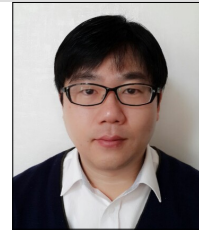


프리텐션 콘크리트 거더 전산해석

Computational Analysis of Pre-Tensioned Concrete Girders



강 현 구*



김 우 석**

* 서울대학교 건축학과 교수
** 금오공과대학교 건축학부 교수

1. 서 론

콘크리트가 압축(Compression)에 강하고 인장(Tension)에 약하다는 사실은 널리 알려져 있으며 이러한 콘크리트의 낮은 인장력으로 인해 하중의 초기단계(Early stage)에서 휨 균열(Flexural cracking)이 발생한다. 이러한 균열이 진전되는 것을 줄이거나 막기 위해 구조 요소(Structural element)의 주인장방향(Longitudinal direction)으로 집중하중이나 편심하중을 적용시키는데 이와 같은 힘에 의해 사용 하중시(@Service load) 구조 요소의 중앙부나 지점부위에서의 인장응력(Tensile stress)을 제거하거나 크게 줄임으로써 균열이 진전되는 것을 막아준다. 이와 같이 주인장방향으로 부과되는 힘을 긴장력(Prestressing force)이라고 하는데 이를 적용한 프리텐션(Pre-Tensioned) 콘크리트는 일반적으로 강선 등을 여러 줄로 겹쳐 만든 강연선이라는 강재 보강근에 인장응력을 미리 부과해서 외부 작용하중에 저항함으로써 그 특성을 향상시킨 구조로서 주로 초고층빌딩, 장대교량, 주차장, 원자력 격납구조물(Reactor containment structures) 등 건축·토목분야에서 폭 넓게 사용되고 있다.

따라서 본고에서는 4개의 축소된(Reduced-scale) 거더와 1개의 실제 크기(Full-scale) AASHTO Type-II 교량 거더¹⁾로 구성된 총 5개의 프리텐션 콘크리트 거더의 휨실험결과와

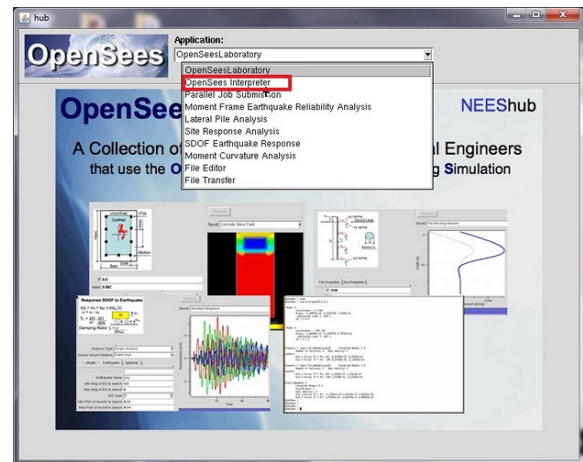


그림 1 OpenSees(2006)²⁾

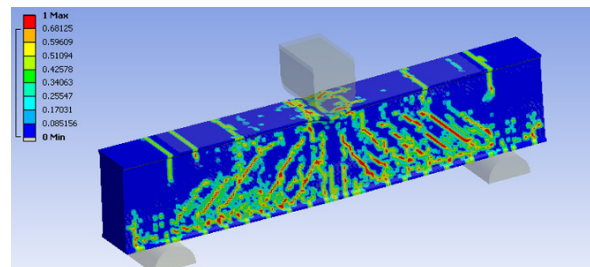


그림 2 ANSYS(2007)³⁾

전산해석결과를 비교·분석하였다. 실험결과와 신뢰성을 검증하기 위해 사용된 전산해석 프로그램은 2차원 모델링을 위해 그림 1과 같은 OpenSees²⁾가 사용되었고 3차원 모델링을 위해 그림 2와 같은 ANSYS³⁾가 사용되었다. 이를 통해 프리텐션 콘크리트 거더를 전산 해석하는데 있어 그 방법을 제시하고자 한다.

