

광양대교의 지중정착식 앵커리지터널 설계사례



장학성
(주)유신코퍼레이션
지반본부 전무



장석부
(주)유신코퍼레이션
지반·터널2부 이사



장영일
(주)유신코퍼레이션
기초설계팀 이사



권 승
(주)유신코퍼레이션
지반·터널2부 차장

1. 서론

광양대교는 여수국가산업단지 진입도로 개설공사중 묘도-광양간을 잇는 해상 현수교로서 총연장 2,260m, 주경간장 1,545m인 세계 3위 규모의 장대교량이다. 본 교량은 여수와 광양간의 수송거리·시간 단축을 통한 물동량 수송을 원활히 하여 물류비용을 절감하고 광양만권에 대한 설비투자여건개선 및 2012년 여수세계박람회, 한려해상 등 서남해안 관광개발 여건개선을 위해 계획되었다.

광양항 입구에 건설되는 광양대교는 타정식 현수교로서 장래에 운항이 예상되는 초대형 컨테이너선(18,000TEU 급)의 안전한 통행을 가능하게 하는 주경간장 1,545m를 확보하도록 앵커리지 위치를 선정하였으며, 이 중 묘도측 앵커리지는 지중정착식 앵커리지터널로 계획하였다.

일반 교통터널은 공사중 안정성이 가장 중요한 요소이나 교량의 지중정착식 앵커리지를 위한 터널은 장대교량

의 지지점 형성을 위한 하중에 대한 안정성에 더욱 중요한 특징이 있다. 이에, 본 고에서는 지중정착식 앵커리지에 대한 내용을 기초기능보다는 터널안정성 측면에서 소개하고자 한다.

2. 앵커리지의 정의 및 형식

타정식 현수교에 있어서 앵커리지는 케이블로부터의 장력에 저항하는 구조물로서 지반의 지지력과 외적 안정성을 만족하도록 설계되어야 한다. 통상 현수교의 케이블 단부에는 보강거더를 지지하는 모든 하중이 집중되기 때문에 앵커리지에도 매우 큰 하중이 작용하게 된다. 이와 같은 앵커리지의 형식은 케이블 하중에 저항하는 방식에 따라 크게 중력식, 터널식 그리고 지중정착식으로 구분된다.

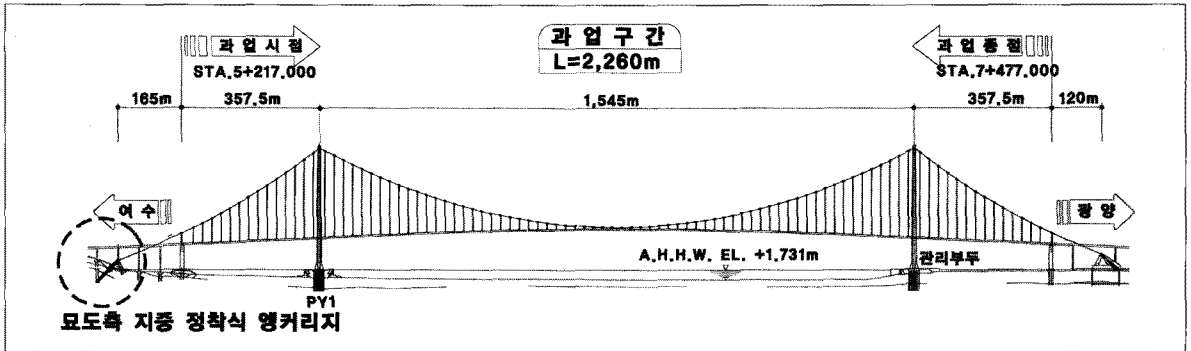


그림 1. 광양대교 현황도

중력식 앵커리지는 구조물의 자중으로 케이블 하중에 저항하는 방식으로 지지 메커니즘이 가장 확실하나, 앵커리지 구조물의 자중을 확보하기 위해 대규모의 콘크리트가 필요하고 앵커리지의 전면부가 해수에 노출되므로 이에 대한 별도의 차수시설이 필요한 단점이 있다.

터널식 앵커리지는 비교적 양호한 지반을 굴착하여 강재프레임을 지중에 매설하고 케이블을 강재프레임에 연결하여 앵커블럭 콘크리트의 마찰저항으로 케이블 하중에 저항하는 방식이다. 중력식에 비해 콘크리트 타설량을 절감할 수 있으나, 일반적으로 경사터널 형태로 되어있어 시공성이 불량하다.

