

삼도붕이 전하는 자연의 선물, 부항다목적댐

Buhang Multi-Purpose Dam, The Present of Nature



유지영*



유재철*



원효재**



정찬균***

*GS건설 토목사업본부 상무
 **GS건설 토목사업본부 부장
 ***GS건설 부항다목적댐 설계팀 부장

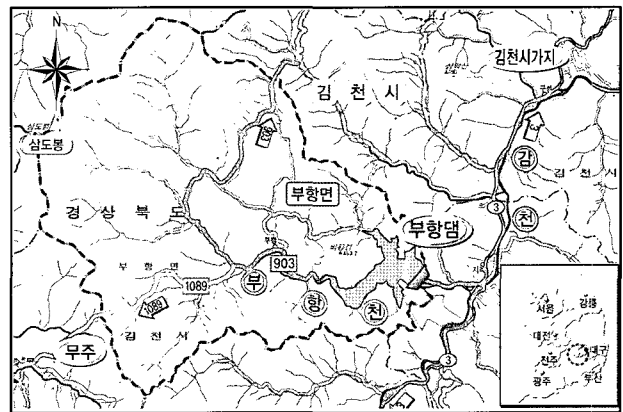
1. 머리말

김천시 부항면은 백두대간의 삼도붕에서 이어진 비룡봉과 부항천의 맑은 물이 만나 명경지수(明鏡止水)를 이루는 곳으로 예로부터 자연경관이 수려한 것으로 알려져 왔다. 비룡봉의 수려한 산자락에서 흘러내려온 물은 부항천을 따라 유유히 흐르다 감천과 만나 김천시내로 흘러들어간다. 청명한 자연을 김천시민들에게 연결시켜주는 부항천과 감천이건만, 가끔 잔혹한 피해를 안겨줄 때가 있다. 태풍 루사가 전국적으로 피해를 주던 2002년, 김천시는 폭우에 의한 홍수로 38명의 인명피해와 4,191억원의 재산피해를 감내할 수밖에 없었다. 상류에 홍수를 막아줄 수 있는 시설이 없는 김천시로서는 항구적인 홍수방어 대책수립의 필요성이 대두되었고, 이에 따라 시급히 2004년 부항다목적댐 기본계획을 수립하여 2006년 기본설계가 완료되었다.

앞서 언급한 바와 같이 부항다목적댐이 건설될 부항면은 맑은 물과 수려한 자연속에 묻힌 곳으로 댐건설 이후에도 환경을 보존하고 자연경관을 유지하는 것이 중요한 목표 중의 하나이다. 금회 부항다목적댐 시공사인 GS건설은 자연친화적 댐 건설을 위해 댐의 배면녹화가 가능한 표면차수벽형 석괴댐 형식으로 선정하였고, 각종 부대시설 및 이설도로의 형식선정부터 구조계획, 가설계획 단계까지


‘산수배경과 조화되고 자연친화적이며, 안전하고 경제적인 댐건설’이라는 목표를 가지고 설계하였다.

부항다목적댐은 총저수용량 54.3백만 m^3 의 중규모댐으로써, 연간 36.9백만 m^3 의 용수를 공급하고, 12.3백만 m^3 의 홍수조절능력을 보유하고 있다. 부항다목적댐이 건설됨에 따라 김천시를 포함한 감천 본류 연안지역의 홍수피해를 줄일 수 있으며, 경북 서북부(김천시, 구미시)지역은 장래 안정적으로 용수를 공급받을 수 있고, 하천유지용수를 확보함에 따라 감천 하류 수질개선 효과를 얻을 수 있다. 다음 <그림 1>은 본 부항다목적댐이 설치될 위치와 유역현황을 나타내고 있다.



<그림 1> 부항다목적댐 사업위치도

표 1 주요 사업내용

구분	주요사업내용
사업 내용	<ul style="list-style-type: none"> ○ 본댐 <ul style="list-style-type: none"> - 형식 : 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐(CFRD) - 규모 : 높이 64m, 길이 472m, 체적 2,162천m³ ○ 이설도로 : 12.8km <ul style="list-style-type: none"> - 지방도 903호선 5.97km, 군도 21호선 2.1km, 농어촌 도로 4.72km - 교량 13개소(유촌1교 등), 터널 1개소(지좌터널)
사업 기간	○ 2002년~2010년
사업비	○ 412,844백만원(지역정비사업비 지자체분과 발전설비 자체자금 포함)
전체 조감도	

부항다목적댐은 부항다목적댐 본댐 건설 및 이설도로 건설이 주된 사업내용이며, 이에 대한 구체적인 내용과 전체 조감도를 다음 <표 1>에 수록하였다.

댐건설 사업은 종합 플랜트이므로 수많은 공종을 포함하고 있으나, 본 학회지의 목적에 부합하는 세가지로 주제로 축약하여 부항다목적댐 및 이설도로 주요교량의 수치 해석과정을 소개하고자 한다.

첫째, 콘크리트 표면 차수벽형 석괴댐의 사면안정성 해석, 침투해석 및 응력-변형률 해석을 통한 「댐의 안정성」을 검토한 내용이며, 둘째 교량계획시 최적단면 설계를 위해 실시한 「교량 구조해석」에 관한 내용, 마지막으로 「가배수터널 안정성 해석」으로써 NATM 공법 터널의 주요 구간에 대한 안정성 검토내용을 수록하였다.

2. CFRD 댐의 안정성 검토를 위한 전산 해석

2.1 개요

본 부항다목적댐의 형식은 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐(CFRD)이며, CFRD의 안정성은 제체사면 안정성, 침투에 대한 안정성 및 응력-변형률 거동에 대한 안정성으로 나눌 수 있다.

이러한 안정성을 검토하기 위하여 아래의 3가지 검토를

실시하였다.

