

KAERI 채널형 전단벽체의 동적해석; 시스템판별, FE 모델향상 및 시간이력 응답

Dynamic Analysis of a KAERI Channel Type Shear Wall: System Identification, FE Model Updating and Time-History Responses

조순호^{1)*}Cho, Soon-Ho^{1)*}¹⁾광주대학교 건축학부/건축공학전공 교수¹⁾Professor, Dept. of Architectural Engineering, Gwangju University

/ A B S T R A C T /

KAERI has planned to carry out a series of dynamic tests using a shaking table and time-history analyses for a channel-type concrete shear wall to investigate its seismic performance because of the recently frequent occurrence of earthquakes in the south-eastern parts of Korea. The overall size of a test specimen is $b \times l \times h = 2500 \text{ mm} \times 3500 \text{ mm} \times 4500 \text{ mm}$, and it consists of three stories having slabs and walls with thicknesses of 140 mm and 150 mm, respectively. The system identification, FE model updating, and time-history analysis results for a test shear wall are presented herein. By applying the advanced system identification, so-called pLSCF, the improved modal parameters are extracted in the lower modes. Using three FE in-house packages, such as FEMtools, Ruaumoko, and VecTor4, the eigenanalyses are made for an initial FE model, resulting in consistency in eigenvalues. However, they exhibit relatively stiffer behavior, as much as 30 to 50% compared with those extracted from the test in the 1st and 2nd modes. The FE model updating is carried out to consider the 6-dofs spring stiffnesses at the wall base as major parameters by adopting a Bayesian type automatic updating algorithm to minimize the residuals in modal parameters. The updating results indicate that the highest sensitivity is apparent in the vertical translational springs at few locations ranging from 300 to 500% in variation. However, their changes seem to have no physical meaning because of the numerical values. Finally, using the updated FE model, the time-history responses are predicted by Ruaumoko at each floor where accelerometers are located. The accelerograms between test and analysis show an acceptable match in terms of maximum and minimum values. However, the magnitudes and patterns of floor response spectra seem somewhat different because of the slightly different input accelerograms and damping ratios involved.

Key words: Concrete, Dynamic properties, Finite element analysis, Modal parameters, Model updating, Shaking table test, Shear wall, Shell element, System identification, Time-history analysis.

1. 서론

2011년 일본의 후쿠시마 원자력 발전소 지역에 강진이 발생한 이래 그 동안 지진 안전 혹은 약진지역이라 여겨졌던 국내에서도 최근 경주, 포항 지역 등에 제법 규모가 큰 지진이 빈번히 발생하므로 한반도 지역도 더 이상 지진 안전지역이 아님은 주지의 사실이 되었다. 이는 후쿠시마의 강진으로 인하여 한반도를 포함한 주변지역에 지각 혹은 지질구조의 변동이 발

생한 것으로 추정된다. 이에 KAERI(Korea Atomic Energy Research Institute)에서는 원자력 부속건물의 주부 구조체로 흔히 사용되는 채널형(Channel)형 전단벽체의 동적거동 혹은 내진성능에 관한 실험 및 해석연구를 국책과제로 계획하게 되었다.

2020년 4월 처음으로 지진공학회를 통하여 해당 시험체의 Round robin analysis 대회 개최를 선포하였고 관련자들의 참여를 독려했던 결과, 초기에는 대학, 연구소 및 기업체에서 총 17팀이 참가하게 되었다. 곧이어 시험체 설계 상세사항 및 도면, 예비진동실험 결과 및 기록 데이터, 지진입력 데이터 및 전체 실험진행 절차에 대한 자료를 배포하였다. 6월경에는 본 실험 전 사전예측 결과를 요청하였으며, 7월경 부산대 지진연구센터의 대

*Corresponding author: Cho, Soon-Ho

E-mail: gaza@gwangju.ac.kr

(Received January 28, 2021; Revised April 7, 2021; Accepted April 8, 2021)

형 진동대에서 지진입력을 단계별로 증가시켜 본 실험을 수행, 완료하게 되었다. 9월에는 본 실험의 측정 데이터를 배포하기 이전에 참여팀에 실험결과와 예측치를 제출할 것을 요청하였으며, 11월 초에는 참여팀이 모여서 중간 워크숍을 실시하기에 이르렀다. KAERI 측에서 요구한 예측치는 각층의 3지점에서 측정된 가속도응답 및 층응답 스펙트럼이 주된 내용이었다.

저자는 거리상의 이유로 공개실험에 참가하지 못하였으며, 초기 해석모델의 결과에 대하여 확신을 갖지 못하여 11월의 워크숍에도 참석하지 못하였으나, 11월 초반에나 최종 결과물을 제출하기에 이르렀다.

본 논문에서는 초기 FE(Finite element)모델의 Setup 과정과 더불어 예비실험에서 획득한 진동기록을 다시 검토하여 시스템판별의 재수행, 그 결과에 근거하여 초기 FE모델의 Updating, Updated 된 FE모델에 의한 탄성동적해석 등의 내용을 포함한다. Round robin analysis의 초기목적이었던 비탄성 동적해석에 대하여서는 아직도 진행 중이며, 가능한 최소한의 비선형 거동만이라도 포함하여 해석을 수행할 예정이다. 만약 유용한 결과를 획득하였을 경우 후편 논문에서 이를 다시 추가로 기술할 예정이다.

2. 시험체 개요

KAERI 측에서 계획한 3층 채널형 시험체의 전체 형상 및 예비 및 본 실험에 사용된 가속도계 배치 현황은 Fig. 1과 같다.

채널의 웹 벽체 길이는 3,500 mm이고, 플랜지 즉 날개 부분의 벽체 길이는 2,500 mm이며, 각층의 높이는 1,500 mm이므로 전체 높이는 4,500 mm가 된다(중심간 거리 기준). 정착부의 크기는 1000 mm×400 mm이며, 슬래브 및 벽체의 두께는 각각 140 mm 및 150 mm이다.

시험체에 사용된 콘크리트의 설계기준강도는 30 MPa이며, 2019년 10월 한 달 동안 대략 매주 간격으로 정착부, 1층, 2층, 3층 벽체 및 슬래브 순으로 단계적으로 타설하였다. 보강근은 항복강도 400 MPa, D10 및 D13을 혼용하였다. 대략 벽체의 수직철근비는 1.13~1.35%, 수평철근비는 1.13%이며, 단부에는 특별한 내진 Confinement 배근을 포함하지 않았다. 슬래브의 단변방향 철근비는 0.68%, 장변방향 철근비는 0.81~1.13% 정도이다. 정착부는 M35 고장력 볼트를 2열로 대략 500 mm 간격으로 벽체 둘레에 배치하였다.