지중정착식 앵커리지는 본 과업에 채택한 방식으로서 앵커리지 케이블 정착을 위한 터널 형태의 챔버를 지중에 시공한 후 정착부와 주케이블을 연결하는 형식이다. 이

방식은 구체콘크리트의 타설량과 굴착량을 최소화하여 경제적인 시공이 가능하나 정착부의 암반상태가 양호해야 하는 제약조건이 있다. 다음의 표 1은 앵커리지의 형식별 개요도 및 적용 사례를 나타낸 것이다.

광양대교의 모도측 앵커리지는 당초 기본계획시에는 해상에 위치한 중력식 앵커리지로 설계되었으나, 광양항을 지나는 초대형 컨테이너 선박 운항의 안전한 항로 폭을 확보하기 위해 경간장을 1,545m로 늘이면서 앵커리지의 위치도 변경하게 되었다. 그림 2와 같이 경간장이 늘어남에 따라 앵커리지의 위치가 당초 해상에서 육상부로 이동하게 되어 주변 지형 및 지반조건과 도로 선형의 계획성 등을 고려하여 모도측 산지형에 앵커리지를 지중정착시키는 형식을 선정하게 되었다.

지중정착식 앵커리지는 현수교의 주케이블로부터 작

표 1. 앵커리지의 형식별 특징

구분	지중정착식 (채택안)	중력식	터널식
개요도			
사례	<ul style="list-style-type: none"> • High Coast, Askoy • Storda, Bomla 	<ul style="list-style-type: none"> • 광안대교 • 아카시대교 	<ul style="list-style-type: none"> • 세토대교 • 구루시마교