- 한계평형 해석에 의한 댐제체 상·하류 비탈면의 안정성 분석
- 2, 3차원 수치해석에 의한 댐제체 및 양안의 침투거동 분석
- 시공단계와 수위조건을 고려한 2, 3차원 정적, 동적 응력-변형률 해석을 통한 제체의 거동 분석

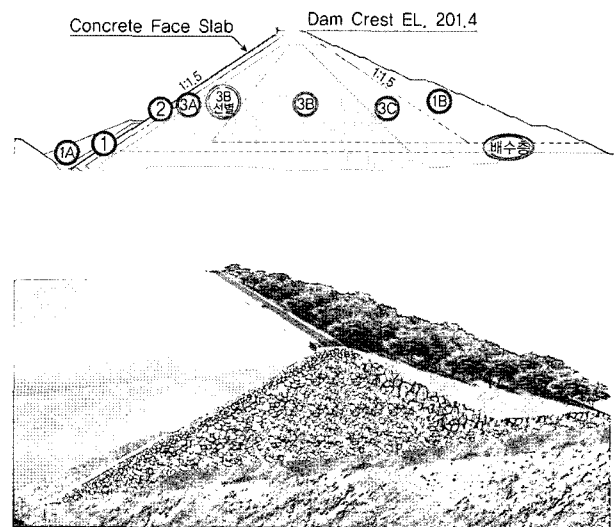


그림 2 부항다목적댐 단면도

2.2 사면안정 해석

사면안정 해석을 위한 물성치는 댐축조 재료에 대한 기존 문헌자료 및 대형시험결과를 비교, 분석하여 결정하였으며 이를 적용하여 강도감소법 그림 3에 의한 FEM해석을 실시하여 가상파괴면을 산정하고 한계평형법 그림 4을 이용하여 산정원으로 파괴시킬 경우의 안전율을 구하였으며, 사면안정 해석을 반영하여 부항다목적댐의 상·하류 사면경사를 1:1.5로 설계하였다.

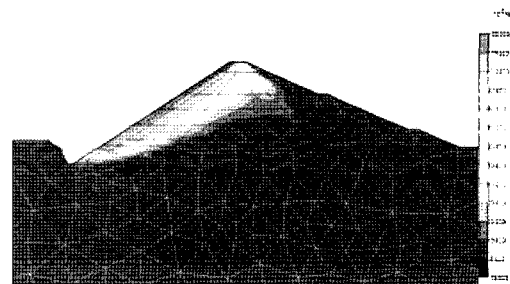


그림 3 강도감소법

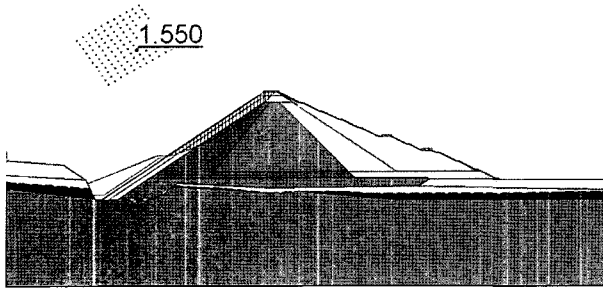


그림 4 한계평형법

2.3 침투해석

침투해석은 2차원 그림 5와 3차원 그림 6 두가지 방법으로 실시하여 상시 만수위 및 수위 변화에 따른 정상류 조건하에서의 간극수압분포와 침투경향을 파악하였다.

2차원 침투해석을 실시하여 그라우팅의 효과와 댐 저부를 통과하는 유량을 산정하였으며, 3차원 해석을 통하여는 댐 좌우안의 침투유량을 산정하였으며, 이를 근거로 하여 댐체 침투에 대한 안정성 검토와 댐 매설계기인 누수량 측정기 용량 및 위치 등의 설계에 반영하였다.

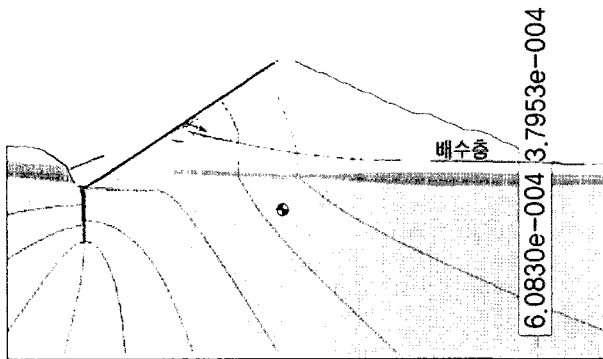


그림 5 2차원 침투해석 결과

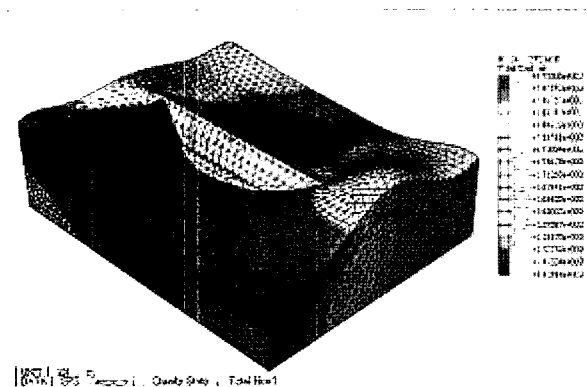


그림 6 3차원 침투해석 결과

2.4 제체의 시공단계에 따른 응력-변형을 해석

제체의 시공단계에 따른 응력-변형을 해석은 2차원 및 3차원해석을 병행하였다.

축조재료를 비선형 모델로 모사하여 시공단계 및 담수시 유한요소해석 실시하고 차수벽의 응력, 변위 및 댐체내부의 응력전이 상태를 분석하여 단면 설계시 반영하였다.

2차원 해석의 경우는 Kondner(1963)의 Hyperbolic 모델을 적용하고, 기초지반과 축조재는 평면변형률 요소로, 표면 차수벽은 보요소로, 담수는 외력으로 모델링하였으며, 하부경계조건은 상-하 방향의 변위, 측면부 경계조건은 좌-우 방향의 변위를 구속하여 해석 수행하였다.

3차원 해석은 기초지반과 축조재를 4면체 및 6면체 솔리드 요소로, 표면 차수벽을 셸 요소로 모델링하고, 하부 경계조건은 상-하방향의 변위를, 측면부 경계조건은 좌-우 방향의 변위를 구속하여 수행하였다.