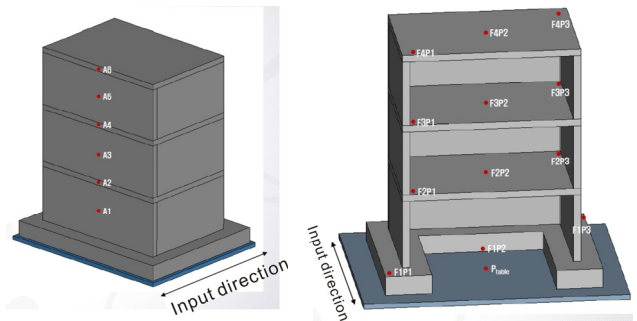
구조물의 동적성능을 결정하기 위한 예비실험에는 진동대를 이용하여 0.5~50 Hz 정도의 진동수/주파수 폭을 갖는 백색잡음을 해당 방향에 입력하여 단변 및 장변방향 신호를 별도로 수집하였다. 이때 사용된 가속도계는 PCB 393B04이며, 샘플링 주파수(f_s)는 512 Hz이다.

3. 시스템판별(System identification)

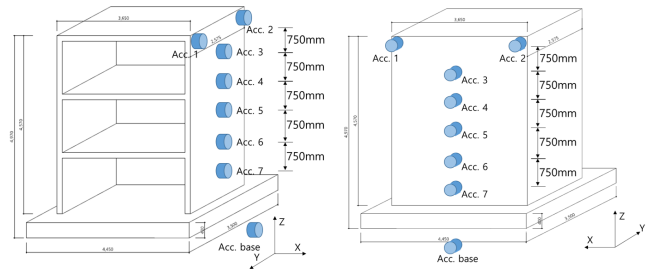
해당 벽체의 동특성 결정을 위한 예비실험은 입력 및 출력을 모두 기록하는 전통 모달실험(Experimental modal test)으로서 기본적으로 FRF (Frequency response function) 혹은 Transfer 함수를 산정하여 고유진동수(f), 모드형태(ϕ) 및 감쇠율(ξ)을 제법 손쉽게 결정할 수 있다[6]. 당초 KAERI 측에서 제시한 1차 및 2차 고유주파수는 16 Hz와 23 Hz이며, 1차 모드는 길이방향 수평 및 회전변위 성분이 혼재되어 나타나고 있으며, 2차 모드는 단변방향 수평변위만이 나타나고 있는 것으로, 모두 슬래브의 수직변



(a) Overall view of test specimen



(b) Accelerometer arrangements for main tests



(c) Accelerometer arrangements for preliminary tests to determine dynamic properties

Fig. 1. Overall test configurations

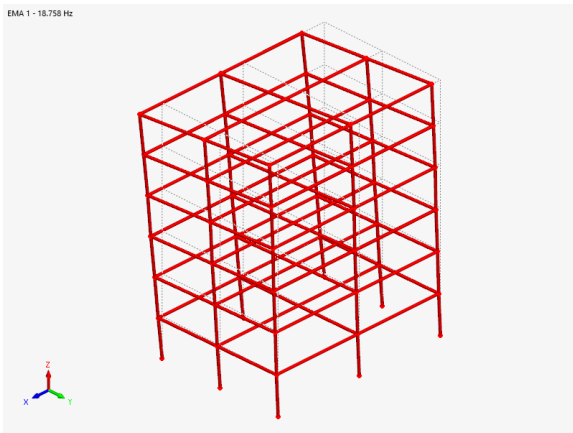
형이 포함된 형태이다.

초기 단계에서 FE 해석모델에 대한 고유치해석을 수행한 결과 해석치와 실험으로부터 발췌한 값의 차이가 상당히 크게 나타나, 더욱 시스템판별에 집중할 필요성을 인지하게 되었다. 일반적인 방법으로 FRF를 산정하여 고유주파수를 결정하면 KAERI 측이 제시한 값을 획득할 수 있으나, 보다 고급의 변수모델(Parametric model) 및 응답(Output)에 근거한 pLSCF (Polyreference least-squares complex frequency)법을 적용할 경우 보다 향상된 고유치를 획득할 수 있었다[14].

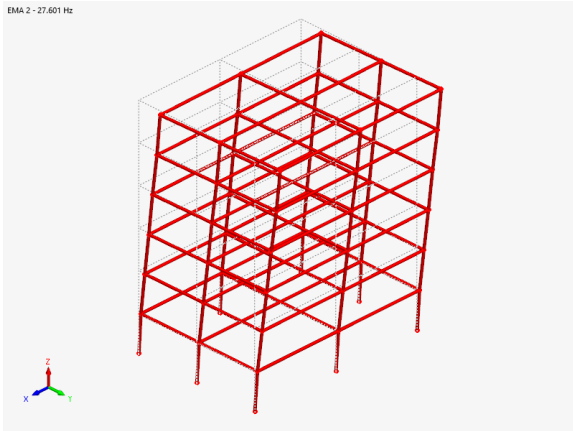
pLSCF법은 시간영역의 LSCE(Least-squares complex exponential)법의 Polyreference 및 주파수 영역의 버전으로 Pole를 먼저 발췌하여 고유주파수, 감쇠율 및 모달 참여계수를 결정한 후, Upper 및 Lower Residues를 고려하여 모드형태를 발췌한다. Correlogram법에 의하여 FRF 혹은 Cross-power spectrum(XPS)을 산정하기 때문에 고전적인 방법 보다는 잡음을 보다 정제할 수 있다(식 (1)). 자세한 설명은 참고문헌 [4]를 참조하라.

