

조적식 교각의 내진해석 기법 개발

Development of Seismic Analysis Technique for Masonry Structure

정 용 철¹⁾ 배 준 현²⁾ 이 준 석³⁾ 강 영 중⁴⁾
Jeong, Yong-Cheol Bae, Jun-Hyun Lee, Jun-Seok, Kang, Young-Jong

ABSTRACT

There are many railway structures which were designed without considering aseismic capacity. In special, masonry structures constructed long time ago should be reviewed about their resistance to earthquake. In this paper, technique to evaluate the capacity of masonry railway bridge is tried to develop by means of FEM analysis. In general FEM analysis program, 3-D solid element is used for masonry structures and response spectrum analysis procedure is tried. In addition, 3-D solid element has material properties equivalent to mortar-brick composite body. Used FEM program is ABAQUS-CAE

1. 서 론

20세기에 들어와서 세계적으로 지진 활동이 활발해지고 있고 그에 따른 피해 또한 크게 발생하고 있다. 특히 최근에 발생한 미국 캘리포니아와 일본 고베 대지진, 터키, 대만의 지진, 그리고 최근의 인도 구자라트 지역의 지진은 지진에 대한 피해가 얼마나 심각한지를 잘 보여주고 있다. 또한, 우리 나라는 일반적으로 지진에 대해 안전지대로 생각하고 있지만, 과거 15세기와 18세기 사이에는 우리나라에서도 지진활동이 활발하게 일어났으며, 20세기 중반 이후에는 지리산 지진(JMA진도 V, 1936.7.3), 동해 지진(JMA진도 III, 1963.9.6), 속리산 지진(JMA진도 III, 1978.9.15), 홍성 지진(JMA 진도 V, 1978.10.7)이 발생하였고 그 외에도 MM진도 IV 중진이 여러 차례 관측되었다. 이러한 관측 기록들로 조사 분석한 결과, 한반도에도 지진 활동이 활성화 될 활률이 증가함을 알 수 있다. 이러한 사실로 보았을 때 우리 나라에서도 구조물에 치명적인 손상을 줄 수 있는 강진이 발생할 가능성을 배제할 수는 없다.

이러한 요구에 의해 국내에서도 내진설계의 개념이 설계에 반영되기 시작하였으며, 1991년에 제정 된 '고속전철용 설계 시방서'의 '하중'편에 지진력이 도입되었고, 2000년에는 '고속철도시설물 내진 설계기준'에서 좀더 일반적인 범위의 내진설계가 철도 시설물에 반영되었다. 이러한 내진설계 기준의 도입으로 현재 설계, 시공되는 교량의 경우 지진에 대해 안정성을 확보하고 있으나, 과거에 시공되어 내진설계가 적용되지 않은 교량, 특히 조적식 교량은 지진에 대한 안정성 확보를 확신할 수 없다.

이에 따라 본 연구에서는 범용해석 프로그램(ABAQUS)를 사용하여 내진설계가 되어 있지 않은 기존 조적식 교량에 대해서 내진성능을 평가하고 지진 시 구조물 붕괴방지 수준의 내진성능을 확보할 수 있는 방안을 연구하고 구조물의 내진해석 개발에 그 목적을 두고 있다

2. 기 본 이 론

조적식 구조물은 석재와 모르타르로 구성되어 있다. 이러한 조적식 구조물 해석시 기존의 유한요소법을 이용하

1 고려대학교 토목환경공학과 석사과정
2 고려대학교 토목환경공학과, 석사과정
3 한국철도기술연구원, 책임연구원, 공학박사, 정회원
4 고려대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사, 정회원

면 조적식 구조물의 거동을 분석할 경우에는 석재 및 모르타르의 탄성계수 차이가 현저하므로 두 구성체의 경계지역에서는 엄밀한 요소망이 요구된다. 또한 개별요소법 (Discrete Element Method)을 적용할 수 있으나 널리 적용되지 못하고 있으며 최근에 한계해석법(limit method)을 이용한 해석기법 (Sutcliffe등, 2001)도 제시한바 있다. 한편 벽체식 조적식 구조물의 경우, 경계조건이 비교적 간단하다면 극한하중(ultimit load) 해석법에 의한 근사해석이 가능하며 실험결과와 유사한 결과를 얻을 수 있는것으로 알려져 있으나(Shinha, 1980) 아치형 조적식 구조물의 경우에는 적용이 곤란한 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 비교적 해석시간이 짧고 실제로 현장에서 적용가능하며 복합체의 에너지이론을 근거로 조적조의 안정성을 검토할수 있는 J.S. Lee et al. (1998)의 방법을 선택하여 석재와 모르타르의 등가물성치를 산정하였다

2.1 기본 해석

등가물성치의 기본적인 가정은 다음과 같다

석재와 모르타르는 일체거동을 하며 모르타르 이음부는 연속체이다.