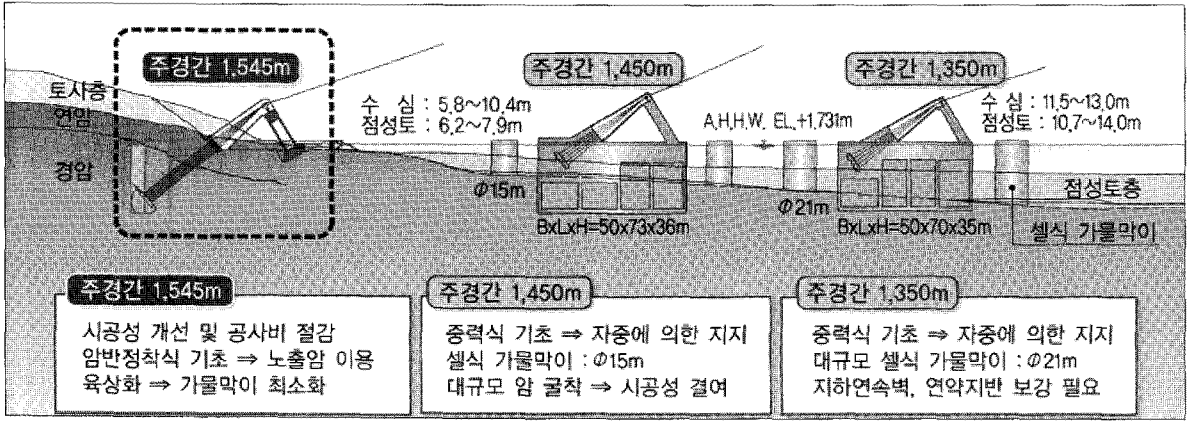


그림 2. 주경간장 변화에 따른 앵커리지의 위치 및 형식 선정

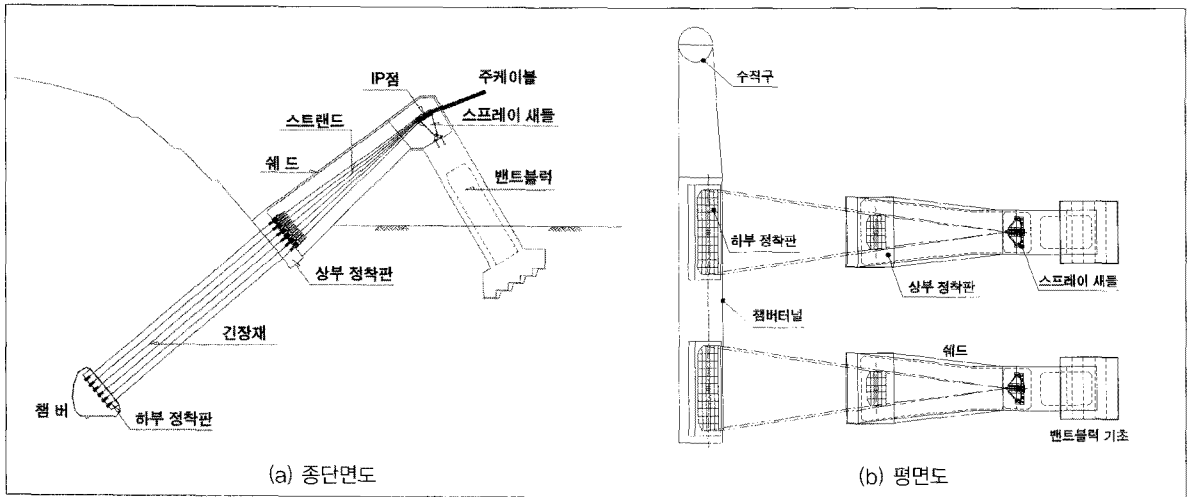


그림 3. 지중정착식 앵커리지의 구조

용하는 장력을 지중으로 분산시키는 목적으로 되어있어 일반적인 기초에 비해 복잡한 구조를 가진다. 정착판이 설치되는 챔버터널과 챔버터널 시공시 작업구로 사용되는 수직구, 현수구 주케이블이 각각의 스트랜드로 분할되는 스프레이 새들, 스프레이 새들을 받치는 벤트블러, 지중 챔버터널의 하부 정착판과 지상의 스트랜드가 연결되는 상부 정착판 그리고 상부 정착판과 하부 정착판을 서로 연결하여 긴장시키는 긴장재 등으로 지중정착식 앵커리지는 구성되며 각 구조별 명칭은 그림 3과 같다.

3. 지반조사 결과

모도축 앵커리지 구간에는 기본설계와 실시설계를 통해 총 17공의 시추조사와 실내 및 현장시험 그리고 물리탐사를 수행하고 이를 종합 분석하여 지반특성을 파악하였다. 그림 4는 모도축 앵커리지에 대한 시추조사 위치도 및 지층단면도를 나타낸 것이다. 본 구간의 기반암은 주로 사암으로 구성된 퇴적암이며, 관입암의 영향으로 부분적으로 심한 풍화를 보이기도 하나 대체로 암질상태는 양

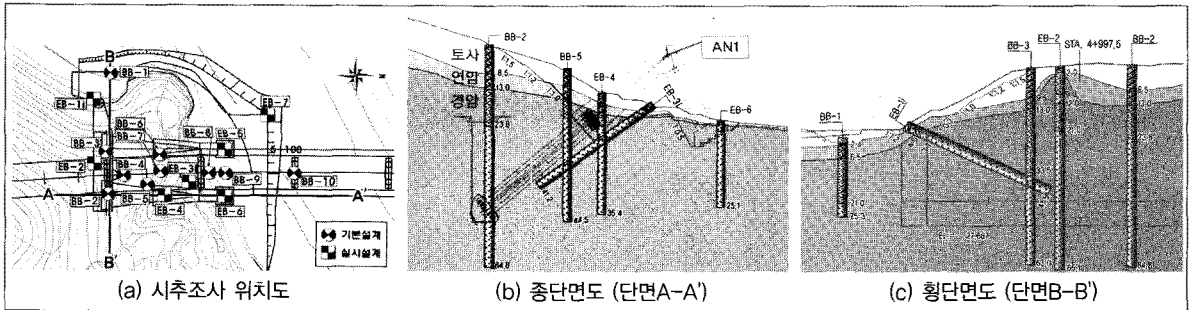


그림 4. 시추조사 위치도 및 지층단면도

표 2. 연속체 지반 설계정수

구분	단위중량 (kN/m ³)	점착력 (kPa)	내부마찰각 (°)	변형계수 (MPa)	포이송비
토사	20	15	30	65	0.32
풍화암	21	30	33	150	0.30
연암	24	380	37	1,000	0.26
경암	26	1,200	43	10,000	0.24

표 3. 불연속체 지반 설계정수

절리군	Dip dir.	JRC	간격 (m)	길이 (m)	JCS (MPa)	c (kPa)	φ (°)	K _n (MPa/mm)	K _s (MPa/mm)
J1	5/216	6	0.8	3.5	50	35	34	17.3	0.37
J2	49/345	10	1.2	3.0					
J3	54/105	8	1.4	2.8					

호하다. 시추조사를 통한 암반분류(RMR)결과 상부로부터 2m정도는 IV-등급이 분포하고, 지중 앵커리지 정착부가 위치하는 챔버터널을 포함한 대부분 구간은 II-등급 암반으로 양호한 암반상태를 나타냈다.

