

## 구조물 축소 모형시험과 수치해석에 의한 구조물 안전도 평가



이 명 규\*

### 1. 서 론

우리나라에서는 90년대 이후에 사회·경제적인 필요성과 시공기술의 발전에 따라 새로운 고층건물, 사장교, 현수교 등 여러형태의 장대구조물이 계획, 시공되고 있다. 최근에 시공되고 있는 장대 교량의 경우에는 구조물의 사회적 중요성에 입각하여 계획단계에서 구조물의 거동을 파악하기 위한 풍동시험 등 기초적인 구조물 모형시험이 행해졌다. 그러나, 현재까지 우리나라의 구조물 축소모형시험에 관한 연구분야는 여러 가지 장기간 건축구조물이나, 장대교량, 원자력발전소의 축소모형시험을 장기간 수행해온 다른 선진국에 비해볼 때 아직 초보적인 단계에 머물고 있으며, 몇몇의 연구자에 의해서 부재모형을 중심으로한 연구가 수행되어져 왔을 뿐이다.

일반적으로 구조물의 구조계 변경에 대한 적절성 평가는 여러 가지 제약조건을 가지는 수치해석에 의존하여 평가하는 것이 일반적인 현실이

다. 그러나, 사회적으로 중요성을 가지는 구조물을 구조변경하여 사용하는 경우에는 구조변경이 그 구조물의 안전성에 미치는 영향을 합리적으로 평가하기 위하여 수치해석과 구조물의 축소모형 시험을 동시에 수행하는 것이 바람직 할 것으로 사료된다. 이에 본 기사에서는 구조물 축소모형 시험과 수치해석을 통하여 구조물의 구조계변경에 따른 안전도 평가를 합리적으로 수행하기 위한 절차에 관하여 살펴보기로 한다.

### 2. 구조계 변경 구조물의 축소모형구조물을 이용한 안전도 평가 절차의 개요

일반적으로 구조물 모형시험은 구조물의 설계 및 시공단계에서 해석적으로 예측할 수 없는 복잡한 구조물의 거동을 검토하기 위해서 주로 실시된다. 그림 1과 같은 지하철 구조물의 경우에는 그 사회적 중요성에 비추어 볼 때, 기존구조물의 구조계가 변하는 경우에는 안전도평가를 목

\* 전주대학교 토목환경공학과 전임강사

적으로한 구조 거동파악을 위하여 모형시험을 실시하는 것이 바람직할것으로 사료된다. 이와 같은 구조물의 기하학적인 형상 및 재료특성을 고려한 모형의 상사비에 따라 수행되는 모형실험을 통하여 구조물의 사용하중 거동분석과 극한하중 도출이 가능하게 된다.

본 기사에서는 그림 2에 나타낸 기존의 지하철 정차장 구조물(A-LINE)에서 신설되는 역과의 승환을 위하여 기존 구조물 벽체의 일부를 절개하여 승환 통로(B-LINE)를 설치하는 과정에서 기존 지하철 구조물의 구조 안전도를 평가하기 위하여 수행한 구조물 축소모형 시험 및 수치해석을 예로 하여 절차를 기술하기로 한다. 대상 구조물에 대한 축소구조모형은 크기와 재하설비 제약으로 모형구조물은 그림 1의 O으로 표시한 부분에 대한 부분 구조물 모형을 제작하였다.

이러한 평가작업에서 적절한 모형제작을 위하여 먼저 기존구조물의 시공상태를 조사 분석해야 한다. 모형구조물의 제작의 첫 번째 단계에서는 구조물의 거동을 나타낼 수 있는 적절한 상사비

를 결정하며 모형실험에 관한 문헌분석과 구입가능한 재료, 작업성 등을 고려하여 상사비를 결정한다. 이러한 상사모형이 결정되면 원형구조물의 시공도면을 기준으로하여 상사비를 고려한 구조물의 축소모형제작이 이루어지게 된다. 모형구조물의 제작에는 먼저 모형콘크리트의 선정, 모형철근의 제작 및 열처리 등의 절차가 필요하다. 특히, 모형콘크리트의 선정시에는 재료 특성을 적절히 모델링하기 위하여 시멘트의 선정, 골재의 적당한 크기 및 입도 선정, 골재의 구입, 콘크리트의 시험배합, 압축과 할렬인장강도를 포함한 기본 특성시험 등의 분석과정이 뒤따라야 한다.

모형철근은 재료 선택과정과 적절한 열처리 온도 선택을 위한 열처리 시험 등의 절차를 통하여 제작한다.

모형구조물 제작의 두번째 단계는 준비한 재료로 시공도면을 기준하여 실제 모형을 제작하는 것이다. 일반적으로 철근콘크리트 구조물의 제작은 거푸집제작, 철근조립, 콘크리트 타설의 단계를 거치게 되며 모형구조물에서도 같은 절차를 거쳐서 제작된다.

일반적으로 구조물 재하시험에 앞서 원형구조물에 대한 수치해석과 모형시험체에 대한 예비해석(Pre-analysis)을 수행하고 해석결과를 분석하여 재하시험에서의 측정항목을 선정한다. 재하시험후에는 모형구조물에 대한 사후해석(Post-analysis)을 실시하여 사전해석과 구조물의 실제 거동의 차이를 분석하여 재하시험과 수치해석의 결과로부터 최종적으로 원형구조물의 안전도를 평가하게 된다. 이러한 안전도 평가절차는 그림 3과 같이 정리할 수 있다.