Table 1. Modal parameters extracted using pLSCF

Mode No.	Frequency (Hz)	Damping (%)	MPC (%)	MPD (°)	MAC alias (%)
1	18.758	6.28	96.9	17.4	5.2
2	27.601	1.53	95.9	12.9	90.3
3	36.540	1.11	87.2	21.8	87.8
4	73.015	0.82	92.4	20.8	95.1
5	75.989	99.4	6.0	95.9	
6	81.456	0.70	99.4	11.1	95.1
7	83.981	0.85	98.6	14.5	94.7
8	88.204	0.83	93.6	16.2	94.7
9	92.925	1.14	98.5	7.0	77.9
10	108.674	1.15	81.3	19.4	77.9



(a) 1st mode (18.758 Hz)



(b) 2nd mode (27.601 Hz)

Fig. 2. Mode shapes extracted using pLSCF

$$S_{XY}^+(w) = \int_{-\infty}^{\infty} r_{XY}(t) e^{-jw t} u(t) dt \quad (1)$$

$$= \int_0^{\infty} r_{XY}(t) e^{-jw t} dt$$

여기서 S_{XY}^+ = 정방향 스펙트럴 밀도함수(Positive spectral density function), r_{XY} = 교차 상관함수(Cross-correlation function), $u(t)$ = 단위 Step 함수이다.

KAERI 측에서 제공한 동일 진동기록으로부터 pLSCF를 사용하여 재

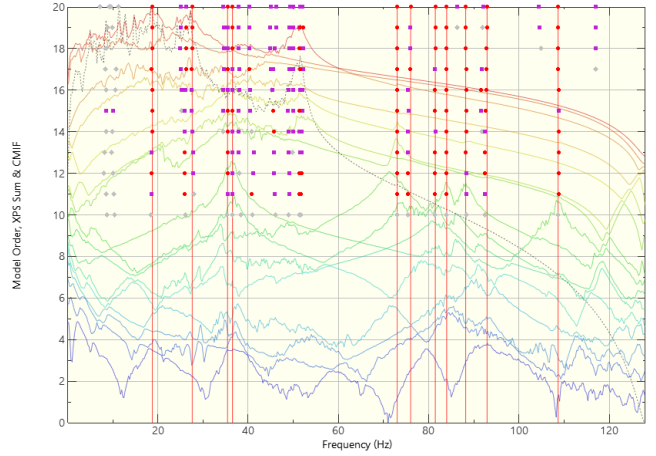
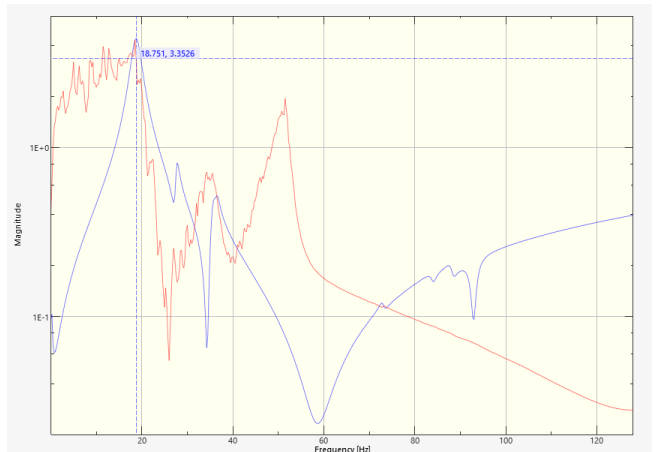
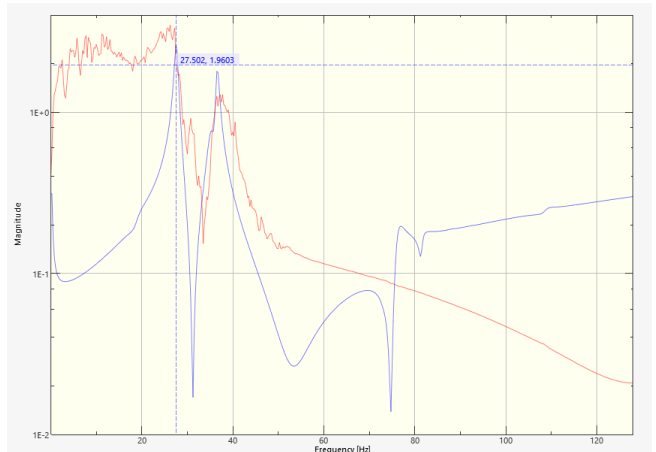


Fig. 3. Stability diagram



(a) XPSs at 3rd floor in the X direction (Acc base & 4)



(b) XPSs at 3rd floor in the Y direction (Acc base & 4)

Fig. 4. Comparisons between measured (in red) and synthesized XPSs (in blue)

발채한 1, 2차 고유진동수 및 모드형태는 Table 1 및 Fig. 2와 같다. 여기서 MPC(Modal phase collinearity) 및 MPD(Modal phase deviation)는 발채한 모드의 Complexity 정도를 나타내는 값으로서 전자는 클수록 후자는 작을수록 Real 모드를 의미한다[9]. MAC(Modal assurance criterion) alias는 MAC 행렬의 비대각선항중 가장 큰 값을 나타내며, 직교성(Orthogonality)

정도를 표시한다.

1차 모드에서 감쇠율이 예상보다 크게 나왔으나(2% 정도 vs. 6.28%), 시스템편위에 의한 감쇠율 산정은 다른 값보다 신뢰성이 떨어지므로 안정 Pole로 채택하였다.

pLSCF에서 제공하는 XPS 및 CMIF(Complex modal indicator function)에 대하여 모델차수 증가에 따른 대표적인 안정화도는 Fig. 3과 같으며, 발췌된 모드에 근거하여 재조합한 XPS는 실험결과와 상당한 차이를 보여주고 있다(Fig. 4). 이는 실제 진동대에 의한 가진 시 상당한 잡음이 예상되며, 또한 고품질의 백색잡음을 확보하기도 매우 어렵기 때문인 것으로 판단된다. 향후 유사 실험 시에는 센서의 감도가 더 높은 Forced-balanced형(100배 정도) 가속도계를 슬래브 바닥에 설치하고, 비틀림 모드를 위하여 적어도 2개의 센서를 짝으로 사용하면 어느 정도 이러한 문제는 해소될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 EMA 뿐만 아니라 OMA (Operational modal analysis)를 위한 Output-only 실험도 고려해 볼 수 있다[19].