2. 프리텐션 콘크리트 거더의 실제 휨실험

2.1 실험계획

거더 길이 5.2m인 4개의 축소된 콘크리트 거더는 단위중량 1,840kg/m³인 경량콘크리트를 사용하였으며 단면형태와 강섬유의 보강(강섬유혼입량=40kg/m³) 유무에 따라 각각 R1, R2, I1, I2로 명명하였다. 거더길이 7.5m인 실제크기 AASHTO Type-II 교량 거더(G1)는 단위중량 1,840kg/m³인 보통중량 콘크리트를 사용하였으며 단면 및 실험체 상세는 그림 3, 그림 4와 같다.

2.2 실험결과

실험결과 초기하중단계에서는 어떠한 균열도 보이지 않았고, 하중이 증가하면서 인장 지역(Tensile region)인 중앙부 하단(@Bottom-fiber)에서 미세한 균열이 관찰되었다. 하중이 증가함에 따라 균열수 역시 증가하면서 중앙부를 중심으로 해서 지점으로 퍼져나갔으며 휨균열은 중앙부 하단에서 상부로 지속적으로 진행되었다. 그 후 비선형 거동이 관찰되면서 모든 거더는 하중점 근처에서 상부면(@Top-fiber)의 콘크리트 파괴에 의해 최종적으로 휨파괴(Flexural failure)되었다(그림 5). 표 1은 실험결과 중 프리텐션 콘크리트 거더의 하중에 따른 변위의 관계를 나타낸 것이다.

3. 프리텐션 콘크리트 거더의 전산해석

이전 장에 기술된 실험을 전산해석하기 위해 OpenSees와 ANSYS 프로그램을 사용하여 각각 2차원 및 3차원 모델링을 통한 유한요소해석을 수행하였다. 다음과 같은 세가지

