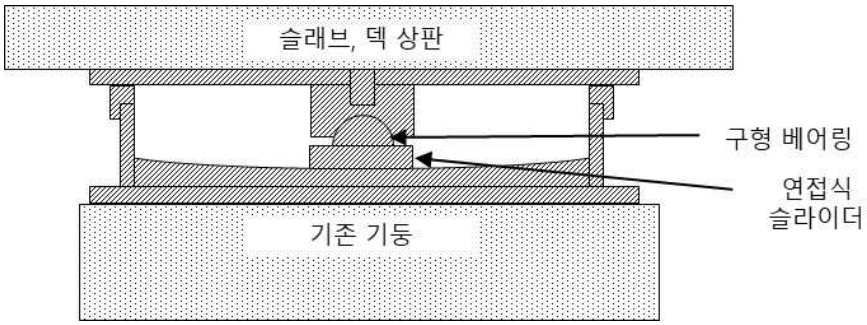
해당 공법은 면진 또는 제진장치를 사용하여 기둥의 에너지 소산 및 감쇠 능력을 증진시킴으로써, 최종적으로 터널 구조물 전체의 지진 응답을 감소시키는 공법으로 다음과 같은 연구들로 보고된 바 있다.

- Chen et al. (2014): 전단패널 댐퍼(shear panel damper, SPD)
- Ma et al. (2018): 미끄러짐 베어링 면진 장치(sliding isolation bearing)
- Chen et al. (2019): 자기조정 에너지소산 장치 (self-centering energy dissipation)
- Xu et al. (2020): 마찰진자형 면진받침(friction pendulum bearing, FPB)

이상의 면진 또는 제진장치들은 지하구조물 기둥 상단 혹은 하단에 적용하였을 때 구조물 전체의 수평방향 변형이나 전단력을 감소시킬 수 있음이 보고되었다. 이 공법은 아직까지 개착식 터널에 대해 실적용 되지 않은 공법으로서, 해석 및 소규모 실험을 통해 그 가능성을 확인한 사례가 대부분이며 보다 연구가 필요하다.

② 보강개요도

해당 공법은 터널에 대한 실적용 사례가 없으므로 교량에 대해 적용된 사례들을 참조하여 <해설그림 3.3.18>과 같이 보강개요도를 작성하였다. 교량의 경우 기존에 사용되던 교량받침을 해체하여 제거하고 교체하는 방식으로 수월하게 내진성능 보강이 가능하나 터널의 경우 실적용을 위해서는 보다 상세한 공법에 대한 연구가 필요하다.



<해설그림 3.3.18> 마찰진자형 면진받침 개요도

4.나. 측벽 전단철근 매립공법 (embedding plate anchored shear reinforcement)

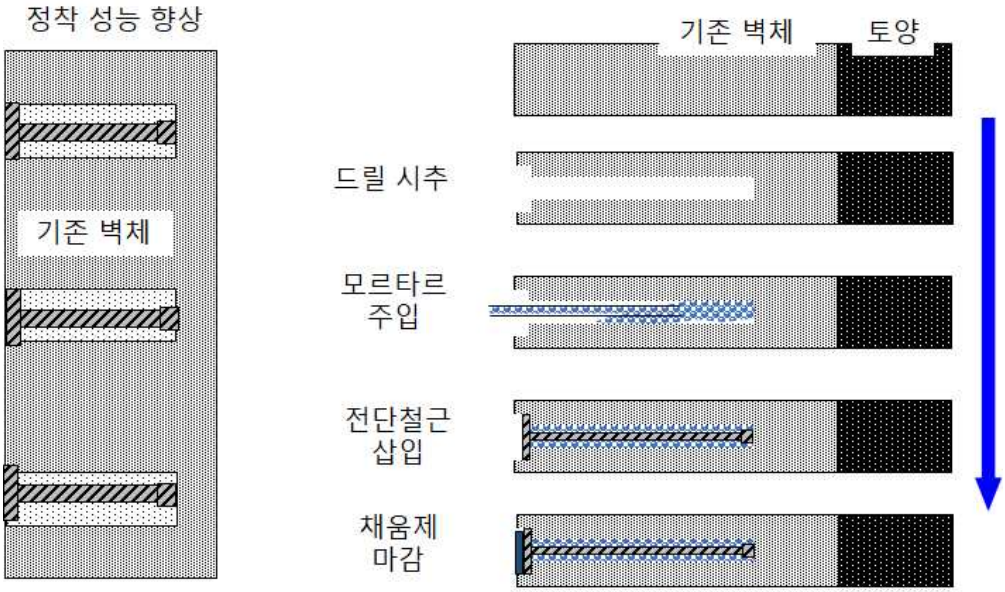
① 공법개요

개착식 터널의 내부로부터 양쪽에 강판을 용접한 철근을 매립함으로써, 정착 성능을 확보하면서 벽체의 전단강도를 증진시킬 수 있는 공법이다 (Kawamura et al. 2013). 매립하는 부분에 추가하는 원형 강판은 정착 성능을 확보하는데 도움이 되며, 노출부분에 설치하는 사각형 강판 또한 매립 철근의 중심을 잡는 역할을 할 수 있다.

② 적용과정

해당공법의 적용을 위해서는 보강할 위치에 미리 드릴로 삽입공을 시추하는 과정이 필요하며, 레이더나 기타 비파괴 탐지 기법을 바탕으로 위치를 선정할 수 있다. 이렇게 삽입공을 시추하고 청소한 뒤 모르타르를 타설하고 철근을 매립한다. 이후 철근 노출부 또한 보수재로 마감함으로써 철근 매립을 완료한다. 관련 공법의 적용 절차를 <해설그림 3.3.19>에 요약하였다.

③ 보강개요도



<해설그림 3.3.19> 측벽 철근 매립공법

4.다. 지진격리공법 (개착식 구조물의 주변 지반 내진보강)

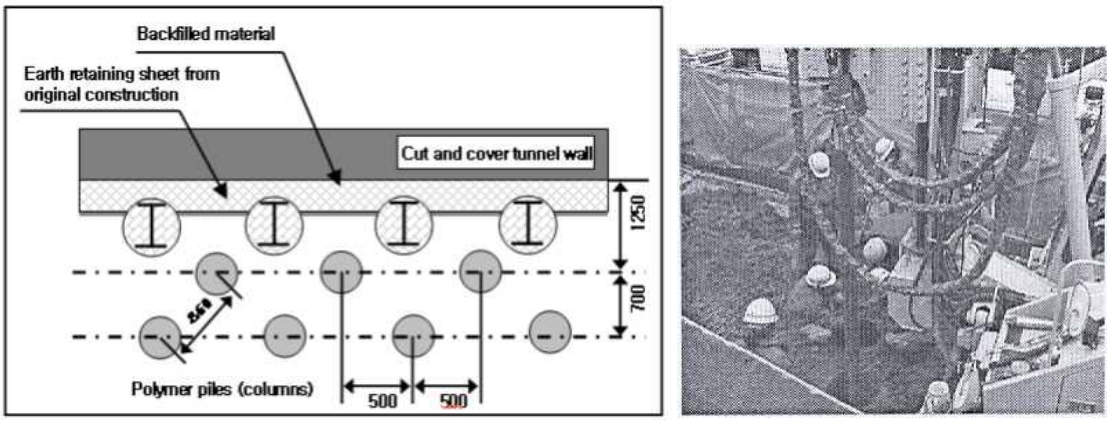
개착식 터널 주변 지반에 파일벽체를 시공하여 내진안정성을 확보하는 공법이다.

① 공법개요

- 최근 개발된 '폴리머 진동차단 공법(Polymer seismic isolation method)'은 주변 지반으로부터 구조물로 전달된 지진 거동을 감소시키기 위하여 지하구조물 양 측면에 폴리머 벽체를 시공한다.
- 이 공법은 그 자체로 지진 시 지반변형을 막거나 통제하기 위한 것이 아니고, 주변 지반으로부터 전달된 지진력을 차단하기 위한 목적이다.

② 보강개요도

- 가운데 기둥은 스틸 재킷공법으로 충분히 보강되어질 수 있지만, 측벽을 보강하는데 있어서는 기존의 유효한 공법이 부재한 실정이다.
- 내진성능평가에서 상대 변형이 30%까지 감소됨과 함께 해석결과 측벽의 전단력은 대규모 지진에도 안전한 수준 이내로 유지되는 것으로 분석되었다.
- 해당 공법은 구조물의 깊이에 대한 피복 토양의 깊이 비가 1.5 이하인 얕은 구조물에 대해서는 높은 변형 저감효과를 보이나, 깊은 곳에 위치한 구조물에 대해서는 상대적으로 효과가 낮을 수 있다.
- 이를 보완하기 위한 일환으로 Shadabi et al. (2021) 등은 구조물 상부의 피복 토양 일부를 발포 폴리에스티렌(expanded polystyrene, EPS) 등으로 대체함으로서 지진력을 감소시키는 기술을 연구한 바 있다.



<해설그림 3.3.20> 폴리머 파일의 내진격리공법(일본 Nakagawa 역)

3.3.2 굴착식 터널의 내진성능 향상방법

1. 터널의 내진성능 확보 필요 위치는 다음과 같은 구간으로 제시되어 있어, 해당 구간의 포함 여부에 대한 조사가 필요하다.
   가. 토피의 두께가 얇고 지반이 연약한 터널의 갱구부, 주요 구조물 접속부 구간
   나. 대규모 단층대 및 파쇄대 통과구간, 지층구조가 급변하는 계곡부
   다. 천층터널 및 편경사 지형으로 지진 시 터널의 안정성이 취약하다고 판단되는 구간

2. 지진으로 인한 굴착식 터널 피해 사례에 따르면 지진 시 횡방향 변형으로 인한 피해가 종방향 변형으로 인한 피해보다 크다. 따라서, 터널의 횡방향 파괴, 상대변위 발생량을 분석하는 것이 내진성능 향상을 효과적으로 할 수 있다.

3. 지진 시 굴착식 터널의 주요 피해는 지반 안전성 확보를 위한 록볼트·숏크리트와 라이닝에서 발생된다. 터널 안정성 확보 측면에서 록볼트, 숏크리트는 공사 중 가설구조물로 설계되는 것이 국내 터널 설계개념임에 따라, 지반이완 하중에 저항하도록 설계된다. 지진피해가 육안으로 확인되는 라이닝 구조물에 대하여 균열, 붕락, 전단변형, 시공·신축이음부 균열, 바닥부 융기 등에 초점을 맞추어 향상 방안을 수립하는 것이 효과적이다.

▌해설▐

1. 굴착식 터널은 지반과 일체가 되어 있기 때문에 지진 시 구조물에 작용하는 관성력이 작고, 교량 및 성토 등의 지표 구조물에 비해 내진성능이 높다. 그러나 기반암 내에 시공되지 않은 터널의 경우 지진파의 증폭, 상대변위 발생 가능성이 높기 때문에 지진에 대한 대응성 및 내진성능 향상 방안이 필요하다.
   「KDS 27 17 00」에서 제시하고 있는 내진설계 대상 지역에 대한 내용 이외에 지진발생시

기존 시설물(터널) 내진성능 향상요령

지진피해가 다수 있었던 해외 사례를 살펴보면 다음과 피해가 발생한다.

① 지진에 의해 생긴 경사면 움직임, 붕괴, 지진 단층의 상대변위 발생부

② 편토압을 받고 있는 터널

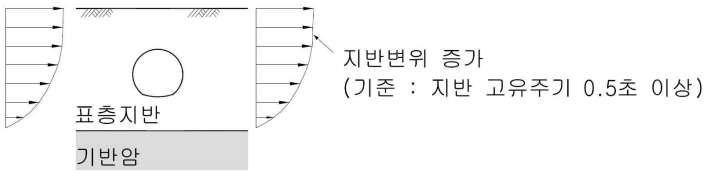
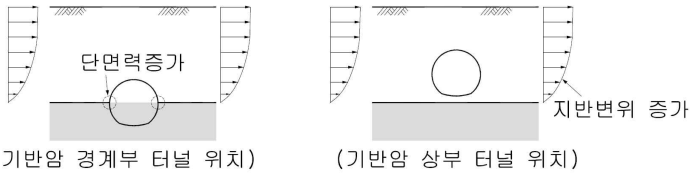
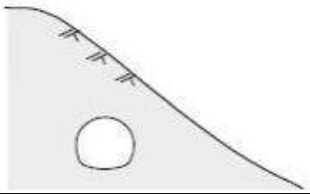
③ 라이닝이 없거나 라이닝 두께가 매우 얇은 구간

④ 시공 불량 구간 또는 지속적인 동결융해 등으로 라이닝의 강도가 저하된 구간

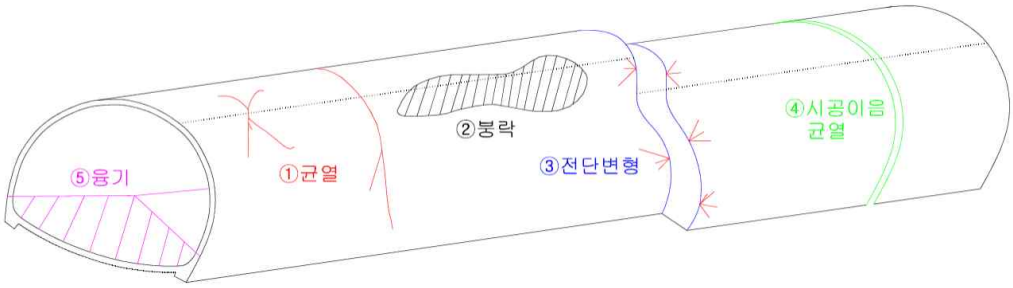
⑤ 상부 지반의 이완구간 (공사 중 지반붕괴 이력이 있는 곳 등)

상기의 항목들을 도식적으로 표현하면 다음과 같다.

<해설표 3.3.2> 굴착식 터널의 지진 시 피해발생 구간(宮林,2011)

No.	피해발생 구간	개요도
1	연약지반에 시공된 터널	
2	기반암 경계부 및 상부에 위치한 터널	
3	편토압 경사면에 시공된 터널	
4	국부적 연약지반 노출 터널	
5	단면 변화 부	

지진 시 라이닝의 주요 피해는 다음의 그림과 같이 라이닝 균열, 붕락, 전단변형, 시공·신축이음 균열, 바닥부 융기 등으로 나눌 수 있다.



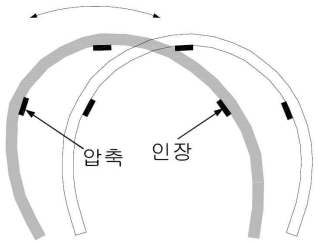
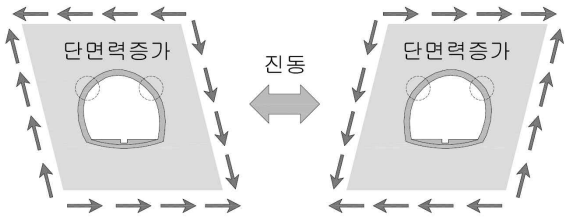
<해설그림 3.3.21> 굴착식 터널의 지진 시 주요 피해(宮林, 2011)

<해설표 3.3.3> 굴착식 터널의 지진 시 주요 피해(宮林, 2011)

구 분	2016년 구마모토 지진(진도 6), 타와라야마 터널		
균열/ 박락			
	전주면 균열	박리(측벽)	박락(천단)
붕락/ 전단변형			
	라이닝 붕락		전단변형

2. 해외 사례를 보면 지진시 터널에서는 횡방향 변형으로 인한 피해가 종방향의 변형으로 인한 피해보다 크다. 이러한 현상의 원인으로 종방향의 변형은 라이닝 시공 및 신축이음이 종방향으로 약 10.0m 간격으로 다수 시공되어 있음에 따라 종방향의 변형이 흡수되었다고 설명하고 있으나, 아직까지 명확한 근거를 찾지는 못하고 있는 상황이다. 횡방향의 경우 지진동 발생시 한쪽이 압축을 받을 때 다른 한쪽은 인장을 받고 있게 되고, 이러한 하중-응력 조건의 반복으로 라이닝 전단변형이 발생되게 되며, 이러한 상대변위 발생을 고려한 내진성능 향상방안 수립이 필요하다.

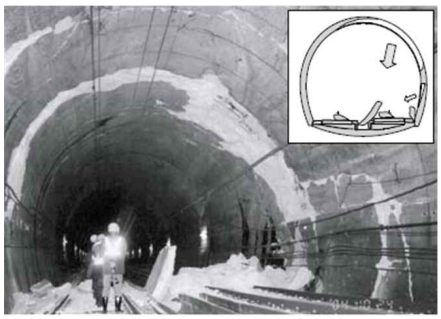
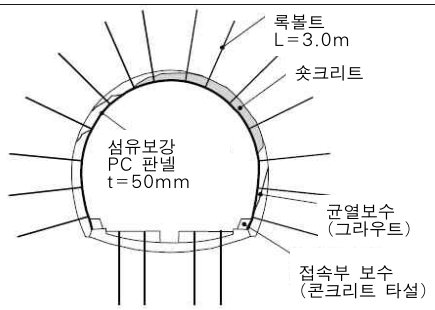
<해설표 3.3.4> 굴착식 터널의 지진 시 변형모드 및 응력발생 양상(宮林, 2011)

구 분	지진동 시 터널 변형모드	응력 발생 양상
개요도		

3. 라이닝의 내진성능 향상방법으로는 지진력에 대한 저항을 증가시키기 위해 라이닝의 인성을 높이는 방법을 적용할 수 있다. 라이닝 구조물의 두께를 증가시키는 경우 관성력이 크게 작용될 수 있기 때문에, 철근보강, 시트보강(탄소섬유, 아라미드섬유, 강판접착, FRP시트 등) 등을 통해 구조물 인성을 높이는 방법이 효과적이다. 아울러 단층대, 파쇄대 또는 연약지반과 같이 지진에 취약한 구간은 지반과 구조물의 일체 거동을 유도할 수 있도록 인버트 라이닝을 설치하거나 주변 지반 보강 등이 방안이 될 수 있으나, 터널 운용 중에 인버트 라이닝 설치는 많은 어려움이 따르므로 대상 터널의 현황에 맞춰 보강 방안을 수립하여야 한다.

라이닝 붕락 또는 탈락이 발생된 해외 사례의 보강 방안을 살펴보면, 라이닝 탈락은 라이닝 배면 암반(또는 토사)의 쐐기 파괴(Failure Wedge) 구간을 보강하거나, 이완대 영역 증가가 예상되는 구간의 경우 배면 충진 및 록볼트·숏크리트 보강 이후, 섬유가 보강된 프리캐스트 패널을 라이닝 전면에 추가 보강을 하고 있다.

<해설표 3.3.5> 굴착식 터널의 지진 피해 및 보강 사례(宮林, 2011)

구 분	라이닝 탈락 전경	보강단면
개요도		
터널명	오우누마 터널(신칸센)	
피해정도	라이닝 대규모 붕괴	
지진정도	2004년 니가타현 주에쓰 지진 (규모 6.8, 최대진도 7)	

3.3.3 개착식 터널의 액상화 보강방법

개착식 터널의 액상화 보강의 주요 목표는 액상화 발생의 억제 또는 액상화 발생에 따른 피해가 발생하지 않도록 하는 것이다.

1. 터널 주변 지반의 지진시 액상화 발생 가능성을 검토한다.
2. 지진 시 주변 지반이 액상화 할 가능성이 있는 경우 터널의 부상(浮上) 및 주변 지반 변형에 따른 터널의 안정성을 확보해야 한다.

▌해설▐

개착식 터널은 지반의 액상화에 기인하는 부상 및 주변지반 변형 등에 따른 피해에 대한 검토가 필요하다. 지반의 액상화에 기인하는 측방유동이 구조물에 추가 하중으로 작용하지 않도록 하는 것이 중요하다(일본터널표준시방서, 2016). 또한 지반의 액상화 및 그에 따른 지반의 측방유동은 지중구조물의 내진성능에 큰 영향을 미치기 때문에 내진설계에 있어 지반의 안정성을 충분히 검토해야 한다.

터널 주변 지반이 액상화하게 되면 큰 양압력(Uplift pressure)이 발생하여 터널의 부상이 발생할 수 있다. 따라서 액상화로 인해 발생하는 양압력에 의한 부상을 방지할 수 있는 대책이 필요하다. 또한, 액상화로 인해 발생한 과잉간극수압의 소산과 함께 주변 지반의 침하가 발생하는 경우가 있다. 게다가 경사 지반 및 수제선 근방에서는 측방유동이 발생하여 영구지반변위에 의한 피해가 발생 할 수 있다(일본터널표준시방서, 2016). 제반 지반조건 및 시설물의 중요도 등에 따른 최적의 액상화 보수보강계획을 위해서는 액상화 위험정도, 구조물에 대한 액상화 발생 시 예상 피해정도, 성능목표 그리고 가용한 시공재료와 구현 가능한 보강방법에 대한 충분한 이해가 필요하다. 기존 개착식 터널에 적용할 수 있는 액상화 대책공법은 다음과 같다(일본토목학회, 2012).