4. 고유치해석 및 FE 모델향상(FE model updating)

본 연구를 위하여 선택한 FE 해석프로그램은 Ruaumoko[3], FEMtools [5] 및 VecTor4[11, 18] 등이다. Ruaumoko는 전문 비선형 동적해석 프로그램으로 Univ. of Canterbury에서 오래전에 개발되었으며, Drain-2D [12]와 매우 흡사하나 보다 다양한 요소 및 이력모형을 제공하고 있으며, 훌륭한 Post-processing 모듈을 구비하고 있다. 하지만, 보와 같은 선요소에 중점을 두고 있으므로, 현재로서는 쉘판 요소는 탄성해석만 가능하다. FEMtools는 DDS(Dynamic Design Solutions)사에서 개발한 실험-해석 Correlation을 위해 특화된 프로그램으로서, Script에 근거하여 작동하며 관련된 많은 Script 예를 제공하고는 있으나, 현재로서는 고유치해석만 가능하다. VecTor4는 Univ. of Toronto에서 개발한 MCFT이론(Modified compression field theory)[16]에 근거한 전문 콘크리트 전단 해석용 비선형 프로그램으로서 쉘요소 및 동적해석에까지 확장한 경우이다. 이 모든 프로그램은 보다 상용화된 ABAQUS[1] 및 ANSYS[2]와는 사뭇 다르게 특정 목적을 위하여 소규모 그룹에서 개발된 In-house 프로그램으로서 아직도 어떤 부분에서는 검증 중에 있다.

고유치해석을 위하여 Ruaumoko는 보다 표준방법인 Householder QR, Jacobi 및 Subspace iteration 알고리즘을 사용하고 있으며, FEMtools는 ANSYS 류와 마찬가지로 Lanczos 및 Subspace 등의 다양한 Extraction 방법을 사용하고 있다. 한편 VecTor4는 EISPACK[8]에서 제공하는 절차를 사용하고 있다.

전단벽 해석을 위한 FE 모델링에는 여러 방법이 존재한다. 평면응력(Plane stress)요소 혹은 유사 기둥(Column analogy)요소를 이용하거나 혹은 판/쉘요소를 사용할 수 있다. 보통의 평면응력요소를 사용할 경우 휨 거동을 묘사하는 데는 한계가 있거나, 아니면 Shear rocking의 제거를 고려한 회전 자유도를 갖는 비적합(Incompatible) 평면요소를 사용하여야 한다[17]. 유사 기둥요소를 사용하는 경우 강역지역(Rigid zone)을 포함하여야 하며, 이 경우 전단응력을 묘사하는데 한계가 있다. 따라서 보다 자세한 응력분포 및 정확한 전단응력을 묘사하기 위해서는 쉘 요소의 사용

이 불가피한데, 고려된 변형형태 및 유도방법에 따라 다양한 쉘요소가 존재하며 특히 비선형 혹은 동적해석의 경우 Mesh 크기, 감쇠모델 및 콘크리트의 전단거동을 고려하는 방법에 따라 결과가 매우 민감하게 변화한다. 이에 대하여 Opensees[13]에서는 4-절점 ShellMITC4, ShellDKGQ 및 ShellNLDKGQ 등의 요소를 제공하고 있으며, MITC4의 경우 Layered 모델도 가능하다. 마찬가지로 ANSYS 및 ABAQUS에서도 다양한 4- 혹은 8-절점의 Non-Layered 혹은 Layered 요소를 제공하고 있다. 하지만, 이 모든 요소는 콘크리트 거동 묘사에 있어서는 이론적인 Plasticity기반 모델을 사용하고 있다.

Ruaumoko는 Hybrid stress type II 사각형 쉘요소를 사용하고 있다. x 및 y의 3차 식으로 표현된 변위 분포 및 전체 요소에 대한 전단응력을 가정하고 있으며, 요소의 둘레에서는 주변 보와의 적합조건을 위하여 3차식의 법선변위 및 1차식의 접선변위 분포를 채택하고 있다. FEMtools에서는 ANSYS의 Shell63과 동일한 4-/8-절점 요소를 사용하고 있다. 상기는 모두 절점당 6-자유도를 갖는다. 한편 VecTor4는 9-절점, 전체 42-자유도(요소 둘레의 8절점은 5-자유도, 중앙 절점은 2-자유도)를 갖는 Heterosis layered shell 요소를 사용하고 있다[7, 10]. 이 동 및 회전변위에 대하여서 각각 Serendipity 및 Lagrangian계의 형상함수를 채택하며, 중앙 절점에는 Zero 에너지 모드를 제거하기 위하여 회전변위 만을 허용한다. Gauss 적분은 휨거동에는 9x9, 전단거동에는 2x2를 선택적으로 적용한다. 콘크리트 거동의 묘사는 MCFT 이론을 3차원 쉘요소에 까지 확장하여 역학적 거동에 근거한 합리적인 모델을 사용하고 있다. 한편으로는 평균응력 개념에 의한 분포된(Smeared) 균열거동을 고려하고 있으나, 다른 한편으로는 균열면에서의 국부적 이산(Discrete) 균열거동을 포함하고 있으며, 또한 면내 뿐만 아니라 면외 방향에서의 전단지지 거동을 고려하고 있다.

Table 2 및 Fig. 5는 전술한 3개의 FE 프로그램을 사용하여 초기모델에 대하여 수행한 고유치해석 결과를 나타낸다. 컴퓨터 메모리 문제로 정착부의 모델링은 무시하였으며, 즉 벽체 기부는 완전 고정으로 가정하였다. 보 강근의 강성은 Ruaumoko 및 FEMtools 해석에는 포함하지 않았고 VecTor4에만 고려하였다. 이러한 사실을 고려할 때 3개의 프로그램에 의한 고유치해석 결과는 서로 일치하고는 있으나, 실험치(18.8 Hz 및 27.6 Hz)와 비교하면 상당히 단단한(Stiff) 거동을 예측하고 있음을 알 수 있다.