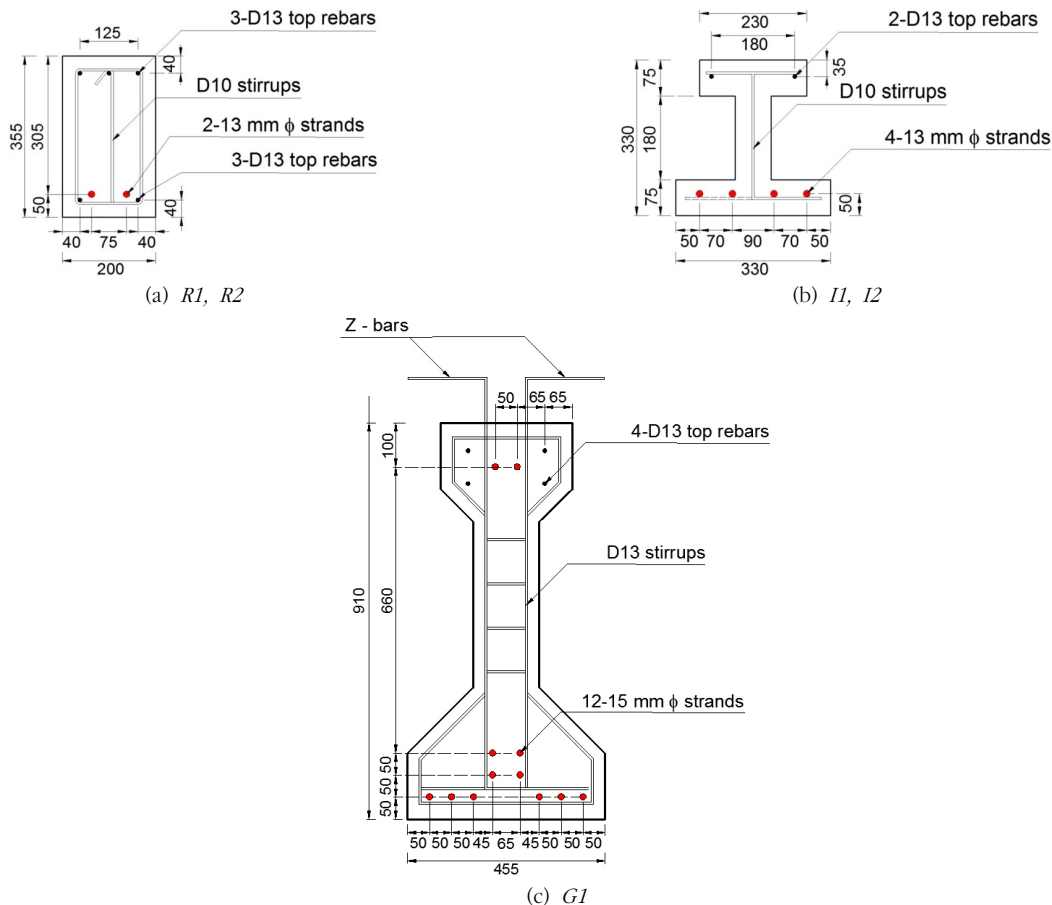


그림 3 프리텐션 거더의 단면상세

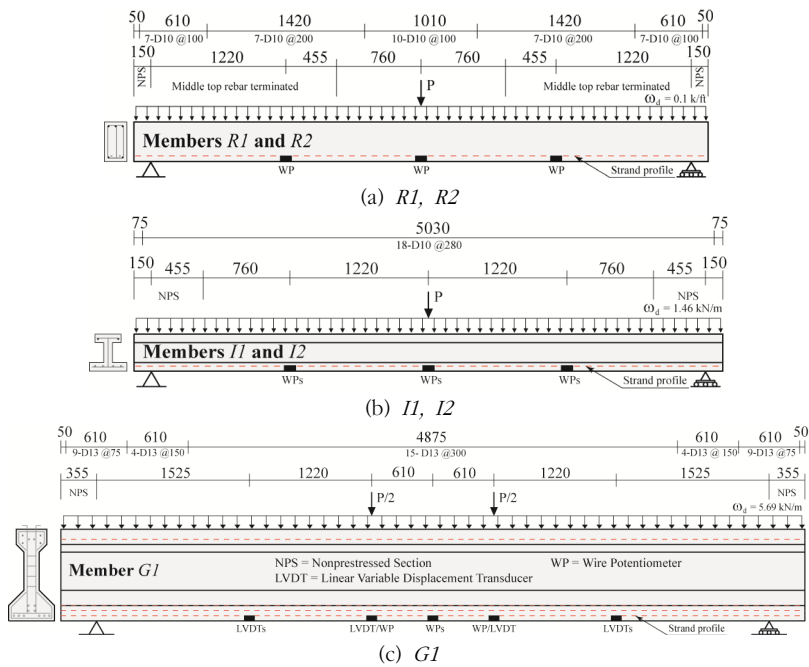


그림 4 2차원 유한요소모델에 따른 프리텐션 거더의 입면

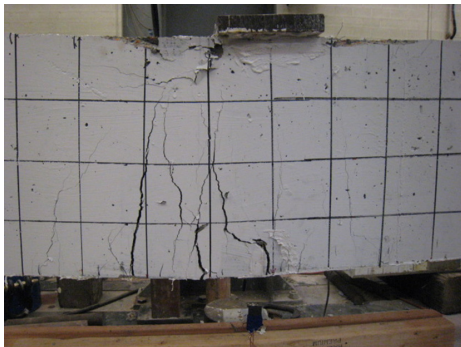


그림 5 중앙부의 균열 패턴(R1 거더)

조건의 분석을 통해 실험결과와 전산해석 결과를 상호 검증하였다.

- (1) 하중-중앙부 처짐 관계(@ 초기균열 및 최종 하중단계)
- (2) 하중-상·하부 응력 관계
- (3) 전이단계와 최대하중단계에서의 응력분포

3.1 2차원 비선형 유한요소 모델링

그림 6은 세 가지 다른 유형의 2차원 비선형 유한요소 모델을 나타낸 것으로 각 모델은 Eight forced-based nonlinear beam-column elements에 의해 연결된 9개 절점(Node)로 구성되어 있는데 이러한 절점(Node)은 변위계가 설치되어 있는 지점(Support)에 위치시켰다. 절점의 자유도(Degrees of freedom[DOF])는 x축 및 y축에 따라 두 가지 이동단

표 1 실험결과

I.D.	변위		하중	
	@첫균열 (mm)	@최대하중 (mm)	@첫균열 (kN)	@최대하중 (kN)
R1	9.4	104.6	56.8	112.9
R2	12.2	137.4	64.7	121.6
I1	16.8	38.6	93.2	103.3
I2	14.0	51.1	89.1	137.2
G1	7.6	37.1	856.2	1329.2

(Translation), z축에 대해 하나의 회전단(Rotation)으로 구성되어 있다. 각각의 요소는 Gauss-Lobatto 직교(Quadrature) 방식에 따라 할당된 적분점(Integration point)을 포함한 다섯 가지 Fiber 단면으로 구성된다(그림 6).