<해설표 3.3.6> 개착식 터널에 적용할 수 있는 액상화 대책공법

개 량 종 류	공 법 원 리	액상화 발생 억제	액상화후 피해 발생 억제	부상 (浮上) 방지
고결 공법	느슨한 사질토 지반 내에 시멘트 및 안정 재료를 주입하여 지반을 안정시키는 공법	○	○	○
지하수위 저하공법	Deep well 등으로 지하수위를 저하(불포화)시켜 지반의 유효응력을 증가시키는 공법	○	×	×
치환 공법	연약토를 굴착하여 제거하고 양질토로 치환하는 공법	○	×	×
기타	지반에 널말뚝이나 말뚝 등을 설치하여 기초를 강화하는 방법, 직접기초의 지오그리드 등을 통한 보강, 성토부에 대한 시트파일 마감공법 등 지반을 구속하여 구조적으로 액상화 피해를 저감시키는 공법	△	△	△

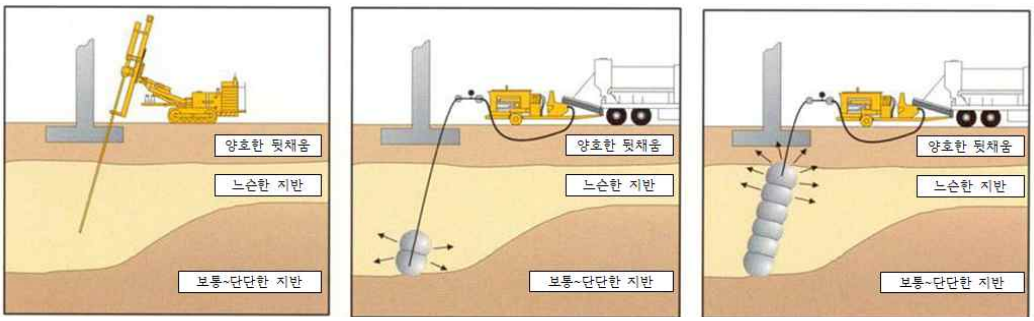
1. 고결공법

고결처리 공법은 느슨한 지반 내에 시멘트 및 안정 재료를 주입하여 지반을 안정시키는 공법으로, 기존 구조물 주변 및 직하부에 액상화가 발생할 것으로 예상되는 지반에 적용이 가능하다. 고결공법을 통해 주변 지반의 액상화 발생을 억제하는 것이 가능하다. 또한 측방유동 등이 발생하지 않는 수평지반의 경우 개착식 터널의 상부에 고결공법을 적용함으로써 터널 주변 지반의 액상화 발생에 따른 개착식 터널의 부상을 방지 할 수 있다.

이 공법은 비교적 소규모 장비를 적용하여 작업여건 및 시공성이 양호하고, 공기단축이 가능하지만, 지반에 안정제를 주입하므로 지하수 흐름이 존재하거나 해안에서는 각별한 품질관리가 요구된다.

① 저유동성 모르타르 주입공법

저유동성 모르타르 주입공법은 중금속 용출방지용 기능성 혼합재가 포함된 슬럼프치가 10cm 이하의 저유동성 모르타르를 지중에 주입하여 주변 토사를 방사형으로 압밀 다짐시킴으로서 지반을 압축강화 및 밀도 증진, 사석층과 세굴 지반 내 압밀 충전 시킴과 동시에 고결 기둥체를 형성하여 지반을 개량하는 공법이다.



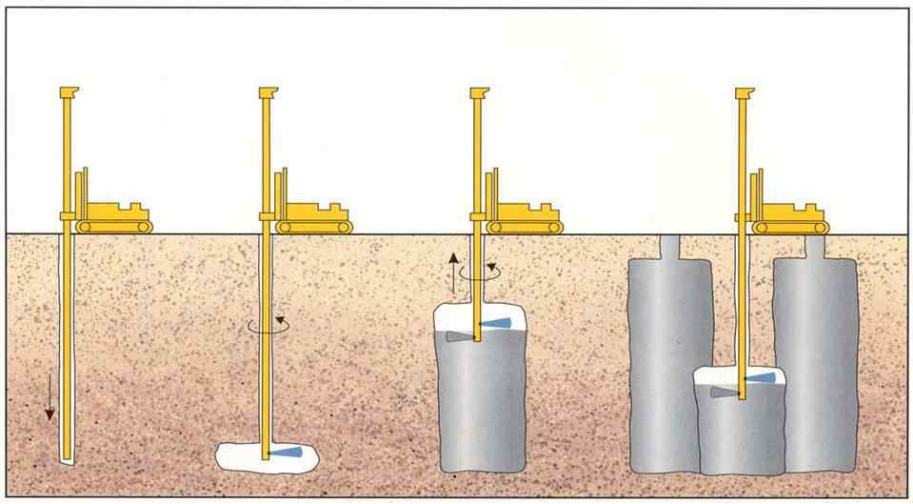
<해설그림 3.3.22> 저유동성 모르타르 주입공법 (Hayward Baker, Inc)

② 약액주입 그라우팅공법

지반의 빈틈에 주입제를 압입하여 주입제가 굳어짐과 동시에 지반을 엉기어 굳혀서 물의 이동을 멈추거나 흙을 강화하는 공법이다. 사용되는 약액은 시멘트, 모르타르 등 여러 가지 종류가 있으며, 약액의 안전성에 대한 충분한 검토가 필요하다.

③ 고압분사교반공법

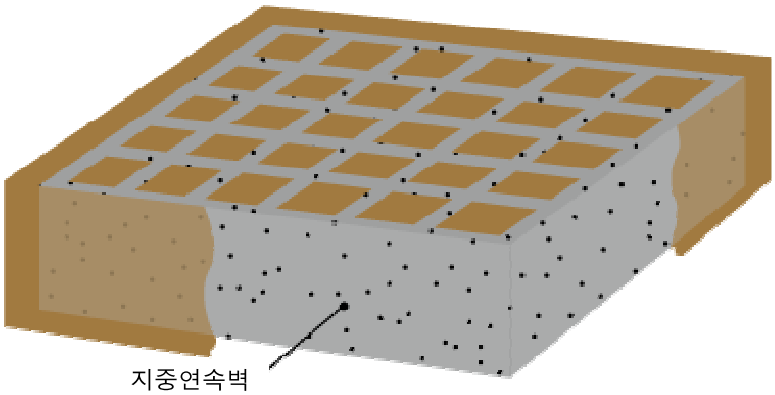
지반 경화제를 고압으로 분사하여 원지반을 교반 및 혼합하여 지반을 고결시키는 공법이다. 소구경 보링공을 활용하여 대구경의 개량체를 조성할 수 있으며 사질토 및 점성토 둘 다 적용 가능하며 진동과 소음이 적은 장점이 있다. 시공 시 발생하는 잔여 경과제의 처리가 필요한 단점이 있다.



<해설그림 3.3.23> 고압분사교반공법 (Hayward Baker, Inc)

④ 지중 연속벽 공법

지중에 커터샤프트를 삽입하여 수직상하 절삭과 동시에 수평방향 연속이동하면서 시멘트와 지중토사를 혼합하여 격자모형의 슬러리월을 형성함으로써 지반개량과 동시에 주변 지반의 변위가 억제되는 공법이다.



<해설그림 3.3.24> 지중연속벽공법 (CCC method Assoc.)

2. 지하수위 저하공법 (불포화 공법)

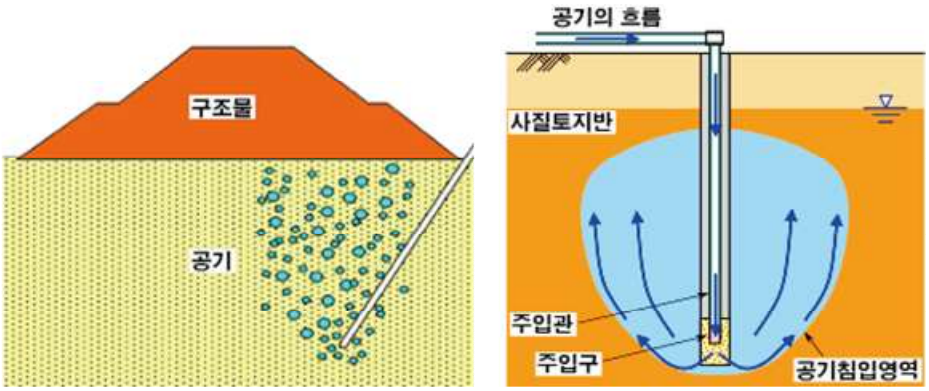
지하수위 저하공법(불포화공법)은 Deep Well 등으로 지하수위를 저하시켜 지반의 유효응력을 증가시키거나 지반에 공기를 주입하여 지반을 불포화하여 액상화 강도를 증가시키는 공법이다. 본 공법은 영구적으로 구조물 기초하부 지반의 품질관리가 필요하므로 경제성을 염두하여야 한다.

① 슈퍼 웰 포인트 공법 (Super Well Point method)

슈퍼 웰 포인트 공법 (SWP공법)은 종래의 웰포인트공법 (강제배수), 딥웰공법 (중력배수), 진공딥웰공법 (중력+강제배수)의 단점을 보완하여 여러 가지 장점을 개선시킨 새로운 진공압입배수 공법이다. 대심도에서 진공효과로 강제배수가 가능하며, 양수량은 종래공법과 비교하여 5~20배이고 보다 광범위한 지역의 지하수를 빠르게 저하시키는 대심도 진공배수, 압밀배수공법이다.

② 공기주입 불포화화 공법 (Air-des)

Air-des 공법은 지반 내에 공기를 주입하여 지반을 불포화하여 지반의 액상화 강도를 증가시키는 액상화 대책공법이다. Air-des 공법은 지반 내에 공기를 주입하는 몹시 간단한 작업에 의해 액상화 대책을 실시하는 공법으로 주입한 기포가 균일하게 지반의 간극수에 5~10% 정도 포함되는 것이며 지반의 기본적인 성질(강도, 투수성, 지진 발생 시 진동특성 등)을 거의 변화시키지 않고 액상화 저항강도가 증가하게 된다.



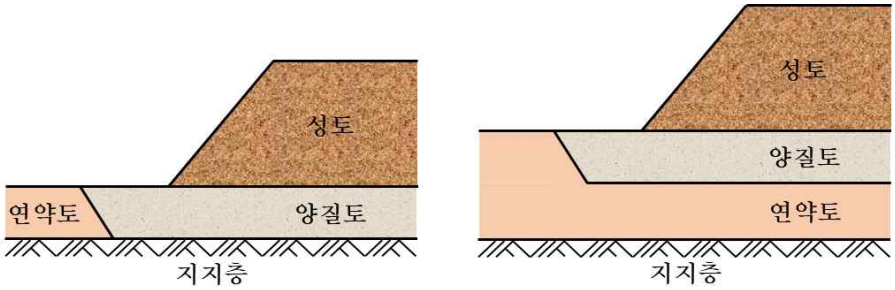
<해설그림 3.3.25> 공기주입 불포화 공법(Toa Corp.)

3. 치환공법

치환공법은 지표면 가까이 있는 액상화에 취약한 연약지반을 양질의 사질토로 치환하는 공법으로 굴착치환과 강제치환(성토나 폭파)이 있다. 해당 심도가 얕을 경우 시공성 및 품질관리가 확실하다.

① 굴착치환 공법

굴착치환공법은 굴착장비로 연약층 전체 또는 부분적으로 굴착하고 양질의 사질토를 채우는 방법이며, 시공심도가 3m 까지가 효과적이며 배출토를 처리할 토사장이 필요하다.



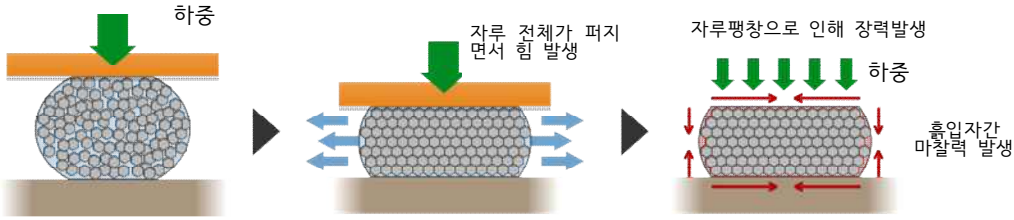
<해설그림 3.3.26> 굴착치환 공법

4. 기타공법

고결공법, 배수공법, 지하수위 저하공법, 치환공법 외에도 액상화 가능한 지반 주위 또는 내부에 널말뚝 및 지오그리드, 말뚝공법 등을 적용하여 지반의 구속효과에 의해 액상화를 저감하는 공법 등을 소개한다.

① D-BOX (Divided Box) 공법

D-BOX 공법이란 "구획구속원리" 효과에 의해 내하력이 증대되도록 고안된 자루를 사용하여 진동저감효과를 고려하는 액상화 대책공법이다. 자루 상부에서 힘을 가하면 자루가 편평하게 늘어나기 때문에 자루 전체에 장력이 발생하고, 이때 토립자간의 재배치로 마찰력이 발생하며 자루의 장력에 의한 입자간의 마찰력이 진동저감효과를 발휘하게 된다.



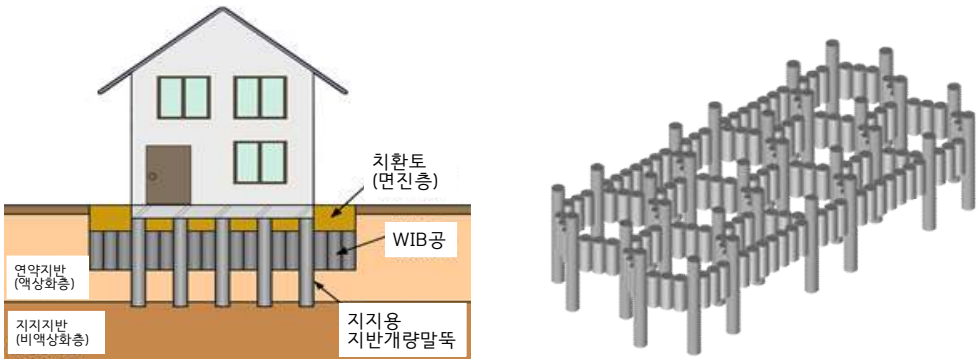
<해설그림 3.3.27> D-BOX공법 (Mitanisekizai LLC.)

② 성토 내진보강 시트파일 마무리 공법 (시트파일+타이로드)

지진 시 지반의 지지력이 감소되는 액상화 지반 상의 성토 대책으로써 성토부 외측에 시트파일을 시공하고 시트파일 사이에 타이로드를 설치하여 성토 본체의 침하나 변형을 저감 할 수 있는 공법이다.

③ WIB(Wave Impeding barrier) 공법

WIB공법(Wave Impedign Barrier)은 땅속의 소요 깊이에 지반 개량 말뚝에 의한 강성이 높은 판 모양 또는 벽 모양의 셀 형식 구조체를 구축하여 도로 및 철도건설공사, 플랜트 등의 환경진동이나 지진 발생 시 구조물의 지진 작용력을 감소하는 지반 진동 대책공법이다. 본 공법은 지반진동파의 전파를 억제 단절하는 대체토(면진층)와 흡수 단절하는 셀 구조체(제진층)로 구성된다. 면진 효과와 제진효과의 조화로 진동전파 저감하고 연약지반에서는 셀 벽과 주변 지반의 강성비가 커지기 때문에 진동전파 저감 성능이 높아진다. 수평방향진동도 연직방향진동과 거의 동일한 정도의 진동전파 저감 성능 실적이 인정되어 적용범위가 다양하다. 또한 WIB공법은 연약지반의 지내력을 증강하여 건물의 침하 및 액상화도 방지할 수 있다.



<해설그림 3.3.28> WIB공법 (ed-techno, Inc.)

④ 성토 및 기초하부 토목섬유(지오셀, 지오그리드) 보강 공법

지오셀은 3차원적으로 구조적 특징에 의해 효율적인 토립자 구속효과를 발휘하는 특징을 가지고 있으며, 벌집모량의 3차원 형태로 제작된 단위 셀 안에 속채움재를 넣고 다짐함으로써 흘과 지오셀의 마찰저항, 이웃한 셀의 수동저항 등 복합구조체의 강성을 증대시키는 공법이다.

⑤ 팽이기초 공법

1987년 12월 지바현 지진 발생 및 1995년 1월 고베 지진 발생시 광범위한 액상화로 큰 피해가 발생되었는데 팽이기초를 적용한 주택이나 건축물에서는 거의 피해가 발생하지 않았다고 한다. 팽이기초(Top base)공법은 팽이모양으로 생긴 콘크리트 파일을 구조물의 기초지반 표면에 부설한 후 공극을 쇄석으로 채워서 다짐을 하는 공법으로써 지지력이 충분하지 않은 지반 위에 구조물을 건설하는

경우 기초부에 시공하여 지지력 증대와 침하 억제의 효과를 동시에 도모할 수 있는 기초공법이다.

한편, ITG(In-situ Installed Top-base & Geomesh) 공법은 기존 팽이기초의 연결철근 대신 지오메쉬와 팽이용기를 사용하여 개개의 팽이기초를 연결하여 지반 보강 복합체를 형성함으로써 액상화 지반의 지반개량효과를 증대시키는 공법이다.

현장타설형 팽이기초공법은 팽이기초(Top base)공법과 공법원리는 동일하나 기성프리캐스트 팽이기초를 사용하는 Top base 공법과 달리 현장에서 팽이용기(거푸집용)와 철근연결후 콘크리트 타설 및 양생하는 점이 다르다.

<해설그림 3.3.29> 팽이말뚝기초공법(Sanwakensetsu)

⑥ 나무말뚝 공법

일본에서는 도로 성토 및 지상 2~3층의 RC 건축물 등 경량 구조물에 액상화 대책공법으로 나무말뚝공법을 개발하고 있다. 나무말뚝을 느슨한 모래층에 설치 시 말뚝의 구속 효과로 인한 지반 토층의 밀도 증가와 말뚝 주면을 따라서 과잉 간극 수압의 소산으로 인해 액상화에 대한 지반의 저항력을 증가시킬 수 있다.

제4장 내진성능 향상보고서

4.1 일반사항

내진성능을 향상한 후 향상결과를 보고서의 형태로 제출한다. 보고서의 문장은 간결하고 앞뒤 연결 관계가 명확하여야 하며, 객관적인 자료수집과 분석 그리고 결론으로 이루어져야 한다.

4.2 보고서 구성

보고서에 포함되어야 하는 항목은 다음과 같다.

1. 구조물에 대한 정보
2. 현장조사 및 문서검토
3. 내진성능 평가보고서 분석
4. 내진성능 향상설계
5. 내진성능 향상 시공 결과
6. 결론

▌해설▐

내진성능 향상보고서에 포함되어야 할 내용을 절차별로 구분하면 다음과 같다.

가. 1단계: 정보 분석

나. 2단계: 내진성능평가 분석

단계 별 상세 내용을 예시하면 <해설표 4.2.1>, <해설표 4.2.2> 및 <해설표 4.2.3>과 같다.