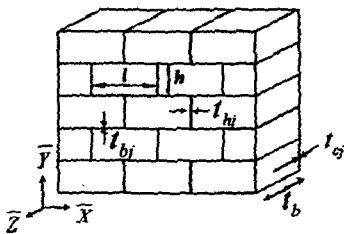


그림 1 조적식 구조물

$$\begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/E_x & -\nu_{xy}/E_y & -\nu_{xz}/E_z & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{yx}/E_x & 1/E_y & -\nu_{yz}/E_z & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{zx}/E_x & -\nu_{zy}/E_y & 1/E_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{yz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{zx} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{pmatrix}$$

그림 2 조적조 구조물의 비등방성 재료특성

등가 이방성 물성치는 유한요소해석에서 응력/변형율로 계산된 강성매트릭스 시스템에 의해 정의되어진다. 그러한 물성치안에 응력/변형율은 다음과 같은 관계식을 통해 구할수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_b &= [S_b] \bar{\sigma} \\ \sigma_{by} &= [S_{by}] \bar{\sigma} \\ \sigma_{bz} &= [S_{bz}] \bar{\sigma} \end{aligned} \quad (1)$$

3. 실험 방법 및 결과

작업이 이루어지고 있는 조적식 구조물에서 시료를 채취하였다. 그리고 시료채취 후에 3 개의 모르타르와 7개의 석재 공시체를 만들고, 3개의 모르타르와 5개의 석재에 대해서 시료의 단면적은 완전한 원이라고 가정하고 하중은 편심이 가해지지않고 전면적에 동일한 응력을 가하여 압축실험을 실시하였고, 2개의 석재에 대해서 실험 인장강도 실험을 실시하였다. 이러한 실험결과를 토대로 Lee 등(1998)의 접근법 중 변형률 에너지법을 이용하여 등가 모델에 대한 비등방성 탄성계수를 계산하였다. 최대 압축, 인장강도는 파괴모드계산에 이용하였다.



그림 3.채취한 시료

대표적인 체적은 모르타르와 석재 변형율의 합은 같다고 가정하여 산출하였다. Lee 등(1998)의 접근법 중 변형률 에너지법을 응용하면 실험에서 얻은 조적조 각 구성체의 물성치와 치수를 이용하여 다음과 같은 등가 모델에 대한 비등방 탄성계수를 얻을 수 있다.

표 1. 등가 모델에 대한 비등방 탄성계수

$E_x = 301,000 \text{ kg/cm}^2$	$\nu_{xy} = 0.20$	$G_{xy} = 107,700 \text{ kg/cm}^2$
$E_y = 293,000 \text{ kg/cm}^2$	$\nu_{yz} = 0.20$	$G_{yz} = 103,700 \text{ kg/cm}^2$
$E_z = 288,000 \text{ kg/cm}^2$	$\nu_{zx} = 0.20$	$G_{zx} = 106,700 \text{ kg/cm}^2$

4. 내진 해석

오늘날 주로 이용되는 해석방법에는 응답스펙트럼 해석법과 시간이력 해석법이 있다. 응답스펙트럼 해석방법에는 단일모드와 다중모드 스펙트럼 해석이 있다. 전자는 해석이 단순하고 계산량이 적으나, 결과값이 크게 산정되고, 후자의 경우는 해석방법이 비교적 간단하고 구조물의 동적특성을 고려하기가 용이하여 구조물의 시간에 따른 거동을 알수 없으며, 비선형 해석이 불가능하나 일반적인 교량 해석에는 정확한 결과를 산출할 수 있다. 또한 시간이력 해석법은 구조물의 시간에 따른 거동과약이 가능하며 가장 정확한 결과값을 얻어낼수 있으나, 실제 지진기록이나 인공지진차형이 필요하며 계산량이 많이 요해진다. 따라서 본 연구에서는 비교적 용이한 방법으로 정확한 값을 산출할수 있는 다중모드 스펙트럼 해석법을 이용하였다.

자유진동 해석에서 하중과 감쇠에 의한 효과는 고려되지 않았고 자유진동의 방정식은 $[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = 0$ 이다. 일반적인 유한요소 해석 결과값은 자유진동모드와 관련이 있다. 밑의 표에서 C3D8 요소의 경우 고유치는 distributed and this brings to increment of calculation time. 따라서, 본 연구에서는 C3D20(20 node 3D-solid element) 를 이용하였다.