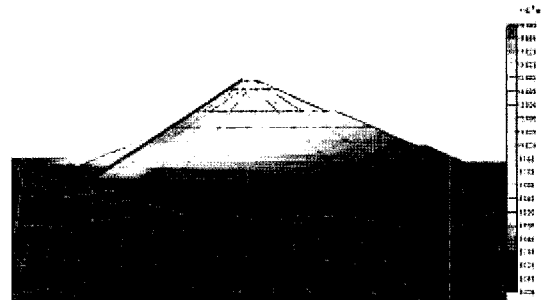


그림 7 담수후 수평변위(2차원해석)

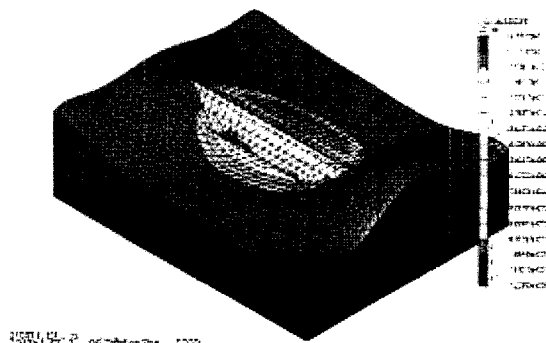


그림 8 담수후 전체변위(3차원 해석)

2차원 해석 결과 담수시 응력변화는 주로 상류측에 발생하므로 댐 상류에 변형계수 및 강도가 우수한 재료를 이용하여 제체의 안정성을 향상시키는 것이 유리하다는 결론을 도출하였다.

3차원 해석결과 담수시 제체의 최대변위는 124mm로 2

차원 해석결과(60mm)보다 다소 크나 댐체체응력 및 차수벽 콘크리트 부재력은 허용치 이내로 안정한 것으로 확인되었다.

이와같은 응력-변형을 거동을 분석한 결과를 반영하여 연직거동분석을 위한 계측기는 EL.170m~EL.185m 사이에 설치하며, 수평거동분석을 위한 콘크리트 차수벽 전면 에 변위측정계를 설치토록 설계에 반영하였다.

3. 교량 구조해석

3.1 개요

부항다목적댐의 이설도로는 국내 댐 중에는 사례가 드물게 호수를 환상(環狀)으로 순환하는 도로로 건설되며, 순환도로를 따라 호수를 횡단하는 교량을 설계하였다.

부항다목적댐은 자연친화적 댐 건설에 중점을 두고 있어 이설도로 상의 교량도 형식선정부터 구조계획, 가설계획 단계까지 '산수배경과 조화되고 자연친화적이며, 안전하고 경제적인 교량 건설'이라는 목표로 하였다.

표 2 이설도로 교량 개요

구분	교량명	폭원 (m)	연장 (m)	상부형식
지방도	단산1교	13.7	70	IPC 거더교
	단산2교	10.7	60	IPC 거더교
	단산3교	11.2	70	RC 슬래브교
	단산4교	11.2	70	RC 슬래브교
	유촌1교	10.7	372	강아치교, 강합성상자형교
	유촌2교	10.7	393	복합트러스 거더교
	유촌3교	10.7	120	IPC 거더교
리도	지좌교	7.7	285	복합트러스 거더교
	신옥교	7.7	145	강합성 상자형교
	부항육교	11.2	10	RC 라멘교
	부항교	BOX형 생태통로 2개소		
군도	회곡교	9.2	60	IPC 거더교
기타	도곡1교	12.3	67	IPC 거더교
	산내들교	7.3	75	콘크리트 아치교

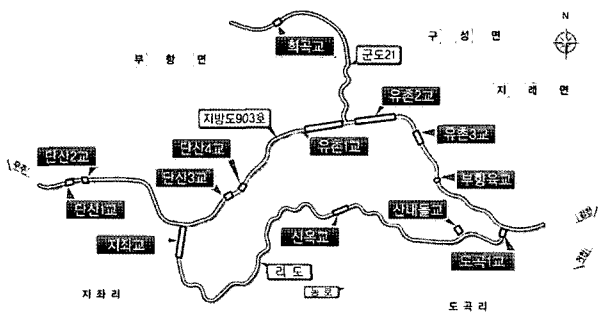


그림 9 이설도로 교량 위치도

부항다목적댐은 호수면적이 크지 않고 이설되는 도로도 폭원이 좁고 연장이 짧기 때문에 웅장하고 거대한 형식보다는 아담하고 경제적이면서도 미관이 뛰어나 댐호반과 인근지역의 랜드마크가 될 수 있도록 하였다. 부항다목적댐 이설도로상 가설되는 총 13개소 교량의 개요는 다음 표 2와 같다.

3.2 형식선정

총 13개소의 교량 중 유촌1교와 유촌2교는 일체로 조망되고 부항호의 중심에 위치하여 조망권이 집중되며 비교적 연장이 길어 중심교량으로 계획하였다. 교량형식 결정시 경관분석, 가설여건, 연계교량과의 조화, 기본계획 분석 등을 통하여, 유촌1교는 2경간 연속 강아치교로, 유촌2교는 복합트러스 거더교로 선정하였다. 하부구조는 상부구조와의 조화감이 우수한 형상계획을 하였으며 고교각임을 감안하여 중공단면을 적용하였다.

유촌1교의 배면은 탁트여있기 때문에 곡선의 2면아치를 적용하여 상부구조가 강조되면서 케이블 설치로 개방성이 우수한 아치교 형식을 채택하여 부항호의 상징교량이 될 수 있도록 하였다(그림 10, 11 참조). 유촌1교는 이설도로교량 중 조망권이 가장 좋은 지점이므로 차도와 분리된 전망보도를 설치하여 보행자가 여유롭게 호수를 감상할 수 있도록 배려하였다. 그림 12와 같이 2경간 연속 2면 아치가 갖는 곡선이미지와 잘 어울릴 수 있도록 곡선선형을 갖는 전망보도를 도입하여 미적인 측면을 강조하였다. 한편, 그림 13과 같이 유촌2교는 배면이 산으로 막혀 있어 상부돌출형 교량형식 보다는 거더 중심교량이 적합하기 때문에 복부판 배제로 개방형 단면을 갖는 복합트러스 거더교를 선정하였다. 부항호의 상류부를 횡단하는 지좌교는 유촌2교와의 통일성을 기하기 위하여 동일한 형식으로 선정하였으며, 가설여건이 유촌2교에 비해 양호하므로 크레인 2대를 사용하여 분할기치토록 계획을 수립하였다(그림 14 참조).