콘크리트 Fiber는 폐쇄 스티립을 고려한 구속 콘크리트와 비구속 콘크리트의 두 부분으로 나뉘어져 있다. 그림 6에서 보듯 콘크리트와 철근의 Fiber 구성 관계는 OpenSees에서 구현된 일축 재료 모델을 사용하였다. 그림 6에서 빈 원은 강연선의 Fiber를 나타낸 것이고 검은색 원은 철근을 나타낸 것이다. 삼선형(Tri-linear) 응력-변형률 관계는 본 연구에서 사용된 긴장재를 해석하기 위해 PCI 디자인 핸드북⁴⁾에서 제안된 곡선에 따라 가정하였다.

모델링에 사용된 재료 변수는 표 2에 나타나 있고 회전단과 이동단은 각각 그림 6의 N2와 N8절점에 적용하였다. 부재자중(w_d)은 콘크리트의 단위중량에 따라 각각 축소된

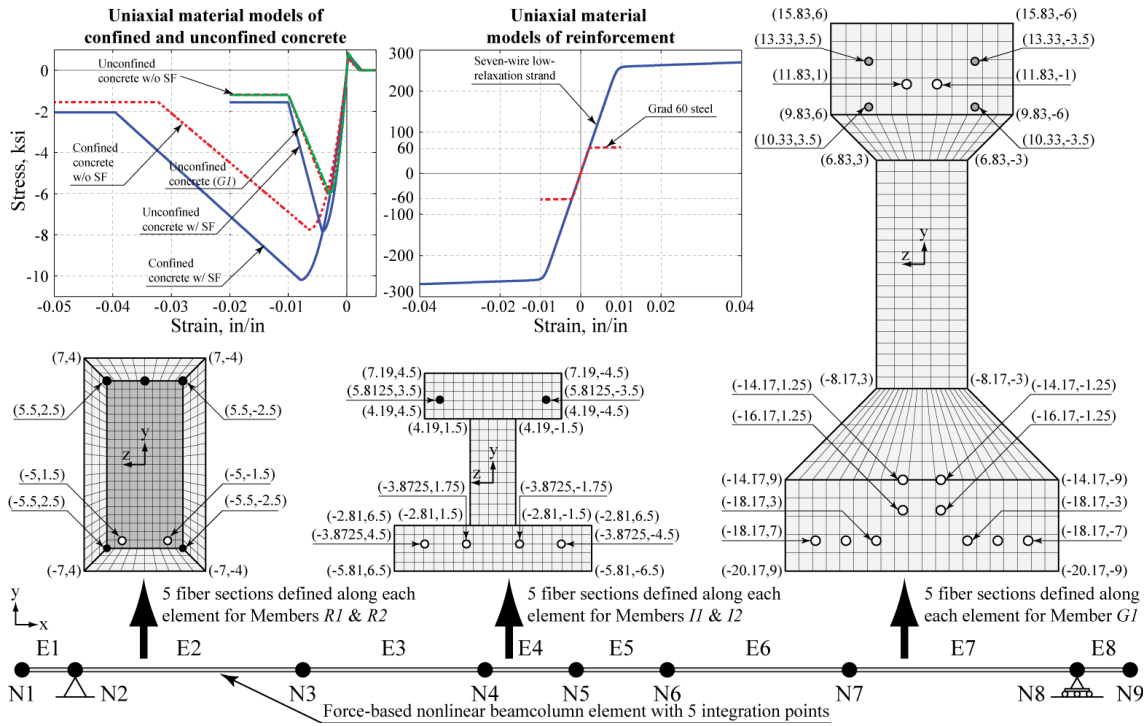


그림 6 OpenSees를 이용한 2차원 모델링에서 Fiber 단면의 이산화 도식(단위: 1in.=25.4mm; 1ksi=6.89MPa)

