

기초구조물로서 얇은 셸 구조물의 지진응답

Seismic Response on Thin Shell as Structural Foundation

이 휘 민*
 Yee Hooi Min

아지자 압둘 나살*
 Azizah Abdul Nassir

김 재 열**
 Kim Jae Yeol

Abstract

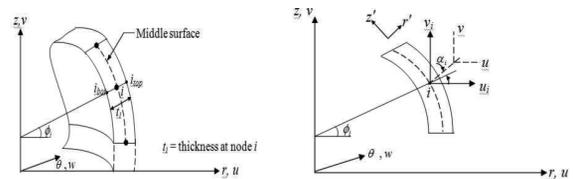
This study aims to investigate the seismic response of a large span thin shell structures and assess their displacement under seismic loads. The study employs finite element analysis to model a thin shell structure subjected to seismic excitation. The analysis includes eigenvalue analysis and time history analysis to evaluate the natural frequencies and displacement response of the structure under seismic loads. The findings show that the seismic response of the large span thin shell structure is highly dependent on the frequency content of the seismic excitation. The eigenvalue analysis reveals that the tenth mode of vibration of the structure corresponds to a large-span mode. The time history analysis further demonstrates, with 5% damping, that the displacement response of the structure at the critical node number 4920 increases with increasing seismic intensity, reaching a maximum displacement of 49.87mm at 3.615 seconds. Nevertheless, the maximum displacement is well below the allowable limit of the thin shell. The results of this study provide insight into the behaviour of complex large span thin shell structures as elevated foundations for buildings under seismic excitation, based on the displacement contours on different modes of eigenvalues. The findings suggest that the displacement response of the structure is significant for this new application of thin shell, and it is recommended to enhance the critical displacement area in the next design phase to align with the findings of this study to resist the seismic impact.

Keywords: Long Span, Thin Shell, Seismic response and foundation structures

1. 서론

얇은 셸의 요소 공식화는 회전 변위 보간과 독립적인 회전 자유도를 기반으로 한다 [1,2]. 그림 1에 사용된 좌표계는 전체 셸 좌표계이며, 여기서 r, z, θ 는 좌표를 나타낸다. 반면, 국소 좌표계는 r', z', θ' 로 표시된다. 변환 자유도는 $u_i, v_i, w_i, u_i, v_i, w_i, \beta_i$ 로 표시되며 α_i 와 θ 는 회전 자유도를 나타낸다. 각도 φ 은 자오선 방향에 해당하는 반면, θ 은 원주 방향에 해당한다 [3]. 자오선을 따라 셸 요소의 기하학적 구조를 나타내기 위해 2차 형상 함수가 사용되며, 변위 함수도 2차로 가정된다. 형상 함수와 변위 함수 모두 셸의 두께에 걸쳐 선형 변화를 나타낸다. 그림 1과 같이 셸 요소 내의 각 점은 요소의 바닥과

상면에 있는 한 쌍의 점(아이탑과 아이봇)에 의존한다는 점에 유의해야 한다. 각 점은 각 점의 기하학적 좌표로 정의된다. 셸 요소의 전역 좌표와 곡선 좌표 사이의 관계는 식 1 [4, 5]에 설명된 것과 같이 특정 식을 사용하여 나타낼 수 있다.



a) Global Coordinate System, b) Local Coordinate System(3).

Fig. 1. Shell Elements' System Coordinates.

$$\begin{Bmatrix} r \\ z \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^3 N_i(\xi) \frac{1+n}{2} \begin{Bmatrix} r_i \\ z_i \end{Bmatrix}_T + \sum_{i=1}^3 N_i(\xi) \frac{1-n}{2} \begin{Bmatrix} r_i \\ z_i \end{Bmatrix}_B \quad (1)$$

형상 함수 $N_i(\xi)$ 은 원소에 대한 노드 I와 관련된 형상 함수를 나타낸다. 여기서,

* Faculty of Civil Engineering, Universiti Teknologi MARA, Pinang, Malaysia
 * 교신저자, 정회원, 협성대학교 건축공학과 교수
 Hyupsung university
 Tel. 031-299-0758
 E-mail: jjaerinim@empas.com

$$N_1 = \frac{\xi(\xi-1)}{2}, N_2 = 1-\xi^2, N_3 = \frac{\xi(\xi+1)}{2} \quad (2)$$

따라서 식 1은 두께를 나타내는 벡터의 길이와 함께 중간 표면 좌표로 하여 아래와 위쪽을 연결하는 벡터로 보다 정교한 형태로 표현하는 것이 적합함을 의미한다. 따라서 식 3과 식 4와 같이 된다. [3].

$$\begin{Bmatrix} r \\ z \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^3 N_i(\xi) \begin{Bmatrix} r_i \\ z_i \end{Bmatrix}_{mid.} + \sum_{i=1}^3 N_i(\xi) \frac{n}{2} \overrightarrow{v_{3i}} \quad (3)$$

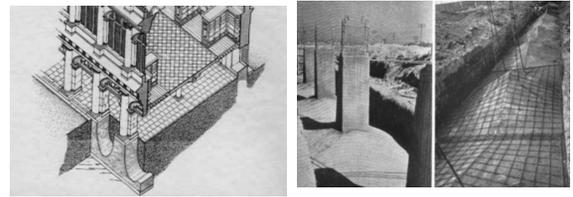
$$\overrightarrow{v_{3i}} = t_i \begin{pmatrix} \cos \varphi_i \\ \sin \varphi_i \end{pmatrix} \quad (4)$$

2. 건축 기초로서의 얇은 쉘

2.1 사원의 배치현황

아치 기하학의 최적화를 통해 재료의 효율성을 확보할 수 있다는 것은 역사적 사례를 통해 확인할 수 있다. 얇은 쉘 기초의 선구적 역할을 하는 석조 아치의 활용이 그 예라고 할 수 있다. 예를 들어 1695년에 완성된 케임브리지 트리니티 칼리지의 도서관은 크리스토퍼 렌이 역 아치 기초를 도입했다 [6].