그림 1의 구조물축소모형 제작은 모래를 이용한 기초지반 형성 → 하부슬래브 거푸집제작 → 하부슬래브 철근조립 → 하부슬래브 타설 → 양생 → 하부슬래브 현치부 타설 → 양생 → 벽체 및 기둥철근조립 → 벽체 절개부 철근제거 → 벽체, 기둥 및 중간슬래브 거푸집설치 → 중간슬래브 철근조립 → 벽체, 기둥 및 중간슬래브 타설 → 양생의 순서로 진행되었으며 철근조립 단계에서는 재하시 구조물의 거동을 측정할 철근용 변형계이

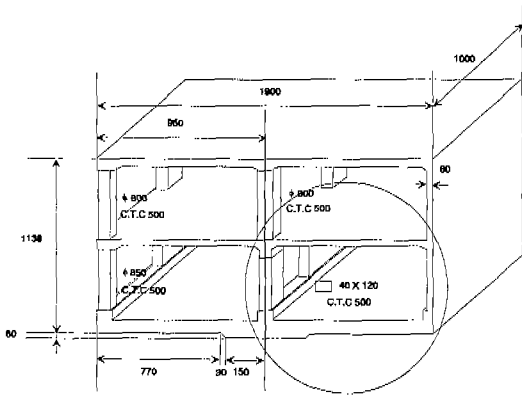


그림 1 지하철 정차장 구조물의 단면형상

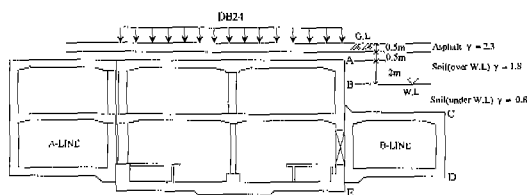


그림 2 승환통로가 설치된 단면의 형상

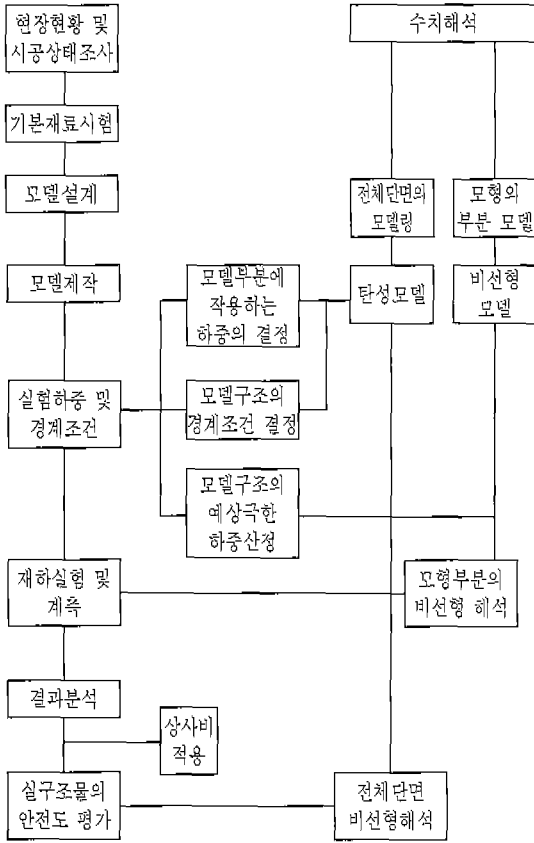


그림 3 구조물 축소모형시험 및 수치해석 절차의 흐름도

지와 콘크리트 매설게이지를 설치하였다. 양생이 완료된 모형 구조물은 재하시험에 앞서 균열 관찰이 용이하도록 흰색페인트로 도포하였고 콘크리트 게이지를 표면에 설치하였다. 측정을 위해 약 140여개의 계측센서가 설치되었고, 재하실험은 시험에 앞서 수행된 실구조물 및 모형체의 수치해석결과를 기준으로 하여 실시되었다. 수치해석은 실제의 원형구조물에 대하여 벽체의 절개에 따른 구조해석을 수행하였고, 또한, 모형구조물은 지하철 정거장 구조물 중의 일부만을 대표하고 있으므로 이 모형구조에 대해서도 구조해석을 수행하였다. 이 모형구조해석 결과는 실험결과와 비교분석되었으며 이로부터 원형 구조물의 안전도를 평가하였다.

### 3. 안전도 평가를 위한 구조물 축소모형시험과 수치해석 예

본 절에서는 그림 1의 구조물의 안전도 평가를 위해서 수행한 연구내용을 개략적으로 기술하기로 한다.