<해설표 4.2.1> 1단계: 정보 분석

구분	항목	내용
터널 제원 및 기초자료 현황	준공도서 보유 현황 (내진성능평가 시 관련자료)	1) 준공도면 2) 구조계산서 3) 지반조사보고서 4) 점검 및 진단자료 5) 보수보강 자료 6) 기타 자료
	터널 기본사항	1) 시설물명 2) 시설물 종류 3) 위치 4) 관리주체 5) 준공년도 6) 시공비(내진성능평가, 내진보강설계, 내진보강시공) 7) 준거 설계기준 및 시방서 8) 시공방법 9) 터널형식(형식, 형상) 10) 터널제원(연장(m), 내공폭(m), 내공높이(m)) 11) 상태등급 12) 중요부착시설물 13) 기타시설물
	터널구조물 설계현황	1) 콘크리트 강도 2) 철근강도 3) 개착BOX구조물(슬래브두께(mm), 벽체두께(mm), 기둥폭(mm), 철근배근) 4) 액상화(수행여부, 주변지반, 지하수)
내진보강사업 수행 현황	내진설계 현황 (내진설계 수행시 작성)	1) 내진설계기준 적용 현황 2) 내진등급(시방서 동일) 3) 지진구역 4) 지진구역계수, Z 5) 위험도계수, I 6) 가속도계수, A(시방서 동일) 7) 지반종류(지반계수, S) 8) 성능수준 9) 검토방법
	내진성능평가	1) 내진성능평가 수행 여부 2) 내진성능평가 보고서 보유 현황 3) 용역 정보(용역명, 용역범위, 용역업체, 용역기간, 용역비, 책임토목구조기술자 성명 및 날인 유무 등) 4) 최신기준 적용여부 5) 심의/자문/검증위원회 수행 여부 6) 내진보강 필요여부 7) 내진보강방안 제시여부

	내진보강설계	1) 보강설계 수행여부 2) 보강공법 3) 설계서 등 보유 현황 4) 용역 정보(용역명, 설계사, 설계기간, 설계비, 책임토목구조기술자 성명 및 날인 유무 등) 5) 적용기준(개정년도) 6) 심의/자문/검증위원회 수행여부
	내진보강공사	1) 보강공사 수행여부 2) 공사시방서 등 보유 현황 3) 공사 정보(공사명, 공사기간, 공사비, 시공사, 토목공사업 등록업체 여부 등) 4) 감리제도 운영현황 5) 현장검증 수행여부

<해설표 4.2.2> 2단계: 내진성능평가

항목	내용
현장조사 적정성	1) 자료조사 2) 현장조사(외관조사, 재료특성조사 등) 3) 기타(상태평가 등)
내진성능수준목표 선정 적정성	1) 내진등급(시방서와 동일) 2) 내진성능수준 3) 평가지진하중의 평균재현주기 4) 지진구역 5) 지진구역계수, Z 6) 위험도계수, I 7) 가속도계수, A(시방서 동일) 8) 지반종류(지반계수, S)
예비평가 적정성	1) 지진도 평가(지진 구역, 지반종류, 지진도 그룹) 2) 취약도 평가(Soil 지수, Slope 지수 등) 3) 영향도 평가(Traffic 지수, Facilities 지수 등) 4) 내진그룹화
상세평가 적정성	1) 해석조건(해석위치, 해석방법, 안정성 검토방법, 기반암 등) 2) 적용물성치(지반 동적물성치, 구조물 특성치) 3) 해석결과 · 변위 · 휨 · 전단 4) 내진성능평가 결과
내진보강방안의 적정성	1) 내진보강 적정성 2) 내진보강공법 안정성 · 보강위치, 보강재료, 보강길이, 강도감소계수, 단면력 등

3. 내진성능 향상보고서에는 향상결과의 결론을 도출하는데 사용된 근거자료(현장조사결과 및 해석결과)가 추가로 제시되어야 한다.

4. 내진성능 향상설계에 적용되는 보강공법은 실험을 통해 성능 보강효과를 검증하여야 하고, 실험을 수행하지 않는 경우 보강공법에 대한 전문기관의 기술인증 및 전문가 검토를 통해 성능 보강효과를 입증하여야 한다.
   내진성능 향상설계는 해석 및 내진성능 평가를 통해 그 성능을 확인하여야 한다.

부 록

부록 A. 내진보강 사례 및 예제
- 개착식 터널

부록 B. 내진보강 사례 및 예제
- 굴착식 터널

부록 A

내진보강 사례 및 예제
- 개착식 터널

A.1 개착식 터널의 지진피해 사례

A.2 개착식 터널의 내진보강 사례

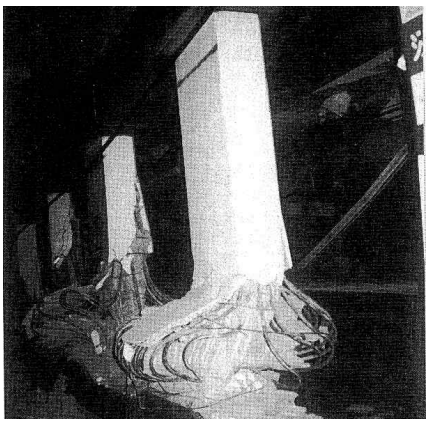
A.3 개착식 터널의 내진보강공법 상세

A.1 개착식 터널의 지진피해 사례

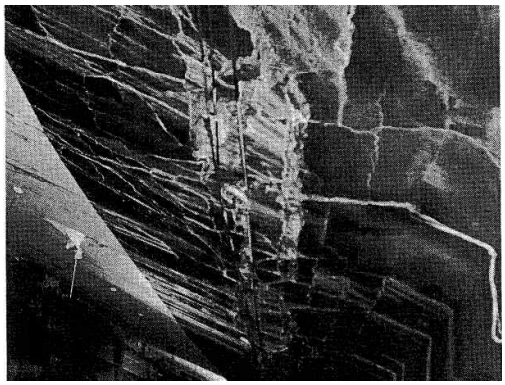
A.1.1 Daikai 지하철역 피해 사례

(1) 피해 사례 분석

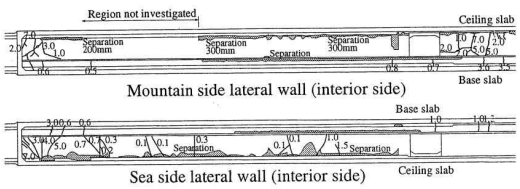
1995년 고베 대지진(효고현 남부 지진)으로 인하여 Daikai 지하철역에서 보고된 개착식 터널의 지진 피해 사례가 <그림 A.1.1> 및 <그림 A.1.2>에 요약되어 있다. Iida et al. (1996)은 개착식 터널 구간을 중앙 기둥의 번호를 기준으로 구역 A (1-23번 기둥), 구역 B (24-29번 기둥), 그리고 구역 C (30-35번 기둥)로 나누고, 각 구역에서 관측된 피해 결과들을 다음과 같이 보고하였다.



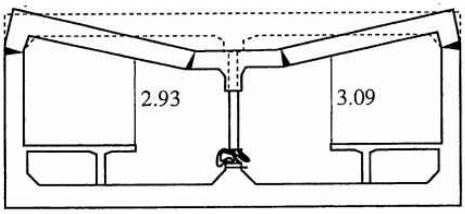
(a) 중앙 기둥 피해 (23번 기둥)



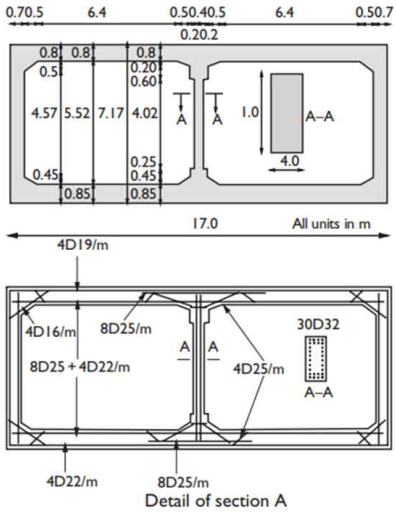
(b) 상부 슬래브 피해 (18번 기둥)



(c) 측벽 단면의 균열 분포



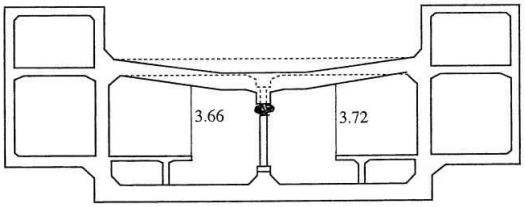
(d) 단면도 (2번 기둥) - 터널 변형 형상



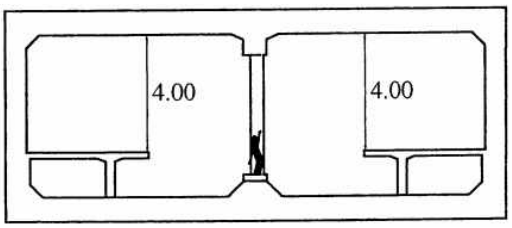
(e) 터널 전체 단면도 (A 구역)

<그림 A.1.1> Daikai 지하철역 단면도 및 지진피해 사례 (A 구역)

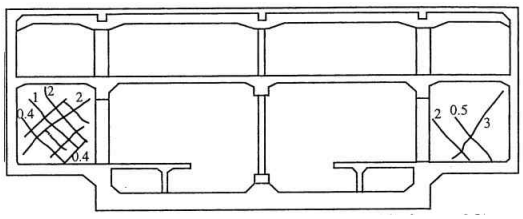
구역 A의 중앙 기둥에서는 주철근의 심한 좌굴과 주철근 주변 콘크리트의 박리가 확인되었으며, 이 외에도 다수의 횡방향 철근이 항복되었다(<그림 A.1.1(a)>). 측벽에서는 우각부에서 다수의 균열이 발생하였으며, 특히 터널 종방향을 따라서 넓은 균열이 발생하였고 이를 따라 누수가 발생하기도 하였다 (<그림 A.1.1(c)>). 구역 A의 경우 중앙 기둥의 파괴 및 이로 인한 상부 슬래브의 침하가 많았으며, 이 이후 측벽이 안쪽으로 구부러지는 변형이 발생한 것으로 보고되었다 (<그림 A.1.1(d)>).



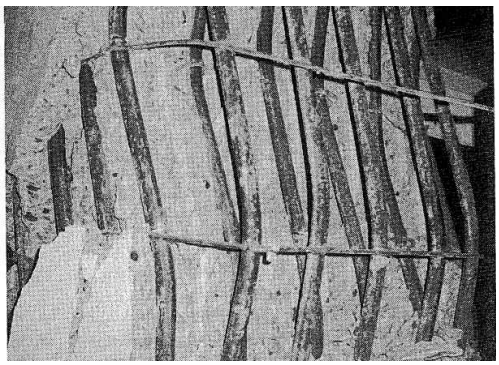
(a) 단면도 (B 구역, 24번 기둥 주변)
- 터널 변형 형상



(b) 단면도 (C 구역, 31번 기둥 주변)
- 터널 변형 형상



(c) 단면도 (B 구역, 28번 기둥 주변)
- 터널 전체 균열 분포



(d) 중앙 기둥 철근의 좌굴
(C구역, 34번 기둥)

<그림 A.1.2> Daikai 지하철역 단면도 및 균열 양상 (B/C 구역)

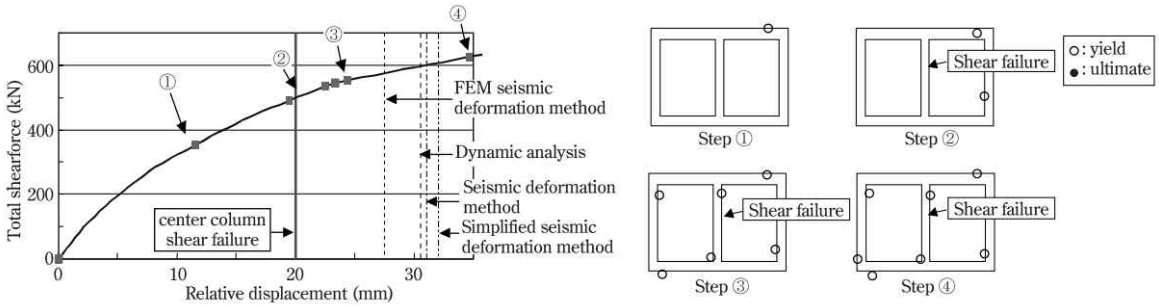
구역 B에서는 구역 A와 비슷하게 중앙 기둥과 측벽에서 지진피해가 보고되었다. 24번 및 25번 기둥에서는 중앙 기둥 상부에서 철근 좌굴이 관측되었으며 (<그림 A.1.2(a)>), 26, 27 및 28번 기둥에서는 휨파괴로 인한 콘크리트 박리가 관측되었다 (<그림 A.1.2(c)>).

구역 C의 경우 31번 기둥 하단에서 심한 균열이 발생하였으며, 이로 인해 천장 슬래브에서 약간의 침하가 발생했다(<그림 A.1.2(b)>). 34번 기둥에서는 콘크리트 박리 및 약간의 좌굴이 발생하기도 하였으나 콘크리트 심부에는 피해가 없었으며, C 구역은 전반적으로 다른 구역에 비해 피해 사례가 적은 것으로 확인되었다.

(2) 내진성능 평가 및 파괴모드 검증

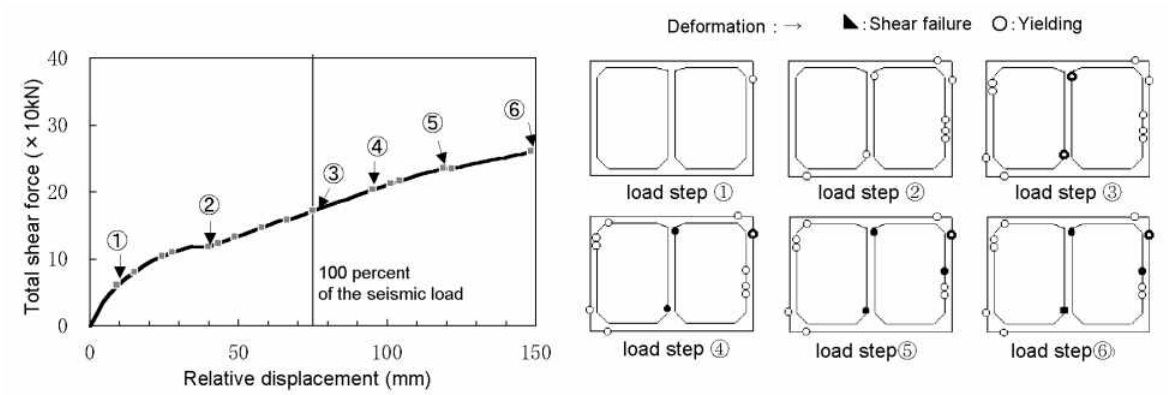
Nishiyama et al. (1999) 및 Nishiyama et al. (2004)는 응답변위법을 사용하여 Daikai 지하철역의 파괴 메커니즘에 대해 분석하였다. 해당 논문들은 각 구역 단면 부재들을 보요소를 사용하여 모사하였으며, 삼선형 모멘트-곡률 물성 모델을 적용하여 비선형 거동 특성을 반영하였음을 보고하고 있다.

A 구역(역사)의 경우 상대변위가 약 12mm에 도달하였을 때 상부 슬래브의 철근 항복이 관측되었으나, 콘크리트의 파괴는 일어나지 않았다. 이후 상대변위가 20mm에 도달하였을 때 중앙 기둥의 상부에서 전단파괴가 발생하였다. 이때 다른 부재들에서는 철근의 항복 외에 다른 피해가 발생하지 않았다. 이후 상대변위가 약 25mm에 도달하였을 때 중앙 기둥 및 슬래브, 측벽의 우각부 부근의 철근들에서 항복이 확인되었다. 그러나 이후 상대 변위가 30mm를 초과할 때까지도 다른 부재들은 극한 상태에 도달하지 않았다 (<그림 A.1.3>). 이를 고려할 때 Daikai 역사의 파괴 메커니즘은 상부 슬래브의 항복, 이후 중앙 기둥의 전단파괴로 인하여 내하력이 감소함으로써 상부 슬래브가 붕괴한 것으로 생각된다.



<그림 A.1.3> Daikai 지하철역 <A 구역> 해석결과 - Nishiyama et al. (1999)

B 및 C 구역의 경우 상대 변위가 10mm에 도달하였을 때 측벽 우각부의 철근 항복이 발생하였으나 이것이 파괴로 이어지진 않았다. 이후 상대변위가 50mm에 도달하였을 때 휨모멘트로 인해 중앙 기둥의 철근이 항복하였으며, 100mm에서 극한강도에 도달하는 것으로 보고되었다. 그럼에도 중앙 기둥의 전단파괴는 발생하지 않았으며 75mm의 상대변위에서 표면 콘크리트의 박리가 발생하였다(<그림 A.1.4>). 이는 실제로 관측된 지진피해 사례와 동일하다.



<그림 A.1.4> Daikai 지하철역 <B/C 구역> 해석결과 - Nishiyama et al. (2004)

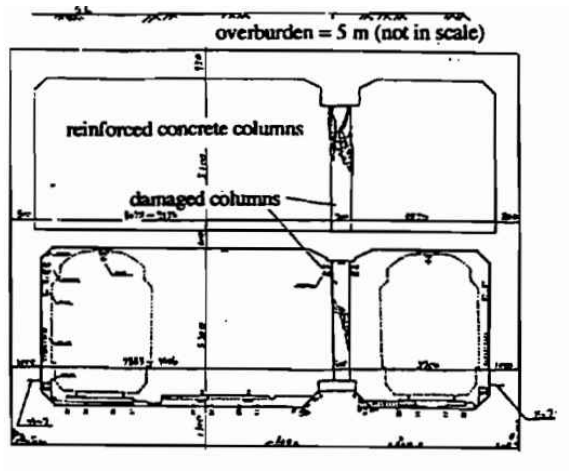
A.1.2 Kamisawa 지하철역 피해 사례

(1) 피해 사례 분석

EEFIT의 보고서(Chandler, 1997)에 따르면, 1995년 고베 대지진(효고현 남부 지진)으로 인한 피해는 Daikai 지하철역 외에도, Kousoku Nagata 지하철역, Kamisawa 지하철역 및 Sannomiya 지하철역 등에서 발생하였다.

Kamisawa 지하철역에서 보고된 개착식 터널의 지진 피해 사례는 <그림 A.1.5>에 요약되어 있다. Kamisawa 지하철역의 경우 두 개의 층으로 구성되어 있으며, 상부 바닥판의 중앙 기둥에서 피해가 심했던 것으로 보고되었다. 기둥 상부에서는 심각한 대각 전단균열이 관측되었으며, 기둥 하부에서는 경미한 대각 전단균열이 관측되었다(<그림 A.1.5(a)>). 이러한 큰 대각 균열을 따라서 상하 부분의 상대적 미끄러짐이 발생하였으며, 결과적으로 기둥의 축방향 내하력이 감소한 것으로 보고되었다. 또한 이로 인해 상부 슬래브에서는 최대 50mm의 침하가 발생하였다. 하부 슬래브의 경우 중앙 기둥에서의 대각균열 발생은 미미하였다(<그림 A.1.5(b)>). 전반적으로 Kamisawa 지하철역의 지진피해 사례는 Daikai 지하철역과 비교하면 경미한 수준인 것으로 보고되었다.

(a) 중앙 기둥



(b) 단면도 및 균열 분포

<그림 A.1.5> Kamisawa 지하철역 단면도 및 지진피해 사례

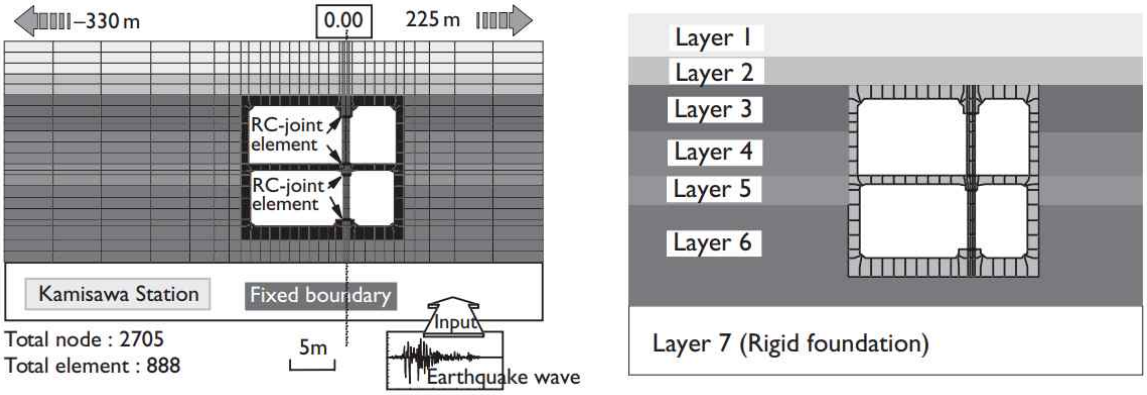
(2) 내진성능 평가 및 파괴모드 검증

Maeakawa et al.(2003)은 Kamisawa 지하철역의 개착식 터널에 대해서 동적 시간이력 해석을 수행하여 파괴 모드를 조사한 연구 결과에 대하여 소개하고 있다. 해당 연구는 Kamisawa 역의 지진피해 메커니즘을 유한요소해석으로 분석하고, 중앙 기둥의 주철근 및 횡철근 상세를 변화시켜가면서 해당 터널의 내진성능을 분석하였다. 이 해석 연구에서 중앙 기둥의 상하단은 슬래브에 완전히 고정된 것으로 가정하였으며, 실제 설계를 고려하여 5m의 지표토층이 터널 구조물 위에 존재하도록 해석 모델을 제작하였다 (<그림 A.1.6>). 해석에 사용된 철근 상세는 <표 A.1.1>에 요약된 바와 같으며, 실제 피해를 입은 터널에서는 주철근비에 비하여 전단철근 보강비가 굉장히 낮았던 것을 알 수 있다.