1953년 Felix Candela와 Carlos Recamier는 Los Almacenes de las Aduanas라고도 알려진 멕시코 시티 커스텀 하우스를 위한 최초의 얇은 쉘 콘크리트 기초를 구축했다. Candela는 일반적으로 플랫폼 풋팅에서 관찰되는 것처럼 질량에만 의존하지 않고 독특한 모양에서 구조적 무결성을 도출하는 쌍곡 포물선의 독특한 배열을 사용했다. 쌍곡 포물선은 이중 곡선 형태를 가진 반탄성 표면으로 좌굴에 대한 내성이 현저하다. 또한 이러한 쌍곡 포물선은 개발 가능한 표면으로 직선을 사용하여 이중 곡선을 이룰 수 있다. 이 특성은 구성 관점에서 상당한 이점을 제공한다. 그림 2에는 1600년대부터 1900년대까지 쉘 기초 구현 사례가 나와 있다. 멕시코 시티 커스텀 하우스 프로젝트에서 각 쌍곡 포물선(hypar)의 치수는 3.05m x 4.95m이며 상승폭은 0.76m였다.



a) Trinity College Library of inverted arch foundations in year 1695 [7] b) Combination of Multiple Hyperbolic Paraboloid Shapes of Shell Foundation for Mexico Custom House in 1953 [8]

Fig. 2. Examples of Shell Foundations Implementation.

쉘은 152mm 두께로 시공되었으며 203mm 간격으로 배치된 9.53mm 철근을 사용하여 보강되었다. 특히 모서리나 능선 보는 포함되지 않았지만 직경 15.88mm의 철근이 둘레를 따라 배치되었다. 기초에 쉘 구조를 구현하여 휨에 의존하지 않고 면내 또는 막내 힘을 통해 주로 하중을 받는 하중을 토양에 분배하는 공간 시스템을 구축한다. 이 방법은 콘크리트를 주로 직접 압축함으로써 콘크리트 사용을 최적화한다. 따라서 주로 압축 응력이 유발되면 동일한 하중에 대한 두께와 강재 보강 요구량을 줄이는 것이 가능하다 [8].

건물의 레벨을 높이기 위해 건물의 기초로 펜덴티브 얇은 쉘 구조가 제안되었다. 이 접근법의 주요 목적은 특히 홍수에 취약한 지역에서 재난적 사건의 영향을 완화하는 것이다 [9]. 이는 100년 동안 평균 홍수 수준을 초과하는 안전한 지역으로 쉘 구조를 설계함으로써 홍수와 관련된 위험을 크게 최소화할 수 있다[10,11]. 철근 콘크리트 구조의 재료로 고급 콘크리트인 C40이 선택되었다. 해석에서 얇은 쉘 요소를 나타내기 위해 두께 h인 0.3m의 쉘을 사용했다. 이 두께 분류는 반경 대 두께 비율(R/t)이 20[12]보다 큰 기준을 충족하기 때문에 얇은 쉘 범주에 속한다.

본 연구에서는 최적화 기법을 이용한 수정이 필요하므로 쉘의 치수는 제안된 원래의 펜덴티브 모델을 기반으로 결정되었다. 2000 평방피트 크기의 주택에 대한 예상 하중은 185,962kg으로 9.82kN/m²에 해당하는 것으로 결정되었다. 주변 인프라 및 안전 요소를 고려하기 위해 20kN/m²

의 시험 적용 하중을 사용했다. 실제 건설 적용을 시뮬레이션하기 위해 셸의 경계 조건을 고정 지지체로 설정했다. 이러한 선택은 산업체에서 경험한 실제 조건을 정확하게 복제하기 위해 이루어졌다 [11].

본 연구에서는 비록 장경간 펜던트 얇은 셸의 지진 영향을 조사하는 데 초점을 맞춘 해석 접근법은 다르지만 동일한 개념을 사용했다. 또한 여러 개의 펜던트를 통합하여 펜던트의 기하학적 설계를 향상시켜 구조물을 더 크게 향상시켰다. 이러한 확장은 셸 기초 위에 건물을 수용할 수 있는 용량을 증가시키는 것을 목표로 한다. 주목할 점은 이전의 연구에서 홍수 유체역학적 힘이 구조물에 미치는 영향을 이미 고려했다는 것이다. 그러나 본 연구에서는 지진 사건의 시간 이력을 분석하고 시간에 따른 구조물의 변위를 측정하는 것을 포함하여 지진 영향을 구체적으로 조사하고자 한다. 이를 달성하기 위해 지진 하중을 받는 구조물의 동적 거동을 포착하기 위한 종합적인 해석이 수행될 것이다. 이러한 해석은 구조물이 지진력에 어떻게 반응하는지에 대한 가치 있는 출력을 제공하여 구조물의 지진 성능을 더 잘 이해할 수 있게 해줄 것이다. 또한 시간에 따른 구조물의 변위도 본 연구의 핵심 초점이 될 것이다. 지진 사건 동안 구조물의 다양한 지점에서의 변위를 추적함으로써 다양한 하중 조건에서의 구조물의 변형 및 응답에 대한 가치 있는 정보를 얻을 수 있다. 이 데이터는 구조물의 무결성 및 지진력에 대한 내구성 평가에 기여할 것이다.