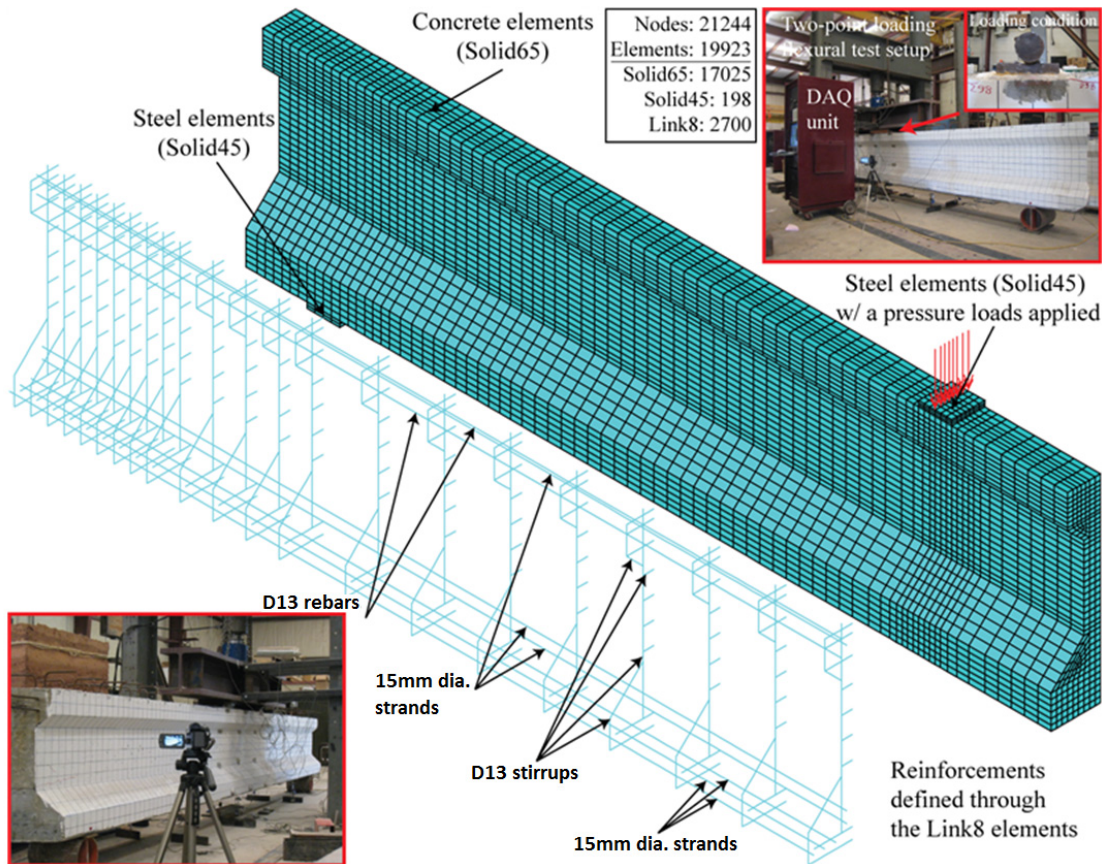


그림 7 G1 거더 부재의 3차원 유한요소 모델

표 2 2차원 모델링에 사용된 재료 변수

콘크리트		경량 (R1&I1)	경량 &강섬유 (R2&I2)	보통중량 (G1)
구속 콘크리트	$f'_{cc} = 1.3f'_c$	53.4MPa	70.3MPa	NA
	$\epsilon_{cc0} = 2f'_{cc}/E_c$	0.0064	0.0079	NA
	$f'_{cu} = 0.2f'_{cc}$	10.7MPa	14.1MPa	NA
	$\epsilon_{cu} = 5\epsilon_{cc0}$	0.0322	0.0396	NA
	E_c	16,579MPa	17,772MPa	NA
비구속 콘크리트	f'_c	41.1MPa	54.1MPa	41.4MPa
	ϵ_{c0}	0.0034	0.0042	0.003
	$f'_{cu} = 0.2f'_c$	8.2MPa	10.8MPa	8.3MPa
	$\epsilon_{cu} = 5\epsilon_{c0}$	0.01	0.01	0.01
	E_c	16,579MPa	17,772MPa	30,448MPa
철근				
SD400	f_y	414MPa		
	E_s	200,000MPa		
	α	0.005		
강연선				
강연선	f_{pu}	1862MPa		
	$f_{pv} = 0.96f_{pu}$	1788MPa		
	E_{ps}	196,552MPa		
	α	0.005		

거더는 1.5kN/m, 실제 크기의 거더는 5.7kN/m의 등분포하중(w_d)으로 계산하였다. 프리스트레싱 효과는 영이 아닌 (Non-zero) 강연선의 초기 응력으로 가정하였다. 긴장력은 R형, I형 거더와 G1 거더에 대해 양단으로부터 각각 152mm, 610mm, 356mm 거리에서 완전히 부착된 것으로 가정하였으며 철근 단면은 부재단면에서의 전달 길이(Transfer length)를 고려하였다.