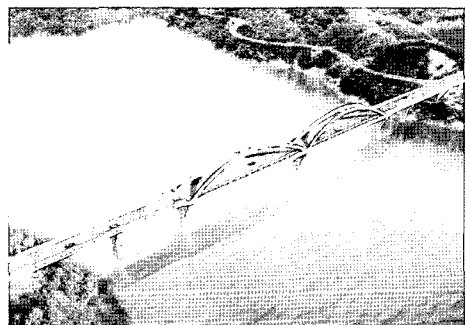


그림 10 유촌1교 전경

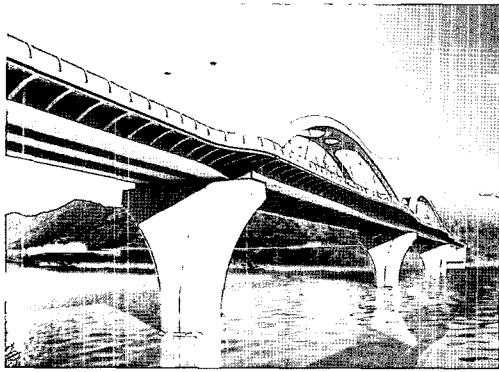


그림 11 수면에서 바라본 유촌1교

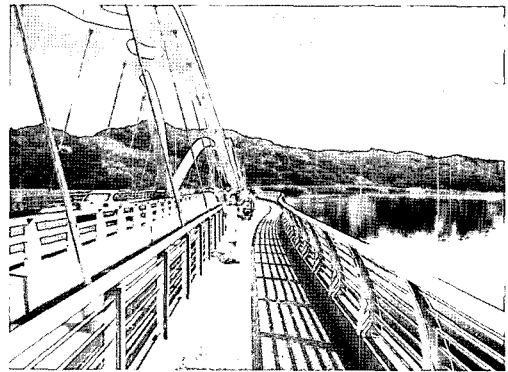


그림 12 유촌1교의 전망보도

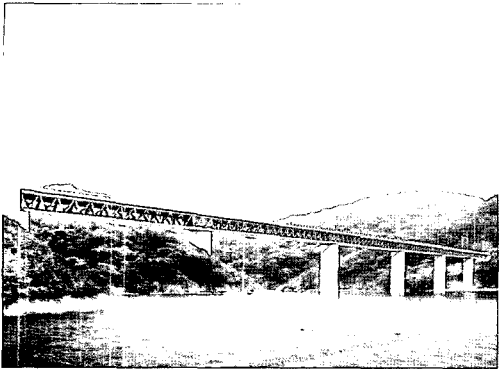


그림 13 유촌2교 전경

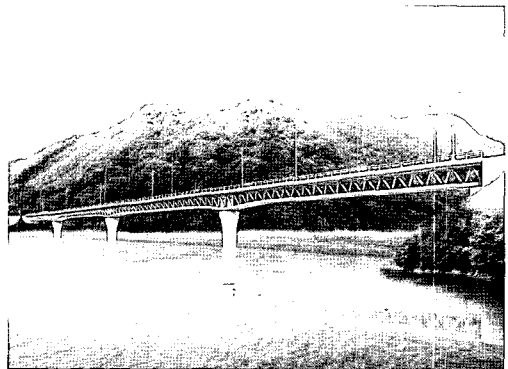




그림 14 지좌교 전경

3.3 세부구조계획

2경간 연속아치교 형식의 유촌1교는 아치구조의 특징과 연속교의 특징을 동시에 갖도록 하였다. 케이블을 갖는 아치구조의 보강형에 발생하는 단면력은 일반적인 연속교 거더의 단면력보다 작다. 리브의 강성과 케이블의 배치 및 간격에 따라 단면력의 크기가 조절될 수 있고, 중로아치교와 달리 하로아치를 연속화한 사례는 국내외에서 흔하지 않기 때문에 연속화시 나타날 수 있는 구조거동을 설계에 반영하기 위해 다각도의 정밀검토를 수행하였다. 특히, 온

도에 의한 응력의 영향이 클 수 있으므로 2경간을 연속화한 아치부의 구조성, 사용성, 계획성을 단순화한 경우와의 비교하여 타당성 검토하였다(표 3 참조). 검토 결과를 토대로 고정단을 연속지점부에 두고 양쪽 측경간에 가동단을 두는 교량받침 배치를 통하여 온도응력에 의한 효과를 최소화하였다. 연속화시키는 경우 중앙 지점부에서 다소 큰 휨모멘트가 발생하지만 지간 중앙부의 처짐이 감소되며 온도효과를 포함한 고정하중과 활하중에 대한 응력이 단경간의 경우와 큰 차이가 없고 구조적 효율성이 우수할 뿐 아니라 신축이음 배제가 가능하고 거더압출시공에 장

표 3 아치교의 연속화 검토

구 분	비교1안(연속화 경우)	비교2안(단순화 경우)
개요도 (휨 모멘트도 및 교량받침 배치도)		
주행성	• 연속화(200m)하여 주행성 우수	• 신축이음 설치로 주행성 불량
구조성	응력(고정하중+활하중+온도하중)	• 보강형 최대응력 = 162.1MPa
	처 짐	• 리브 최대응력 = 183.4MPa
가 설 공 법	• 연속화되어 거더압출시 유리	• 거더압출시 지점부 가체결 부재 필요
계 획 성	• 보도설치시 연결부 없이 연속화 가능	• 보도설치시 중앙부에서 연결부 발생
선 정	●	

점이 있는 연속화 구조를 채택하였다.

아치의 라이즈비는 구조적인 효율성과 미관의 측면에서 중요하다. 라이즈비가 크면 아치효과가 커져 구조적 효율성이 좋아지나 구조물이 거대해져 미관이 나빠지고, 라이즈비가 작아지면 구조 효율성은 불리하나 날렵한 외관을 갖는 장점이 있다. 1/5~1/8 범위의 라이즈비에 대하여 리브, 보강형의 구조 효율성, 기존 사례분석 및 경관적 검토를 통해 아치 라이즈비의 타당성 검토한 결과를 표 4에 정리하였다. 아치 라이즈가 증가할 때 케이블 하중분담률이 감소하고 보강형과 리브의 응력이 증가하나, 보편적인 라이즈비(1/5~1/8) 범위에서는 그 차이가 크지 않으므로 효율적인 단면구성이 가능하고 날렵한 외관으로 조형미가 우수한 라이즈비($f/L=1/6$)로 결정하였다.