3. 모드 및 시간 이력 분석

지진해석을 위한 FEA(Finite Element Analysis)에서의 모드해석은 고유값 문제를 해결하여 구조물의 고유진동수, 모드형태 및 모드참여인자를 결정하는 것을 포함한다. 얇은 셸 구조는 다른 차원에 비해 상대적으로 두께가 작으며, 결과적으로 부피 대비 표면적의 비율이 높다. 이러한 구조는 기하학적 구조로 인해 모달해석을 통해 포착해야 하는 고유한 진동모드를

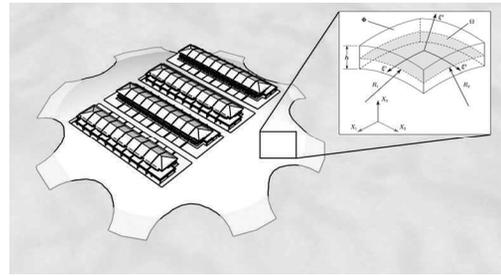


Fig. 3. Conceptual Design of the Large Span Elevated Building Foundation

보여준다 [13].

평형 방정식은 그림 4의 그림을 기반으로 식 5 [14, 15]에서 도출된 지진 여기 동안 얇은 셸 구조에 작용하는 내부 힘과 외부 힘의 균형을 나타낸다. 기본 비율은 α 와 β 의 곡선 좌표계에서 얇은 셸의 선형 이론에서 도출된 평형 방정식과 기하학적 비율을 포함한다. 외부 힘은 지반 운동에서 발생하는 반면 내부 힘은 구조물 내의 변형과 응력에서 발생한다. 평형 방정식은 지진 하중 하에서 얇은 셸 구조의 동적 거동을 제어한다.

$$\begin{aligned} & \frac{\delta(T_1 B)}{\delta \alpha} + \frac{1}{A} \frac{\delta(SA^2)}{\delta \beta} - \frac{\delta \beta}{\delta \alpha} T_2 + \frac{2}{R_2} \frac{\delta A}{\delta \beta} H \\ & + \frac{1}{R_1} \left[\frac{\delta(M_1 B)}{\delta \alpha} - \frac{\delta \beta}{\delta \alpha} M_2 + 2 \left(\frac{\delta H A}{\delta \beta} \right) \right] + ABq_1 = 0 \\ & \frac{\delta(T_2 A)}{\delta \alpha} + \frac{1}{B} \frac{\delta(SB^2)}{\delta \alpha} - \frac{\delta A}{\delta \alpha} T_1 + \frac{2}{R_1} \frac{\delta B}{\delta \alpha} H \\ & + \frac{1}{R_2} \left[\frac{\delta(M_1 A)}{\delta \beta} - \frac{\delta A}{\delta \beta} M_1 + 2 \left(\frac{\delta H B}{\delta \beta} \right) \right] + ABq_2 = 0 \end{aligned}$$

$$Q_1 = \frac{1}{AB} \left\{ \frac{\delta(M_1 B)}{\delta \alpha} - \frac{\delta B}{\delta \alpha} M_2 + \frac{1}{A} \frac{\delta(HA^2)}{\delta \beta} \right\}$$

$$Q_2 = \frac{1}{AB} \left\{ \frac{\delta(M_1 A)}{\delta \beta} - \frac{\delta A}{\delta \beta} M_1 + \frac{1}{B} \frac{\delta(HB^2)}{\delta \alpha} \right\} \quad (5)$$

유한 요소 방법은 얇은 셸 구조를 4각형 셸 요소와 같은 유한 요소로 이산화하기 위해 적용된다. 이 요소들은 두께, 재료 특성 및 결절 연결성을 포함한 셸의 기하학적 및 기계적 특성을 포착한다. 유한 요소 모델은 전체 얇은 셸 구조의 거동을 시뮬레이션하는 데 사용된다.

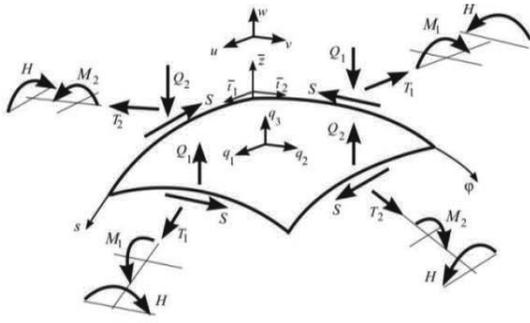


Fig. 4. Directions of external load projections and internal force components in positive orientations

고유 주파수는 감쇠가 없는 경우 얇은 쉘 구조가 진동하는 경향이 있는 고유 주파수를 나타낸다 [16]. 얇은 쉘에 특정한 모드 형상은 각 고유 주파수에서 구조가 나타내는 변형의 특성 패턴이다. 이러한 모드 형상에는 얇은 쉘의 고유한 거동을 포착하는 평면의 굽힘, 평면 내 굽힘 및 멤브레인 모드가 포함된다. 얇은 쉘 구조에 대한 모드 해석의 고유값 문제는 방정식 6 [17]을 해결하는 것을 포함한다.

$$[K]\{\phi\} = [M]\{\phi\}\{\omega\}^2 \quad (6)$$

여기서 [K]는 강성행렬, [M]은 질량행렬, {φ}는 모드형상, {ω}는 고유진동수를 나타낸다. 강성행렬, [K]와 질량행렬, [M]은 식 7, 8 [18,19,20]과 같이 단순화할 수 있다.

$$[K] = \lambda\pi \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} [B_n]^{-T} [D^j] [B_n] \gamma_j d\xi d\eta \quad (7)$$

$$[M] = \lambda\pi\rho \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} [M]^T [N] \gamma J d\xi d\eta \quad (8)$$