#### 3.1 시공도면분석 및 구조물 현황조사

원형구조물의 거동을 축소 모형에서 재현하기 위해서는 원형구조물의 상태를 정확히 파악할 필요가 있으므로 시공도면분석에서는 기존 구조물의 시공도면으로부터 축소구조물 제작부분에 대하여 사용된 철근의 종류, 물탕, 배근상태를 중심으로 검토 분석을 수행하였다. 구조물 현황 조사에서는 콘크리트와 배근된 철근의 각종 물성시험을 실시하였다. 콘크리트 구조물 조사에서는 콘크리트의 현재 상태를 파악하기 위하여 비파괴강도시험, 코어 강도시험, 중성화 시험 등을 실시하였다. 특히, 코어강도시험을 통하여는 모형시험 결과를 분석하는데 필요한 응력 및 변형 상사비를 산정하는 자료를 얻었다. 철근의 성능시험에서는 기존구조물의 철거시 육안으로 철근의 부식상태 및 부식정도를 파악하였고 손상되지 않은 철근 샘플을 채취하여 인장 시험을 실시하여 모형체 제작의 기본자료를 구하였다. 각 재료의 물성시험결과는 다음 표와 같다.

#### 3.2 실구조물의 예비구조해석

실구조물에 작용하는 하중하에서 구조물의 거

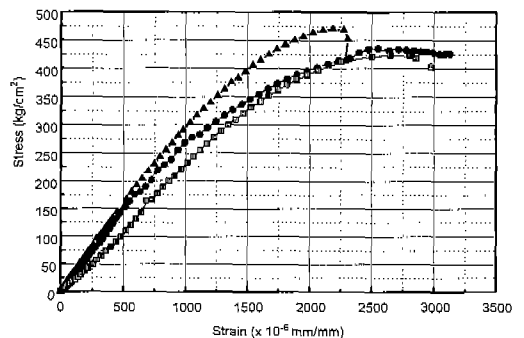


그림 4 원형 콘크리트의 응력-변형곡선(콘크리트 표면게이지값 읽음)

표 1 콘크리트 코아 감도시험 결과

시 편	단면적 (A : cm <sup>2</sup> )	최대하중 (P : kgf)	보정전 강도 (P/A) (kgf/cm <sup>2</sup> )	높이-직경비 (H/D)	보 정 계 수				보정후 강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	비 고
					형상	타설 방향	습윤	충격		
①	80.52	26970	335	1.98	1.0	1.09	0.9	1.18	388	평균강도 463kgf/cm <sup>2</sup> *
②	78.85	33310	422	2.01	1.0	1.09	0.9	1.18	488	
③	79.09	28650	362	2.00	1.0	1.09	0.9	1.18	419	
④	78.15	36910	472	2.04	1.0	1.09	0.9	1.18	546	
⑤	81.71	34110	417	1.94	1.0	1.09	0.9	1.18	483	

\* : 최소값과 최대값을 제외한 평균강도(보정후)

표 2 콘크리트 코아 할렬강도시험 결과

시 편	직 경 (D : cm)	시편길이 (L : cm)	최대하중 (P : kgf)	할렬인장강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	평균압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	압축강도에 대한 인장강도비율 (%)	비고
①	10.08	20.2	10562	33.02	400	8.3	
②	10.02	20.61	8081	24.9		6.2	
③	10.00	20.36	10626	33.2		8.3	

표 3 철근인장시험 결과

철근 직경	항복응력 ( $\sigma_s$ ) (kg/cm <sup>2</sup> )	파단강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	탄성계수*(E) (kg/cm <sup>2</sup> )
D-16	-	7530.031	$2.450 \times 10^6$
	4231.604	6077.201	$1.962 \times 10^6$
D-19	4796.007	6585.738	-
	3704.401	5526.976	-
D-25	3391.035	-	$2.663 \times 10^6$
	4073.757	5522.494	-
D-32	3800.652	-	-
	4002.119	-	$2.446 \times 10^6$

\* : 철근인장시험 공시체에 부착한 Extensometer 읽음값으로부터 산정

등을 검토하고 극한 하중을 산정하기 위하여 현장여건을 고려한 실구조물의 구조해석을 수행하였다. 또한 모형시험을 실시할 부분의 부분 구조 해석을 통하여 전체 구조해석 결과와 비교하여 구조물의 거동을 살펴보았다. 구조물의 모델은 현장조사와 시공도면을 중심으로 하여 기하학적 모델을 작성하였으며 파괴 및 비파괴 감도시험에 근거하여 재료의 특성치(탄성계수, 포아송비 등)

를 결정하였다. 구조물의 해석은 절개부가 설치된 경우와 설치되지 않은 경우에 대하여 모두 실시하여 절개부 설치에 따른 영향을 평가하였다.

전체해석을 수행한 모델은 모델실험을 실시할 구간의 상부슬래브와 좌측의 기둥부를 포함하는 부분이며 재료적으로는 탄성모델을 구성하여 범용 유한요소 해석프로그램인 ADINA의 3차원 쉘 모델을 이용하여 해석하였으며, 하중증가에 따른 구조물의 극한거동을 살펴보기 위해 콘크리트의 인장균열과 압축파괴를 포함하는 재료 비선형모델을 구성하여 ABAQUS프로그램의 3차원 쉘모델을 이용한 극한하중해석을 실시하였다. 해석에서 고려한 하중은 선형해석에서는 상재토압, 시공시 복공판의 하중, 측면토압, 통행하중 등을 고려하였으며 비선형해석에서는 하중증분해석을 위해 상대적으로 일정하게 작용하는 측면토압은 제외하고 하중증분해석을 수행하였다.