아치리브의 경사각은 부재응력과 주행자 관점의 전망성, 좌굴안정성 검토를 통해 결정하였다. 표 5의 검토결과에서 보듯이, 개방감은 직립 또는 외측 15°경사각이 우수하나, 구조적 효율성, 좌굴안정성, 횡방향 강성에서 내측 15°경사각을 갖는 구조가 유리하여 내측경사와 상부 브레이싱을 갖는 구조를 선정하였다.

3.4 구조계산

2경간 연속 강아치교로 계획한 유촌1교의 정밀한 설계를 위하여 관용적인 탄성해석에 의한 설계와 비선형·비탄성 해석에 근거한 성능기준설계를 병행하였다. 그림 15에 정리한 사항을 중심으로 두가지 해석방법에 의한 결과를 비교·검토하여 최적의 단면설계가 되도록 하였다. 단면검토 결과 발생응력이 허용응력설계기준을 만족할 뿐만 아니라, 소성붕괴(Plastic Collapse) 메카니즘을 기반으로 한 극한성능기반설계에 따른 비선형범위에서도 극한저항력이 충분한 안전성을 확보하도록 하였다(표 6, 7 참조).

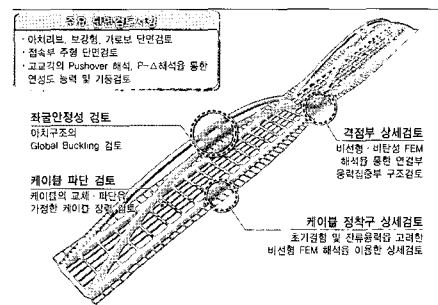


그림 15 2경간 연속아치교(유촌1교)의 주요 검토사항

표 4 아치교의 라이즈비 검토

구분	비교2안($f/L=20/100$)	기존 아치교의 라이즈비 분석
개요도		
부재력	<ul style="list-style-type: none"> 리브응력 : 178.2 MPa 보강형응력 : 178.2 MPa 케이블응력 : 318.4 MPa 	<ul style="list-style-type: none"> 아치라이즈비 사례조사를 통한 적정 라이즈비 검토
경관성	<ul style="list-style-type: none"> 아치부가가 높아 위압감 조성 	
선 정	●	

표 5 아치교의 라이즈비 검토

	비교1안(내측 15°+브레이싱)	비교2안(직립)	비교3안(외측 15°)
개요도			
부재력	<ul style="list-style-type: none"> 리브응력 : 165.1 MPa 	<ul style="list-style-type: none"> 리브응력 : 172.2 MPa 	<ul style="list-style-type: none"> 리브응력 : 170.0 MPa
진동 및 좌굴검토	<ul style="list-style-type: none"> 종방향 진동모드가 지배적임 좌굴안전률 : 13.1 	<ul style="list-style-type: none"> 횡방향 진동모드가 지배적임 좌굴안전률 : 7.1 	<ul style="list-style-type: none"> 횡방향 진동모드가 지배적임 좌굴안전률 : 6.8
경관성	<ul style="list-style-type: none"> 개방감 보통이나 브레이싱 추가로 조형미 우수 	<ul style="list-style-type: none"> 개방감 양호 	<ul style="list-style-type: none"> 개방감 우수 심리적 불안감 유발
선 정	●		

표 6 유촌1교 단면검토 결과

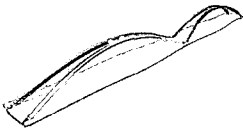
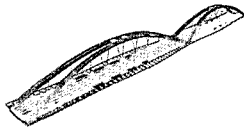
모델링	응력도	구분	발생응력(MPa)	허용응력(MPa)	판정
		아치리브	159.0	165.0	OK
		보강형	145.8	190.0	OK
		가로보	131.2	163.0	OK

표 7 유촌1교 극한성능기반설계

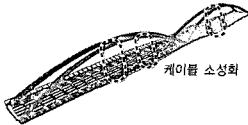
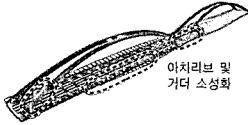

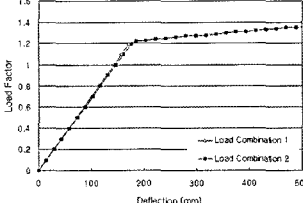
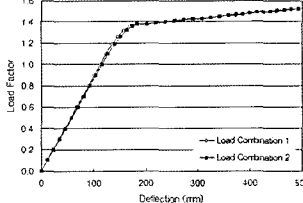
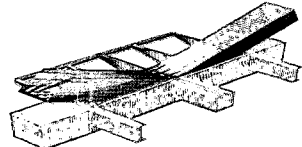
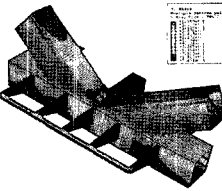
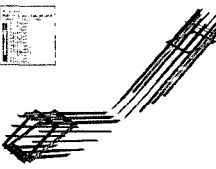
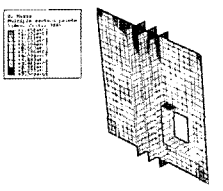
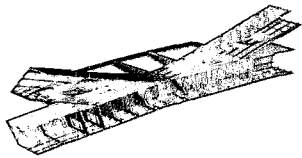
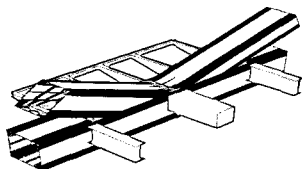
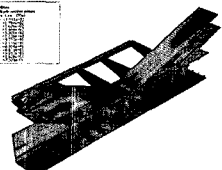
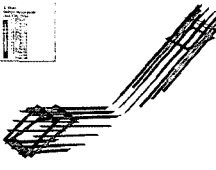
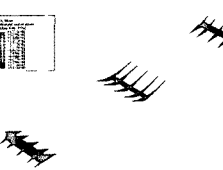
소성화 단계	1단계	 케이블 소성화	교량의 기하 비선형과 재료 비탄성거동을 고려한 설계 $\phi(R_n/\Sigma r_i Q_i) \geq 1.0$ R_n : 극한저항능력 ϕ : 시스템저항계수 $\Sigma r_i Q_i$: 하중	
	2단계	 아치리브 및 거더 소성화	거더중앙부 하중재하시	연속지점부 하중재하시
	3단계	 세로보 및 가로보 소성화 후 최종평과상태 도달	 0.95 × 1.35 = 1.283 ≥ 1.0 OK	 0.95 × 1.50 = 1.425 ≥ 1.0 OK