4. 얇은 쉘의 변위

전체 일반화된 변위 {u, v, w}는 변위 {u₀, v₀, w₀}와 회전 θ_x 및 θ_y의 함수로 표시되며, 각각 정규적인 토타이즈 및 xz 평면이다. 로컬 좌표계에서 이러한 양은 Eqs. 9 ~ 11 [21]과 같이 프라이밍된 변수로 표시된다.

$$u'(x', y', z') = u_0(x', y') + z'\theta_y(x', y') \quad (9)$$

$$v'(x', y', z') = v_0(x', y') - z'\theta_x(x', y') \quad (10)$$

$$w'(x', y', z') = w_0(x', y') \quad (11)$$

얇은 쉘에서의 변위는 얇은 쉘 구조의 거동과 변형을 분석하기 위한 기초를 형성하여 구조 해석의 필수 구성 요소이다. 변위 문제를 해결하는 것은 얇은 쉘이 다른 차원에 비해 두께가 작다고 가정하여 가로 전단 변형을 무시할 수 있다. 또한 얇은 쉘이 주로 멤브레인과 같은 거동을 보이며 평면 내 응력이 응답을 지배하고 쉘의 중간 표면에 대한 정상은 변형 후 표면에 대해 정상이 아니라더라도 변형 후에도 표면에 대해 정상으로 유지된다고 가정한다 [22]. 식 12 [21]에 표현된 바와 같이 변위 벡터 U는 전역 좌표계의 좌표를 나타냅니다.

$$U = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \sum_{n=1}^N \begin{bmatrix} \cos n\theta & 0 & 0 & \sin n\theta & 0 & 0 \\ 0 & \cos n\theta & 0 & 0 & \sin n\theta & 0 \\ 0 & 0 & \sin n\theta & 0 & 0 & \cos n\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{u}_n \\ \bar{v}_n \\ \bar{w}_n \\ \bar{u}_n \\ \bar{v}_n \\ \bar{w}_n \end{Bmatrix} \quad (12)$$

주파수의 수집 범위는 정수로 표시되며, 각 주파수의 순서를 나타내는 'n'으로 표시된다. 주파수 간의 관계는 이중 또는 단일 줄무늬 관계로 분류될 수 있으며, 이는 n번째 주파수에 대한 변위 구성 요소의 대칭 및 반대칭 기여도에 해당한다 [23]. 이러한 함수는 반경, r 및 축, z, 방향에 대해 구체적으로 정의되며 각 노드에서 요소의 변위 관계에 통합된다. 구조 시스템에서 대칭을 언급할 때는 지지 조건을 포함하여 구조에 적용되는 하중과 구조 자체에 모두 대칭이 존재함을 의미한다는 점에 유의해야 한다. 반대칭 시스템의 경우 구조는 지지 조건에서 대칭을 유지하지만 적용되는 하중은 반대칭이다.

해석을 단순화하기 위해 대칭으로 간주 되는 하중 성분을 초기에 측정된 후 반대칭 성분을 설명한다. 노드 변위는 노드 i에 대한 변위와 함께 V_i 및 V_i'을 사용한 회전을 통해 형성된 노드 i의 변위를 포함한다. 노드(α, β)에서 노멀(normal)에 대한 회전은 요소의 각 노드에 대한 상대 변위를 초래하여 사실상

노드 원을 나타낸다. 식 14는 모든 고조파에 대한 포괄적인 표현을 제공한다. 이 식에서 $[N]$ 은 형상 함수로 구성된 (3×15) 행렬을 나타내고 $\{U_n\}$ 은 요소에 대한 (15×1) 변위 벡터를 나타내며 $[S_n]$ 은 식 13과 같이 유도된다.

$$[\overline{S}_n]_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} \cos n\varphi & 0 & 0 \\ 0 & \cos n\varphi & 0 \\ 0 & 0 & \sin n\varphi \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\{U\} = \sum_{n=0}^N [\overline{S}_n] [N] \{\overline{U}_n\} \quad (14)$$

5. 방법론

5.1 유한요소해석(FEA) 모델링

본 연구는 LUSAS 소프트웨어를 사용하여 복잡한 셸 구조의 모델링 및 해석을 제시한다. LUSAS는 그러한 구조의 복잡성을 처리하는 데 상당한 이점을 제공한다. LUSAS는 셸 구조에 맞게 특별히 조정된 고급 유한 요소 해석 기능을 제공하여 기하학적 복잡성과 재료 거동을 정확하게 표현할 수 있다 [24]. 이 소프트웨어는 얇은 셸 이론을 포함하여 다양한 셸 요소 공식을 지원하여 다양한 셸 유형을 고정밀로 시뮬레이션할 수 있다.

또한 사용자 친화적인 인터페이스와 효율적인 매싱 도구를 제공하여 복잡한 셸 모델을 쉽게 만들 수 있다. 또한 LUSAS는 강력한 솔루션과 강력한 후처리 기능을 통합하여 결과를 종합적으로 분석하고 해석할 수 있다.

5.1.1 얇은 셸 모델 생성

FEA 모델링 절차는 구조물의 이산점을 나타내는 노드를 정의함으로써 시작되었다. 이러한 노드는 추가 분석을 위한 기준점의 역할을 한다.