Table 2. Comparisons of eigenvalues predicted by various FE packages

Modes	Frequencies (Hz) (Analyzed / Extracted)		
	Ruaumoko	FEMtools	VecTor4
1	25.6 (1.362)	25.7 (1.367)	28 (1.489)
2	36.1 (1.308)	36.2 (1.312)	38.9 (1.409)
3	37.9	38.0	41.2
4	40.5	40.6	43.2
5	43.5	43.5	46.8
6	72.5	72.3	80.6
7	84.5	84.3	92.3
8	88.2	88.9	94.6
9	90.0	90.1	96.3
10	93.0	94.0	99.4

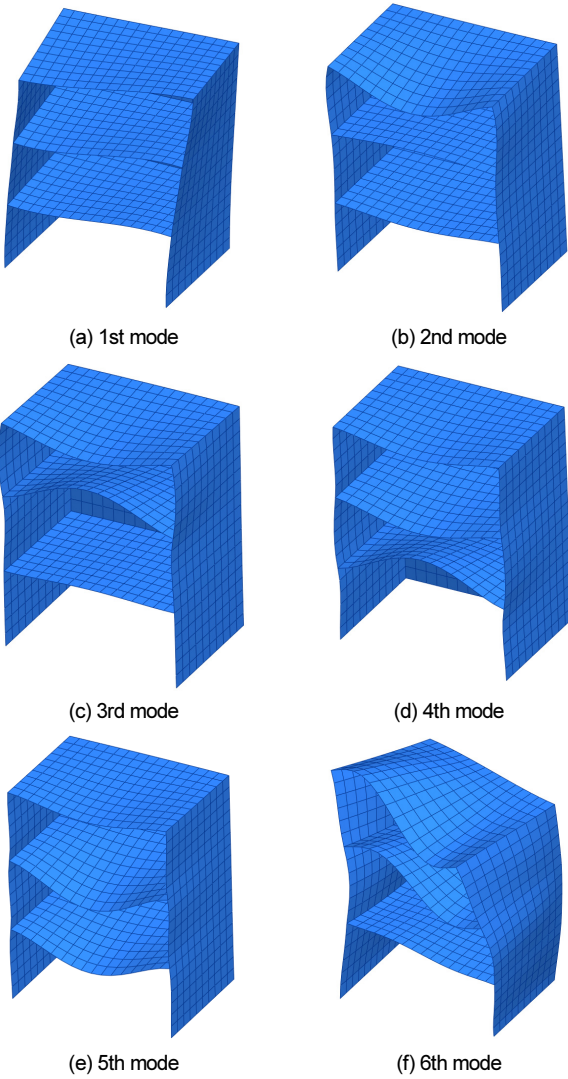


Fig. 5. Mode shapes predicted by FEMtools

통상적으로 건물 해석 시 바닥의 격막작용(Diaphragm action)을 가정하여 두 방향의 횡이동 및 비틀림 모드를 산정하는데, 본 채널형 벽체의 모드 형태는 이와는 상당히 다르게 나타났다. 모든 모드에서 슬래브의 면외변형이 포함되어 있으며, 1차 모드는 길이방향 횡이동 모드이긴 하나, 회전변형이 다소 포함되어 있으며, 2, 3 및 5차 모드는 단변방향 횡방향 모드이긴 하나 서로 다른 슬래브 변형이 포함되어 있다. 4차 모드는 순수히 슬래브 변형 모드이며, 6차는 비틀림 모드이다.

Table 2에서 보는 바와 같이 실험치와 예측치와의 차이가 매우 크기 때문에(31~49% 정도) 구조물의 동적거동을 예측하기 위하여서는 초기 FE 모델의 향상이 요구된다.

이를 위하여 벽체의 기초 정착부를 6-자유도를 갖는 스프링으로 묘사하고 이들의 강성을 주요 변수로 고려하였다. 또한 식 (2)와 같이 1 및 2차 고유진동수 및 모드형태를 목표 응답함수(π)로 설정하고 최적화 이론 및 Bayesian 기법에 근거한 자동향상기법을 적용하여 모델향상을 시도하였다.

$$\pi = \frac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^N r_{f,i} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^m r_{\phi,i,j} \right] \quad (2)$$

Table 3. Initial and updated FE results by FEMtools

Modes	Initial FEA (Hz)	Updated FEA (Hz)	EMA (Hz)	Diff. (%)	MAC (%)
1	25.7	18.761	18.758	0.02	60
2	36.2	27.555	27.601	-0.16	85.8

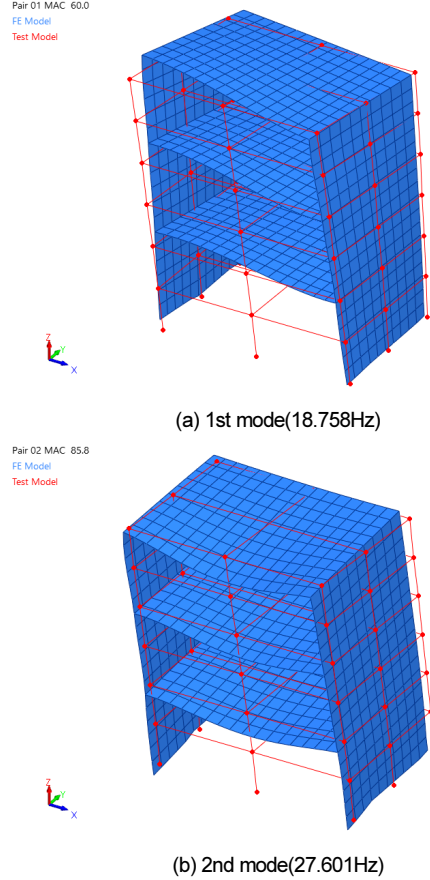


Fig. 6. Measured (in red) and analyzed (in blue) mode shapes

여기서,

$$r_{f,i} = W_{f,i} \left(\frac{f_i^2 - f_{i,exp}^2}{f_{i,exp}^2} \right)^2; \quad r_{\phi,i,j} = W_{\phi,i} (\phi_i^j - \phi_{i,exp}^j)^2$$

W =가중계수이다.

몇 차례에 걸쳐 예비해석을 수행한 결과 회전방향 강성($K_{\theta_x}, K_{\theta_y}, K_{\theta_z}$)은 민감도가 낮아 변수에서 제외하였으며, 변위방향 강성(K_x, K_y, K_z)만을 최종으로 고려하였는데 이 중에서도 K_z 의 영향이 가장 지배적인 것으로 나타났다. Table 3 및 Fig. 6은 모델향상 이전과 이후의 고유진동수 및 모드 형태의 일치 정도를 나타내고 있다. 1차 모드에는 수평방향 변형 뿐만 아니라 약간의 회전변형이 포함되어 있음을 알 수 있고, 1, 2차 모드 모두는 수평방향 변형 이외에 슬래브 바닥변형이 크게 포함되어 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

기초 정착부에 사용된 각각 37개의 x, y 및 z 변위방향 스프링 강성의 변화는 Figs. 7, 8 및 9와 같다. 모델향상 후 K_x, K_y 는 초기값에 비하여 거의