이러한 실구조물의 해석결과를 바탕으로 모형의 제작법위, 재하위치, 재하시 작용하는 하중의 크기 등을 결정하였으며 부분모델 해석으로부터 경계조건의 영향을 검토하여 모델제작시 이를 반

영하였다.

구조물 축소모델 실험을 수행할 부분(그림 1의 우측벽체를 포함하는 정착장부분)에 작용하는 하중은 전체모델의 해석결과를 이용하여 결정하였으며 모델제작부분의 부분모델을 구성하여 선형 해석을 실시하였다. 부분구조물 전체구조물에 비하여 단순한 계를 이루고 있으므로 응력재분배가 상대적으로 적게 일어나 절개부에 발생하는 응력은 더커지게 된다. 따라서 부분 구조물에 대한 해석결과나 모형시험결과는 전체적인 구조물에 대해서는 안전측의 결과를 나타낸다고 할 수 있다.

3.3 구조물 축소모형의 상사비 결정

일반적으로 철근콘크리트 구조물의 모형시험은 구조물의 거동을 어느 정도 범위까지 파악하는 가에 따라 모델의 특성이 결정되고, 결정된 모델의 특성에 따라 기하학적 상사비와 재료 상사비가 결정된다. 기하학적 상사비는 표 4에 나타난 범위에서 결정하는 것이 일반적이다.

모형시험은 앞에서 기술한 바와 같이 정착장 구간중에 절개부가 설치되는 측면 벽체를 중심으로 하여 단면중 우측하단 1/4 부분을 모델링하여 실시하기로 하였으며, 과업의 성격상 구조물의 균열하중 및 극한하중을 얻기 위한 철근콘크리트 강도모델의 기하학적 상사비를 1/5로 결정하였다.

소요되는 재료의 상사비를 조절하기 위해서 모형콘크리트(micro concrete)의 배합시험을 실시하였다. 모형콘크리트는 콘크리트의 압축강도에 대한 인장강도의 비율을 일정하게 유지하기 위하여 특정크기의 골재만을 사용하는 불연속입도

(gap-graded)의 골재를 사용하여 제작하였으며 시멘트의 입자에 의한 강도특성 영향을 모델링하기 위해서 보통 포틀랜드시멘트보다 입자가 미세한 조강시멘트를 사용하였다. 이와 같이 초조강시멘트를 사용하는 경우에는 시멘트입자에 대한 상사조건을 어느 정도 충족시킬 수 있고 양생기간을 줄일 수 있는 이점이 있다. 미세골재의 콘크리트를 제작하는 경우에는 인장강도의 증가에 잔골재율의 영향이 가장 큰 것으로 알려져 있으므로 배합시험에서는 강도를 얻기 위한 물-시멘트비와 잔골재율을 중심으로 하여 배합시험을 실시하였다. 모형콘크리트 배합에서 굵은골재는 N0.4체를 통과하고 N0.8체에 남는 골재로 하였으며 잔골재는 No.30체를 통과하는 골재로 하였다. 모델제작을 위해서 시험을 수행한 배합표는 표 5와 같다. 불연속입도의 골재를 사용한 경우 작업성이 나빠지므로 소요의 작업성을 얻기 위하여 유동화제를 1.5%사용하였다.

각 배합에서는 조강시멘트를 사용하였으므로 압축강도 시험과 할렬인장시험은 재령 15일을

표 4 구조물과 모형종류에 따른 기하학적 축소율 (1/S)

구조물 형태	탄성모델	강도 모델	비고
셸 지붕	1/200~1/50	1/30~1/10	
고속도로 교량	1/25	1/20~1/4	
원자로 반응용기	1/100~1/50	1/20~1/4	
슬래브 구조물	1/25	1/10~1/4	
댐	1/400	1/75	
풍동실험	1/300~1/50	적용안함	

표 5 모델 콘크리트의 종량비에 의한 배합표

	시멘트 (C)	굵은 골재 (G)*	잔골재 (S)**	물 (W)	잔골재율 (S/a)	물-시멘트 (W/C)	유동화제 (adm./C)
Case 1	1	3.15	1.35	0.5	1.35/(3.15+1.35)=0.3	0.5	1.5%
Case 2	1	2.25	2.25	0.5	2.25/(2.25+2.25)=0.5	0.5	
Case 3	1	2.7	1.8	0.5	1.8/(2.7+1.8)=0.4	0.5	
Case 4	1	3.15	1.35	0.42	1.35/(3.15+1.35)=0.3	0.42	
Case 5	1	2.7	1.8	0.42	1.8/(2.7+1.8)=0.4	0.42	

기준으로 실시하였으며 각 배합에 대한 시험결과는 표 6과 같다.

압축강도와 할렬인장강도 시험결과, 압축에 대한 인장 강도비, 최대응력점에서의 압축변형도 등을 원형콘크리트와 비교검토하여 case 1을 최종배합으로 선택하였다.

철근의 재질에 따른 적절한 열처리 온도를 결정하기 위해서 열처리실험을 실시하였다. 모형철근의 경우에는 직경이 3mm, 2mm의 철근을 가공하

기 위하여 경강선을 구입하여 열처리 실험을 실시하여 원형 철근의 응력 변형곡선과 일치하는 최적의 풀림 열처리 온도를 구하였다. 5mm 모형 철근은 이형리브(rib)가 냉간 가공된 상태이므로 철근의 응력변형특성을 갖게 하기 위해서 불림 열처리를 실시하였다.