표 8 연속지점부의 선형 탄성 상세해석 및 비선형 비탄성 구조해석 결과

해석모델		구분	응력도(MPa)		
선형 해석		선형 해석			
초기 결합 고려			플랜지 167 < 209	웹 119 < 209	다이아프램 169 < 209
잔류 응력 고려		초기 결합과 잔류 응력을 고려한 비선형 해석			
			플랜지 150 < 209	웹 169 < 209	보강재 134 < 209

아치리브와 보강형이 만나 응력흐름이 복잡하고 응력이 집중되는 연속지점부에 대해서는 탄성이론에 근거한 상세설계 외에 제작시의 초기결합 및 잔류응력을 고려한 비선형·비탄성 상세해석을 수행하였다. 표 8에 탄성설계와 비

선형 설계 결과를 정리하였으며, 지점부의 응력집중에 대해 충분한 안전성을 확보하였다. 또한, 표 9에서 보듯이, 케이블이 정착되는 보강형 정착구 설계시에도 비선형 유한요소해석을 병행하여 단면검토를 수행하였다. 해석결과

표 9 케이블 정착구의 선형 탄성 상세해석 및 비선형 비탄성 구조해석 결과

해석모델		구분	응력도(MPa)		
선형 해석		선형 해석			
초기 결합 고려			플랜지 198 < 209	보강재 111 < 209	리브 178 < 209
잔류응력 고려		초기 결합과 잔류응력을 고려한 비선형 해석			
			플랜지 221 < 230	보강재 111 < 230	리브 175 < 230

격점부의 불규칙한 단면변화로 인해 거셋판과 만나는 사재의 접합부에는 응력이 집중되었으나, 탄성·비탄성 해석 모두에서 충분한 안전율을 갖는 것을 확인하였다.

3.5 내진설계

부항 다목적댐이 건설되는 경상북도 지역은 내진1등급 지역으로 재현주기 1000년의 지진하중에 대해 안전한 교량 구조물을 설계하였다. 모든 교량에 대해 상·하부중량을 고려한 3차원 프레임 모델을 구성하고, 지반특성 및 지진파를 고려하여 다중모드해석법에 근거한 탄성 지진응답 해석을 수행하였다. 그림 16에는 대표적인 종방향 모드 해석 결과를 도시하였다. 지진응답 해석결과를 토대로 교량받침 종류와 용량을 결정하여 내진안전성 확보 및 단면최적화가 가능토록 하였다. 유촌1교의 경우, 2경간 연속아치부와 접속부의 강박스 거더교 구간이 분리되어 있어 일반포트만으로 계획한 단면으로 충분한 안전성을 확보할 수 있었으나, 유촌2교의 경우 6경간 연속이기 때문에 지진발생시 상부변위 제어가 가능하도록 기초분리장치를 적용하였다.

유촌1교와 유촌2교의 교각에 대한 추가적인 내진안전성 검토를 위해 비선형 해석에 의한 교각의 연성도 능력평가와 역량스펙트럼 방법에 의한 내진성능 평가를 수행하

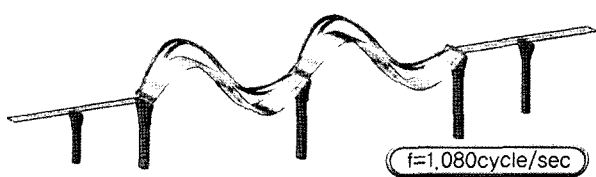
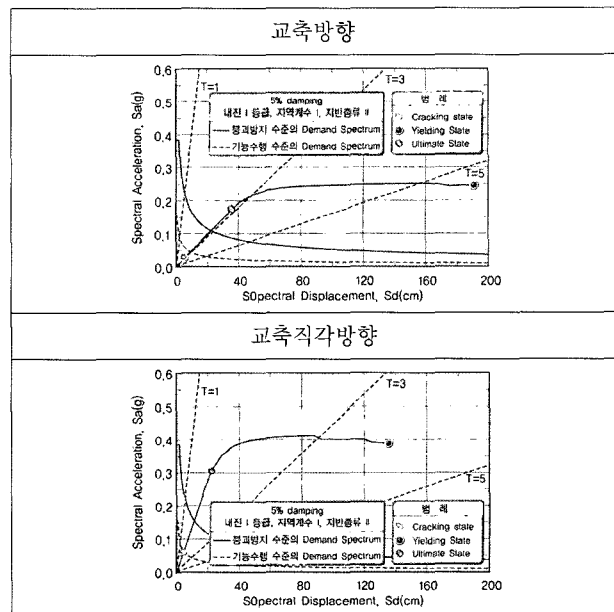


그림 16 유촌1교의 대표적인 종방향 모드 (Non-scale)

였다. <표 10>과 같이 보유내력에 의한 공급응답수정계수(공급R)가 설계시 적용된 소요R 보다 크고, 기능수행 및 붕괴방지 수준의 성능점이 모두 항복점 이하가 되도록 설계하여 교각의 내진안정성을 확보하였다.

표 10 유촌1교의 역량스펙트럼을 이용한 내진성능 평가



금회 설계의 지반조사 결과 기본계획의 유촌1교(강박스 거더교)의 교각 P3 아래로 단층대가 지남을 확인하였다. 따라서 기본설계에서는 유촌1교의 교각배치시 아치부의 교각 P2와 P3 사이로 단층대가 지나가도록하는 한편, 하부지반 암선의 급격한 변화로 지반강성이 상대적으로 차이가 커서 내진안전성에 대한 정밀검토가 필요하기 때문에 지반-구조물 상호작용(SSl)을 고려한 지진해석을 수행

하였다. 다지지점 효과를 고려한 지진파를 작성하여 지반-구조물 상호작용 해석을 통해 지진력 산정하여 정밀검토하였다. 설계응답스펙트럼과 다지지점 지진입력파와 지반-구조물 상호작용을 고려한 지진응답해석 결과를 재래 해석법과 비교하여 제시하였다(표 11, 12 참조). 검토결과, 일부교각의 부재력에 다소 증감이 있으나 설계단면력에 의해 충분한 안전율을 확보하는 것을 확인하였다.