앵커리지의 설계 및 안정성 검토를 위해 산정한 연속체 및 불연속체 지반정수는 다음의 표 2, 표 3과 같다.

4. 지중정착식 앵커리지의 설계

지중정착식 앵커리지는 챔버터널과 챔버터널의 작업구로 사용되는 수직구로 구성되며 각 터널에 대한 세부 설계현황은 다음과 같다.

4.1 단면설계

챔버터널의 단면은 두께 1.5m, 가로 16.4m, 세로 7.2m의 하부 정착판의 설치와 터널 내 작업공간을 고려하여 폭 7.7m, 높이 7.8m 규모의 비대칭 형태로 계획하였으며, 터널 완공 후 긴장재에 의해 지반에 발생하는 응력집중을 완화하기 위해 직선형태의 정착판 설치부와 아치부의 접합이 원호형태로 이루어지게 하였다. 하부 정착판 반대편의 측벽부도 지반의 지지효과 및 작업안전성 향상을 위해 곡면으로 설계하였다. 수직구 단면은 구조적으로 유리하며 작업구로 활용할 수 있도록 직경 6.0m 규모의 원형으로 하였다. 챔버터널 및 수직구의 표준단면은 그림 5와 같다.

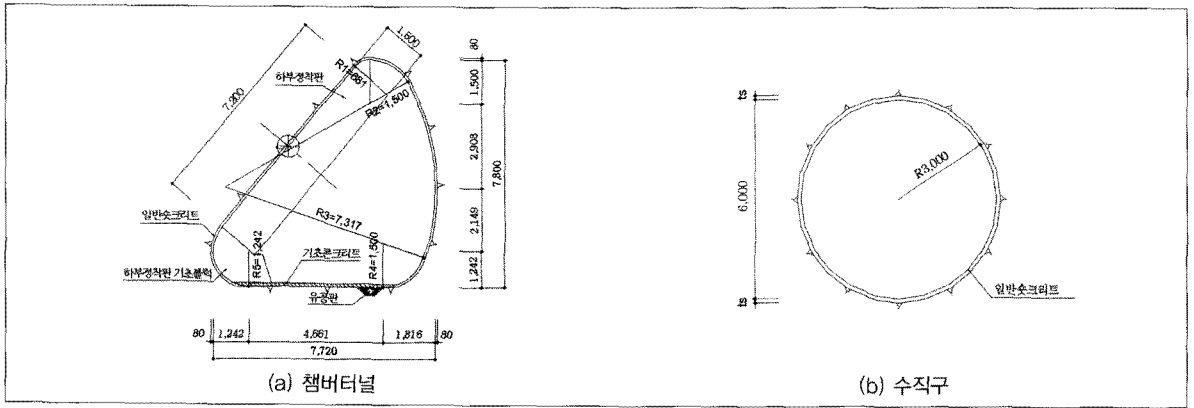


그림 5. 챔버터널 및 수직구의 표준단면

표 4. 앵커리지 터널의 표준지보패턴

구 분	챔버터널	수 직 구	
		지보패턴-1	지보패턴-2
굴진장	2.0m	2.0m	2.0m
숏크리트 두께	8cm	8cm	12cm
일반록볼트	길 이	3.0m	2.5m
	설치간격	(횡)2.0m, (종)2.0m	(횡)1.345m, (종)2.0m
Swelllex bolt	길 이	3.0m	-
	설치간격	(횡)2.2m, (종)2.6m	-

4.2 굴착 및 지보설계

챔버터널은 터널규모 및 압반상태를 고려하여 굴착공법은 전단면 굴착을 적용하였으며, 수직구는 챔버터널에 선시공되는 작업구로서 전단면 하향굴착으로 계획하였다. 발파공법으로는 챔버터널 구간에서는 평행심발공, 수직구에는 경사심발공을 적용하였으며, 챔버터널의 하부 정착판 접합부 및 아치부에는 원 압반의 손상을 최소화하여 앵커리지 시스템의 안정성 향상을 위해 노치(notch) 선균열 발파공법을 적용하였다.