모델제작에 사용한 모형콘크리트와 모형철근의 응력변형곡선으로부터 결정된 원형과 모델과의 상사비는 다음 표 7과 같다.

표 6 원형과 모델 콘크리트의 강도비교

	압축강도 $f'_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	할렬인장강도 $f'_t$ (kg/cm <sup>2</sup> )	압축강도에 대한 인장강도비 ( $f'_t/f'_c$ )	압축강도의 변형도 ( $\times 10^{-6}$ )	비 고
현장시험	406	30	0.073	0.0020	
Model Case 1	257	18	0.070	0.0028	
Model Case 2	321	25	0.078	0.0031	
Model Case 3	371	24	0.065	0.0030	
Model Case 4	350	25	0.072	0.0033	

표 7 원형과 모델과의 상사비

	물리량	차원	상사비 (원형/모델)		비고		
재료 성질	콘크리트 응력, $\sigma_c$	FL <sup>-2</sup>	$S_\sigma$	1.80	463/257	콘크리트 강도실험 결과	
	콘크리트 변형도, $\epsilon_c$	-	$S_\epsilon$	0.89	0.0025/0.0028		
	콘크리트 탄성계수, $E_c$	FL <sup>-2</sup>	$S_\sigma/S_\epsilon$	2.02	1.8/0.89		
	포아송비, $\nu_c$	-	1	1	1		
	밀도, $\rho_c$	FL <sup>-3</sup>	$S_\sigma/S_1$	1.0	1.0		
	철근응력, $\sigma_s$	철근 변형도, $\epsilon_s$	FL <sup>-2</sup>	$S_\sigma$	1.77	4,347/2,458	5mm 철근
					1.10	4,000/3,630	6mm 철근
					0.559	0.00743/0.01329	5mm 철근
					0.581	0.02677/0.04605	6mm 철근
	철근탄성계수, $E_s$	FL <sup>-2</sup>	1	3.16	585,218/184,951	5mm 철근	
1.90				149,944/78,827	6mm 철근		
기하 형상	길이, $l$	L	$S_1$	5			
	변위, $\delta$	L	$S_\sigma S_1$	4.45	5×0.89		
	각변위, $\beta$	-	$S_c$	0.89		콘크리트 변형상사비	
	철근 단면적, $A_s$	L <sup>2</sup>	$S_\sigma S_1^2/S_c$	25.0			
하중	집중하중, Q	F	$S_\sigma S_1^2$	45	1.80×25		
	선하중, w	FL <sup>-1</sup>	$S_\sigma S_1$	9	1.80×5		
	압력, q	FL <sup>-2</sup>	$S_\sigma$	1.80	1.80		
	모멘트, M	FL	$S_\sigma S_1^3$	225	1.80×5 <sup>3</sup>		

3.4 구조물 축소모형의 제작 및 재하실험

모형의 제작은 실내에서 목재 거푸집을 이용하였으며 타설은 하부슬래브 타설, 상부슬래브와 벽체 및 기둥타설의 2단계로 이루어 졌으며 재하시험동안 구조물의 거동을 파악하기 위해서 140여 개의 계측센서를 모형 구조물에 설치하였다. 구조물을 15일 양생시킨 후 재하장치를 설치하여 재하시험을 실시하였다. 구조물의 전체해석결과로부터 모델부분에 작용하는 하중의 비율을 산정하여 모형시험 구조물에 하중을 재하하였다. 하중은 벽체쪽에는 단순지지 장치를 이용하여 분포하중을 작용시켰으며 정착장 중앙기둥부 상단에는 단순지지 장치를 이용하여 집중하중을 작용시켰다. 정착장 중앙기둥부와 벽체쪽에 작용하는 하중 크기의 비는 3차원 구조해석의 결과로부터 산출된 값으로서 2:1로 하였다. 재하실험시 구조물모형의 하중 재하위치는 그림 5에 나타낸 바와 같으며 하중재하장치는 그림 6과 같다.

시험결과 절개부에 균열은 하중이 9ton 이상에서 발생하며 이 위치에서의 변형측정결과로부터 구한 균열하중과 일치하고 있다. 절개부에 발생한 균열의 형상 및 하중은 그림 7과 같다. 정착장 중앙의 하부거더에는 하중이 9ton인 경우 수직방향으로 균열이 발생하였으며 폭은 0.6mm폭으로 발생하였으며 그 양상은 그림 8과 같다. 균열 양상은 전단균열로 사료되며 이는 정착장 중앙기둥에 과도한 하중이 걸리게 되므로 발생하는 현상으로 판단된다.