표 11 설계응답 스펙트럼과 입력지진파

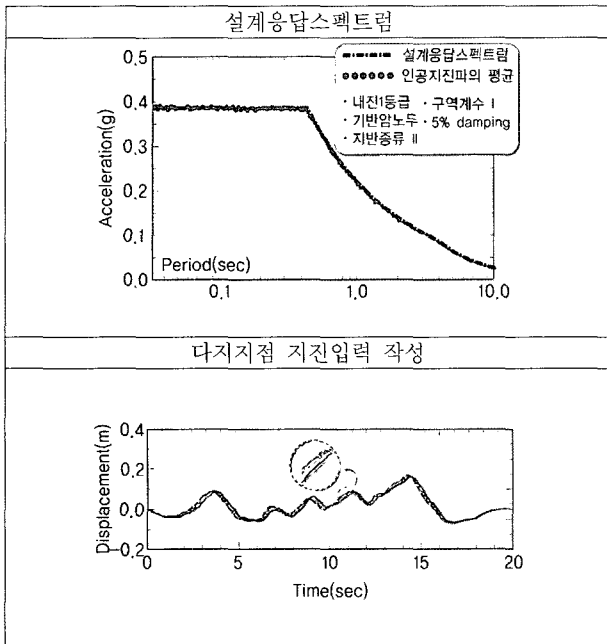


표 12 지반-구조물 상호작용(SSl)을 고려한 교량의 지진 응답해석 결과

교각	교축방향 모멘트(kNm)		교축직각방향 모멘트(kNm)	
	재래해석법	정밀해석법	재래해석법	정밀해석법
P3	291,743	293,679	244,689	206,591
P4	131,113	133,685	171,716	196,304

4. 가배수터널 주요 구간 안정성 검토

4.1 개요

가배수터널은 연장 279m의 NATM 방식의 터널로서 주요 안정성 검토구간으로는 추정 단층대 및 폐쇄 콘크리트가 설치될 폐쇄공 구간과 갱구부 구간이다. 안정성 검토는 유한요소법 및 유한차분법을 이용한 2차원 및 3차원 연속체 해석과 개별요소법을 이용한 2차원 및 3차원 불연속체 해석을 통해 수행하였으며, 각각의 안정성 검토시 터널의 시공과정에 따른 재하조건을 반영하였다

4.2 단층대 통과구간의 안정성 검토

터널 통과구간은 화강암질 암반으로 대부분 양호한 지반상태를 보이나 지반조사 결과 폐쇄공 하류부에서 터널과 교차하는 단층 1조가 발견되어 이에 따른 3차원 안정성 검토를 수행하였다(그림 18). 단층대 통과구간은 강관다단 그라우팅 공법으로 보강토록 계획하였으며, 시공시 TSP 탐사 및 선진수평시추에 따라 단층의 위치 및 보강범위를 적용토록 하였다. 안정성 검토결과 천단변위는 1.26mm가 발생하였으며, 슛크리트의 압축응력과 전단응력은 각각 1.74MPa과 0.01MPa이며 록볼트 축력은 최대 29.55kN으로 모든 지보재의 응력이 허용치 이내로 안정함을 확인하였다.

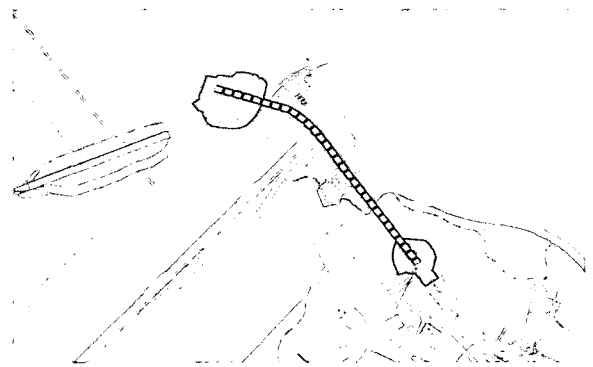


그림 17 가배수터널 위치도

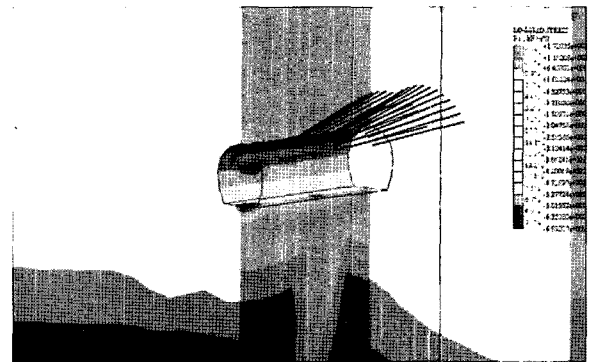


그림 18 단층대 통과구간의 3차원 안정성 검토

4.3 폐쇄공 구간의 안정성 검토

폐쇄공 구간에는 댐 축조 완료 후 담수에 따른 수압이 작용하게 되므로 이에 따른 안정성 검토를 수행하였다. 폐쇄콘크리트의 마찰저항을 확보하기 위해 경험식을 통해 폐쇄깊이를 25m로 결정하였으며, 폐쇄콘크리트의 안정성 검토시 계획홍수위에 해당하는 수두차 48.6m를 작용수압으로 가정하여 해석을 수행하였다. 해석결과 수압 작용에

따른 폐쇄콘크리트의 압축응력과 전단응력은 각각 0.41MPa와 0.18MPa로 모두 허용치 이내로 안정하였으며, 축방향 변위는 0.03mm로 매우 미소하게 발생하였다. 폐쇄공 구간의 주요 해석 결과는 다음의 그림 19과 같다.