지보량은 RMR 및 Q-시스템에 의해 산정하였으며, 지반 조건이 급변하는 수직구는 2개의 표준지보패턴으로 구분하였고 챔버터널 구간은 동일한 지보패턴으로 계획하였다. 표 4는 표준지보패턴을 정리한 것이다. 지보재로

서 숏크리트는 해수의 영향을 받는 환경을 고려하여 부식이 우려되는 강섬유 보강 숏크리트 대신 일반 숏크리트를 적용하고 록볼트는 방청처리 후 시공토록 계획하였으며, 하부 정착판 설치구간에는 긴장재 설치를 위한 천공시 작업 안전성 확보를 위해 팽창성 록볼트인 Swellex bolt를 적용하였다.

5. 안정성 검토

5.1 경험적 방법을 통한 안정성 검토

지중정착식 앵커리지의 안정성 검토방법은 터널식 앵커리지의 지지 매커니즘을 이용하였다. 췌기파괴의 상부

표 5. 쐐기 파괴법에 의한 안정성 검토

개요도	검토식
	$F_s = \frac{(W \cos \beta - T \sin(\phi/2))\mu + W \sin \beta + cA}{T \cos(\phi/2)} \geq 3.0$ <p> T, θ : 케이블 장력(kN)과 굴절각 β : 수평면과 쐐기면이 이루는 각 ($=\theta - \phi/2$) W : 암반 쐐기의 유효중량 (kN) c, A : 저면(활동면)의 점착력(kPa)과 단면적(m^2) ϕ, μ : 암반의 내부마찰각과 저면의 마찰계수($\tan \phi$) </p>



그림 6. 안정성 검토시 고려한 시공단계

면과 측면에 대한 마찰저항은 무시하고, 저면의 전단저항과 마찰저항만을 고려하였다. 또한, 파괴 쐐기에 대한 불확실성을 고려하여 기준 안전율을 2.0에서 3.0으로 강화하였다. 각종 실내시험을 통해 안정성 검토에 영향을 끼치는 주요 설계인자(암반의 점착력과 내부마찰각 및 단위중량)에 대한 정확한 값을 도출하였으며, 검토 결과 안전율은 3.28로 앵커리지 전체 안정성을 확보하였다.

5.2 수치해석을 통한 안정성 검증

쐐기 파괴법에 의한 경험적 안정성 검토에 이어 시공단계 및 불연속면 특성을 고려하기 위한 연속체 해석, 2차원 및 3차원 불연속체 해석 그리고 개구성 균열층리(bedding)를 가정한 해석을 수행하였다.

챔버터널은 일반적인 터널 내공방향의 하중을 받는 구

조와는 달리 터널 완공후 긴장재의 인장력에 의해 터널 외측방향의 하중이 작용하는 특수한 경우로서 그림 6과 같이 터널 굴착 및 지보단계, 긴장재에 의한 프리스트레싱 단계, 스트랜드 연결 후 안전을 평가를 위한 가상 극한 하중 단계로 구분되는 시공단계를 고려한 해석을 수행하였다.

연속체 해석 결과 수직구의 최대 변위는 0.7mm로 매우 안정하게 평가되었으며, 지보재의 단면력도 록볼트 최대 축력 9kN, 슛크리트 최대 압축응력 2.0MPa로 모두 허용치 이내로 계산되었다. 챔버터널은 터널 완공시 최대 1.4mm의 변위가 발생하고 현수교 케이블로부터의 사용하중 작용단계에서는 하부 정착판의 변위가 2.3mm로 예측되었다. 지보재의 단면력도 모두 허용치 이내로 계산되었으며, 앵커리지 시스템의 안전을 파악을 위한 가상 극한하중 작용시 설계 사용하중의 4배 까지 안정성