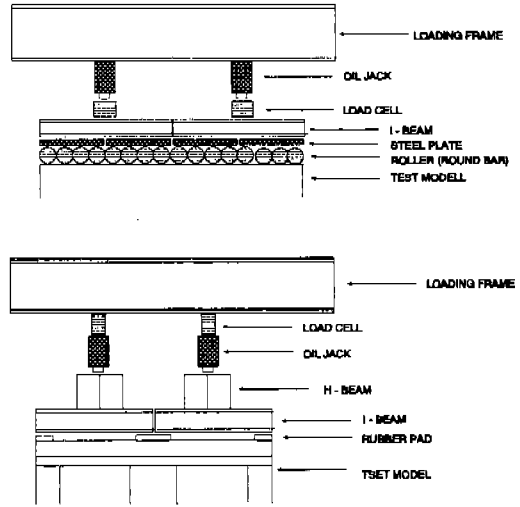


그림 6 모형 구조물의 하중재하장치

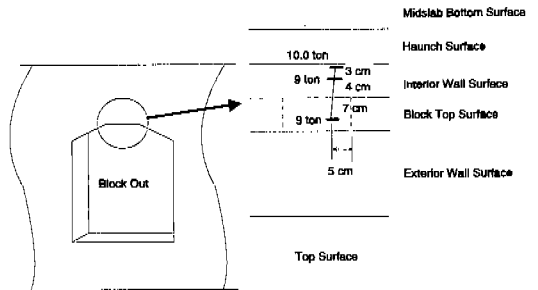


그림 7 절개부 상단의 균열발생 위치 및 형상

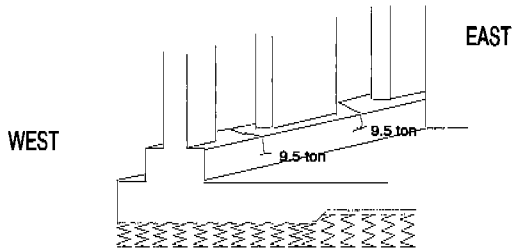


그림 8 하부거더에 발생한 균열양상

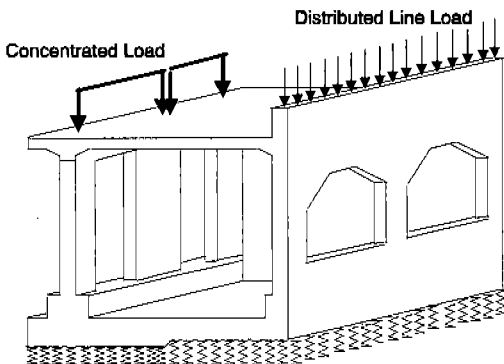


그림 5 모형 구조물의 형상과 하중의 재하위치

3.5 모형구조물의 내하능력 평가

안전도 평가를 위한 구조물 축소모형시험의 중요한 목적은 재하시험시 측정된 결과를 이용하여 구조물의 균열하중과 극한하중을 구하는 것이다.

구조물 축소모형에 하중을 증가 시켜 약 9ton의 하중에서 철근 변형이 불연속적으로 증가하는 거동을 보였으며 이는 균열발생 등에 의해서 용력이 재분배되는 현상으로 볼 수 있을 것으로 사료된다. 절개부 상부에 매설된 철근의 변형은 벽체의 하중이 약 11.2ton에서 크게 증가하였다. 이 하중 이후에서는 구조물이 더 이상의 하중을 부담하지 못하고 정착장중앙 기둥부와 중간거더의 접합부, 하부슬래브거더 등 다른 부위에 계속하여 균열이 진전되어 더 이상의 하중재하가 불가능하였다.

구조물의 거동을 요약하면 절개부위에서 벽체 하중이 약 9ton정도에서 균열이 발생하며 구조물의 극한하중은 균열이 발생한 후 더 이상의 하중을 부담하지 못하고 계속해서 다른 부위에 균열이 진전되는 벽체하중 11.4ton을 구조물의 극한하중으로 볼 수 있다. 모형구조물의 상사비(45)를 적용하면 원형구조물의 균열하중은 405ton으로 볼 수 있고 극한하중은 513ton으로 계산되었다. 설계하중하에서 모델링한 부분에 작용하는 총 하중은 255.27ton (=510.54ton/2)으로 철근변형도에 영향을 미치는 균열하중에 대한 설계하중의 안전도는 약 1.59(=405ton/255.27ton)로 볼 수 있으며, 극한하중에 대한 안전도는 2.00으로 계산할 수 있다. 이러한 분석결과는 다음 표 8과 같다.

3.6 모형구조물의 수치해석

모형구조물의 재하시험결과로부터 원형구조물의 거동을 추정하기 위한 단계로 모형시험체를 3차원 입체요소(solid element)로 모델링하여 수치

해석을 수행하였다. 수치해석모델에서 사용한 재료특성은 모형시험체의 제작에 사용된 콘크리트 및 철근의 강도특성과 변형특성을 고려하여 모델링하였다. 해석된 결과를 실험결과와 비교분석하여 실제 거동과 해석상의 차이를 규명하였다.

3차원 입체요소를 사용한 해석모델의 하부에는 10cm두께의 모래지반을 모델링하기 위해서 스프링요소를 설치하였다. 입체요소를 사용하는 경우에는 예비해석에서 사용한 셀요소와는 달리 지반스프링이 약한 경우에 변형의 급격한 변화에 의해서 해가 불안정하여 하부슬래브에 균열이 발생할 수 있으므로 지반스프링상수를 크게 설정하여 하부슬래브의 거동을 안정시켜야 한다. 해석에서 고려하는 하중은 벽체와 중앙정차장 기둥부에 작용시켰다. 벽체와 기둥에 작용하는 하중비는 전체해석모델에 설계하중이 작용할때 모델부분에 작용하는 부재력으로부터 구하였다.