표 2. 각 요소별 고유치 분석

	solid	solid	solid	Solid	Solid
material	iso	iso	Iso	Ortho	Ortho
elements	C3D8	C3D20	C3D10	C3D20	C3D10
mode01	16.62	19.16	19.15	7.64	7.60
mode02	45.61	46.32	46.30	18.32	18.28
mode03	54.55	63.50	63.44	24.57	24.31
mode04	91.66	104.38	104.19	41.33	40.93
mode05	120.20	151.73	151.71	60.36	60.32
mode06	120.62	168.56	168.49	65.96	65.72
mode07	121.41	192.56	192.30	74.65	73.68
mode08	121.91	250.78	250.02	96.72	97.25
mode09	121.95	307.41	307.13	122.24	119.67
mode10	122.03	333.25	332.53	129.66	127.32

응답 스펙트럼 해석 방법에는 ABS, SRSS, TENP, NRL, CQC 등이 있다. 응답 스펙트럼 해석은 시간이력과 비교했을 때 SRSS와 CQC방법은 거의 차이가 없다. 본 연구에서는 가장 많이 사용되고 있는 SRSS 방법을 택하여 응력값을 산출하였다.

표 3. 다중 응답 스펙트럼 방법

	S1	S2	S3	S4
시간이력	-25.5	14.0	-37.0	-22.8
ABS/ALG	48.3	48.3	65.1	65.1
SRSS/ALG	18.4	18.4	24.8	24.8
TENP/ALG	28.9	28.9	35.9	35.9
NRL/ALG	25.9	25.9	34.6	34.6
CQC/ALG	23.3	13.0	29.0	20.7

응답 스펙트럼은 한국 철도교 시방기준에 제시되어있다. 또한, 응답 스펙트럼 전체에 대한 구조물 파괴계수 기준은 0.1~1까지 표기되어졌다. 예를 들면 파괴 계수가 0.5인 경우는 구조물에 대한 전체 응답스펙트럼 설계시 50%가량이 파괴되기 쉽다는 것을 말한다.

4.1 단경간 거더교와 트러스교의 모델

단경간 거더교와 트러스교는 일반적인 FEM을 이용한 범용해석 프로그램(ABAQUS/CAE)를 사용하여 해석을 실시하였다. 상부구조와 하부구조는 ABAQUS 6.2-001 과 Equation Constraint Option을 사용하였고, 상부구조는 쉘 요소, 하부구조는 3차원 solid 요소로 모델링하였다. 상부와 하부를 잇는 교좌장치 부분은 강제 보요소를 사용하였다. 기초부분에 대한 경계조건은 조금 더 정밀한 해석을 하기 위해 고정단으로 설정하였다.

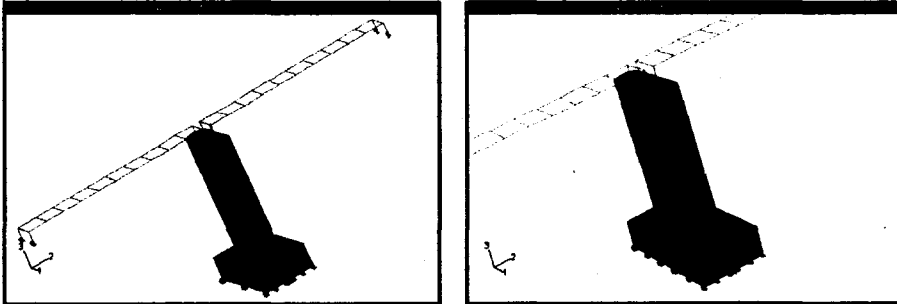


그림 4. ABAQUS/CAE 모델

각각의 구성체(석재와 모르타르)에 대하여 파괴에 대해 판정하여야 한다. 파괴의 기준은 실험결과를 이용하여 조적조 구성체에 대한 Mohr-Coulmb 항복 함수로 결정한다. 이 항복함수는 다음과 같은 응력 불변량(stress invariant) , $\bar{\sigma}$ 에 의해 표현 가능하다. 실험에 의한 응력결과를 유한요소 해석을 이용해 각각의 구성체에 대한 응력으로 바꾼후 Mohr-Coulmb 항복함수를 통해 파괴여부를 판단할 수 있다.