표 6. 연속체 해석 결과도

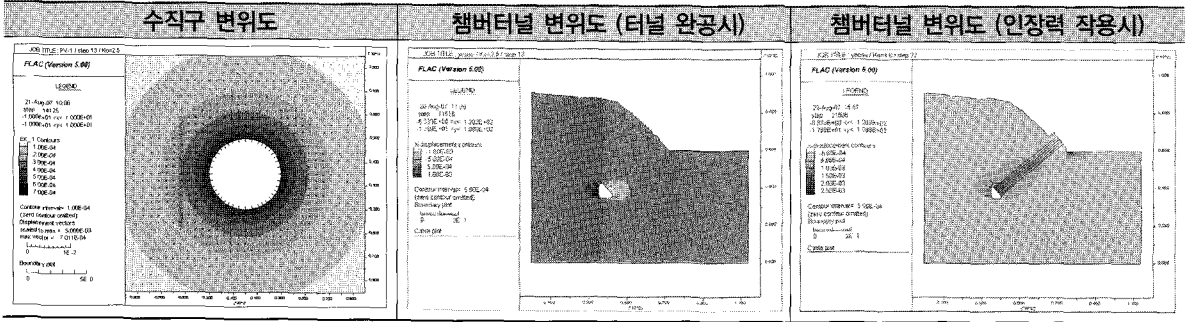
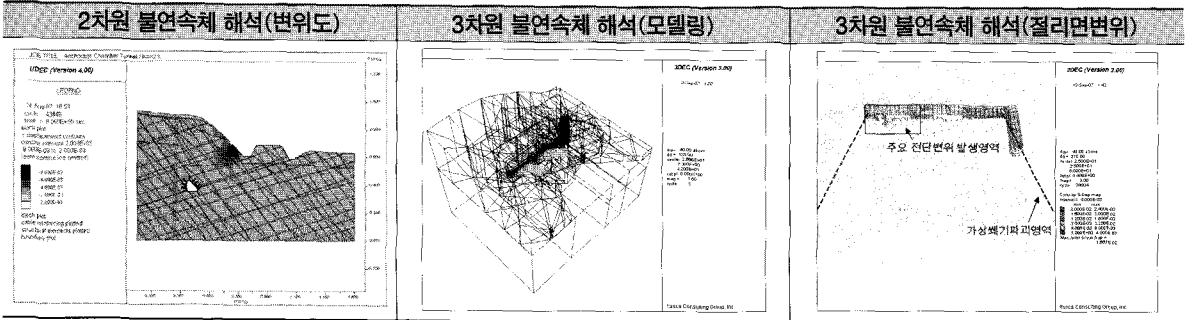


표 7. 불연속체 해석 결과도



이 확인되었다. 연속체 해석의 주요 해석결과도는 표 6과 같다.

암반의 불연속면을 고려한 안정성 검토는 2차원 및 3차원 개별요소해석법으로 수행하였다. 2차원 해석 결과 챔버터널의 최대 내공변위는 1.8mm, 케이블 인장력 작용시 정착판의 변위는 1.1mm인 비교적 적은 안정한 값을 보였으며 지보재의 단면력도 모두 허용치 이내로 나타났다. 케이블 인장력 작용시 최대 변위는 2mm 이내로 해석되었으며, 안전율 검토결과 4.0 이상의 인발하중에 대한 안전율을 확보하는 것으로 나타났다. 3차원 불연속체 해석결과 절리면 전단변위는 최대 6.5mm로 계산되었으며, 절리면의 전단변위는 일정한 방향성을 나타내지 않으며 서로 연결되지 않는 닫힌 상태로 지중정착 암반은 썬기파괴의 가능성이 없는 것으로 검토되었다. 표 7은 불연속체 해석의 주요 결과도를 나타낸 것이다.

지중정착식 앵커리지가 계획된 묘도측 지역은 사암의 퇴적암에 반암이 불규칙적으로 관입된 상태로 챔버 주변은 암질이 좋은 반암이 존재한다. 안전측 해석을 위해 사암의 배당(bedding)이 지표면까지 지속적으로 존재하는 것으로 가정된 유한요소해석을 수행하였다. 케이블 하중이 작용할 때 챔버에 최대 2.1mm의 변위가 발생하며, 하부 정착판에서 하중-변위곡선 분석결과 앵커리지는 3.0 정도의 안전율을 확보하는 것으로 검토되었다.