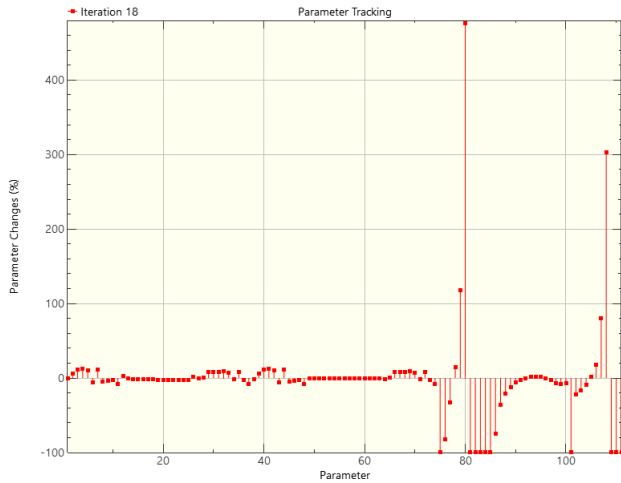


Fig. 7. Parameter variations after FE model updating

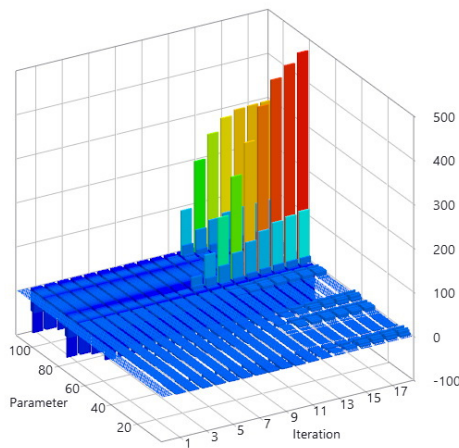


Fig. 8. Parameter variations in processing iterations

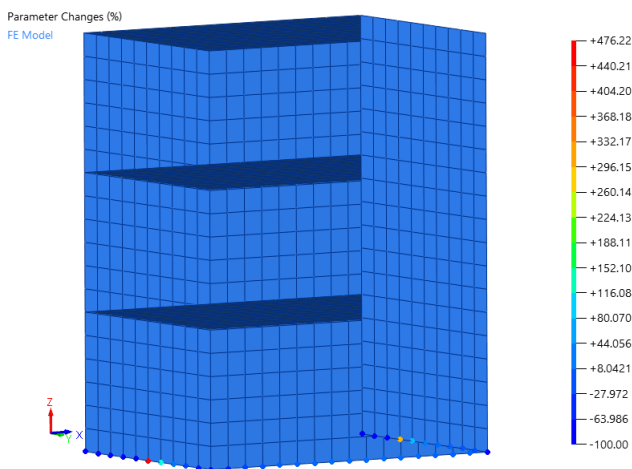


Fig. 9. Magnitudes of the parameter change after FE model updating

변화가 없으나, 몇몇 K_z 은 300~500%의 큰 변화를 나타내고 있다. 큰 변화를 나타내는 정착부의 z방향 스프링의 위치는 Fig. 9에서 빨간색으로 표시되어 있다. 하지만 초기 강성이 $K_z = 1 \times 10^8$ N/mm에서 $K_z = 5 \times 10^8$ N/mm 등으로 변화하였다고 해도 이의 물리적인 의미는 없는 것으로 판단된다.

Table 4. Summary of predicted results by Ruaumoko after FE model updating

Modes	Frequencies (Hz)	Participation Factors	Effective Masses	%-M (Summed)
1	1.89E+01	6.26E-01	2.13E+00	9
2	2.75E+01	-1.26E+00	1.32E+01	67
3	3.69E+01	7.35E-01	3.06E-01	68
4	4.02E+01	-1.53E-01	1.55E-02	68
5	4.27E+01	1.33E+00	1.26E+00	73
6	6.32E+01	1.31E-01	1.73E-01	74
7	8.07E+01	-3.45E-02	4.84E-03	74
8	8.97E+01	3.36E-01	5.12E-02	74
9	9.01E+01	3.93E-02	1.03E-03	74
10	9.45E+01	1.78E-02	2.69E-04	74

5. 탄성동적해석

당초 KAERI의 기본계획은 본 시험체의 비탄성 동적응답을 예측하고 이에 대한 Blind prediction을 주요목적으로 하였으나, 시간제한 상 탄성범위의 응답만을 예측하는 것으로 축소하였다. 이는 시험체 계획 시 Mass modelling이 충분히 반영되어 있지 않았기 때문이며, 이에 대해 KAERI 측에서는 동일 시험체에 대하여 추후 Pushover나 진동대 실험을 추가적으로 고려하고 있는 것으로 알고 있다. 사실, 콘크리트의 비탄성 동적해석은 또 하나의 도전이며, 아직 여러 면에 있어서 심각한 불확실성(Significant uncertainties)을 내포하고 있다. 그중 대표적인 하나는 콘크리트의 전단지지 거동을 3D로 묘사하는 것이고, 또 다른 하나는 감쇠모델이다.

저자가 알기로는 현재까지 발표된 해석방법 중 가장 합리적으로 콘크리트 전단거동을 고려하고 있는 VecTor4의 경우 평균응력을 취급하는 데는 충분히 물리적인 배경을 포함하고 있으나, 3D 균면면에서의 콘크리트 국부응력을 고려하는 데는 아직도 수학적 접근방법을 채택하고 있어 이에 대한 추가적인 검증이 필요하다[10]. 또한 Carr에 의하면 동적해석 시 전통적으로 대부분의 해석프로그램에서 채택하고 있는 초기 강성에 근거한 Rayleigh 감쇠모델을 사용할 경우 소성영역에서 매우 큰 감쇠 모멘트가 발생하여 해석결과에 중대한 영향을 미치는 것으로 보고하고 있다[15]. 이러한 이유에서 본 프로젝트의 대상인 비정형 콘크리트 전단벽체의 3D 비탄성 동적거동 예측을 위한 실험 및 해석을 실행하기에는 아직은 시기상조인 것 같다.