힘 응답은 두가지 Loadstep 해석을 통해 시뮬레이션 하였는데 첫 번째 Loadstep은 부재자중(w_d)과 긴장력이 적용될 때 하중(힘)제어하였다. 비선형 거동을 위한 두 번째 변위제어된 Loadstep은 규정된 하향(Downward) 변위와 R1, R1, I1, I2 거더에서 N5절점 그리고 G1 거더에서 N4, N6절점에 단위절점하중이 적용되었다(그림 4). 이 단계에서는 R형, I형 거더와 G1 거더에 대해 각각 140mm, 75mm, 50mm의 목표(Target) 변위를 달성하기 위해 5,000 하위 단계(Sub-

steps)로 수행되었다. 평형해(Equilibrium solutions)는 0.1%의 에너지기반 수렴 허용오차의 L2-norm을 포함한 Newton-Rapson method(뉴턴-랩슨법)을 사용하여 반복적으로 수행하였다.

3.2 3차원 비선형 유한요소 모델링

3차원 비선형 유한요소 해석은 ANSYS를 사용하여 수행하였다. G1 거더의 연속체(Continuum) 유한요소 모델은 그림 7에 나타나 있다. 전산해석을 효율적으로 하기 위한 일환으로 계산 리소스를 최소화하기 위해 그림 7과 같이 두 개의 횡방향 평면에 대칭되는 실제 부재의 1/4만 모델링하였다. 또한 이산화된 모델링 방법에서 철근요소의 메쉬와 콘크리트 요소의 절점을 함께 공유하였다. 즉 철근은 그림 7에서와 같이 선요소로 취급되며 실제 부피를 차지하지 않는 것으로 가정하였다(Link8; ANSYS, 2007).

콘크리트와 철근은 0.15와 0.3의 프아송비를 가진 등방성 (Isotropic) 재료로 다루어 졌다. 콘크리트와 강재로 된 하중판은 Brick 요소를 사용하여 모델링하였다(각각 Solid 65, Solid 45). 이러한 요소는 세 개의 이동(Translational) 자유도 (DOF)와 연관된 8개의 절점을 가지고 있다. 콘크리트, 철근과 강연선의 구성 모델은 그림 8에 나타나 있는데 그 중 거더의 비구속 콘크리트 모델은 재료실험 결과를 토대로 하였다.

구속된 콘크리트에서 별도로 고려될 필요가 있는 2차원 모델링과는 달리 이러한 조건은 3차원 모델링에서는 필요가 없다. 이것은 삼축 응력하에서의 콘크리트 거동이 3차원 모델링에서는 자연스럽게 구속(Confinement)상태로 내재되어 있기 때문이다.

하중플레이트와 지점 플레이트는 하중이 재하되는 동안 탄성상태로 가정하였다. 그림 8과 같이 철근은 이차 선형 (Bi-linear) 구성 관계인 것으로 가정하였으며 강연선의 비선형 응력-변형률 관계로 PCI 디자인 핸드북⁴⁾을 참조로 하였다.

보다 실제에 가까운 근사해석을 위해 특히 주의를 요하는 것은 응력 집중현상이 일어나는 하중 플레이트내 주요 영

표 3 3차원 모델링에 명시된 절점과 요소 수

	R1 & R2			I1 & I2			G1		
	Qt.	요소크기		Qt.	요소크기		Qt.	요소크기	
		최소	최대		최소	최대		최소	최대
Node	4,530	NA	NA	17,480	NA	NA	21,244	NA	NA
SOLID 65	3,300	0.5	2	13,860	0.174	2.75	17,025	0.5	2.4
SOLID 45	105	0.25	1	384	0.25	1.5	198	0.33	1
LINKS	495	0.5	2	533	0.174	2.75	2,700	0.5	2.4