<표 A.1.1> Kamisawa 지하철역 터널의 내진성능 분석 - Maeakawa et al. (2003)

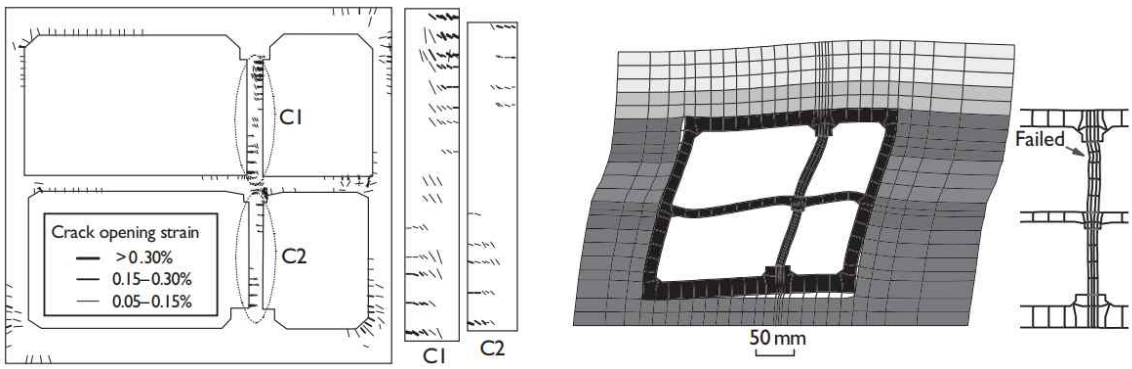
변수	기존(실제) 값	횡철근비 증가 경우	횡철근비 증가 및 주철근비 감소 경우
주철근비	5.1 %	5.1 %	3.67 %
횡(전단)철근비	0.15 %	0.76 %	0.76 %
V (MPa)	1.43	3.27	3.15
V_c (MPa)	0.98	0.98	0.86
V_s (MPa)	0.45	2.29	2.29
P_y (MPa)	1.96	1.96	1.41
V	0.73	1.67	2.23
파괴 위치	상부 기둥	상부 슬래브	관측되지 않음

실제 철근상세에 대한 해석 결과, 상부 바닥판과 연결된 중앙 기둥의 상부에 균열 발생이 집중적으로 이루어졌다(<그림 A.1.6>). 휨모멘트로 인한 종방향 주철근의 항복이 발생하기 이전에 기둥 상부에서 전단파괴가 발생하였으며, 이때의 전단 변위는 약 0.8% 수준이었다. 반면에 하부 기둥과 구조물의 다른 부재들에서는 약간의 균열만이 관측되었다. 이러한 균열 분포는 실제 Kamisawa 역에서 관측된 균열 분포와 유사한 것으로 확인되었다.



<그림 A.1.6> Kamisawa 지하철역 해석모델 - Maeakawa et al. (2003)

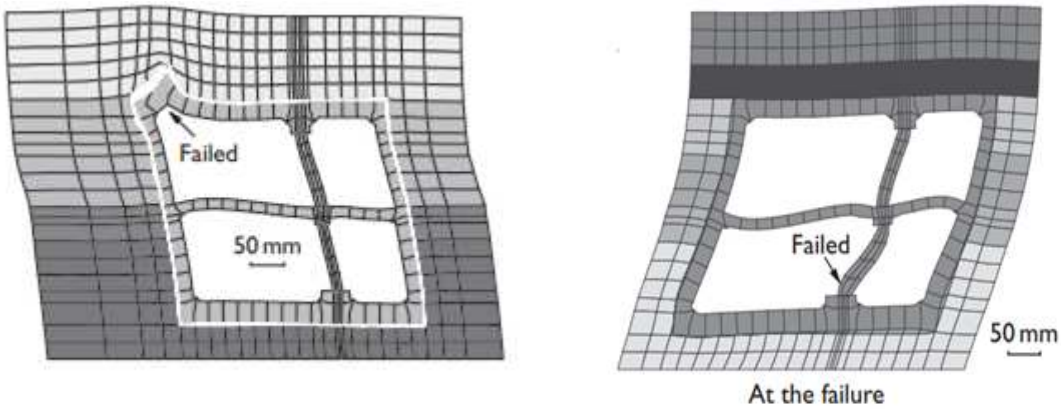
한편 중앙 기둥의 횡(전단)철근비를 0.76 % 수준으로 증가(<표 A.1.1>)시켰을 때, 중앙 기둥의 전단 성능이 증가함에 따라 상부 슬래브의 파괴가 먼저 발생하였다. <그림 A.1.7>에서 확인할 수 있듯이 변형이 상부 슬래브의 우각부에 집중되었으며, 이로 인하여 상부 슬래브에 대각 균열이 발생하였다. 결과적으로 터널 전체 시스템의 내진 성능은 크게 향상되지 않았다. 이는 중앙 기둥의 주철근비가 높아서 슬래브에 높은 힘을 인가하며, 기존에 취약하였던 부재를 보강하더라도 그 다음으로 취약한 다른 부재에서 파괴가 발생하기 때문이다.



<그림 A.1.7> 터널 전체 균열 분포 및 변형 형상 - Maeakawa et al. (2003)

한편, 중앙 기둥의 주철근비를 감소시키고 전단철근의 보강비는 증가시켰을 때, 슬래브에 발생하는 전단응력은 감소하였으며, 이로 인해 상부 슬래브에서 파괴가 발생하지 않았다. 이는 기둥의 휨강도가 감소함에 따라 기둥 단부에서 슬래브로 전달되는 전단력이 감소하였으며, 이로 인해 연결 슬래브에 전달되는 전단응력도 감소하였기 때문이다.

한편 본 연구는 구조물의 철근 상세 외에도 지반의 층별 물성 또한 Kamisawa 지하철역의 파괴에 영향을 준 것으로 판단하였다. 실제 지하철역 주변 지반 단면은 깊이가 깊어짐에 따라 흙의 전단강성이 증가하는 경향성을 보였으며, 이로 인해 상부 바닥판 및 중앙 기둥이 지진으로 인해 더 큰 전단 변형을 경험한 것으로 분석되었다. 주변 지반이 균일한 전단파 속도를 가지고 있는 것으로 가정하였을 때는 중앙 기둥 하부에 변형이 집중되는 경향을 확인할 수 있었다(<그림 A.1.8(b)>).



(a) 중앙 기둥의 철근 증가 시 (b) 토양 단면도 변경 시

<그림 A.1.8> Kamisawa 지하철역 대상 해석 사례 - Maeakawa et al. (2003)

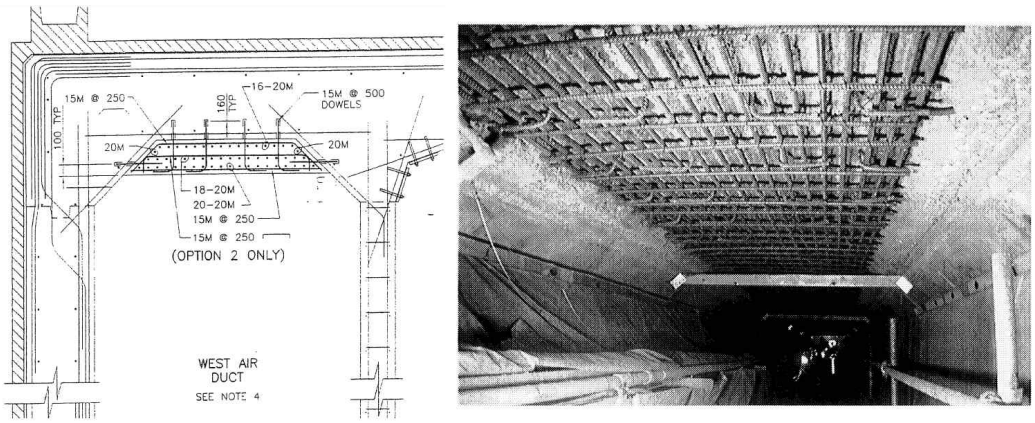
A.2 개착식 터널의 내진보강 사례

A.2.1 슬래브 상·하부 두께증가 보강공법 적용사례

(1) Morgan et al. (2006)은 캐나다의 George Massey Tunnel에 대한 내진보강 시공을 수행한 사례를 보고하고 있다.

(2) 해당 사례에서는 터널의 종방향으로 보강이 필요하여 숏크리트(shotcrete)를 이용한 슬래브 상·하부 두께 증가 보강공법을 적용하였으며, 적용 사례는 <그림 A.2.1>과 같다.

(3) 이 공법을 적용하는 보강설계에서 유의할 점은 기존 슬래브와 새로 타설하는 콘크리트의 일체화를 위해서 충분한 단면적과 정착길이를 갖춘 앵커철근(dowels)을 조밀한 간격으로 설치해야 한다.



<그림 A.2.1> 숏크리트를 이용한 상부슬래브 두께증가 보강공법 적용사례 - 캐나다 George Massey 터널 (Morgan et al. 2006)

A.2.2 부재 증설 보강공법 적용사례

(1) Morisaki et al. (2000)은 본 기법을 철근 콘크리트 기둥에 적용하였을 때의 전단성능 변화에 대해 해석적 연구를 수행하였으며, 해당 기법은 일본의 쿠단시타 지하철역에 적용되기도 하였다 (<그림 A.2.2>).

(2) 이 공법을 활용하는 경우, 중앙 기둥의 휨 및 전단 내하력이 증가함에 따라 슬래브에 전달되는 휨모멘트 및 전단력의 증가를 고려해야 한다.

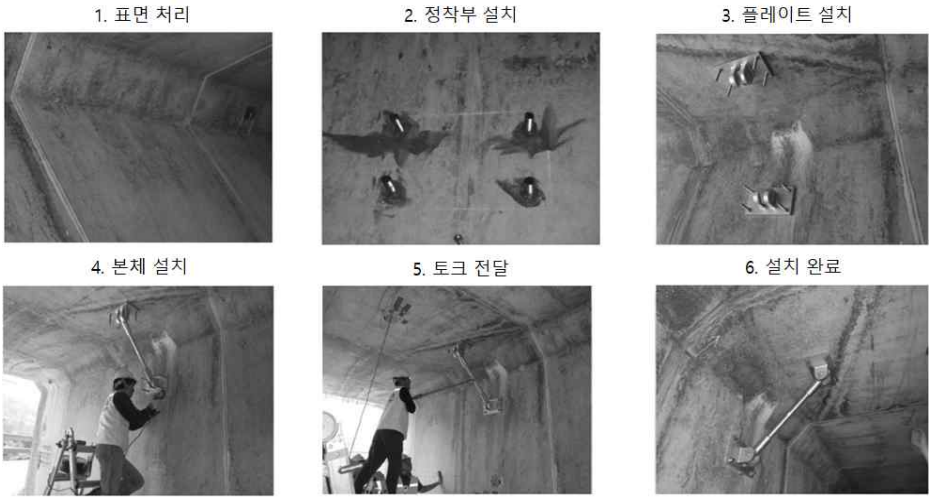
<그림 A.2.2> 콘크리트채움 합성강관을 사용한 보강공법 적용사례 - Morisaki et al. (2000) (일본)

A.2.3 브레이싱 증설 보강공법 적용사례

(1) 정지승 등(2013)은 우각부 스트럿 내진보강공법을 터널에 적용하는 과정에 대한 연구를 보고하고 있다(<그림 A.2.3>).

(2) 이 공법을 적용하는 보강설계에서 유의할 점은, 우각부 스트럿이 설치된 단면과 그렇지 않은 단면 사이에 불균일한 변형 형상 및 힘의 분배가 발생할 수 있으며, 이로 인한 전체 구조물의 파괴모드를 예측하기 위해서는 3차원 모델링과 구조해석이 필요하다.

(3) 스트럿 장치가 우각부의 양방향 변형(열림모멘트 및 닫힘모멘트)에 모두 유효하기 위해서는 압축력과 인장력 성능을 모두 검증하여야 한다.



<그림 A.2.3> 우각부 스트럿 보강공법 시공절차 (정지승 등, 2013)

A.2.4 기둥의 띠판 보강공법 적용사례

(1) 한편 일본 국토교통성 보고서(2010)는 기둥의 모서리에 앵글(지지대 역할)을 사용하고 일정한 간격으로 띠판을 설치하여, 채움 모르타르를 사용하지 않고 비교적 쉽게 기둥에 내하력을 증가시킨 사례를 보고하였다 (<그림 A.2.4>).

(2) Takakura et al. (2011)은 띠판 대신 강판으로 기둥의 전면을 감싼 후에 기존 콘크리트와 강판 사이 공간에 무수축 모르타르로 채워서 구속효과(즉, 휨강도 및 연성도)와 전단강도를 유도한 사례를 보고하였다(<그림 A.2.5>).

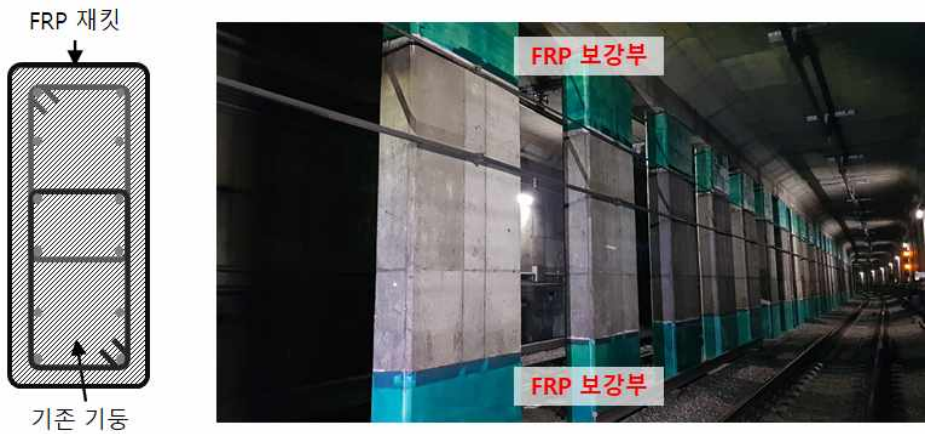
<그림 A.2.4> 기둥의 띠판 보강공법 적용사례 (일본 국토교통성, 2010)

<그림 A.2.5> 기둥의 강판 보강공법 적용사례 (Takakura et al. 2011)

A.2.5 기둥 단부 섬유복합재료 보강공법 적용사례

(1) 기둥 단부 섬유보강폴리머(Fiber Reinforced Polymer, FRP) 보강공법이 적용된 지하철 터널은 <그림 A.2.6>과 같다.

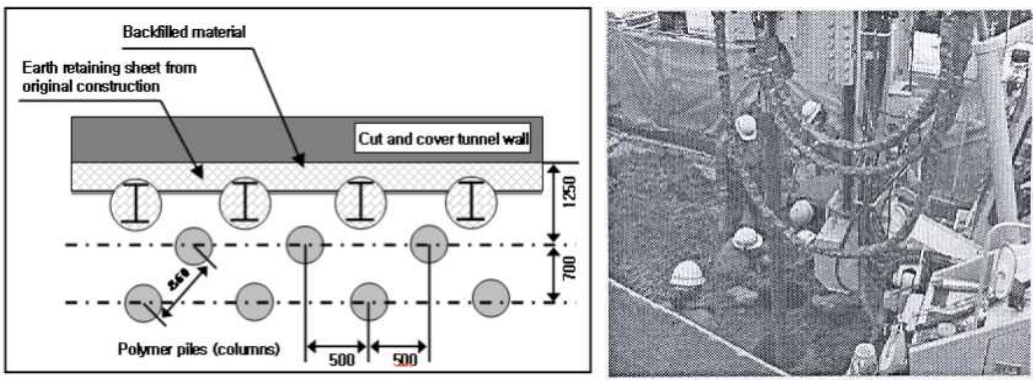
(2) 이 공법은 기둥 단면의 폭이 두께의 2배 이상인 경우 철근콘크리트 단면에 대한 섬유보강폴리머의 구속효과(즉, 휨강도 및 연성도 증가)뿐만 아니라 전단강도에 기여하는 정도가 제한적인 것으로 알려져 있다. 따라서 적용 대상 기둥에 대한 각 공법의 내진성능 향상효과는 적절한 실험 결과를 토대로 판단해야 한다.



<그림 A.2.6> 기둥 FRP 보강공법 개념도(좌) 및 실제 개착식 터널 적용사례(우)

A.2.6 지진격리공법 적용사례

(1) 개착식 터널의 주변 지반에 파일벽체를 시공하여 지진격리장치로 활용하는 공법이 적용된 일본 Nakagawa 지하철역은 <그림 A.2.7>과 같다.



<그림 A.2.7> 폴리머 파일을 활용한 내진격리공법 (일본 Nakagawa 지하철역)

A.3 개착식 터널의 내진보강공법 상세

A.3.1 슬래브 상·하부 두께증가 보강공법 상세

가. 보강과정 상세

(1) 슬래브 상부 두께 증가

- 부재의 휨강도와 전단강도 향상을 위하여 추가 배치된 철근과 콘크리트의 구조적 성능이 효과적으로 발휘되기 위해서는 기존 구조물과의 확실한 부착이 필요하다.
- 슬래브 부재의 하단에서 콘크리트 피복을 까낸 후 기존의 주철근 및 전단철근이 노출된 상태에서 앵커 처리 등에 의한 전단연결재를 설치한 후 추가 주철근과 배력철근을 배근한 후 소정의 두께의 콘크리트를 덧입힌다.
- 신・구 콘크리트 이음면에는 추가적인 무수축 모르타르 시멘트를 충전한다.

(2) 슬래브 하부 두께 증가

- 부재의 휨강도와 전단강도를 향상시키기 위하여는 추가된 주철근의 강도가 충분히 발휘될 수 있도록 확실한 정착장 확인이 필요하다.
- 또한 확실한 전단내하력 확보를 위하여 증가된 두께 부분과 기존 구조물과의 부착이 확실해야 하므로 기존 표면의 거칠게 처리 및 앵커 처리 등에 조치가 필요하며, 추가 타설 콘크리트의 확실한 충전이 되어야 한다.

나. 숏크리트 사용시 고려사항

(1) 숏크리트 재질

- 국토교토부 터널표준시방서 (2015)는 일반숏크리트에 대해 21MPa 이상의 28일 설계기준강도를, 고강도숏크리트에 대해 35MPa 이상의 28일 설계기준강도 및 10MPa 이상의 재령1일 강도를 만족할 것을 권고하고 있다.
- 또한 마감재로 적용할 경우에 대해 재령 28일 부착강도가 암반에 대하여 0.5MPa, 숏크리트에 대하여 1.0MPa 이상이 되어야 함 또한 명시하고 있다.
- Morgan et al. (2006)은 캐나다의 George Massey Tunnel에 대한 내진보강 시공과 관련하여, 두께 보강을 위해 숏크리트를 사용한 바 있다. 해당 사례는 기존의 소성건조수축으로 인한 균열 발생을 제어하기 위해 1kg/m^3 정도의 합성 섬유를 사용하였다.

(2) 콘크리트 표면처리 및 철근 정착

- 부재 보강시 숏크리트의 적절한 부착을 위해서는 기존 콘크리트 표면에 대한 처리가 필요할 수 있다.
- Morgan et al. (2006)의 보고에 따르면 다음과 같은 표면 거칠기가 숏크리트의 부착을 유지하는데 도움이 될 수 있다:
  (a) 150mm의 구간 동안 고저간 차이가 5mm 이상인 지점이 최소 3점 이상
  (b) 150mm의 구간 동안 고저간 차이가 4mm 이상인 지점이 최소 4점 이상
- 이 사례에서는 초고압수 분사 장비나 그리트 블라스팅 등이 사용되어 콘크리트 표면을 처리하였으며, 이후 구멍을 뚫고 에폭시 그라우팅으로 철근을 정착하였다.

A.3.2 강판접착공법 상세

가. 강판가공

(1) 강판의 절단에 의해서 발생된 변형은 바로잡기를 하고 절단 끝부분의 누락이나 재변형에 주의한다.

(2) 접착면의 오염이나, 흙의 부착, 녹 등의 발생은 접착 효과를 현저하게 방해하므로, 접착면은 일제히 블래스트 처리 등을 하여 강판 1장씩을 비닐 등으로 포장하고 운반 시에 손 등으로 접촉되는 일이 없도록 주의한다.

(3) 앵커용 천공 위치는 현장에서 실물 치수를 측정하고 공장에서 천공 작업을 하여 현장에서 구멍의 위치를 수정하는 일이 없도록 한다. 천공으로 생긴 구멍 주변의 버력은 긁어낸다. 구멍 직경은 앵커볼트의 직경보다 5~10mm 정도 크게 뚫는다.

나. 준비공

철근 위치를 조사하여 철근을 피해서 앵커를 설치한다. 또한 앵커는 인발 저항력을 사전에 조사해 둔다.