해석결과 벽체 작용하중이 10ton일 때 구조물의 변형 형상은 그림 9와 같으며 용력이 크게 발생하는 위치는 주로 하중이 집중적으로 가해지는 기둥 부위였으며 벽체에서 용력이 큰부분은 개구부 주변이었다.

해석에서 초기균열은 벽체 작용하중이 10.5ton일때 발생하였으며 발생위치는 집중하중이 작용하는 정차장 중앙기둥부에서 기둥과 중간거더의 접합부에서 발생하였으며 하중이 증가함에 따라서 균열이 진전되었다. 벽체 절개부에서의 균열

표 8 모형시험 해석결과의 분석

구조물의 거동	모형구조물의 하중	원형구조물 환산하중	원형구조물 작용하중에 대한 안전도 (환산하중/원형구조물 작용하중)	비고
균열하중	9 ton	405 ton	1.59	원형구조물 작용하중 : 255.27ton
극한하중	11.4 ton	513 ton	2.00	

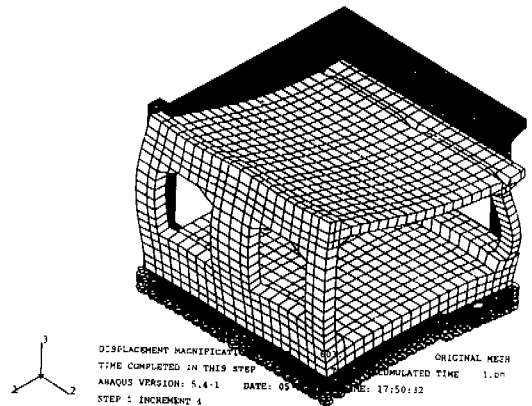


그림 9 구조물의 변형 형상 (벽체 작용하중 10ton)



은 구조물이 극한하중에 도달한 경우에 절개부 상단의 중앙에서 발생하였다.

3차원 입체요소를 사용한 모델에 대하여 해석을 수행한 결과를 구조물의 실제 거동과 비교한 그림 10은 정착장 중앙기둥의 내부 변형의 측정결과와 해석결과가 거의 일치하고 있다. 구조 해석결과와 측정치를 비교한 결과 전산해석치는 실험으로 구한 구조물의 거동과 유사한 경향을 보이고 있는 것으로 볼 수 있다.

모형시험체의 극한하중을 산정하기 위하여 벽체와 기둥에 작용하는 하중비는 1:2를 유지하도록 하여 하중을 자동증분극한하중을 산정하였다. 구조물의 극한해석결과 극한상태는 벽체하중이 13.9ton일때 도달하고 이 하중에서 균열은 주로 중간기둥과 정착장 중앙기둥부의 접합부에 주로 발생하였으며 절개부에서도 균열이 발생하였다. 해석에서의 극한 하중 13.9ton은 구조물의 상사비

를 적용할 경우 원형 구조물 설계하중의 2.45배가 된다. 또한, 모형시험체의 극한해석으로 구한 구조물의 파괴양상은 모형실험에서의 파괴양상과 대체적으로 일치하고 있는 것으로 나타났다.

### 3.7 구조물의 안전도 평가

지하철 정착장에 승환시설을 설치하기 위하여 기존 구조물의 벽체를 절개하여 통로를 개설하는 경우, 기존 구조물의 안전도를 모형시험과 수치해석을 통하여 평가하였다. 대상 구조물인 정착장 구조물의 모형시험을 위하여 실구조물의 해석을 실시하여 모형부분의 구조적 거동을 검토하였으며 구조물의 거동을 합리적으로 나타낼 수 있는 재료를 선정하여 구조모형을 제작하여 재하 시험을 실시 하였다.

정착장 구조물의 구조물 축소모형 시험결과와 해석 결과로부터 얻은 구조거동상의 특징은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 전체 구조물의 3차원 해석결과 절개부를 포함한 전 구조물이 소요의 안전도를 확보하고 있는 것으로 나타났다.
- 2) 실험 결과 구조물의 초기 균열은 절개부 상단 중앙에서 발생하며 균열하중은 9ton(원형 구조물 작용하중 405ton)으로 볼 수 있으며 극한하중은 11.4ton(원형 구조물 작용하중 513ton)이었다.
- 3) 모형시험결과 극한 하중은 11.4ton(원형 구조물 작용하중 513ton)이었으며 해석에 의하면 13.5ton(원형 구조물 작용하중 625.5ton)에서 극한 상태에 이르는 것으로 나타났다. 시험결과와 해석결과와의 파괴 양상은 대체적으로 일치하고 있는 것으로 나타났다.