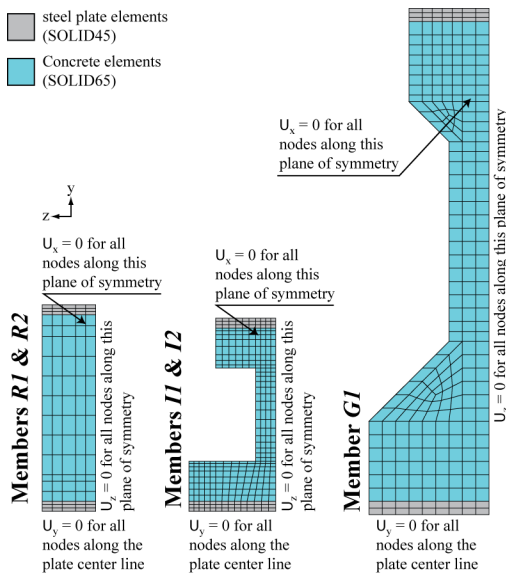


그림 8 3차원 모델에 대한 변위-경계조건

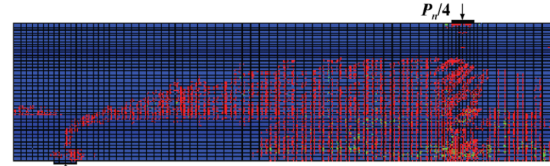
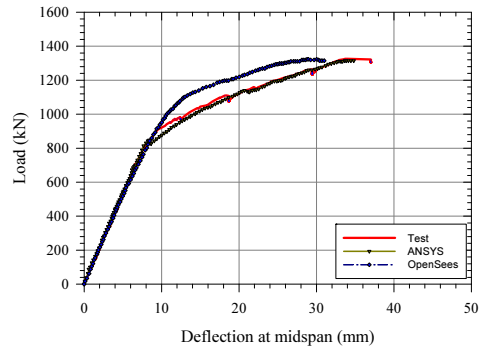


그림 9 G1 거더의 하중-중양부 처짐 관계 및 다양한 하중단계에서 시뮬레이션된 균열 패턴

표 4 실험결과와 전산해석결과

I.D.		δ_i , mm	P_{cr} , kN	δ_{cr} , mm	P_u , kN	δ_u , mm
R1	Test	NA	56.7	9.4	112.6	104.6
	2D model	-2.8	41.1	4.8	112.1	105.2
	3D model	-3.3	44	6.35	115.4	79.8
R2	Test	NA	64.5	12.2	121.3	137.4
	2D model	-3	47.2	5.1	116.1	133.4
	3D model	-3.6	51.6	6.9	117.7	68.8
I1	Test	NA	93.2	16.8	103.2	38.6
	2D model	-8.9	71.6	11.4	140.1	46.2
	3D model	-7.6	75.5	14.5	110.3	32.3
I2	Test	NA	88.9	14	137	51.1
	2D model	-9.7	82.7	12.4	145.3	50.8
	3D model	-7.9	88.8	15.5	138.8	42.9
G1	Test	NA	854	8.6	1326	37.1
	2D model	-3.6	813	7.1	1317	31
	3D model	-2.8	746	7.1	1316	35.1

δ_i =초기 썸뒀; P_{cr} =균열발생시 하중; δ_{cr} =균열발생시 변위; P_u =최대하중; δ_u =최대하중시 변위

역으로 메쉬를 보다 작게 나눌 필요가 있다는 것이다. 해당 모델링 순서는 다음과 같다.

- (1) 콘크리트, 강재 플레이트, 철근 전체를 개별적으로 생성시킴.
- (2) 철근요소의 절점은 정확하게 일치하는 위치에 있는 콘크리트 요소의 절점과 공유함.
- (3) 유한요소 모델을 생성시키기 위해 솔리드 요소 전체를 메쉬(Mesh)로 나눔.
- (4) 어떤 홀로 떨어진 절점이 있다면 도메인(Domain)내 일치하는 절점을 복원할 것.
- (5) 일치하는 절점을 병합함.