(1) 압착공법

압착공법의 경우에는 에폭시계 수지도포 전에 앵커 1개당의 도입 토크치를 구해두고 소정의 압착력을 전 앵커에 균등하게 줄 수 있도록 한다.

(2) 주입공법

- 주입공법의 경우에는 시공성을 고려하여 콘크리트면과 강판면의 빈공간을 2~6mm 평균 4mm 정도로 유지하면서 스페이서의 위치 등으로 조정한다.
- 주입공법의 경우는 강판에 설치하는 주입구멍의 간격을 50~100mm 정도로 한다.
- 또한 강판주변은 주입압력에 의해 흘러나오지 않도록 퍼티용 에폭시계 수지로 마감해 둔다. 에폭시 마감부분에는 강판의 네 모퉁이를 포함해서 50cm 정도의 간격으로 공기빼기 파이프를 설치해 둔다.

다. 접착 및 주입

(1) 압착공법

- 압착공법의 경우에는 고무주걱 등을 이용해서 콘크리트면 및 강판면에 에폭시계 수지를 각 1~2mm 균등하게 도포한다.
- 압착공법에는 각재, 형강 등을 이용해서 앵커의 인발 저항력을 이용해 외면으로부터 강판에 균등한 압력을 가해서 접착한다.
- 접착압력은 여분의 수지가 밖으로 밀려나와 최종 접착층이 0.3mm 정도가 되는 경우를 생각하면 5tf/㎡정도의 압력이 되지만, 점도가 높은 상태에서 접착재를 사용하는 경우는 앵커의 강도, 압착력에 관해 검토할 필요가 있다. 또한 압착에 의해 유출된 에폭시계 수지는 제거한다.

(2) 주입공법

- 주입공법에는 한쪽 주입 구멍에 펌프로 적절한 압력을 가하면서 에폭시계수지 주입을 개시하고 다음 주입 구멍으로부터 에폭시계수지가 나오는 것을 확인한 다음 펌프를 떼어내고, 첫 번째 주입 구멍을 나무못으로 막고, 두 번째 주입 구멍으로 옮긴다.
- 이 사이 공기 빼기로부터 에폭시계 수지가 유출되지만 내부에 기포가 남아있지 않게끔 충분히 유출하는 것을 확인한 후, 공기빼기 파이프를 잠근다.
- 더욱이 종단경사가 있는 경우에는 낮은 쪽에서부터 한다. 주입상태의 확인은 주입작업과 동시에 햄머 등으로 가볍게 두드려 밀도상태를 확인한다.

라. 마무리

(1) 압착공법

- 압착공법의 경우, 소정의 양생기간을 경과했을 시, 지보공 등을 철거하지만, 앵커를 남기고, 너트를 체결해서 만일의 경우의 강판의 낙하를 막게끔 한다.
- 앵커 볼트는 일정한 길이로 절단하고 강판에 부착해 있는 수지는 그라인더 등으로 제거한다. 또한 강판도장은 강교의 도장에 준하는 것이 좋다.

(2) 주입공법

- 주입공법의 경우, 상기 (1)에 준하지만, 시일은 그라인더 등으로 깨끗하게 마무리하는 것만으로 하고 제거하지 않는다. 단 공기 뽑기 파이프는 절단한다.

A.3.3 벽체, 기둥 두께증가보강공법 상세

(1) 부재의 휨강도와 전단강도를 향상시키기 위해서는 추가된 주철근의 강도가 충분히 발휘될 수 있도록 확실한 정착장 확인이 필요하다.

(2) 또한 확실한 전단내하력 확보를 위하여 증가된 두께 부분과 기존 구조물과의 부착이 확실해야 하므로 기존 벽체 표면의 거칠게 처리 및 앵커 처리 등에 조치가 필요하며, 추가 타설 콘크리트의 확실한 충전이 되어야 한다.

A.3.4 기둥 단부 섬유복합재료 보강공법 상세

가. 공법재료

(1) 레진

ACI 440.2R-2 (ACI Comm. 440, 2002)에 따르면, 섬유보강폴리머 (Fiber-Reinforced Polymer, FRP) 보강공법에는 에폭시, 비닐에스테르, 폴리에스테르가 널리 사용되며, 그 외에도 다음 조건을 만족하는 재료들의 사용이 허용된다.

- 콘크리트, 섬유 및 FRP 복합체에 대한 부착 성능이 충분하다.
- 습기, 염해, 온도 변화와 화학 물질들에 대한 저항성이 있다.
- FRP에 요구되는 적절한 기계적 성능요구를 만족한다.
- 작업성과 채움 성능이 충분하다.

(2) 섬유

- ACI 440.2R-2 (ACI Comm. 440, 2002)에 따르면 일반적으로 보강을 위해 사용되는 섬유복합재료로는 탄소섬유 (CFRP), 유리섬유 (GFRP), 그리고 아라미드섬유 (AFRP)가 있다.
- 아라미드 섬유는 방탄성능에서 장점이 있으며 탄소섬유는 인장강도가 높고 유리섬유는 내열성능과 가격에 있어서 장점이 있다.
- Amran et al. (2018)은 현무암 섬유(BFRP)가 사용됨을 보고하고 있다.

(3) 물성치 요구조건

- ACI 440.2R-2 (ACI Comm. 440, 2002)는 FRP용 물질에 대해 일반적인 밀도, 열 팽창 계수 및 인장강도 강성 자료를 제안하고 있다.
- 필요한 경우 이를 참조할 수 있으며, 주로 사용되는 섬유의 인장강성 및 인장강도에 대한 일반 자료를 <표 A.3.1>로 첨부한다. FRP의 부착강도는 1.4MPa을 초과하는 것이 권고된다.

<표 A.3.1> 섬유복합재료로 사용되는 섬유의 일반적인 물성치 (ACI 440.2R-2)

섬유 종류		탄성 강성		극한 강도		최소 파단 변형률(%)
		103 ksi	GPa	103 ksi	GPa	
탄소 섬유	일반 목적	32-34	220-240	300-550	2050-3790	1.2
	고강도	32-34	220-240	550-700	3790-4820	1.4
	초고강도	32-34	220-240	700-900	4820-6200	1.5
	고강성	50-75	340-520	250-450	1720-3100	0.5
	초고강성	75-100	520-690	200-350	1380-2400	0.2
유리 섬유	E-glass	10-10.5	69-72	270-390	1860-2680	4.5
	S-glass	12.5-13	86-90	500-700	3440-4140	5.4
아라미드 섬유	일반목적	10-12	69-83	500-600	3440-4140	2.5
	초고강성	16-18	110-124	500-600	3440-4140	1.6

나. 적용시 주의사항

(1) 콘크리트 표면 상태

해당 사항은 ACI 440.2R-2 (ACI Comm. 440, 2002)를 참조하여 작성하였다.

- FRP 보강에 사용되는 재료와 접착물질은 반드시 콘크리트 표면이 깨끗하고 습기나 수증기 발생이 없는 상황에서 적용되어야 한다.
- 만약 콘크리트 표면의 균열이 0.3mm 이상일 경우 에폭시 등의 충진제를 사용하여 채우는 것이 권장된다.
- 또한 콘크리트 대한 접착 수준을 높이기 위하여 거친 대각부를 평활화하는 것이 권고된다.

(2) 시공시 관리사항

- 적절한 강도 발현을 위해서 FRP 내의 섬유들의 정렬은 5도 이하의 오차를 가지도록 하는 것이 권장된다.
- 레진의 양생기간 동안 온도는 일정하게 유지되는 것이 권장된다.
- 필요한 경우 적절한 강도 발현을 위해 보호용 장비의 설치 등이 가능하다.

부록 B

내진보강 사례 및 예제 – 굴착식 터널

B.1 굴착식 터널의 내진성능 향상 관련 기준 검토

B.2 굴착식 터널의 내진성능 향상 평가 방법

B.3 굴착식 터널의 내진성능 향상 방법

B.1 굴착식 터널의 내진성능 향상 관련 기준 검토

B.1.1 국내외 관련 기준 고찰

가. KDS 27 17 00 (터널 내진설계)

4.3 터널 내진설계시 주의사항

(1) 터널 라이닝의 경우 지진력에 대한 저항을 증가시키기 위해 라이닝의 인성을 높이는 방법을 적용할 수 있다.

(2) 단층대, 파쇄대 또는 연약지반과 같이 지진에 취약한 구간은 지반과 구조물의 일체거동을 유도할 수 있도록 인버트 라이닝을 설치하거나 주변 지반을 보강할 수 있다.

나. 일본 터널 표준시방서(산악공법)

터널의 완성 후 지진 피해 가능성이 있는 경우에는 조건에 따라 구조 설계를 시행하여야 한다.

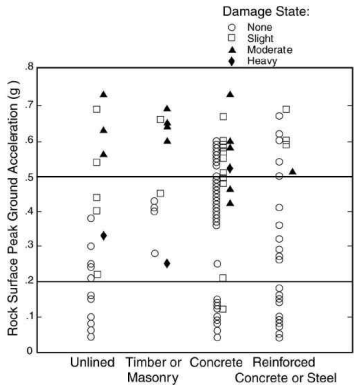
[해설] 터널은 지반과 하나가 되어 거동하므로 지표의 구조물에 비해 지진의 영향이 적고, 내진성능이 높은 구조물이라고 할 수 있다. 특히 안정된 지반 내에 있는 산악부의 터널(NATM)에서는 일반적으로 지진의 영향을 고려할 필요는 없다. 갱구부에서도 일반적으로 행해지는 철근 보강하여 대규모 지진시 피해를 어느 정도 줄일 수 있다.

3.4 라이닝 및 인버트

[해설]

1) 철근의 배치 : 도시부 산악 공법(NATM)에 의한 터널의 경우 주변의 영향을 받아 편하중이 되는 경우도 많기 때문에 일반적으로 철근보강을 하는 경우가 많다. 또한 지진의 영향을 고려하는 경우에는 철근의 배치로 전단 내력 및 인성의 향상을 고려할 필요가 있다.

다. FHWA-NHI-Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels

지진으로 인한 터널 피해는 피해 없음; 약간의 균열 또는 탈락; 구조적 균열 또는 탈락, 라이닝 일부 조각 붕락; 심각한 공동 발생과 붕락의 4가지로 분류되며, 주요 경향은 다음과 같다. - 라이닝이 더 강한 터널, 특히 철근으로 보강된 터널은 더 좋은 내진성능을 보였다.	 <그림 B.1.1> 지진으로 인한 굴착식 터널의 피해사례

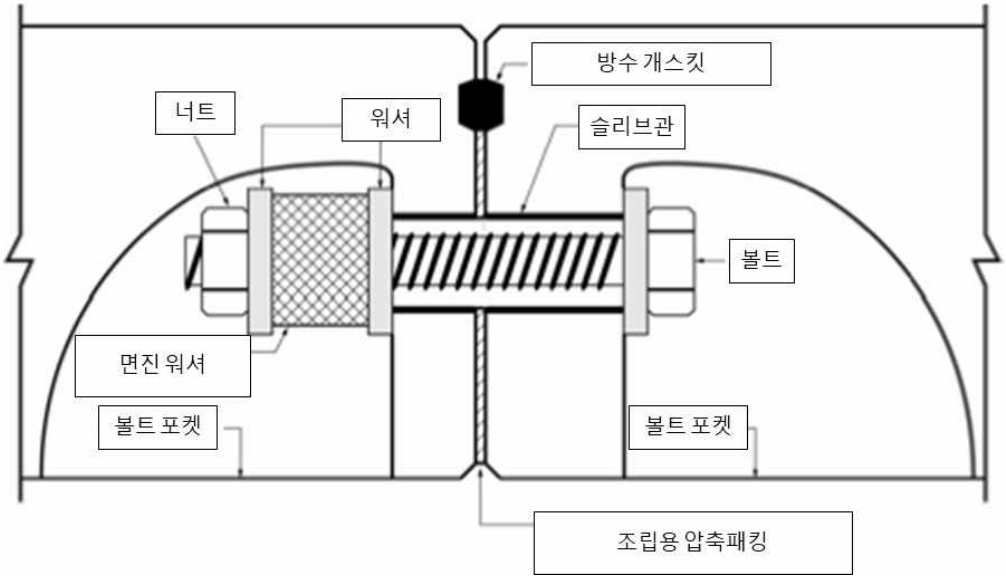
라. FHWA-HRT-05-067-Seismic Retrofitting Manual for Highway Structures: Part 2-Retaining Structures, Slopes, Tunnels, Culverts, and Roadways

미국 도로교통국의 터널 보강 매뉴얼(FHWA-HRT-05-067) 4.5장은 주요 손상 유발 유형별로 내진성능 향상방법을 제안한다.

(1) 지반 운동 유발 손상에 대한 내진성능 향상방법

- 터널 주변 암반이 취약할 경우, 연속적인 또는 경향성을 갖는 락볼트와 숏크리트의 보강이 필요하다. 심한 불균질 암반일 경우 캐미컬 그라우팅을 사용할 수 있다.
- 라이닝에 부분적으로 균열, 노화 등 취약 부분이 존재할 경우, 또한 강성이 낮은 콘크리트 또는 벽돌 라이닝이 존재할 경우 취약 부분을 숏크리트 또는 섬유 보강재 등으로 교체한다. 균열 또는 노화 등의 취약 부분이 심각할 경우, 기존 라이닝을 제거하고 성능이 더 우수한 새로운 라이닝을 설치한다. 기존 라이닝 제거 대신에 추가적으로 안쪽에 라이닝, 강화재 및 아치빔 등을 설치할 수 있다. 일반적으로 암반터널에서는 지진에 따른 변형이 크지 않으므로 강재 라이닝의 사용은 필요치 않으나, 강한 지반운동이 예측될 경우 사용할 수도 있다.
- 라이닝과 배후지반은 조밀히 밀착되어 있어야 하므로 라이닝 뒤에 공극이 관찰될 경우 그라우팅을 주입한다. 공극은 코어 샘플 또는 지반물리탐사 기술로 탐지할 수 있다. 그라우팅재로는 일반적인 그라우트, 폼콘크리트, 폴리우레탄 등을 사용할 수 있다.

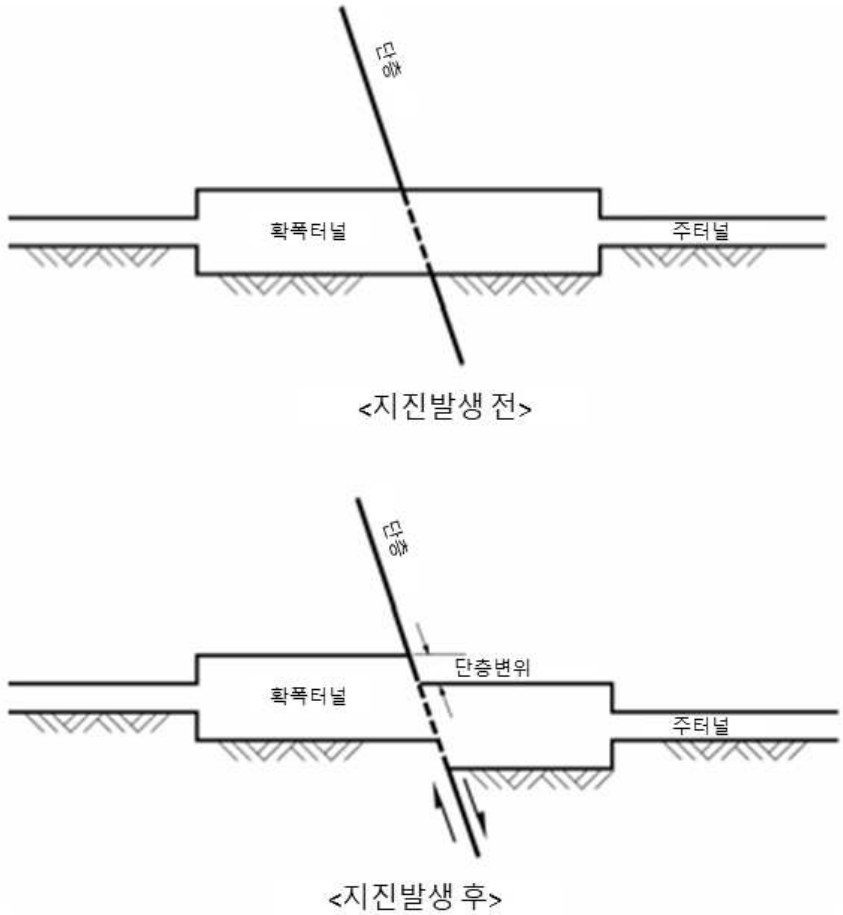
- 토층 터널의 경우, 지반운동에 의한 터널의 횡방향 또는 종방향 변형이 발생할 수 있다. 이런 변형에 대응하여 터널의 인성을 증가시키기 위해 면진워셔와 같은 특별 조인트를 사용하거나, 새그먼트 라이닝 조인트에 강재 연결재를 사용하여 인성을 증가시킬 수 있다.



<그림 B.1.2> 면진워셔를 사용한 조인트 결합

(2) 단층 변형 유발 손상에 대한 내진성능 향상방법

- 단층의 움직임에 의해 좁은 지역의 단층 부분에서 대변형 변위가 예견될 경우, 터널의 폭을 긴 구간에서 확장하는 방법을 고려할 수 있다. 터널의 폭이 확장되어 있다면 단층변위 이후에도 터널의 폐쇄는 일어나지 않으며, 암반잔해제거, 라이닝교체, 포장 또는 열차레일 복구 등의 절차를 거쳐 터널의 기능을 빠른 시간 내에 복구할 수 있다. 확장 폭 및 확장구간길이는 단층의 변위와 도로 또는 철도의 최대허용곡률을 고려하여 설정한다. 터널 확장 시 확장면 라이닝과 내면 라이닝 사이를 셀룰러 콘크리트와 같은 충전재로 채워 흙의 압력이나 작은 지진하중 등은 견디면서 큰 변위 발생 시 압축이 되게끔 설계할 수 있다.



<그림 B.1.3> 확장터널에서 지진에 의한 단층변위 전후 모습 예시

- 단층의 움직임에 의한 터널의 변위가 작거나 넓은 부분에 분포되어 있다면 터널 세그먼트 사이에 인성 조인트들을 설치하여 터널의 손상 없이 S모양으로 굴곡이 되도록 보강할 수 있다.
- 대안적으로, 사후대책으로 터널의 피해 발생 시 빠른 시간 안에 복구를 완료할 수 있도록 지역 수리업체와 계약을 사전에 맺어두는 것도 고려할 수 있다.

(3) 산사태 및 액상화 유발 손상에 대한 내진성능 향상대책

- 산사태 및 액상화에 의해 터널이 지나가는 지반의 대규모 변위가 예상된다면 주변 지반에 대해 산사태 및 액상화 자체에 대한 보강을 실시한다. 만약 액상화에 의해 간극수압의 증가가 예상된다면 터널의 수평토압 저항을 증가시킬 필요가 있다. 지진 시 터널의 입출구부에서 지질의 차이에 따라 큰 하중이 작용할 수 있으므로 지반 강화, 입출구부와 터널의 연결부위 강화, 또는 조인트의 인성설계로 인한 전단력의 저감 방법 등을 고려해야 한다.

B.1.2 국내외 관련 기준 고찰 결론

(1) 일반적으로 굴착식 터널(NATM)의 경우 지반과 하나가 되어 거동하므로 지표에 시공되는 구조물(교량, 개착박스 등)에 비하여 내진성능이 우수하다(일본 터널 표준시방서).

(2) 굴착식 터널의 피해사례를 살펴보면 철근으로 보강된 라이닝이 시공된 터널의 경우, 철근 무보강 라이닝 보다 내진성능이 우수하다(FHWA-NHI).

(3) 굴착식 터널의 내진성능 향상을 위해서는 인성을 증가시키는 보강방안 수립이 필요하며 철근보강이 효과적이다(KDS 27 17 00, 일본 터널 표준시방서 등).

(4) 단층의 움직임에 의한 큰 변형이 예견될 경우, 주요 시설물 배면을 확폭하여 변형 뒤 빠른 복구가 가능하도록 한다.(FHWA-HRT-05-067)

(5) 산사태, 액상화 등에 의한 피해는 지반 보강과 같이 산사태 및 액상화 자체를 저감시킨다(FHWA-HRT-05-067).

B.2 굴착식 터널의 내진성능 향상 평가 방법

B.2.1 적용 범위

기존 굴착식 터널 구조물에 대하여 철근 보강 방법에 의한 향상방법을 제시하여 기존 터널구조물의 내진 향상을 응답이력해석(동적해석법)을 이용하여 검토하였다.