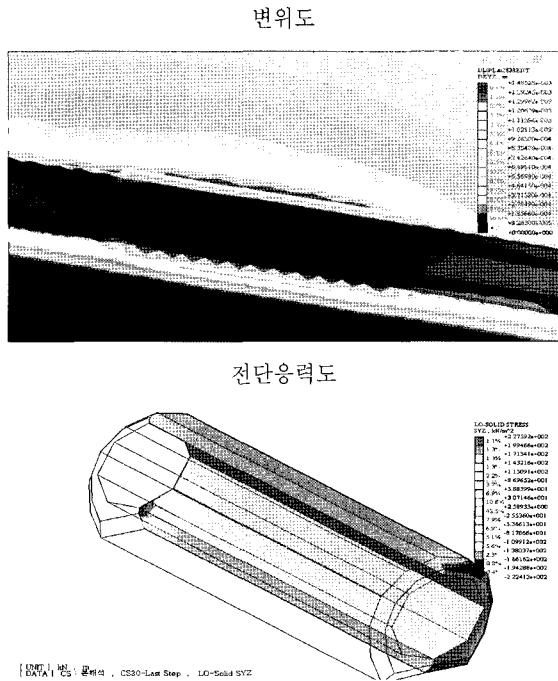


그림 19 폐쇄공 구간의 안정성 검토

4.4 갱구부의 안정성 검토

가배수터널 갱구는 취방류 설비 공간 및 터널의 안정성을 확보하기 위하여 암반의 토피가 터널 직경의 1배 이상 확보되는 위치에 계획하였으며, 이에 대한 2차원 및 3차원 안정성 해석을 수행하였다. 특히 유입부에는 절리의 불연속면을 고려한 3차원 개별요소해석을 수행하였으며, 유입부에 비해 상대적으로 토사심도가 깊은 유출부에는 지반을 연속체로 가정한 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 유입부 및 유출부의 해석 모델링은 그림 20과 같으며, 지반의 소성 평가를 위해 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였다.

유입부 해석결과 전단변위는 1.38mm가 발생하였으며, 절리면의 최대 전단변위는 비탈면에서 최대 4.45mm 발생하였으나 국부적으로 발생하는 것으로 비탈면의 전체적인 안정에는 큰 영향이 없는 것으로 검토되었다. 유출부 해석결과 전단변위와 내공변위는 각각 1.85mm 및 0.58mm이며, 슛크리트 및 록볼트의 단면력은 모두 허용치 이내로 안정한 결과를 나타냈다(그림 21).

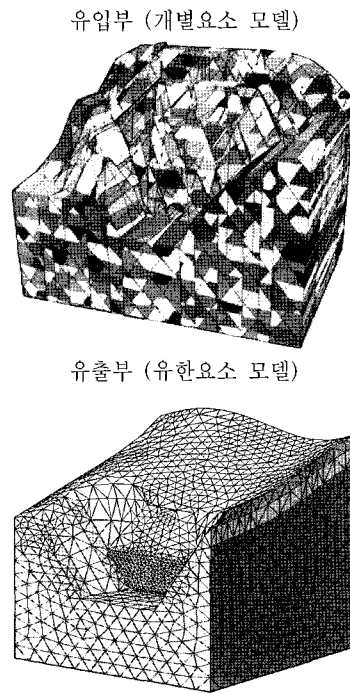


그림 20 가배수터널 갱구부의 해석 모델링

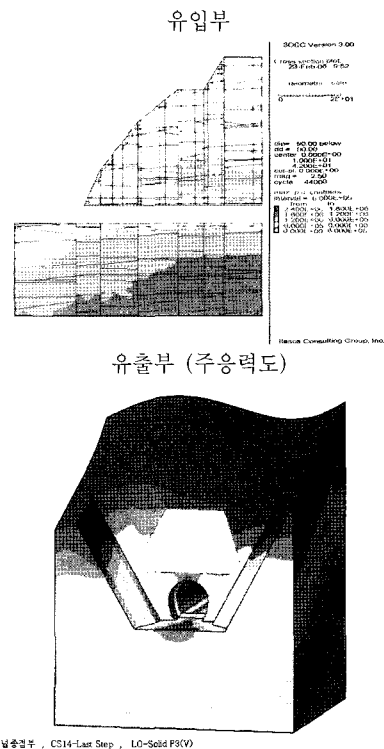


그림 21 가배수터널 갱구부의 주요 해석결과

5. 맺음말

이상으로 부항다목적댐 설계시 수행한 수치해석 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 사면안정해석을 통하여 제체의 경사를 결정하고, 침투 해석을 통하여 제체의 누수량 및 누수시 안정성을 검토하였다. 또한, FEM을 이용하여 응력-변형률 해석을 실시하여 제체의 응력 및 변위분포를 산정하여 안정성 여부를 확인 하는 한편 계측계획에 반영하였다.
- 부항 다목적댐 이설도로 상의 교량은 주변 환경과 조화되며, 안전하고 경제적인 교량이 되도록 설계하였다. 경관성, 경제성, 시공성을 고려하여 형식선정 및 구조계획을 하였고, 세부 구조계획시에는 다양한 파라미터 해석을 수행하여 최적의 구조물 계획을 수립하였다. 유촌1교, 유촌2교는 경관성과 조형미를 최대한 고려하여 부항댐의 상징적인 교량이 될 수 있도록 설계하였다. 구조계산 시에는 관용적인 해석방법과

- 최신이론에 의한 설계기법이 상호보완되어 최적의 단면설계가 이루어 질 수 있도록 하였으며, SSI 해석, Pushover 해석과 같은 내진설계 그리고 상세설계 등 다양한 특수해석을 통해 구조물의 안전성을 확보하였다. 경제성과 조형미는 상대적인 모순(矛盾)관계일 수 있으나, 최적화된 경제성과 동시에 최상의 기능과 형상을 갖는 교량이 되도록 구조물을 설계하였다.
- 가배수터널은 단층대 및 댐 근접구간의 주요 구간을 통과하므로 표준지보패턴에 대한 안정성 검토와 병행하여 주요 통과구간에 대한 3차원 정밀해석을 수행하여 지반 및 지보재의 안정성을 확인하였으며, 유입 및 유출부에 대하여는 3차원 불연속체 및 연속체 해석을 수행하였다. [2]