표 3은 모델링 도메인에 지정된 절점과 요소 수 및 최소·최대 크기를 요약한 것이다.

x축 및 Z축에서 수직인 두 평면에 대한 중양부 단면에서의 경계조건(Boundary condition)은 그림 7에 나타나 있다. 가로방향 자유도($U_z=0$)가 부재 길이에 따라 우측 면에 대한 절점이 0으로 놓이는 동안 절점의 모든 세로방향 자유도(DOF)는 고정되어 있다(즉, $U_x=0$). 또한 이동단($U_y=0$)은 지점 플레이트의 중심선을 따라 절점으로 작용한다.

2차원 모델링에서 프리스트레싱 효과를 위해 강연선에서 초기 응력이 0이 아닌 것으로 지정하고 전달 길이를 고려하였다. 축소된 거더의 경우 등분포하중이 하중 플레이트

의 표면 전체에 걸쳐 작용한다고 가정하였다. 즉, 요소하중(또는 압력)이 사용되었다.

액츄에이터 하중을 적용하기 전 하중-제어 해석은 비선형 변위-제어 해석에 따른 작은 변위의 가정하에서 수행되었다. 2차원 해석과 마찬가지로, 3차원 해석 역시 두 가지 주요 단계가 있는데 전이역에서의 응력 상태는 첫 번째로 시뮬레이션 한 후, 하중-처짐 응답의 전체 평형 경로는 균열과 항복단계 및 최대하중단계를 포함해서 모두 구해졌다. 또한 평형 방정식은 Newton-Rapson method(뉴턴-랩슨법)을 사용하여 반복적으로 수행하였고 면외균형 하중(힘)과 변위의 L2-norm은 수렴 조건에 대해 검토하였다.

3.3 전산해석결과와 실험결과

균열 및 콘크리트 압축파괴(최종)단계에서 적용된 하중과 그 때의 변위를 표 4에 나타내었다. 아울러 하중과 중앙부 수직 변위에 대한 GI 거더의 2차원 및 3차원 전산해석 결과는 실험결과와 비교하여 그림 9에 나타내었고 여러 단계에서 시뮬레이션된 균열 패턴을 보여주는 단면 역시 그림 9에서 확인할 수 있다. 하중에 의한 변위(처짐)값은 중앙부 좌우에 설치한 변위계에 의해 측정된 값의 평균값으로 정하였다(그림 4). 이러한 데이터는 N5 절점에서의 2차원 전산해석결과에 따른 변위(그림 6) 및 3차원 전산해석을 통한 전체 단면폭에 걸친 중앙부하단 절점 변위의 평균값과 비교하였다. 이 때 변위(처짐)는 긴장력과 자중 적용의 첫 번째 Loadstep에서 산출되는 초기 캠버(Camber)가 상대적이라는 것에 주목해야 한다(즉, 하중이 적용되기 전 초기 위치의 처짐이 0으로 동일하게 설정되었음).

전반적으로 실험결과와 전산해석결과는 비교적 잘 일치한다. 또한 비선형거동과 최대하중을 비교·예측하는데 있어 2차원 및 3차원 모델링 결과는 서로 잘 일치한다는 것을 확인할 수 있었다.


4. 결 론

본 고에서는 총 5개의 프리텐션 콘크리트 거더의 휨실험 결과를 비선형 유한요소 Software인 OpenSees를 통한 2차원 모델링 및 ANSYS를 통한 3차원 모델링 전산해석결과와 비교·분석하여 실험결과와의 신뢰성을 검증하였고, 그 전산해석 방법에 대해서도 고찰하였다.

분석결과 실험결과와 전산해석결과는 비교적 잘 일치하며 비선형거동과 최대하중을 비교·예측하는데 있어 2차원 모델링 및 3차원 모델링 결과는 서로 비교적 잘 일치한다는 것을 확인할 수 있었다.

하지만 프리텐션 거더 재료의 비선형 특성을 일반화하는데 있어 아직 그 데이터베이스가 상당히 부족하기에 이에 관한 추가 연구를 통해 일반화할 수 있는 프레텐션 콘크리트 거더의 재료모델 정립이 필요하다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. AASHTO (2007) LRFD Bridge Design Specifications, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
2. Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M.H. and Fenves, G.L. (2006) Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees) User Command-Language Manual - Version 1.7.3. University of California, Berkeley, CA.
3. ANSYS (2007) ANSYS Software and Manual, ANSYS Inc., PA.
4. PCI (2004) PCI Design Handbook, Precast/Prestressed Concrete Institute, IL. 

[담당 : 강현구 편집위원]