B.2.2 내진성능 검토 개요

가. 터널의 내진 특성

(1) 지하구조물의 진동특성은 지반과 구조물의 가속도 크기 및 파형이 거의 동일하게 나타나며 지상구조물의 진동특성은 지중 및 지표면에서의 파형과는 다르게 독자적으로 진동하여 나타난다.

(2) 지하구조물은 지반에 대해 상대적인 진동을 일으키기 어렵고 일어난 진동도 곧 소멸되며 지반의 변위나 변형에 순응하여 거동하는 특성을 가진다.

(3) 또한, 지하구조물이 주변지반에 의해 둘러싸여 있어, 지하구조물에서 주변지반으로 빠져나가는 방사감쇄(Radiation Damping)가 한계감쇄(Critical Damping)를 초과하여 주변지반에 작용하는 진동이 곧 진정되는 특징 때문에 지하구조물은 지상구조물에 비해 지진발생시 피해가 작은 것이 일반적이다.

(4) 터널의 지진피해는 지진력에 의한 직접적인 피해와 주변지반의 변위에 따른 지중응력의 균형이 무너짐에 따라 생긴 응력에 기인한 간접적인 피해로 나눌 수 있으며 주로 간접적인 피해에 의해 발생하는 경우가 다수이다.

나. 터널의 내진검토 위치 선정

(1) 다음과 같은 특수한 상태일 때 지진피해를 받는 경우가 많다.

- 터널이 건설된 지반의 붕괴와 지진단층의 활동
- 터널이 편압, 팽압을 받을 때 시공불량과 동결융해로 의한 콘크리트 라이닝의 기능이 저하된 경우
- 터널 상부가 불안전한 비탈면이고, 지진에 의해 붕괴·활동을 일으키지 않더라도, 비탈면에서 미세변위 또는 균열이 발생한 경우

다. 해석 모델링

(1) 기존 시설물의 내진 성능 향상이라 함은 사용중이었던 대상 터널에 적용된 내진 성능 향상을 분석하기 위하여 지진 현황분석 및 동적 설계정수를 도출하여 대상터널 구간에 적합한 해석 모델을 적용하고 설계 지진력에 대한 충분한 안전율 유도에 목적을 두고 있다.

(2) 해석 모델링에 있어서 단층파쇄대 통과구간의 경우 단층의 방향성(Strike, Dip)이 터널과 3차원적으로 교차하게 되므로, 2차원 해석을 이용하는 경우 결과의 신뢰도가 저하됨에 따라 동적해석의 경우 3차원해석을 이용한 내진해석을 권장한다.

(3) 이와 달리 응답변위법의 경우 터널정거장(다아치 터널) 등 복잡한 형상으로 건설된 구조물에 주로 적용하며, 2차원 응답해석의 경우 단층파쇄대와 같은 3차원 특성을 보이지 않는 경우에는 2차원 해석사용 가능하고, 응답변위법과 2차원 응답해석에 대한 예제는 「내진성능 평가요령」을 참조한다.

라. 내진성능 향상을 위한 보강방법

(1) B.1장에서 굴착식 내진성능에 대한 국내외 기준 분석 결과, 라이닝 인성증대를 위한 철근보강이 내진성능 향상에 유리하다. 그러나 내진성능 평가는 신설 구조물이 아닌 기존 구조물을 대상으로 평가함에 따라 시트 또는 강판보강으로 보강되는 사례가 우선적으로 검토될 것으로 판단되나, 국내에서는 굴착식 터널에서 운용중 터널의 시트 또는 강판보강이 실시된 경우가 없다.

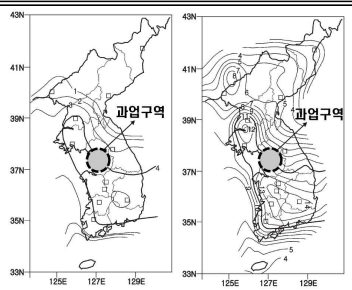
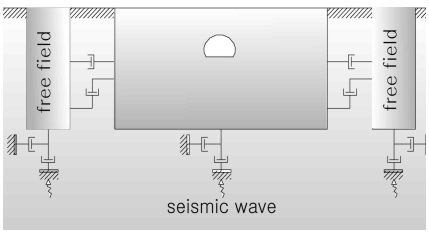
(2) 따라서 본 부록에서는 기존 터널의 내진성능 향상을 위하여 철근보강에 의한 보강방안을 적용하여 향상된 예제를 소개하였고, 추가로, 강판(또는 시트) 보강의 경우 해외 적용 사례를 소개하였다.

마. 내진성능 검토 흐름

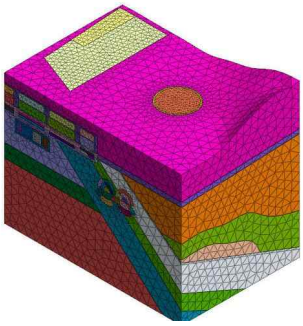
(1) 현황분석 및 해석방법선정

(2) 내진성능 확인을 위한 해석 수행

<표 B.2.1> 지진피해 조사 및 해석방법

현황분석 및 평가정수 산정	해석방법 선정 (응답이력해석)
	
• 지진시 피해사례 조사 • 노선 인근지역 지진 발생 현황 파악	• 구조물 지반 거동특성을 고려한 해석 방법을 적용하여 평가 지진력에 대한 응답이력해석 모델 적용

<표 B.2.2> 내진성능 확인을 위한 해석 수행

내진해석 모델링	
	• 구조물 지반 거동특성을 고려한 응답이력해석(동적해석) 모델링 • 단층대의 주향 및 경사방향이 연직방향이 아님에 따라 3차원 동적해석 실시

바. 목표 성능 수준 및 입력 지진기록의 결정

(1) 지진하중 조합

- 내진성능 평가는 하중에 대한 불확실성이 존재하는 신설구조물이 아닌 기존구조물에 대해 시행됨에 따라, 수치해석 모델을 이용한 터널 구조물의 내진성능 평가는 두 가지 목표성능수준(기능수행, 붕괴방지)에 대해서 실제하중에 대한 수치해석 모델 구성으로 시행한다. 단, 붕괴방지 수준의 지진에 대한 해석으로 기능수행 수준의 목표달성 여부를 충분히 증명할 수 있는 경우, 기능수행 수준 지진에 대한 추가 검토는 생략할 수 있다.

(2) 입력지진기록의 구성

- 입력지진기록은 실지진파를 설계응답스펙트럼에 대해서 스펙트럼 보정 후 Baseline Correction을 하여 적용토록 한다.

(3) 스펙트럼 보정

- 선정된 실지진파 기록이 설계응답스펙트럼을 만족시키기 위해 제안된 방법 중 푸리에 스펙트럼의 주파수대역 조정방법이 있다. (Rizzo et al., 1975; Silva and Lee, 1987) 그러나, 본 방법의 결과로 얻어진 속도, 변위기록에 과도한 에너지성분이 추가되는 단점이 보고되어(Naeim and Lew, 1995), 이를 해결하기 위하여 실지진기록 시간이력에 Wavelet을 추가하여 실지진기록을 보정하는 방법이 제안되었다. 본 방법은 원본지진기록이 가지는 비정상 지진특성을 훼손하지 않는 상태에서 에너지 변화를 최소화하는 장점을 가지고 있다. (Abrahamson, 1992). 본 방법을 적용한 최초의 스펙트럼 보정프로그램은 RspMatch2005이다. (Lilhanand and Tseng, 1987, 1988) Wavelet을 사용한 지진파의 보정을 위해서는 목표스펙트럼과 유사한

원본지진파를 사용하는 것이 가장 좋은 결과를 도출할 수 있으며, 그렇지 않은 경우 보정과정의 수렴을 담보할 수 없는 단점이 있다. 본 예제에서는 이탈리아 Seismosoft사에서 개발된 Seismomatch Ver 2.1.2를 사용하여 Wavelet을 사용한 스펙트럼 보정을 실시하였다. (Seismosoft, 2019)

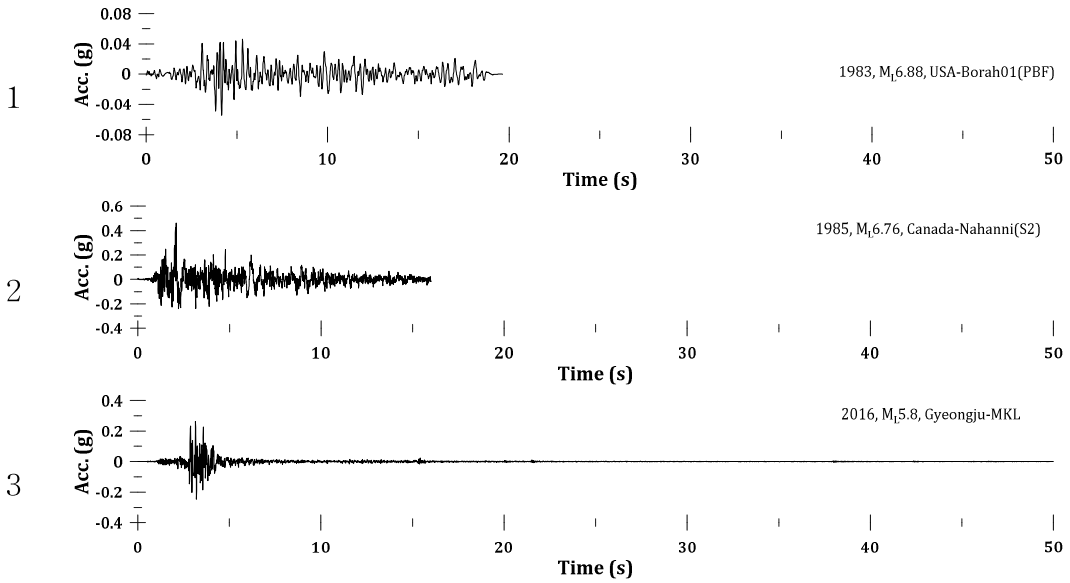
(4) 설계입력지진기록 군(群, BIN)의 구성

- 지진이 빈번한 대부분의 국가에서는 ASCE 기준(1개 기록 사용가능)을 제외하면 모두 설계스펙트럼을 만족시키는 3개 이상의 지진기록을 적용하여 그 결과의 최댓값을 설계에 적용하며, 7개 이상의 지진기록을 사용 시 해석결과(구조물 응답)의 중간값을 적용할 수 있도록 규정하고 있다. 본 요령에서는 우리나라 및 국외 판 내부 지진계측 기록 중 3개의 지진기록을 선정하여 비선형응답이력 해석을 위한 군(群, BIN)을 구성하였다. 선정된 지진기록 군(群, BIN)은 서로 다른 지진이벤트로 구성되어 <그림 B.2.1>과 같으며, 우리나라 경주와 외국의 판 내부 지진기록 2개로 구성된다. 선정된 지진기록은 모두 판 내부 지진기록으로의 유효성, 규모, 지진기록의 품질, 가속도, 지속시간 등을 종합적으로 고려하여 선정되었다. 본 보고서에서 선정된 지진기록 군이 향후 터널 구조물의 내진성능평가를 위한 절대적인 지진파의 조합을 의미하지는 않으며, 설계자는 경주 또는 포항지진기록 중 1개와 외국의 지진기록 중 규모 6.0 ~ 7.0의 실지진기록 2개를 선정하여 스펙트럼 보정 후 적용하는 것을 추천한다. 이때, 해석결과는 세 개의 지진파를 적용한 해석결과 중 최댓값을 사용하여야 한다.

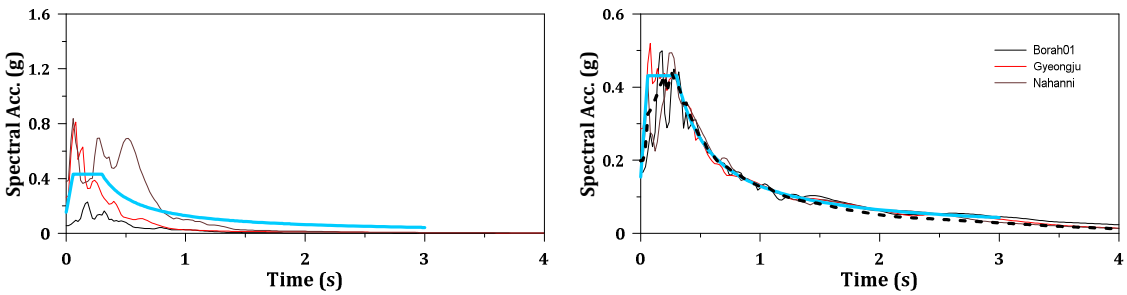
<표 B.2.3> 비선형응답이력 해석을 위한 실지진기록 군(群, BIN) (예)

No	Year	Magnitude (ML)	Epicentral Dist.(km)	PGA (g)	Event/Station/Country
1	1983	6.88	94.34	0.052	Borah01, PBF/America
2	1985	6.76	6.52	0.489	Nahanni, S2/Canada
3	2016	5.8	6	0.3497	Gyeongju/ MKL/Korea

본 예제의 1구역, S1지반 1등급 구조물에 대한 보정 전·후의 응답스펙트럼은 그림 B.2.2에 나타나 있다.



<그림 B.2.1> 비선형응답이력 해석을 위한 실지진 기록군(群, BIN)의 가속도 시간이력 (예)



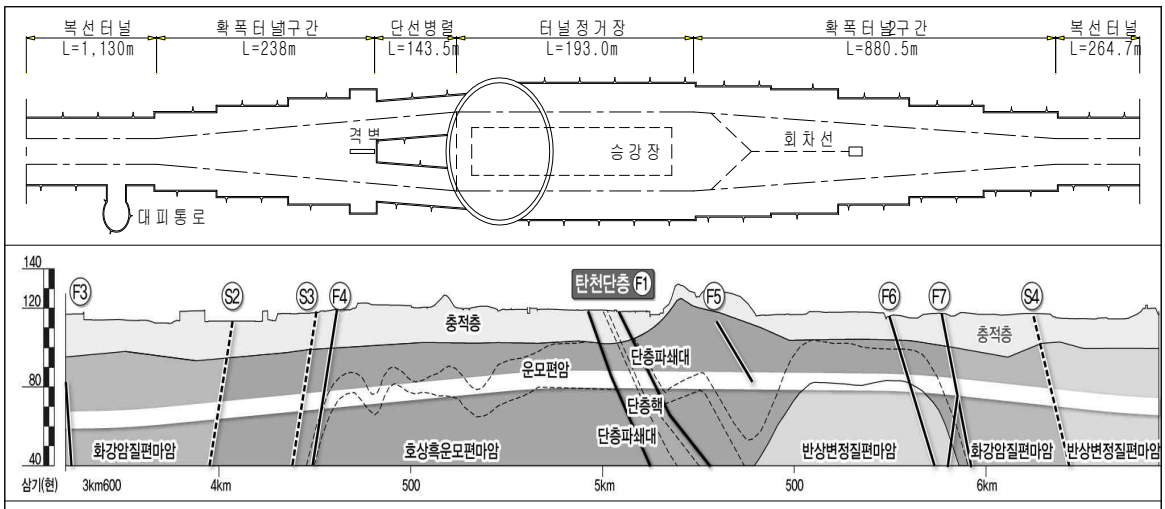
(a) 스펙트럼 보정 전 (b) 스펙트럼 보정 후

<그림 B.2.2> 비선형응답이력 해석을 위한 실지진 기록군(群, BIN)의 스펙트럼 보정 전/후 응답스펙트럼

B.2.3 터널구조물 내진성능 향상 평가 예

가. 해석위치 선정

(1) 터널 구조물 현황



- 복선→ 확폭 → 단선 → 터널정거장 → 확폭 → 복선터널로 구성됨
- 시점부 대피통로(연직갱)
- 단선구간 지하철 00호선 및 00단층 통과
- 단층파쇄대 5개소 통과(F3~F7)

<그림 B.2.3> 내진안정성 평가예의 구조물 현황

(2) 내진취약구간 선정

<표 B.2.4> 내진 취약구간 선정

터널의 내진설계 대상지역(터널설계기준)
- 지반이 취약한 터널의 갱구부 및 주요 접속부
- 대규모 단층대 및 파쇄대 통과구간
- 천층터널 및 비대칭 지형구간
- 액상화가 우려되는 연약지반 내 터널구간 등

내진취약구간	해석방법
근접구조물 및 00단층 통과구간	동적해석법
단층파쇄대	동적해석법

(3) 내진해석 방법

- 터널은 지중에 설치되는 구조물로써 지진발생시 지반과 일체거동으로 지상에 설치되는 타 구조물에 비해 지진 위험도가 낮은 것으로 알려져 있으나, 지반취약구간과 구조물 접속부 등은 지진시 터널에 미치는 영향이 클 것으로 예상된다.
- 지반불량구간 및 일방향 터널 구조물의 내진검토는 2차원으로 충분히 모사가 가능함에 따라 2차원 내진해석을 수행하고, 접속부와 같이 3차원 구조물은 터널에 작용하는 응력이 3차원 거동을 함에 따라 2차원 모사가 불가능하고, 주요접속부에 대한 명확한 내진검토를 위해 주요 접속부 구간에 대하여는 3차원 내진해석을 수행한다. 따라서 본 예제는 3차원 응답이력해석(동적해석) 을 추가한다.
- 또한, 단층, 파쇄대 구간은 주향 경사의 영향에 따라 터널에 작용하는 응력을 2차원으로 완벽히 모사하기 불가능하므로 3차원 내진해석을 수행한다.

나. 3차원 내진해석 방법

내진해석 순서는 ① 터널 구조물 3차원 연속체 해석 → ② 고유치 해석 → ③ 동적해석 순으로 수행한다.

(1) 고유치 해석

- 고유치해석은 지반/구조물 고유의 동적 특성을 분석하는데 사용되며, 이를 통해 지반/구조물의 고유모드(모드형상), 고유주기(고유진동수), 모드기여계수(modal participation factor)등을 얻을 수 있으며, 구조물의 질량과 강성에 의해 결정된다.
- 질량참여율은 복합적인 진동모드형상으로 구조물이 진동되고 있을 때 각 형상별(진동모드별) 구조물 전체의 질량 중 몇 %가 그 구조물의 진동에 참여하고 있느냐를 나타내는 지수이다.
- 고유치 해석을 위해서는 탄성경계를 사용하여 지점조건을 정의 하며, 탄성경계를 구성하는 스프링 상수는 도로교설계기준(하부구조편)의 지반반력계수에 따라 산정한다.

• 연직지반반력계수 : $k_v = k_{vo}(\frac{B_v}{30})^{-3/4}(kgf/cm^3)$

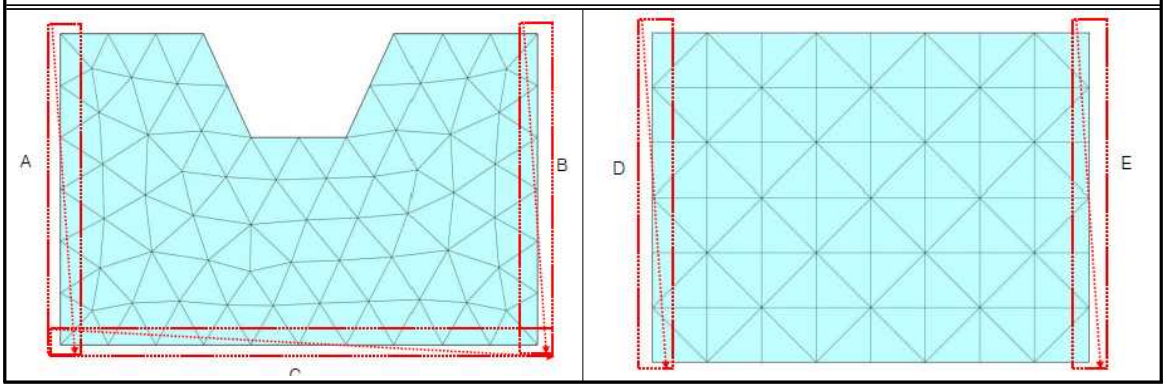
• 수평지반반력계수 : $k_h = k_{ho}(\frac{B_h}{30})^{-3/4}(kgf/cm^3)$

여기서, $k_{vo} = \frac{1}{30}\alpha E_o = k_{ho}$, $B_v = \sqrt{A_v}$, $B_h = \sqrt{A_h}$

<표 B.2.5> 지반 탄성계수 선정 및 경계조건 산정방법

다음의 시험방법에 의한 지반탄성계수 E_0 (kgf/cm^2)	α	
	평상시	지진시
지름 30cm의 강체원판에 의한 평판재하시험을 반복시킨 곡선에서 구한 지반탄성계수의 1/2	1	2
보링 공내에서 측정한 지반탄성계수	4	8
공시체의 1축 또는 3축압축시험에서 구한 지반 탄성계수	4	8
표준관입시험의 N값에서 E_0=28N으로 추정한 지반탄성계수	1	2

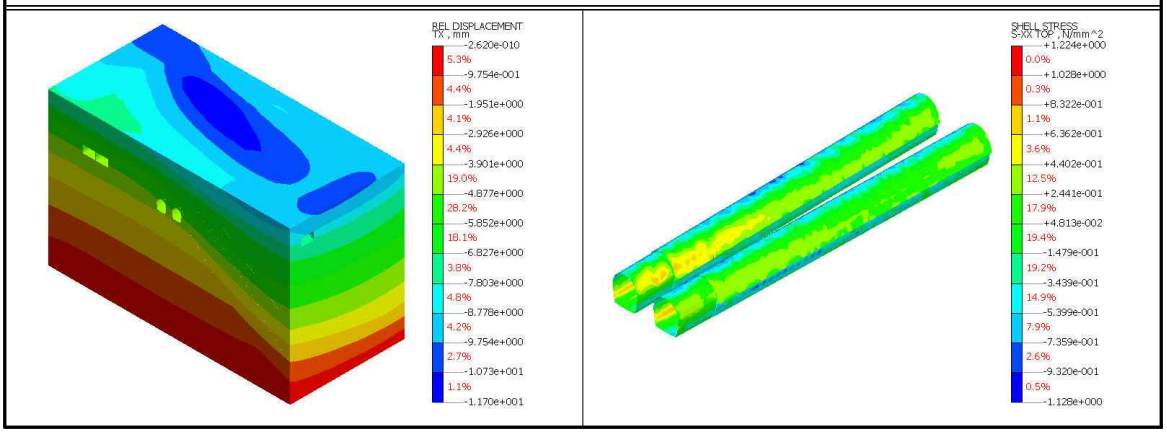
경계조건(탄성경계) 예



(2) 응답이력해석(동적해석)

- 응답이력해석을 위해서는 점성경계를 사용하여 지점조건을 정의한다.
- 고유치해석에서 얻어진 질량참여율 높은 주기를 사용한다.
- 적용 지진파에 따른 구조물(라이닝) 응력을 산출한다.