다음으로 노드를 라인으로 연결하여 모델의 연결성과 구조적 프레임 워크를 확립했다. 이러한 라인은 구조물의 가장자리와 경계를 생성하여 표면 생성의 기초를 형성한다. 표면은 y축을 따라 회전 연산을 사용하여 생성되었다. 이 프로세스는 3차원 표면을 형성하

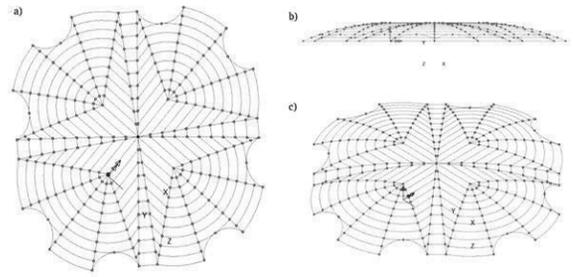


Fig. 5. Model - Multiple Pendentives.
a) Plan view, b) Side Elevation, and
c) Isometric View.

기 위해 프로필 곡선과 같은 기본 형상을 y축을 중심으로 회전하는 것을 포함한다. 이 단계는 초기 표면 메쉬를 생성하는 결과를 낳았다. 지지대 근처의 개구부를 형성하고 펜던트를 형성하기 위해 반구의 기본 2차 방정식이 사용되었다. 이러한 방정식은 표면에 대한 정밀한 조정을 가능하게 했다. 지지대 근처의 기하학적 구조는 원하는 펜던트 형상을 생성한다. 하나의 전체 펜던트를 완료한 후 회전 변환을 사용하여 전체 구조물을 복제했다. 이 복제 프로세스는 4번 수행되어 기하학의 4가지 조합이 생성되었다. 각 조합은 원점을 (50, 20, 0)의 글로벌 좌표로 고정된 상태로 유지하면서 전체 구조물을 회전시켜 생성되었다.

펜던트 기하의 네 가지 조합을 생성한 후, 다음 단계는 필요한 곳에서 중첩된 라인과 노드를 수정하고 삭제하는 것을 포함했다. 이 프로세스는 구조물이 깨끗하고 중복되거나 불필요한 요소가 없는 것을 보장했다. 수정이 완료되면 라인이 연결되어 완전하고 원하는 큰 결합된 다중 펜던트 얇은 셸 구조를 형성했다. 이러한 연결을 확립함으로써 개별 펜던트는 통합되고 통합된 시스템을 생성하기 위해 함께 병합되었다. 구조물을 확장하는 목적은 셸 표면 위에 추가 요소를 수용하는 능력을 증가시키는 것이었다. 이 확장은 펜던트 시스템의 구조적 무결성을 손상시키지 않으면서 바닥, 벽 및 기타 건축 특징과 같은 다양한 건물 구성 요소를 통합할 수 있게 했다. 결합된 펜던트 셸과 증가된 용량으로 생성된 구조는 추가 해석 및 설계 고려를 위한 강력한 기반을 제공했다. 제안된 모델의 새로운 스패ンは 300m로 증가했으며 두께는 1.2m로 증가했으며 피크 높이는 20m를 유지했다. 이러한 변화로 인해 총 표면적은 60,967.64m²로 증가했다.

그림 5에 도시된 전체 모델은 앞서 언급한 모델링 과정을 통해 생성된 전체 구조를 보여준다. 이러한 모델링 절차를 수행하면 구조에 대해 FEA 분석을 수행할 수 있으며, 펜던트 형상과 복제된 기하학적 조합을 포함한 기하학적 특성을 고려할 수 있다. 쉘의 지지대는 견인력에 따라 4가지 유형으로 분류할 수 있다 [25]. 본 연구에서 제안한 모델은 기초부에 재료가 적절하게 부착되어 있다고 가정하기 위해 고정형 지지대가 적용되었다.

5.1.2 표면 매쉬

동적 해석을 위한 매쉬 구성은 정적 응력 해석의 매쉬 구성과 다르다. 정적 해석에서는 높은 응력의 영역을 추정하고 그에 따른 매쉬 전략을 개발하는 것이 비교적 용이하며, 임계 영역에는 더 미세 매쉬가 있고 다른 곳에는 더 조악한 매쉬가 있다. 그러나 동적 해석에서는 강성과 관성력 사이의 상호 작용으로 정적 해석[26]과 크게 다를 수 있는 편향된 형상이 나타난다. 동적 해석에서는 강성과 질량 분포를 모두 고려해야 한다. 일반적으로 동적 해석을 위해 구조물 전체에 균일한 매쉬를 사용하는 것이 좋다 [27, 28]. 더 엄격한 영역에서는 정제를 적용할 수 있는 반면, 더 정제된 매쉬는 유연한 영역이나 질량이 큰 영역에 적합하다.

그림 6은 모델에 사용된 매쉬 분포를 확대하여 보여준다. 본 연구에서 구조요소에 할당된 매쉬의 유형은 모델의 곡률로 인해 4각형 형태와 보간 순서로 얇은 쉘이다. 한편 불규칙 매쉬에는 모델의 경계 지지부 부근에서 아치 개구부 형상과의 호환성을 보장하기 위해 5.0의 균일한 크기가 적용된다.

5.1.3 재료 특성

본 연구의 쉘은 BS 5400[29]에 제시된 장기설계규격에 기초하여 C40 등급의 철근콘크리트를 사용하여 시공한다. 철근콘크리트는 강도, 내구성, 범용성의 조합이 우수하여 재료로 선택된다. 압축강도를 제공하는 콘크리트와 일반적으로 인장강도를 강화하는 철근이나 매쉬 형태의 매립형 철근으로 구성된다. C40 등급의 선택은 콘크리트가 지정된 양생기간 후에 40MPa

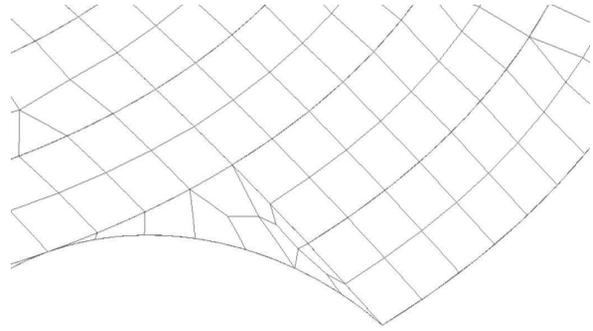


Fig. 6. Closed-up Surface Mesh Distribution.