이러한 배경하에 탄성동적거동 예측을 위하여 Ruaumoko를 채택하여 시간이력응답거동 해석을 수행하였다(절점수≒1406, 요소수≒1164). FEMtools에 의한 모델향상 결과로부터 획득한 정착부의 스프링 강성을 벽체 기부에 6-자유도 스프링을 삽입하여 묘사하였으며, 초기 강성에 근거한 Rayleigh 감쇠모델 및 Newmark 적분법을 사용하였다. 이때 입력된 지진 데이터는 초기에 KAERI로부터 제공된 값으로서 2016년 경주지진 시 기록된 명계리 NS 방향이며, 최대 지반가속도 크기는 0.28 g이다

해석결과와 전체개요는 Table 4와 같다. 정착부 스프링 요소 삽입 및 모델향상에 의한 강성을 고려한 결과, 모드 1차 및 2차는 실험으로부터 발췌한 값 및 FEMtools의 결과와도 매우 일치하고 있음을 알 수 있다. 이는 두

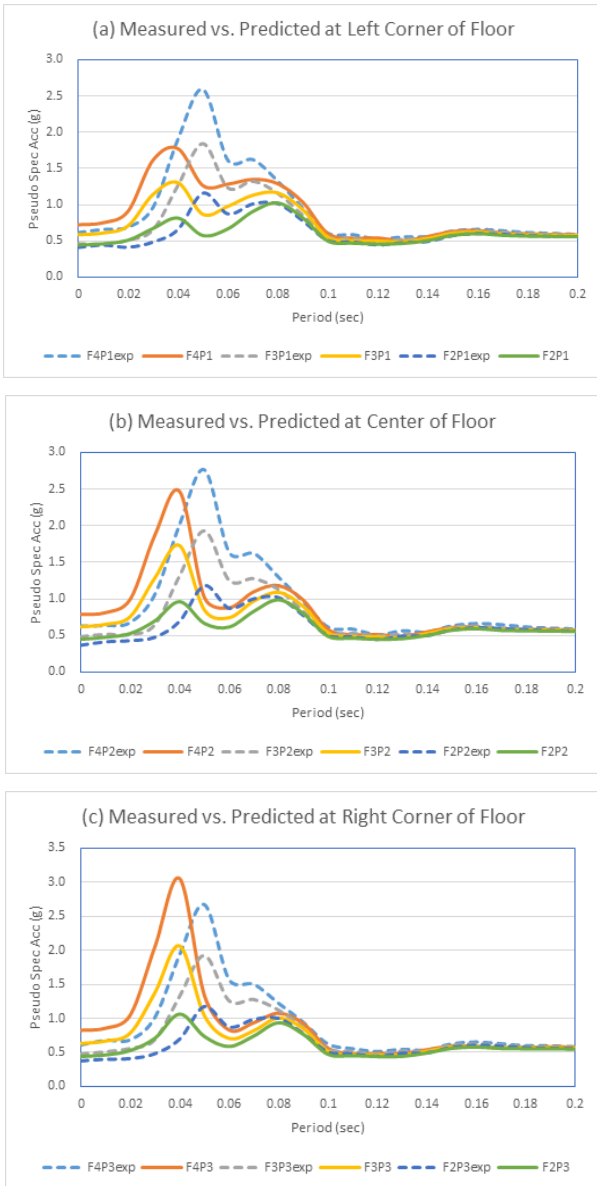


Fig. 10. Typical floor response spectra predicted by Ruaumoko

프로그램에서 사용된 쉘요소가 비적합 평면응력과 판요소로 유도되었기 때문이다. 한편 동일 스프링 강성을 벽체 기부에 삽입하였을 경우 VecTor4는 제한된 요소의 사용으로 인하여 1차 및 2차 모드의 재현도는 다소 떨어졌다(18 Hz 및 29 Hz).

Fig. 10은 0.28 g 명계리 입력운동에 의하여 각층의 계측점에서 Ruaumoko에 의하여 예측된 응답을 보여주고 있다. 비교를 위하여 응답 산정시 감쇠율은 $\xi = 2\%$ 를 사용하였다. 가속도계에 의하여 기록된 값을 예측하여야 하므로 모든 값은 상대적 물리량이 아닌 전체 물리량을 기준으로 하였다. 여기서 사용된 응답 측정치는 KAERI 측에서 제공한 본 실험의 첫 번째 가속도 기록값이다($PGA=0.33 g$, $f_s = 512 \text{ Hz}$).

측정 및 예측된 스펙트럼 값은 층의 중앙에서는 유사한 크기를 나타내나, 층의 좌측 및 우측 코너에서는 각각 과소 및 과대평가하는 경향을 나타내고 있다. 측정치는 거의 대칭 경향을 나타내고 있으나, 해석치는 비틀림이 포함된 양상을 나타내고 있다. 이는 벽체 기부의 스프링 강성이 대칭이 아니기

때문인 것으로 판단된다. 하지만, 모든 스펙트럼에서 측정치의 최대값은 $T=0.05 \text{ sec}(f=20 \text{ Hz})$ 에서 나타나고 있는데 반하여, 해석치는 $T=0.04 \text{ sec}(f=25 \text{ Hz})$ 에서 나타나고 있음에 주의할 필요가 있다. 이와 같은 불일치는 해석 시 입력된 지진운동은 초기에 KAERI에서 제공한 값으로 응답 측정치 부가된 지진운동과 100% 일치하지 않은 데서 기인하는 것으로 판단되며, 추가조사 중이다. 필요 시 응답 및 재료강성, 감쇠율 등을 추가적인 변수로 고려하여 FE 모델향상을 시도하는 방안을 고려하고 있다.

또한, 현재로서는 입력운동 0.5 g, 0.75 g 및 1 g에 대한 응답예측은 유사한 탄성거동을 나타낼 것으로 판단되어 생략하였다. 다만, VecTor4에 대한 프로그램 자체의 검증 및 콘크리트 벽체의 비탄성거동을 조사하기 위하여 인위적으로 입력운동의 크기를 증가시키거나, 혹은 집중질량을 추가하여 비탄성 동적해석 혹은 Pushover 해석을 수행 중에 있다. 의미 있는 결과를 획득할 경우 후편논문에서 취급할 예정이다.

한편, 현재는 일반적인 시간영역 점증적(Incremental) 동적해석으로 응답을 예측하였으나, 가속도 측정결과로부터 유도된 FRF 함수로부터 각 층의 탄성응답을 예측할 수도 있으므로, 이에 의한 응답을 서로 비교해 보는 것도 또 하나의 기술적 관심사이다.