5.3 암반 Creep 거동에 따른 앵커리지 장기 안정성 검토

지속적인 케이블 하중을 받는 지지암반의 장기적인 거동분석을 살펴보기 위해 Creep 해석을 실시하였다. 실내에서 암반의 일축압축강도 대비 30%, 50%, 70%의 시험

표 8. 개구성 균열층리(bedding)를 가정한 해석

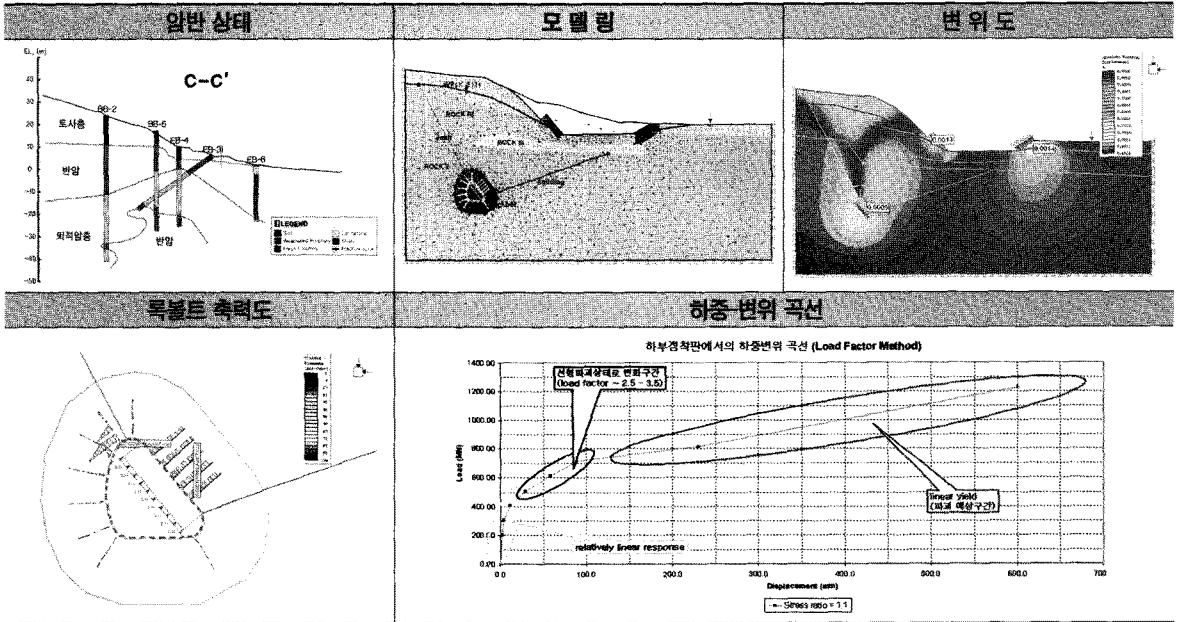
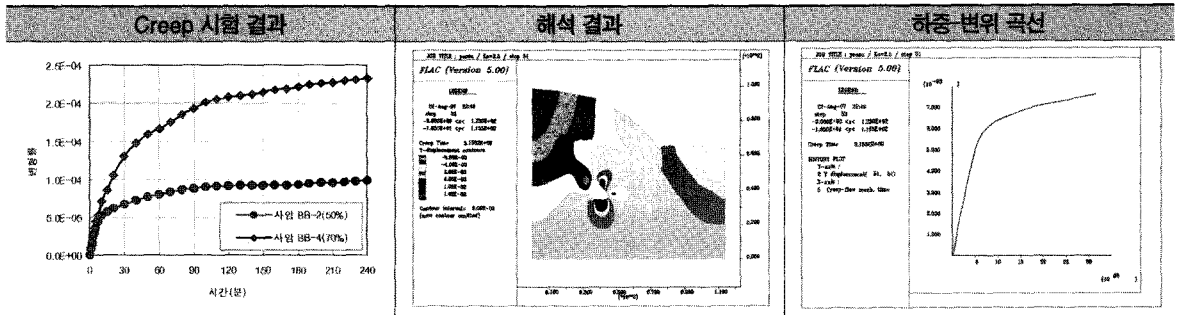