해석결과 예



<그림 B.2.4> 동적해석 결과 예

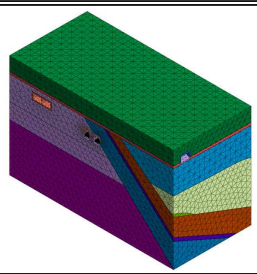
B.2.4 근접 구조물 및 단층 통과 구간에 대한 내진성능 향상 평가 예

가. 해석개요

내진성능 평가 요령에 근거하여 지하철 3호선 및 탄천단층 통과구간에 대해 실제 지진파를 이용한 응답이력해석(동적 해석) 수행

나. 해석조건 및 해석모델링

<표 B.2.6> 해석 조건 및 모델링

해석조건	해석 모델링
• 적용 지보패턴 : FPS-1, FPS-2, FPS-3 • 해석영역 : 좌우 5.0D 이상, 하부 4.0D 이상, 상부 지표면까지 모델링 • 해석 모델 : Mohr-Coulomb 모델 • **철근보강 여부 : 철근보강**	

다. 해석 물성치

<표 B.2.7> 적용 물성치

구 분	탄성파속도(m/s)		Ed (MPa)	Gd (MPa)	Kd (MPa)	vd
	Vp	Vs				
풍화암	1,300	610	2,167	797	2,558	0.359
Ⅲ등급	2,200	1,100	8,231	3,087	8,231	0.333
Ⅱ등급	3,000	1,600	17,676	6,792	14,822	0.301
Ⅰ등급	3,700	2,000	27,984	10,816	22,597	0.294
단층핵	1,650	790	3,786	1,401	4,244	0.351
단층파쇄대	1,650	790	3,786	1,401	4,244	0.351

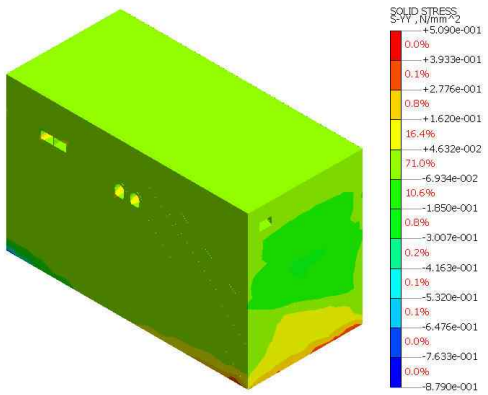
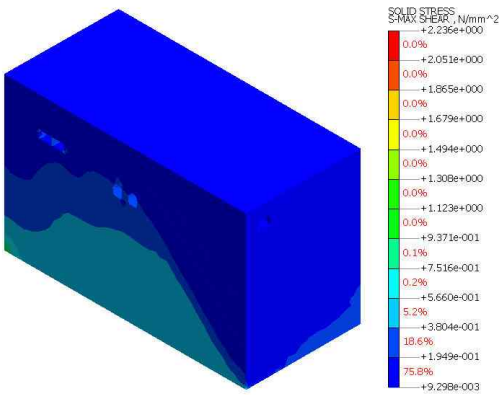
라. 해석결과

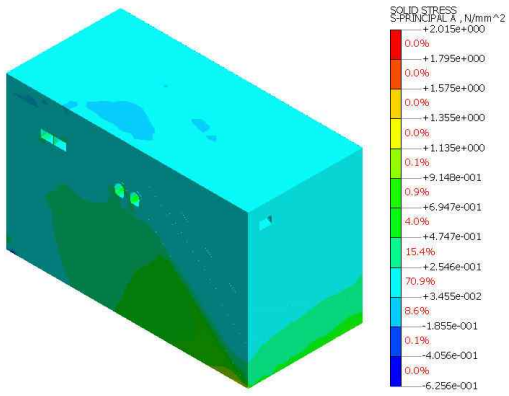
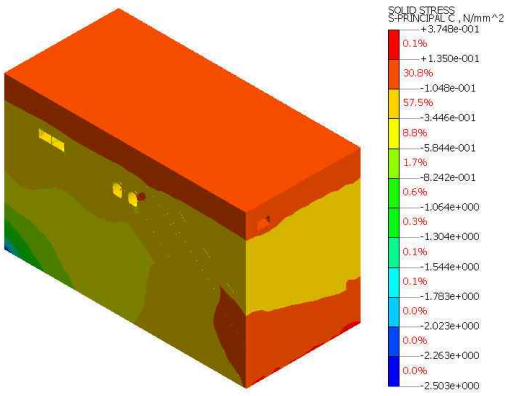
<표 B.2.8> 해석 결과표

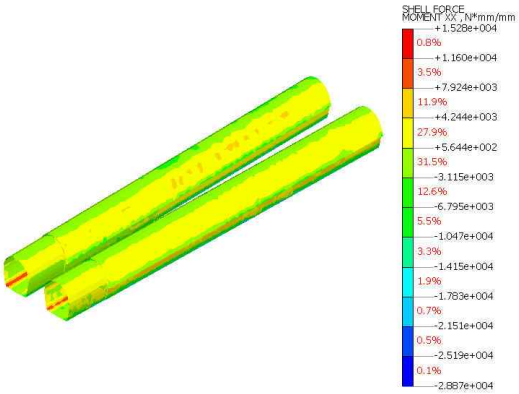
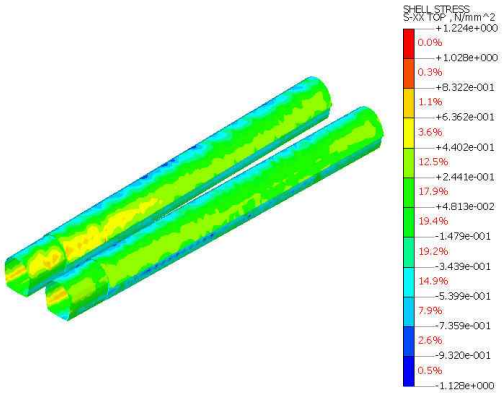
검토위치	지진시 단면력			공칭 단면력			판 정
	Mu(kN·m)	Pu(kN)	Vu(kN)	ØMu(kN·m)	ØPu(kN)	ØVu(kN)	
FPS-1	105.50	1290.06	231.21	254.31	3109.72	274.70	O.K
FPS-2	105.12	1272.32	229.47	255.09	3087.45	274.01	O.K
FPS-3	127.97	1501.79	274.74	320.20	3757.69	323.14	O.K

마. 지진하중에 따른 결과

<표 B.2.9> 해석 결과도

종방향응력도	전단응력도
	

최대주응력도	최소주응력도
	

콘크리트라이닝 모멘트도	콘크리트라이닝 응력도
	

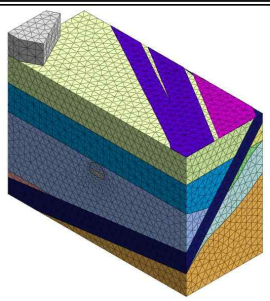
B.2.5 단층파쇄대 통과구간의 내진성능 평가 예

가. 해석개요

내진성능 평가 요령에 근거하여 단층파쇄대 통과구간에 대해 실제 지진파를 이용한 응답이력해석(동적 해석) 수행

나. 해석조건 및 해석모델링

<표 B.2.10> 해석 조건 및 모델링

해석조건	해석 모델링
• 적용 지보패턴 : PD-3, PD-4, PD-5 • 해석영역 : 좌우 5.0D 이상, 하부 4.0D 이상, 상부 지표면까지 모델링 • 해석 모델 : Mohr-Coulomb 모델 • **철근보강 여부 : 철근보강**	

다. 해석 물성치

<표 B.2.11> 적용 물성치

구 분	탄성파속도(m/s)		Ed (MPa)	Gd (MPa)	Kd (MPa)	vd
	Vp	Vs				
토 사	850	390	785	287	981	0.367
Ⅳ등급	1,900	920	5,467	2,030	5,950	0.347
Ⅲ등급	2,200	1,100	8,231	3,087	8,231	0.333
Ⅱ등급	3,000	1,600	17,676	6,792	14,822	0.301
단층파쇄대	1,650	790	3,786	1,401	4,244	0.351

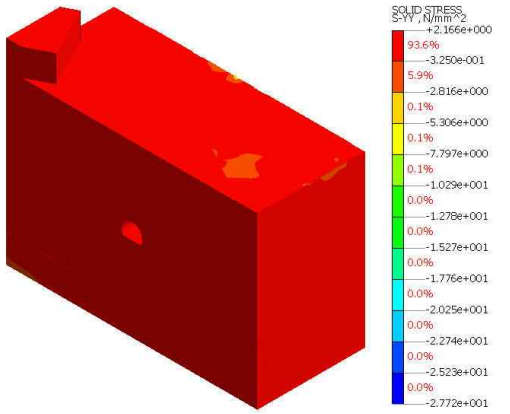
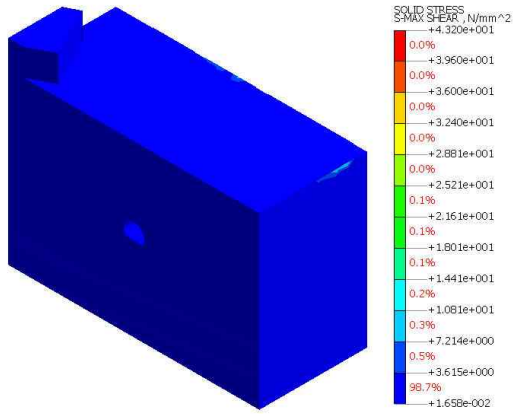
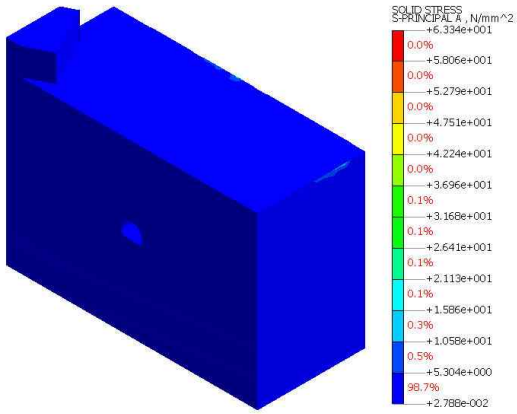
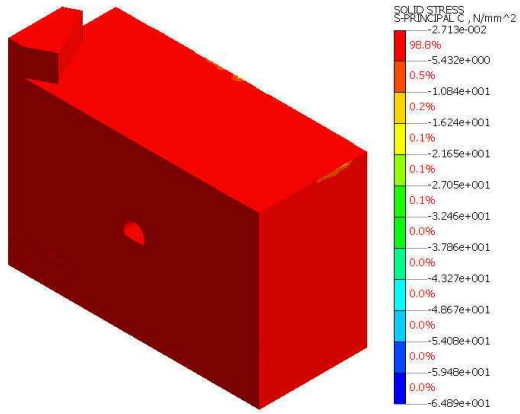
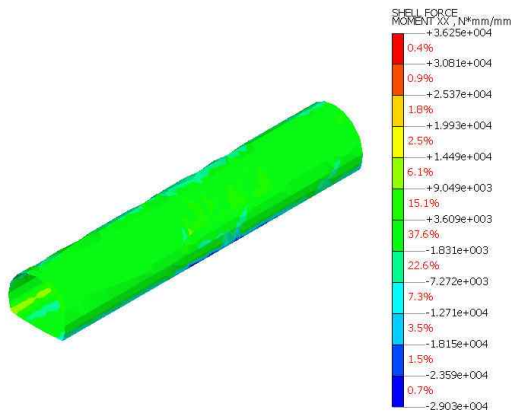
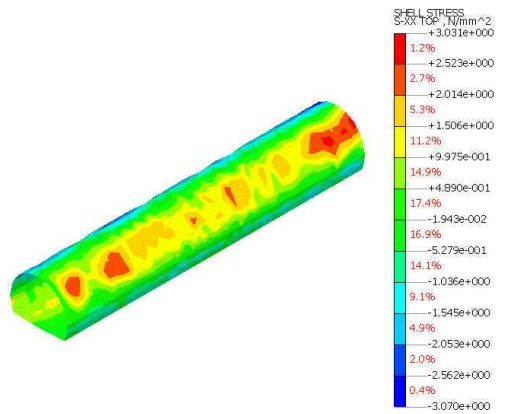
라. 해석결과

<표 B.2.12> 해석 결과표

검토위치	지진시 단면력			공칭 단면력			판 정
	Mu(kN·m)	Pu(kN)	Vu(kN)	ØMu(kN·m)	ØPu(kN)	ØVu(kN)	
PD-3(무근)	0.86	0.28	43.80	1.2	1.0	94.31	O.K
PD-4(무근)	0.83	0.52	85.02	1.2	1.0	94.31	O.K
PD-5	136.73	1956.65	240.42	240.15	3436.51	300.32	O.K

마. 지진하중에 따른 결과

<표 B.2.13> 해석 결과도

종방향응력도	전단응력도
	
최대주응력도	**최소주응력도**
	
콘크리트라이닝 모멘트도	**콘크리트라이닝 응력도**
	

B.3 굴착식 터널의 내진성능 향상 방법

B.3.1 개요

굴착식 터널의 운용중 지진으로 인한 피해 발생시 보강대책은 터널 구조물, 라이닝의 인성(Toughness)을 증대하는 것이 기본적인 방향이 될 수 있으며, 이는 국내외 기준에서도 제시되어 있다(KDS 27 17 00, 일본 터널 표준시방서(산악공법), FHWA-NHI 등).

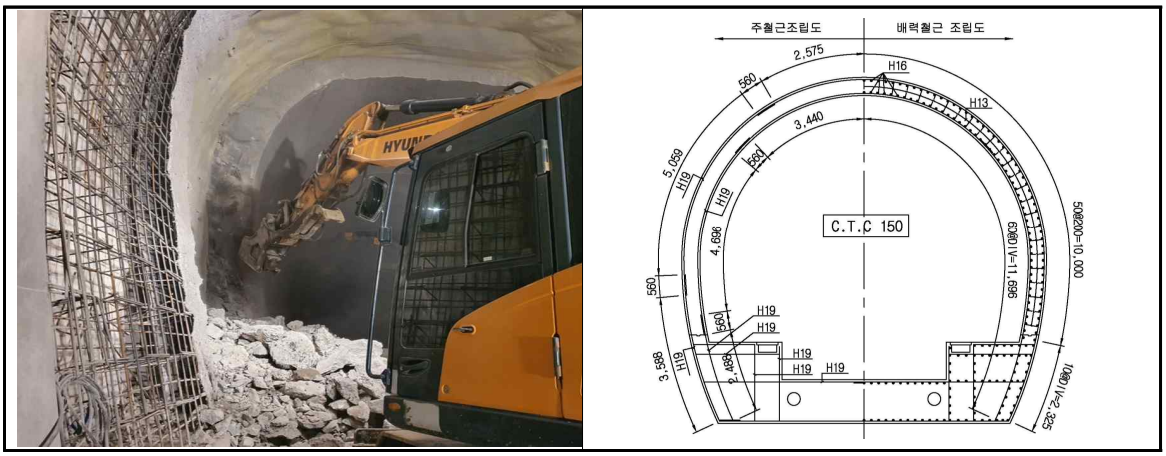
인성을 증대시키는 방법으로는 라이닝 철근보강 및 섬유시트 보강이 대표적인 사항이며, 주요 공법에 대한 특성은 다음과 같다.

B.3.2 라이닝 내진성능 향상 방안

가. 라이닝 철근보강

(1) 내진성능 향상 라이닝 설계 및 시공

라이닝 철근보강은 지진설계하중에 부합되는 철근량을 산정한 후 철근배근도를 다음과 같이 작성하고 시공하게 된다. 이 경우 지진으로 인해 붕락된 라이닝은 사전철거 한다.


주철근조립도
배력철근 조립도
2,575
560
H16
H13
3,440
5,059
H19
H19
4,686
C.T.C 150
560
H19
H19
H19
H19
H19
3,588
H19
2,488
560
560
H19
H19
H19
H19
H19

(2) 철근보강 라이닝 시공방법(KCS 27 40 05, 현장타설 라이닝)

<표 B.3.1> KCS 코드에 포함되어 있는 철근보강 라이닝 시공방법

- 콘크리트라이닝을 철근으로 보강하여야 할 경우에는 보강 목적에 부합하도록 시공하여야 하며 이의 가공 및 관리는 KCS 14 20 11(철근공사)을 따른다. - 가공된 철근은 콘크리트가 타설되기 직전까지 철근 콘크리트의 기능 발휘에 유해한 요인이 개입되지 않도록 관리하여야 한다.

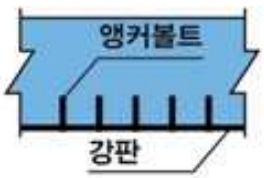
- 철근이 아치형으로 조립될 경우에는 철근망의 처짐이 발생하지 않도록 조립하여야 하며 소요 피복두께가 확보될 수 있도록 조치를 취하여야 한다. - 철근망 조립 시 방수막이 손상되지 않도록 유의하여야 하며 이물질을 깨끗이 청소한 후 콘크리트를 타설하여야 한다.

나. 시트 보강

(1) 시트 보강 방법 및 특성

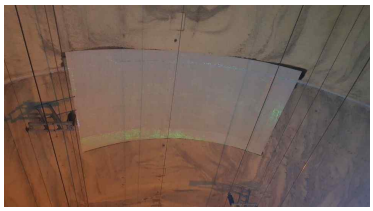
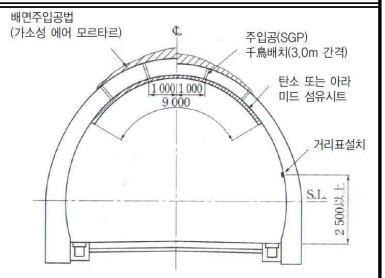
- 내진성능 향상을 위한 시트 보강은 아래 표와 같이 섬유시트(아라미드, 탄소섬유 등) 및 강판접착으로 나눌 수 있다.
- 섬유시트의 경우 아라미드 시트 및 탄소섬유 시트 등이 있으며, 아라미드의 경우 부도체로서 기존 운영중 터널의 종류(도로터널, 철도터널 또는 기타)에 따라 적용성을 검토하여야 한다.
- 강판접착의 경우 강판자체의 강성이 커 원형의 굴착식 터널에서는 밀착시공에 어려움이 있다.