의 특징적인 압축강도를 가짐을 나타낸다. BS 5400을 준수하는 C40 등급의 철근 콘크리트를 사용하면 쉘이 부과된 하중을 지지하고 다양한 환경적 요인을 견딜 수 있는 필요한 강도와 복원력을 보유하여 구조물의 수명과 안전성을 보장한다. BS 5400은 강, 콘크리트 및 복합교량의 설계 및 시공에 대한 지침을 제공하는 영국 표준이다. 쉘 구조물은 BS 5400의 장기 설계 사양을 준수하여 장기간에 걸쳐 내구성과 구조적 무결성을 보장할 수 있다.

5.2 고유값 관리

고유값 컨트롤은 하중케이스의 속성으로 고유값과 고유벡터를 분석하고 결정할 수 있게 해준다. 이 과정을 시작하기 위해 사용자는 LUSAS의 컨트롤 메뉴를 통해 고유값 기능에 접근한다. 첫 번째로 지정해야 할 핵심 파라미터는 고유값의 수다. 본 연구에서는 이 값을 30으로 설정하는 것이 좋다. 적절한 수의 고유값을 선택함으로써 광범위한 동적 모드와 주파수를 포착할 수 있다. 이를 통해 구조물의 동적 거동을 포괄적으로 파악할 수 있다. 고유값 정규화는 특히 불안전 모드 분석(IMD)을 위해 후속 분석 단계에서 중요한 역할을 한다. 이 연구에서는 고유값 정규화를 질량으로 설정한다. 구조물 내의 질량 분포는 동적 거동에 상당한 영향을 미친다. 고유값은 구조물의 고유 주파수를 나타내고 고유 벡터는 관련 모드 모양을 설명한다. 질량에 대한 고유 벡터를 정규화함으로써 질량 분포의 영향을 설명하도록 진폭이 조정되어 동적 응답을 보다 정확하게 표현한다 [30].

5.3 지진응답 분석

IMDPlux(Interactive Modal Dynamics) 설비는 지진응답 계산 수행에 활용된다. 이 과정에서 여기를 정의하고 원하는 결과를 명시한다. 지진응답 해석을 위해서는 댐핑 정보를 추가적으로 제공해야 한다. 주의할 점은 고유진동수 해석 결과와 달리 지진응답 해석에서 얻은 출력값은 설계값이다. 특히 정적 해석 하에서 최대 변위 출력을 나타내는 노드의 응답을 분석하는 데 많은 관심을 기울이고 있다. 지진 가속도 기록은 지진 입력 프로그램에서 모드, 댐핑, 보간 옵션 등이 설정되어 있으며, 본 연구에서는 지진 가속도 기록을 업로드하여 지상 운동 데이터를 수집한다. 또한 지진 가진 시 에너지 소산을 제어하기 위해 댐핑값 5%를 선택한다. 지상 운동을 정확하게 표현하기 위해 기록의 선형 보간 옵션이 선택된다. 정확한 시간 통합을 보장하기 위해 기존 지진 기록의 시간 단계의 절반인 0.0025의 시간 단계가 입력되며, 이러한 미세한 시간 단계를 통해 해석의 정확성이 향상되어 구조물의 동적 응답을 보다 상세하게 모델링할 수 있다 [31].

6. 결과 및 토론

6.1 고유값 분석 결과

고유값 분석은 결과적인 결과를 제공하여 제안된 모델의 동적 거동에 관한 귀중한 정보를 제공했다. 고유값의 10가지 모드는 해당하는 주파수 및 오류 규범과 함께 시스템의 진동 특성 및 모달 특성을 설명한다. 얻은 고유값은 각 모드와 관련된 진동 크기를 나타낸다. 고유값이 증가할수록 해당 모드의 진동 수준이 높아짐을 나타낸다. 반면 주파수는 각 모드에서 시스템이 진동하는 속도를 나타낸다. 주파수가 높을수록 더 빠른 진동을 의미하는 반면 주파수가 낮을수록 더 느린 진동을 의미한다. 오류 규범은 분석의 정확성을 평가한다. 오류 규범이 작을수록 계산된 고유값과 실제 시스템 거동 사이의 더 밀접한 일치성을 나타낸다. 오류 규범이 작으면 고유값과 주파수를 신뢰할 수 있고 정확하게 추정할 수 있음을 나타낸다.

고유값 분석의 오차 규범 출력을 분석해 보면, 모든

모드에 대한 오차 규범이 상대적으로 작은 것을 알 수 있다. 이는 고유값 해의 수렴이 잘 이루어졌음을 나타내며, 계산된 고유값과 빈도가 모델의 동적 거동을 정확하게 표현한 것임을 시사한다. Table 1은 고유값 분석에서 얻은 출력을 요약한 것이다.