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \tag{2}$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \tag{3}$$

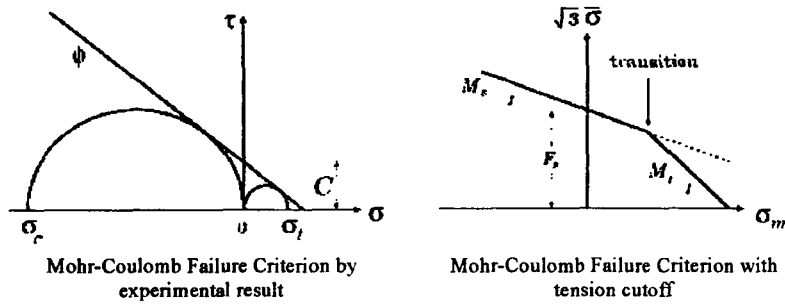


그림. 7 Mohr-Coulomb 파괴

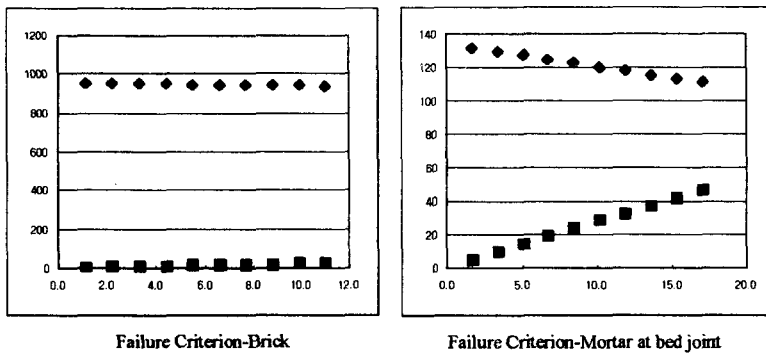
4.3 내진 해석 결과

다음과 같은 알고리즘(J.S.Lee et al.)에 의해 파괴여부를 알 수 있다.

	31	-0.0093	0.0126	-0.0037	-3.9681	0.2169	0.0012
	131	0.0016	0.0159	-0.0001	-5.2398	-0.1001	0.0003
	231	0.0088	0.0357	0.0009	4.3513	-0.2054	0.0022
	351	0.1236	1.0984	-0.0366	-0.1398	-0.0792	0.7719
	406	-0.0636	7.3896	0.0306	0.5240	-0.0149	1.6810
	461	-1.5396	-22.0317	2.2046	-3.2250	-0.1850	-2.2618

표 4 응력 결과

아래 그래프는 구조체(모르타르, 석재)의 응력과 파괴기준을 보여준다. 이 그래프를 통해서 파괴여부를 판단할 수 있다.



5. 결론

연구에서 내진해석은 이방성 물성치를 가진 3차원 solid 요소를 응답스펙트럼 방법을 이용하여 해석하였고, 조적식 구조물에 대해서 세부적으로 모르타르와 석재에 대해서 나눠서 모델링하는 것 대신에 변형을 에너지 개념을 이용하여 등방성 물성치를 구현후 응력값을 산출하였다. 이러한 과정은 성질이 각각 다른 구조물에 대한 분석과정에서 좀더 시간을 효율적으로 단축시킬 수 있다. 여러 교각의 구조물의 해석결과의 경향을 살펴볼 때 상부구조의 질량이 크며, 교각의 높이가 클수록 안전도가 낮아짐을 확인할 수 있다. 이와 더불어 여러 기존 조적식 구조물에 적용한 결과 힘에 의해 종결눈(bed joint)에서 균열이 먼저 발생하는 경향을 보이고 있다.

이에 덧붙여, 이 방법에서는 설계에서 적용하기에 용이한 응답스펙트럼을 적용하게 되므로 응답스펙트럼의 부호

를 결정하기 위해서는 정적인 해석이 한번 더 필요한 것으로 나타났으며, 해석결과값을 조직조 각 구성체의 성분으로 전환하기 위한 단계를 거쳐야 할 필요가 있다. 추후에 이러한 부분에 대해서는 일련의 처리과정을 담당할 수 있는 패키지를 개발하는 방향으로 연구가 진행될 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. Ronald F. Gibson, "PRINCIPLES OF COMPOSITE MATERIAL MECHANICS" McGraw-Hill, Inc.
2. J.S. Lee, C.S. Bang, Y.J. Mok, S.H. Joh, "Numerical and experimental analysis of penetration grouting in jointed rock masses", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 37(2000), pp.1027-1037
3. Ali, S. & Page, A. W. (1988), "Finite element model for masonry subjected to concentrated loads", J. Str. Eng., Vol. 114, pp. 1761-1784
4. Lee, J. S., Pande, G.N., Middleton, J. & Kralj, B. (1996), "Numerical modeling of brick masonry panels subject to lateral loadings", Comp. & Str. Vol 61, pp. 735-745
5. J.Middleton, and G.N. Pande, "COMPUTER METHODS IN STRUCTURAL MASONRY