<표 B.3.2> 시트 보강 방법 및 특성

보강공법	섬유 시트(아라미드, 탄소섬유 등)	강판접착
공법 개요	- 기존 콘크리트표면에 에폭시수지를 사용하여 아라미드 시트 접착	- 콘크리트표면에 접착수지로 강판 접착
개요도		
특성	- 경량, 고강도 및 자중증가 미미 - 난연 및 부도체 재료로서 전차선	- 시공실적 다수, 자중 증가 - 전차선이 설치되는 지하철·철도

보강공법	섬유 시트(아라미드, 탄소섬유 등)	강판접착
	이 설치되는 지하철·철도터널 적용성 우수 - 건축한계 영향 없음	터널에서의 적용성 곤란 - 건축한계 영향 없음 - 전차선의 고압전류 영향으로 안전사고 우려 - 원형의 굴착식 터널에서는 밀착시공 어려움
유지관리	-	- 강판 들뜸현상 및 강판 표면 유지관리 필요

<표 B.3.3> 국내외 섬유 시트 보강 사례

국내사례		해외 사례(일본)
경부고속철도(제6-4) 식장터널	돔형 전력구	
		
		1965년에 준공된 철도터널 라이닝 두께 부족 및 배면 공동에 대한 대책으로 보강 시행

(2) 섬유시트 보강 시공방법 (아라미드 섬유의 경우)

① 재료

<표 B.3.4> 아라미드 섬유시트의 품종별 물성 및 접착제(SKRW, SKRS, SKRN)의 물성

품 종	섬유중량 (g/㎡)	섬유두께 (mm)	인장강도 (kg/㎠)	인장탄성률 (kg/㎠)
A280	280	0.194	21,000이상	1,200,000
A415	415	0.288	21,000이상	1,200,000
A830	830	0.576	21,000이상	1,200,000

품 명	물 성	기준치(kg/㎠)	시험방법
SKR	압축강도	700이상	ASTM D695
	인장전단 접착강도	100이상	ASTM D1002
	인장강도	300이상	ASTM D638

* W : 겨울용, S : 여름용, N : 일반용
* 상기 아라미드 섬유시트별 물성은 예로 제시한 것으로서 내진성능 향상 방법의 결과에 따라 적정 품종을 사용하도록 한다.

② 준비작업

(a) 아라미드 섬유시트 절단

- 시공계획에 따라 아라미드 섬유시트를 아라미드 전용 가위나 커터 또는 그라인더를 이용하여 필요한 길이로 자른다.
- 주의사항 : 섬유시트의 형상이 흐트러지지 않게 최대한 주의하여야 한다.

(b) 콘크리트 표면 정리

- 아라미드 섬유시트와 콘크리트부재 사이에 충분한 접착력을 확보하기 위하여 콘크리트면을 최대한 평활하게 정리한다.

(c) 이물질 제거

- 콘크리트 표면의 이물질 등을 압축공기, 진공청소기 등으로 완전히 제거한다.

(d) 손상부위 보수

- 콘크리트면에 현저한 결손이 있을 경우, 고강도 모르타르나 에폭시 모르타르 등으로 결손된 부분을 복구한다.
- 균열부위 등은 에폭시로 균열보수 후, 시공한다.

(e) 프라이머 도포

- 시공면 청결상태를 확인하고 계절 및 온도를 고려하여 적정 프라이머 종류 를 선택한다.

- 프라이머의 주제와 경화제를 무게비 2:1(저울사용 권장)로 혼합용기에 담아 전동믹서로 색상이 균일하게 될 때까지 혼합시킨다.
- 적당한 배분용기로 혼합된 프라이머를 옮긴 다음, 시공면에 도포롤라로 균일하게 도포하며, 도포량은 시공면의 상태에 따라 다르지만 일반적으로 250g/㎡를 도포한다.
- 손으로 만져 끈적거림이 없는 상태가 되면 완전히 건조된 것이며, 다음 공정을 수행할 수 있다.

③ 아라미드 섬유시트 부착

(a) 접착제 준비

- 시공면의 면적, 형태, 가용인원, 작업환경, 가사시간 등을 고려하여 시공계획을 수립하고 적절한 함침용 레진 종류를 결정한다.
- 준비한 함침판을 평평한 바닥에 놓는다. 함침판은 단순 평판이어도 무방하다.
- 함침용 레진의 주제와 경화제를 무게비 2:1(저울사용 권장)로 혼합용기에 담아 전동믹서로 색상이 균일하게 될 때까지 혼합시킨다.

(b) 접착제 도포

- 절단된 아라미드 섬유시트를 함침판 위에 접힌 부분 없이 펼쳐 놓는다.
- 탈포롤라를 이용하여 혼합된 레진을 아라미드 섬유시트 섬유방향으로 문질러 레진이 아라미드 섬유시트에 충분히 스며들도록 함침작업을 수행한다. 함침은 중앙부에서 양 끝단 방향으로 진행하는 것이 바람직하며, 주의 깊은 함침작업을 통해 레진이 섬유 아래쪽으로 배어 나오도록 하여야 한다.
- 함침작업이 완료되면 고무주걱 등을 사용하여 시트표면에 남아있는 수지를 긁어서 제거한다. 시트표면에 최소한의 수지만 남아있어야 시공면에 시트를 잘 부착시킬 수 있다.
- 함침작업 시 필요한 함침용 레진량은 다음과 같다.

  SK-A280 : 700 ~ 800 g/㎡

  SK-A415 : 1,100 ~ 1,200 g/㎡

  (* 상기 함침용 레진량은 예로 제시한 것으로서 내진성능 향상 방법의 결과에 따라 적정 레진량 또는 다른 재료를 사용하도록 한다.)

(c) 아라미드 섬유시트 부착

- 함침이 완료된 아라미드 섬유시트를 시공면으로 옮겨 부착시킨 후 롤러나 고무주걱 등을 사용하여 강하게 밀착시켜 시공면과 시트사이의 기포와 과량의 함침용 레진을 제거하여 준다. 함침작업 장소와 시공면과의 거리가 멀거나 이동이 불편한 경우에는 함침이 완료된 아라미드 섬유시트를 적당한

크기로 접어서 옮길 수 있다.

- 2겹 이상의 아라미드 섬유시트를 시공하는 경우에는 1겹의 함침용 레진의 경화가 어느 정도 진행되어 시공면에서 흘러내리지 않을 때까지 기다린 후에 동일한 방법으로 2겹 째의 시공을 실시한다. 1겹 부착 후 2겹째 시공이 가능한 시간은 레진의 종류와 대기온도에 따라 크게 달라지나, 일반적으로 1일 2겹까지의 시공은 가능하다.
- 주의사항

주의사항 1 : 레진이 함침된 아라미드 섬유시트를 시공면까지 옮길 때 이물질에 오염되지 않고 섬유배열이 흐트러지지 않도록 주의하며, 지나치게 작게 말거나 접지 않도록 한다.

주의사항 2 : 시공면에 아라미드 섬유시트 부착 후 함침용 레진의 경화전에 시트가 흘러내리거나 떨어지는 현상이 발생하는지를 확인할 필요가 있다.
만약 이런 현상이 발생한다면 부착시 시트와 시공면사이의 기포를 충분히 제거해 주지 않았거나, 함침용 레진이 지나치게 많이 아라미드 섬유시트 표면에 남아 있을 가능성이 있다.

주의사항 3 : 기대한 보강효과를 발현하기 위해서는 아라미드 섬유시트가 함침용 레진에 완전하게 함침되어야 한다. 만약 함침판에서의 함침이 충분하지 않을 경우에는 함침된 시트를 시공면에 부착한 후 시트표면의 색깔(청녹색)이 균일하게 될 때까지 도포롤러를 이용한 함침작업을 반복하여야 한다.

(d) 현장여건에 따라 함침판의 사용이 불합리한 경우에는 다음의 작업방법으로 시공할 수 있다.

작업방법 1 : 시공면에 함침용 레진을 도포한다.

작업방법 2 : 레진이 도포된 시공면에 아라미드 섬유시트를 부착한다.

작업방법 3 : 부착한 아라미드 섬유시트 위에 함침용 레진을 도포하여 부착한 아라미드 섬유시트가 함침용 레진에 완전하게 함침되도록 한다.

④ 양생

아라미드 섬유시트 시공 및 경화 후 설계강도가 발현되기까지는 충분한 양생기간을 확보하여야 한다.

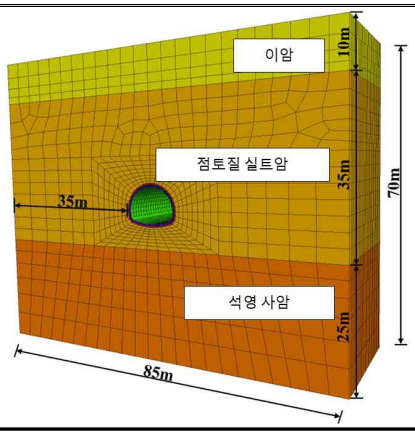
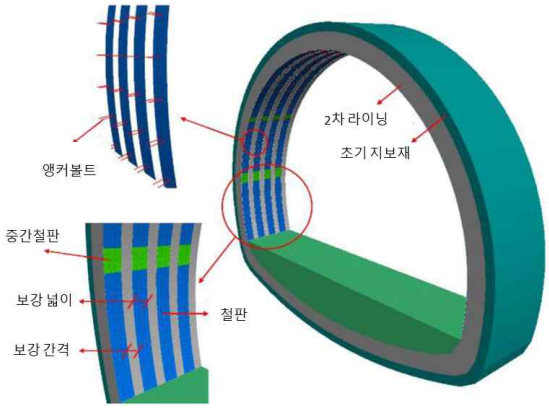
⑤ 도장 마감

(a) 아라미드 섬유시트 시공 후 필요에 따라 적절한 마감도장을 수행한다. 마감도장 시공방법은 각 도료의 표준시공법에 준한다.

(b) 마감도장은 함침용 레진의 초기경화 후에 실시하여야 하며, 초기 경화에는 함침용 레진 종류와 대기온도에 따라 많은 차이가 나지만 대체적으로 약 2일 정도가 소요된다.

다. 해외 강판 보강 사례 - 공용중인 고속도로 터널의 강판접착 보강에 대한 사례연구(Chen et al., 2020)

(1) 터널보강용 강판 설계를 위한 3차원 수치해석

수치해석 모델링	강판접착 모델링
	

<그림 B.3.2> 지반 및 터널 수치해석 모델링 및 강판접착 모델링

- 수치해석으로부터 보강강판의 두께, 넓이, 간격을 조절해 가며 수직수평 변위, 전단력 및 인장력을 계산하고 가장 효율적인 두께, 넓이, 간격을 설정하였다.
- 수치해석에 활용한 암반 및 터널 라이닝의 물성은 <표 B.3.5>와 같으며, 강판 및 앵커볼트의 물성은 <표 B.3.6>과 같다.
- 수치해석 결과 두께 8 mm, 넓이 30 cm의 강판과 설치간격 20 cm가 가장 효과적인 설계로 판단되었다.

<표 B.3.5> 수치해석에 사용한 암반 및 터널 라이닝의 물성(Chen et al., 2020)

재료	탄성계수 (MPa)	포아송비	단위중량 (kN/㎥)	점착력 (kPa)	내부마찰각 (°)
이암	472	0.31	25.9	200	24.2
점토질 실트암	1.162	0.30	26.1	250	28.8
석영 사암	1.700	0.28	26.7	1,500	39.6
연약 이암	395	0.31	22.8	28	12
연약 점토질 실트암	992	0.30	23.5	44	18
초기 지보재	28.800	0.167	25	-	-
2차 라이닝	31.500	0.167	25	-	-

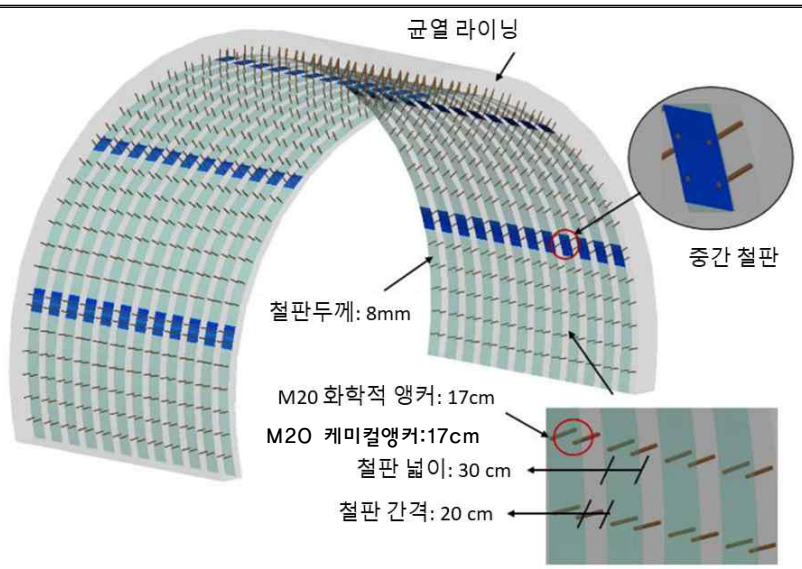
<표 B.3.6> 수치해석에 사용한 강판 및 앵커볼트의 물성(Chen et al., 2020)

유형	탄성계수 (GPa)	포아송비	단위중량 (kN/㎥)	항복강도 (MPa)	한계강도 (MPa)
Q235 스틸	200	0.3	78.5	235	375
M20 화학앵커볼트	210	0.3	78.5	400	500

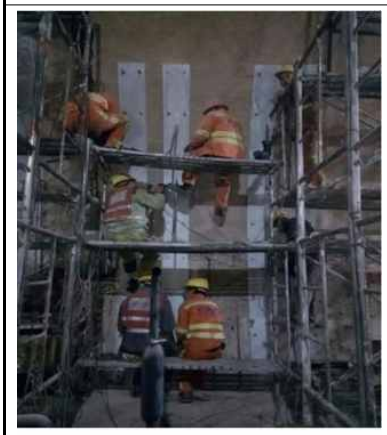
(2) 현장에의 적용

- <그림 B.3.3>과 같이 두께 8 cm, 넓이 30 cm의 Q235 등급 강판을 20 cm 간격으로 설치하여 터널 보강을 실시하였다.
- 보강 절차는 <그림 B.3.4>와 같다.

터널 강판 보강 모식도



<그림 B.3.3> 터널 강판 보강 모식도

보강 공사 작업 사진		
(a)	(b)	(c)
 (d)	(e)	(f)

1) 방화코팅 레이어 제거
2) 누수 방지를 위한 기존의 라이닝 균열 방수마감처리
3) 기존 누수가 확인될 경우, 시멘트모르타르를 사용하여 방수마감처리
4) 라이닝 표면 정리 및 청소(그림 a)
5) 볼트 구멍 생성
6) 강판 청소 및 도금처리(그림 b)
7) 강판-라이닝 볼트 결합(그림 c, d)
8) 화학적 앵커 볼트 결합(그림 e)
9) 겹침 강판을 활용하여 두 강판 연결(그림 f)
10) 강판과 라이닝 사이 에폭시 주입
11) 방화코팅 및 마감처리(그림 f)

<그림 B.3.4> 강판 활용 터널 보강 공사 작업 절차

(3) 보강 후 결과

- 강판 보강 1년 경과 후, 누수, 균열, 박리 등의 현상이 발견되지 않았다.

참고문헌

(1) 건설도서 편집부, (2002), “지하 구조물의 내진설계”, 건설도서

(2) 국토교통부, (2018), “터널 내진설계 KDS 27 17 00”, 국토교통부

(3) “일본 터널표준시방서(산악공법편)・동해설”, 2006

(4) 정지승, 문인기, & 민대홍. (2013). 가압식 브레이싱 보강에 의한 지중박스구조물의 내진성능향상 방법. Journal of the Korean Society of Safety, 28(4), 97-102.

(5) 國土交通省都市・地域整備局街路交通施設課 (平成22年 3月) 地下街耐震に關する調査報 告 書

(6) Abrahamson. (1992), “Non-stationary Spectral Matching”.

(7) Bakis, C. E., Ganjehlou, A., Kachlakev, D. I., Schupack, M., Balaguru, P., Gee, D. J., & Busel, J. P. (2002), “Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures”, Reported by ACI Committee, 440.

(8) Chandler, A. (Ed.). (1997), “The Hyogo-ken Nanbu (Kobe) Earthquake of 17 January 1995: a field report by EEFIT”, Earthquake Engineering Field Investigation Team, The Institution of Structural Engineers.

(9) Chen, H., Lai, H., Qiu, Y., and Chen, R. (2020), "Reinforcing Distressed Lining Structure of Highway Tunnel with Bonded Steel Plates: Case Study", Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol. 34, No. 1, pp.04019082.

(10) Chen, Z. Y., Chen, W., & Bian, G. Q. (2014), “Seismic performance upgrading for underground structures by introducing shear panel dampers”, Advances in Structural Engineering, 17(9), 1343-1357.

(11) Chen, Z., & Zhou, Y. (2019), “Seismic performance of framed underground structures with self-centering energy-dissipation column base”, Advances in Structural Engineering, 22(13), 2809-2822.

(12) Iida, H., Hiroto, T., Yoshida, N., & Iwafuji, M. (1996), “Damage to Daikai subway station”, Soils and foundations, 36(Special), 283-300.

(13) Kawamura, K., Fukuura, N., Okamoto, S., & Shindoh, T. (2013, August), “Seismic retrofitting method for underground reinforced concrete structures by embedding plate anchored shear reinforcement bars”, In Proceedings of the 3rd International Conference on Sustainable Construction and Technologies-SCMT3, Kyoto, pp. 18-21.

(14) Lilhanand and Tseng. (1988) “Development and Application of Realistic Earthquake Time Histories Compatible with Multiple-Damping Design Spectra”.

(15) Lilhanand and Tseng. (1987) “Generation of Synthetic Time Histories Compatible with Multiple-Damping Design Response Spectra”.

(16) Ma, C., Lu, D., & Du, X. (2018), “Seismic performance upgrading for underground structures by introducing sliding isolation bearings”, Tunnelling and Underground Space Technology, 74, 1-9.

(17) Maekawa, K., Okamura, H., & Pimanmas, A. (2003). “Non-linear mechanics of reinforced concrete”, CRC Press.

(18) Morgan, D. R., Kazakoff, K., & Ibrahim, H. (2006), “Seismic retrofit of a concrete immersed tube tunnel with reinforced shotcrete”, In Shotcrete for underground support X pp. 270-284.

(19) Morisaki, M., Furuta, M., & Abe, K. (2000, November), “Mechanical properties of steel pipe attachment method applied to seismic strengthening”, In proceedings of tunnel engineering, Japan Society of Civil Engineers, Vol. 10, pp. 87-94

(20) Neaim and Lew. (1995) “On the Use of Design Spectrum Compatible Time Histories”.

(21) Nishiyama, S., Kawama, I., & Haya, H. (2004, August), “Analysis of the cut and cover tunnels damaged in the South-Hyogo earthquake of 1995”, In 13th world conference on earthquake engineering, Vancouver, Canada, Paper No. 1511, pp. 1-11.

(22) Nishiyama, S., MUROYA, K., HAYA, H., TANAMURA, S., & NISHIMURA, A. (1999). “Seismic design of cut and cover tunnel based on damage analyses and experimental studies”, Quarterly Report of RTRI, 40(3), 158-164.

(23) Rizzo et al., (1975), “Development of Real/Synthetic Time Histories to match Smooth Design Spectra”.

(24) Seismic Retrofitting Manual for Highway Structures: Part 2-Retaining Structures, Slopes, Tunnels, (2004), Culverts, and Roadways, FHWA-HRT-05-067.

(25) Shadabi, S., Parvizi, M., Rabeti Moghadam, M., & Mohammad-Alizadeh Samani, E. (2021), “Attenuation Potential of Geofoam as Cover Material in Cut and Cover Tunnels during Earthquakes”, Journal of Earthquake Engineering, 1-28.

(26) Silva and Lee, (1987), “State of the art for Assessing Earthquake Hazards in the United states”.

(27) Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels－Civil Elements, (2009), FHWA-NHI-10-034.

(28) Tetsuya Takakura, Yoshiomi Kosato, Yoshihiro Inoue, Jiro Aida, Kiyoshi Sato, Yoshihisa Sakhira, (2011), “Planning and construction of seismic reinforcement of existing excavated tunnels on railway business lines”, Civil Engineering Construction Technology presentation.

(29) Xu, Z., Du, X., Xu, C., & Han, R. (2020), “Numerical analyses of seismic performance of underground and aboveground structures with friction pendulum bearings”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 130, 105967.

기존 시설물(터널) 내진성능 향상요령

발행 국토안전관리원

2004년 5월 제정
2011년 7월 개정
2022년 5월 개정

* 본 요령의 내용에 관한 질의 및 건의 사항은 국토안전관리원으로 연락하여 주시기 바랍니다.

국토안전관리원 (https://www.kalis.or.kr)
(우) 52856 경상남도 진주시 에나로 128번길 24 대표전화 1588-8788

본 요령은 국토안전관리원 홈페이지에서 다운로드 받으실 수 있습니다.