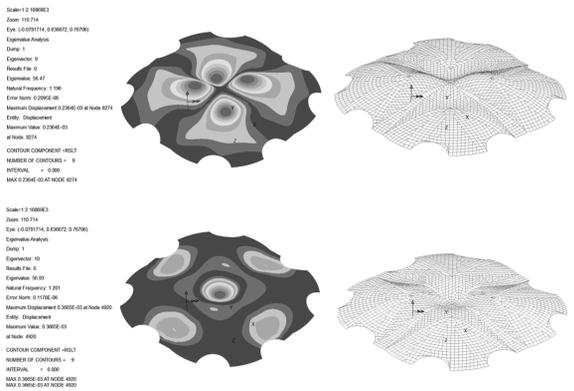
Table 1. Eigenvalue

Mode	Eigenvalue	Frequency, Hz	Error Norm
1	9.76223	0.497273	0.491934E-09
2	14.4711	0.605441	0.897920E-10
3	14.5168	0.606395	0.470095E-09
4	23.8763	0.777685	0.210115E-09
5	24.1661	0.782390	0.114592E-09
6	34.8173	0.939112	0.434339E-10
7	35.4634	0.947786	0.110333E-09
8	40.1826	1.00888	0.857056E-10
9	56.4669	1.19596	0.209481E-06
10	56.9254	1.20081	0.117810E-06

모드 1은 가장 낮은 고유값 9.76223과 이에 해당하는 주파수 0.497273으로 두드러져 다른 모드에 비해 상대적으로 진동 진폭이 작은 모드를 시사한다. 모드 6~10은 고유값과 주파수가 점진적으로 증가하는 모습을 보여 진동의 크기가 크고 진동 속도가 빠른 모드를 나타낸다. 모드 6은 고유값 34.8173과 주파수 0.939112이며, 모드 10은 가장 높은 고유값 56.9254와 주파수 1.20081을 보여준다.

모드 10이 모델의 동적 거동에 대한 임계 모드로 결정되었기 때문에, 이후 지진 해석인 병진 변위 시간 이력 해석을 위한 활성 모드로 선택되었다. 모드 10을 활성 모드로 선택함으로써, 이 모드가 나타내는 특성과 특성을 기반으로 지진 하중 조건에서 구조물의 응답을 포착하는 데 집중할 수 있다. 이 결정은 지진 해석이 가장 영향력 있는 모드를 고려하도록 조정되어 지진 이벤트 동안 구조물의 거동을 포괄적으로 이해할 수 있도록 한다.

고유값 해석에 기초한 변위 출력은 표 2에 제시되어 있으며, 모드 8에서 얻은 최저치와 모드 10에서 생성된 최고 변위에 대한 변형 메쉬를 갖는 변위 등고선은 그림 7에 제시되어 있다.



a) Lowest Displacement - Contour Output of Mode 8, b) Deformed Mesh - Mode 8, c) Highest Displacement - Contour Output of Mode 10, and d) Deformed Mesh - Mode 10

Fig. 7. Eigenvalues Contour Output

고유값 40.1826과 변위 0.1766 mm로 특징지어지는 모드 8은 가장 낮은 변위를 보여준다. 해당 변위 등고선은 가장 높은 값이 모델의 피크 근처, 특히 여러 쉘의 교차점에 집중되어 있음을 보여준다. 반대로 더 낮은 변위 값은 주로 경계 지지대에 더 가깝게 분포된다.

반면에 모드 10은 고유값 56.9254, 변위 0.3665 mm로 가장 높은 변위를 보여준다. 이 모드에 대한 변위 등고선은 모델의 최고점에서 정확하게 높은 값의 집중을 보여주는 반면, 중간 변위값은 지지대 근처의 개구 주변에 집중되어 있다. 이러한 변위의 집중은 구조물의 최고점이 상당한 동적 힘을 경험하고 있음을 시사하며 주의와 보강이 필요하다. 결과를 바탕으로 구조적 무결성을 보장하고 과도한 변위를 완화하기 위해 가장 높은 변위 지점에서 보강을 강화하는데 중점을 두는 것이 좋다. 보강 철근의 크기나 양을 늘리거나 추가 브레이싱을 도입하는 등 이 영역의 구조 요소를 보강하면 동적 힘에 대한 강성과 저항이 효과적으로 향상될 수 있다.

가장 높은 변위 지점을 보강함으로써 전체적인 구조 성능이 향상되어 안정성이 향상되고 동적 하중에 대한 취약성이 감소할 수 있다.

Table 2. 다양한 고유값 모드에 대한 변위 출력

Mode	Node	Displacement, mm
1	4920	0.3179
2	4983	0.2664
3	6358	0.2665
4	5194	0.2211
5	6056	0.2216
6	5232	0.2186
7	8014	0.2391
8	6177	0.1766
9	8274	0.2364
10	4920	0.3665

6.2 개별 노드 변위 - 시간 이력 출력

선택한 노드인 노드 4920에 대한 변위 - 시간 이력 출력은 모든 고유값 모드 중에서 관찰된 가장 높은 변위를 기반으로 한다. 이 특정 노드는 구조물의 다른 노드와 비교할 때 가장 큰 변위 크기를 나타내기 때문에 선택되었다. 노드 4920에서 변위 - 시간 이력 출력은 분석된 시간 기간 동안 상당한 변위를 보여준다. 이 그림은 구조물이 외부 여기인 동적 힘에 반응함에 따라 변위 크기의 변화를 보여준다. 이 분석은 구조물이 최대 변위를 경험할 때 지진 이벤트의 중요한 기간을 식별하는 데 도움이 된다.

시간이력 해석 출력은 지진 가진에 대응하여 몇 가지 중요한 결과를 도출하였다. Fig. 8에 도시된 변위 - 시간이력해석결과를 기준으로 응답시간 4.100초에서 X축 방향 최대 변위는 -6.76mm로 관찰되어 수평면을 따라 현저한 변형이 관찰되었다. 두 번째로 Y축 방향이 응답시간 3.615초에서 최대 변위 49.87mm로 가장 높은 변위크기를 나타냈으며, 이는 중대한 수직변형을 의미한다. 마지막으로 응답시간 1.115초에서 Z축 방향으로 0.93mm의 비교적 작은 변위가 관찰되었다.