6. 결론

KAERI의 채널형 전단벽체에 대하여 시스템판별, 모델향상 및 탄성동적해석을 수행한 결과 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 각기 고유한 쉘요소의 Formulation 특성을 갖는 Ruaumoko, FEMtools 및 VecTor4에 의한 초기 FE 모델에 대한 고유치해석 결과는 일치하였다. 이는 ABAQUS류의 상용패키지에 의한 해석 결과와도 일치한다.
- 2) 예비실험으로부터 획득한 일련의 가속도 기록을 보다 고급의 변수모델에 근거한 시스템판별법인 pLSCF를 적용한 결과, 보다 향상된 1차 및 2차 고유진동수 및 모드형태를 발췌해 낼 수 있었다(18.8 Hz 및 27.6 Hz).
- 3) 벽체의 기초 정착부에 6-자유도의 스프링을 삽입한 모델에 대하여 FEMtools를 이용하여 스프링 강성을 변수로 하고 고유진동수 및 모드형태를 목적 응답으로 고려하여 모델향상을 수행하였다. 그 결과 1차 모드의 일치는 다소 열악하나, 2차 모드는 대체로 우수한 일치를 나타냈다.
- 4) 모델향상에 영향을 미치는 주요 변수는 수직 변위방향의 스프링 강성이다. 모델향상 후 초기강성이 $K_z = 1 \times 10^8 \text{ N/mm}$ 에서 $K_z = 5 \times 10^8 \text{ N/mm}$ 등으로 변화하였으나, 이의 물리적인 의미는 없는 것으로 판단된다.
- 5) FEMtools의 모델향상으로부터 유도된 스프링 강성을 Ruaumoko 모델에 고려한 결과 동일한 고유진동수 및 모드형태를 재현할 수 있었다. 하지만, VecTor4에 고려할 경우, 제공된 요소의 제한으로 재현도는 Ruaumoko 보다 열악하였다(18 Hz 및 29 Hz).
- 6) 향상된 모델에 대하여 Ruaumoko 해석으로부터 획득한 명계리 028 g 입력운동에 대한 각층의 응답스펙트럼은 실험치와 어느 정도 차이를 나타냈다. 층의 중앙에서는 유사한 크기를 나타내나, 층의 좌측 및 우측 코너에서는 각각 과소 및 과대평가하는 경향을 나타내고 있다. 측정치는 거의 대칭 경향을 나타내고 있으나, 해석치는 비틀림이 포함된 양상을 나타내고 있다. 이는 벽체 기부의 스프링 강성이 대칭이 아니기 때문인 것

으로 판단된다. 하지만, 모든 스펙트럼에서 측정치의 최대값은 $T=0.05 \text{ sec}(f=20 \text{ Hz})$ 에서 나타나고 있는데 반하여, 해석치는 $T=0.04 \text{ sec}(f=25 \text{ Hz})$ 에서 나타나고 있다. 이와 같은 불일치는 해석 시 입력된 지진운동 및 감쇠율이 다소 상이한 데서 기인하는 것으로 판단된다.

/ 감사의 글 /

본 연구를 수행하는 데 있어 수많은 기술적 질문에 대하여 관대히 응대해 주신 KAERI 측의 김민규 및 정재욱 박사님께 감사를 드린다.

/ REFERENCES /

1. ABAQUS, Analysis User's Manual, Ver. 6.11, USA, c2011.
2. ANSYS, Robust Simulation and Analysis Software, Available from: <http://www.ansys.com/>, Release 11.0, ANSYS Incorporated, USA, c2007.
3. Carr AJ, Ruaumoko3D; Inelastic Dynamic Analysis – User Manual, Dept. of Civil Engrg. Univ. of Canterbury, NZ, c2017.
4. Cauberghe B. Applied Frequency–Domain System Identification in the Field of Experimental and Operational Modal Analysis, Ph.D. Thesis, Dept. of Mech, Engrg, Vrije Universiteit Brussel, Belgium, c2004.
5. Dynamic Design Solutions, FEMtools Users' Guide Ver. 4.1, Leuven, Belgium, c2020.
6. Ewins DJ, Modal testing: Theory, Practice and Application, Research Studies Press, Baldock, Hertfordshire, UK, c2000.
7. Figueiras JA, Owen DRJ, Analysis of Elasto–Plastic and Geometrically Nonlinear Anisotropic Plates and Shells in Hinton E, Owen DRJ, Finite Element Software for Plates and Shells, Pineridge Press Limited, Swansea, UK, c1984.
8. Garbow BS, EISPACK–A Package of Matrix Eigensystem Routines, Computer Physics Communications, 1974;7:179–184.
9. Heylen W, Lammens S, Sas P. Modal Analysis Theory and Testing, Dept. of Mech, Engrg, Katholieke Univ, Leuven, Belgium, c1995.
10. Hrynyk TD, Behaviour and Modelling of Reinforced Concrete Slabs and Shells Under Static and Dynamic Loads, Ph.D. Thesis, Dept. of Civil Engrg, Univ. of Toronto, Canada, c2013.
11. Hrynyk TD, Vecchio FJ, User's Manual of VecTor4, Univ. of Toronto, Canada, c2019.
12. Kanaan AE, Powell GH, General Purpose Computer Program for Inelastic Dynamic Response of Plane Structures, Report EERC 73–6, College of Engrg, Univ. of Berkeley, USA, c1973.
13. Mazzoni S, McKenna F, Scott MH, Fenves GL, OpenSees Command Language Manual, Pacific Earthquake Engrg. Research (PEER) Center, USA, c2005.
14. Peeters B, Van Der Auweraer H, Guillaume P, Leuridan J. The PolyMAX Frequency–Domain Method: A New Standard for Modal Parameter Estimation, Shock and Vib, Special Issue Dedicated to Prof. Bruno Piombo, 2004;11:395–409.
15. Puthanpurayil AM, Carr AJ, Lavan O, Dhakal RP, Effect of Choice of Inherent Damping Models on Reliability of Incremental Dynamic Analysis, NZSEE Conference, Paper 0346, Wellington, April 27th–29th, c2017.
16. Vecchio FJ, Collins MP, The Modified Compression–Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, ACI J, 1986; 83(2):219–231.
17. Wilson EL, Three–Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures – A Physical Approach with Emphasis on Earthquake Engineering, Computers and Structures Inc, Berkeley, California, USA, c2002.
18. Wong PS, Vecchio FJ, VecTor2 & FormWorks User's Manual, Univ. of Toronto, Canada, c2002.
19. Structural Vibration Solutions, ARTeMIS Extractor: Ambient Response Testing and Modal Identification Software, User's Manual, Denmark, c2001.