## 4. 결 론

본 기사에서는 기존 구조물의 구조를 변경하여 사용하는 경우 구조물 축소모형시험과 수치해석을 이용하여 안전도를 합리적으로 평가하는 절차에 관하여 지하철 정착장 구조물을 예로하여 살펴 보았다. 구조물의 안전도를 평가하기 위한 구조물 축소모형 시험에서는 원형구조물의 실제 거동을 나타내는 모형의 제작이 가장 중요한 사항이다. 이를 위해서 적절한 상사율을 가지는 구조

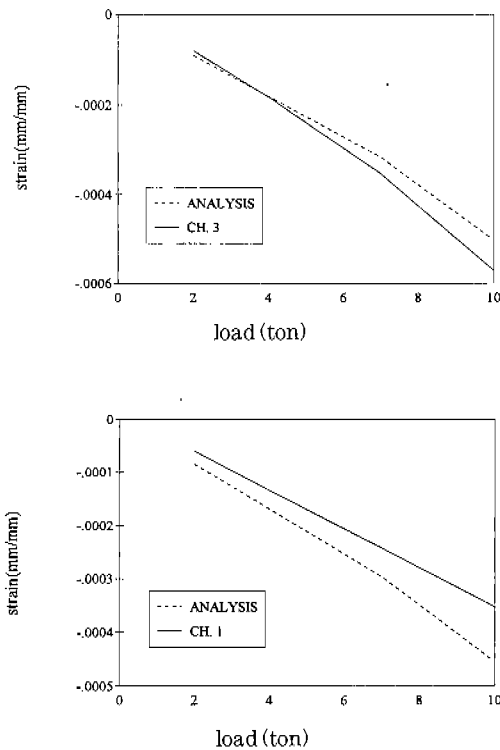


그림 10 정착장 중앙기둥에서의 내측 표면의 변형 (중앙위치)

재료의 선정, 합리적인 경계조건의 설정, 실제하중을 고려한 재하방법 등을 결정하여야 한다. 구조재료의 선정과 모형의 축소율은 모형구조의 거동이 탄성범위 내인가 또는 극한거동인가에 따라 결정되는 것이 일반적이다. 안전도 평가를 위한 모형구조물의 제작과정에서는 원형구조물 거동을 수치해석을 통하여 예측하는 과정이 필요하며 이러한 사전해석(pre-analysis)을 통하여 구조물의 개략적인 거동과 측정항목을 정하며, 또한 합리적인 재하방법을 결정하게 된다. 모형구조물에 대한 재하시험을 통하여 원형구조물의 거동을 상사비를 적용하여 바로 예측할 수 있으나 재하시험후 측정된 사항에 대하여는 모형구조물에 대한 사후해석(post-analysis)를 수행하여 측정값과 비교 검토하여 거동의 일치성을 입증하는 것이 일반적이다. 이런 과정을 거쳐 검증된 수치해석모델을 이용하여 실험에서 고려하지 않은 여러 가지 하중조건에 수치적으로 검토할 수 있으며 이를 이용하여 안전도검토와 적절한 대책을 수립할 수 있게 된다.

사전해석-모형시험-사후해석의 절차에 따른 구조물의 모형실험의 사례는 미국과 유럽에서 찾아볼 수 있으며 이를 통하여 수치해석기법의 발전이 이루어지고 있다. 현재까지 우리나라에서는 구조물 모형실험에 관련된 연구가 활발하지 못한 편이며 상대적으로 경험이 적게 축적되어 있는 실정이다. 그러나 수치해석기법의 발전과 실제구조물의 안전도를 합리적으로 파악하기 위해서는 구조물모형 실험이 필수적이며 앞으로 연구가 활발히 이루어져야 할 분야로 사료된다.

### 참 고 문 헌

- Noor, F. A. and Boswell, L. F., Small Scale Modelling of Concrete Structures, Elsevier Applied Science, 1992
- Sabnis, G. M., etc, Structural Modeling and Experimental Techniques, Prentice Hall, 1983
- Pfeiffer, P. A. et al, "Pretest Analysis of a 1:6-Scale Reinforced Concrete Containment Model Subjected to Pressurization", Nuclear Engineering and Design, Vol. 115, 1989, pp. 73-89.
- Neville, A.M., Properties of Concrete, 3rd edition, 1981
- Mindess, S., Young, J.F., Concrete, 1981
- Malhotra, V.M., and Carino, N.J., "Handbook on Nondestructive Testing of Concrete", CRC Press, 1991
- ADINA-IN User's Manual, ADINA Engineering, 1984
- ADINA Example Manual, ADINA Engineering, 1984
- ADINA Theory and Modeling Guide, ADINA Engineering, 1984
- ABAQUS User's Manual Ver. 5.2, Hibbit, Karson & Sorensen, Inc, 1992,
- ABAQUS Example Manual Ver. 5.2, Hibbit, Karson & Sorensen, Inc 1992
- 오병환, 이명규, "온도 및 내압을 받는 원자로 철근콘크리트 격납구조물의 비선형해석", 대한토목학회논문집, 제14권 3호, 1994년 5월, pp. 403-414
- Horschel,D.S., Experimental Results from Pressure Testing a 1:6-Scale Nuclear Power Plant Containment, NUREG/CR-5121, SAND88-0906, Sandia Nat'l Lab., 1992
- Clauss, D.B., Round-Robin Pretest Analysis of a 1:6-Scale Reinforced Concrete Containment Model Subject to Static Internal Pressurization, Sandia Nat'l Lab., 1987
- 이한선, 구조물의 축소모델 재료에 관한 연구, 한양대학교 초대형 구조시스템연구센터, 1995
- 장승필, 모형교량에 관한 실내시험연구, 한국도로공사 도로연구소, 1993