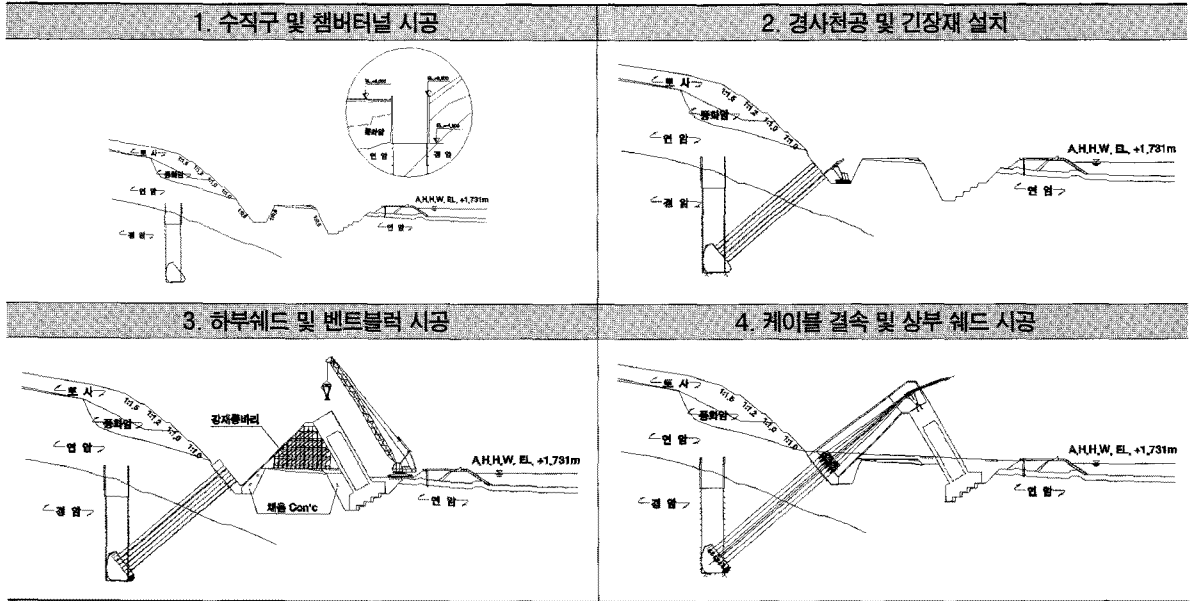
표 9. 암반 Creep 시험 및 해석



응력으로 암반 Creep 시험을 실시한 결과 응력비가 50% 이하가 되면 Creep에 대한 영향은 매우 작아졌다. 본 설계시 케이블 하중으로 인해 상부 정착판 주변 암반에 작용하는 최대응력이 2.2MPa이고, 암반의 평균 일축압축강도가 112MPa임을 고려할 때 설계 응력비는 2%이므로, 케이블 하중에 대한 Creep 영향은 무시할 수 있는 것으로 검토되었다.

암반 Creep 시험 결과로 산정된 Kelvin계수와 Maxwell계수를 이용하여 2차원 Creep 수치해석을 수행하였다. 검토 결과 챔버실에 존재하는 하부 정착판에 최대 7.4mm의 변위가 발생하고 그 이후는 수렴하는 것으로 나타나 암반의 장기거동에 대해 앵커리지는 안전한 것으로 검토되었다.

표 10. 지중정착식 앵커리지 시공순서



6. 지중정착식 앵커리지 시공방안

지중정착식 앵커리지의 시공은 크게 수직구 및 챔버터널의 시공단계와 긴장재 및 케이블의 설치단계로 구분되며, 시공순서를 정리하면 표 10과 같다. 앵커리지 시공에 있어서 가장 높은 정밀도를 요구하는 공종은 긴장재 설치를 위한 경사 천공작업으로서, 최신 암반 천공기를 적용하여 천공오차를 줄이고 파쇄구간에는 케이싱을 사용하여 굴진 직진성을 확보하도록 하였다. 또한 지하수 유입에 따른 긴장재의 부식을 방지하기 위해 이중 시멘트 그라우팅과 HDPPE관을 설치하였다.

7. 맺음말

광양대교는 경간장 1,545m의 국내 최장대 타정식 현수교로서 지형 및 지반조건 등을 고려하여 경간장 확보가

가능토록 터널을 이용한 지중정착식 앵커리지를 도입하였다.

각종 지반조사를 통해 지중정착식 앵커리지로서 케이블을 지하 암반에 정착시키기 적합한 양호한 암반상태를 확인하였고, 불연속면의 방향성이 케이블 하중에 유리한 방향으로 존재함을 확인하였다. 앵커리지의 안정성은 터널식 앵커리지 설계 기준을 적용하여 경험적 방법으로 활동 췌기에 대한 안정성을 확인하였으며, 지층 및 암반특성을 반영한 연속체 및 불연속체 수치해석을 통하여 안정성을 검증하였다.

지중정착식 앵커리지는 지반조건 및 입지조건이 확보된다면, 타 형식의 앵커리지에 비해 우수한 지지력을 얻을 수 있으며 공사비를 절감할 수 있어 장경간 현수교에 있어서 우수한 앵커리지 형식이라 판단된다.