Table 3. 변위 - 시간

Entity	Time, s	Displacement, mm
Peak_Pos_DX	3.265	6.29
Peak_Neg_DX	4.100	-6.76
Abs_Peak_DX	4.100	-6.76
Peak_Pos_DY	3.615	49.87
Peak_Neg_DY	2.155	-34.44
Abs_Peak_DY	3.615	49.87
Peak_Pos_DZ	1.115	0.93
Peak_Neg_DZ	1.727	-0.71
Abs_Peak_DZ	1.115	0.93

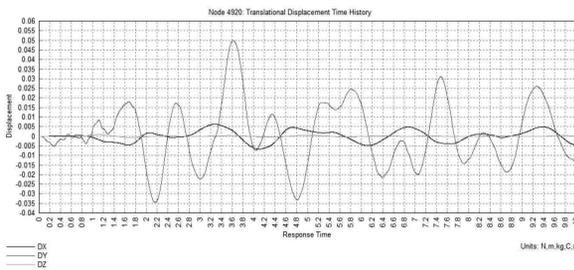


Fig. 8. Plot of Displacement Time History on Individual Node (Node 4920) for Direction Dx, Dy and Dz.

이러한 연구 결과를 바탕으로 얇은 셸 모델에 있어서 Y축 방향이 변형 및 변위 측면에서 매우 중요하다고 결론지을 수 있다. Y축 방향의 최대 변위는 X축 및 Z축 방향의 최대 변위보다 유의하게 높게 나타나 셸이 보다 큰 수직 변형을 경험한 것으로 나타났다. 해석에 의한 변위 출력을 변형 한계인 $L/250$ 와 비교해보면 최대 변위값이 얇은 셸에 대한 허용 한계에 훨씬 못 미치는 것을 알 수 있다. Y축 방향의 최대 변위는 49.87 mm로 변형 한계보다 유의하게 작다. 따라서 얇은 셸 모델은 변형 한계 기준을 만족하여 허용 수준의 변형을 경험하면서 가해지는 힘에 견딜 수 있는 것으로 나타났다.

7. 결론

본 연구는 300m의 대경간을 가지는 고가의 플랫폼 기초로서 구현을 위해 설계된 새로운 모델의 개발에 초점을 맞추고 있다. 본 연구의 범위는 지진 들뜸에 대한 모델의 저항 능력을 더욱 정당화하여 전체적인 적용 가능성과 신뢰성을 향상시켰다. 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

a) 본 연구에서 수행된 고유값 해석은 10개의 다른 모드를 나타냈으며, 각각의 모드는 서로 다른 출력을 나타냈다. 모델 8은 6177번 노드에서 가장 적은 변위를 나타냈고, 최소 변위값은 0.1766mm를 나타냈다. 반대로 모델 10은 4920번 노드에서 0.2364mm로 모든 모드 중 가장 높은 변위 출력을 나타내어 동적 힘에 대한 취약성을 나타냈다. 지진 들뜸 하에서의 구조적 응답에 대한 추가 통찰력을 얻기 위해 중요한 노

드를 식별했으며, 노드 4920은 모드 및 시간 이력 해석을 위해 선택되었다.

b) 고유값 등고선 출력은 모델 내에서 중요한 영역을 효과적으로 강조하여 높은 변위가 집중된 영역을 나타낸다. 가장 높은 변위값을 갖는 모드 10은 모델의 피크에 집중된 적색 등고선의 높은 값을 나타내는 반면 지지 개구 부근의 변위 등고선의 평균값은 상대적으로 낮게 유지된다. 이러한 영역은 구조적 견고성을 강화하고 동적 하중에 대해 보다 효과적인 저항을 가능하게 하기 위한 보강 강화의 필요성을 명확하게 나타낸다.

c) 시간이력해석 결과 임계노드인 4920번 노드는 허용한계 미만으로 유지되는 최대변위를 경험한 것으로 나타났다. 변위-시간이력 그래프는 X, Z 방향으로 비교적 낮은 변위를 보인 반면 Y 방향으로 49.87mm의 유의한 변위값을 나타냈다. 그러나 Y 방향으로 높은 변위에도 불구하고 최대변위는 여전히 얇은 셸의 경우 허용한계 이내로 떨어진다. 이 결과는 설계된 모델이 지진의 들뜸에 효과적으로 견딜 수 있으며, 이를 통해 고가 플랫폼 기초의 구조적 무결성 및 안전성을 확보할 수 있음을 나타낸다.

결론적으로, 본 연구는 얇은 셸 구조 위의 건물을 대상으로 하는 고가 플랫폼 기초의 새로운 대경간 모델을 성공적으로 개발하였다. 이 결과는 견고하고 탄력적인 고가 플랫폼 기초 시스템을 이해하고 구현하는 데 기여할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00339490).

References

1. R. Pathak, Melani, Amit, Khare, Rakesh, Finite Element Modelling and Free Vibration Analysis of RC Shell & Spatial Structures for Seismic Evaluation, Proceedings of Recent Advances in Interdisciplinary Trends in Engineering & Applications (RAITEA). (2019).

2. C.L. Dym, F. Asce, H.E. Williams, Stress and Displacement Estimates for Arches, *Journal of Structural Engineering*. 137 (1) (2011) 49-58.
DOI:<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29ST.1943-541X.0000267>
3. A.A. Mansor, M.M. Hamid, S. Abbas, Finite Element Dynamic Analysis of Thin Shells Subjected to Arbitrary Loading. *Journal of Engineering Science and Technology*. 16 (6) (2021).
4. O.C. Zienkiewicz, *The Finite Element Method*, ZAMM - Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik. 60 (8) (1980) 345-46.
5. K.J. Bathe, *Finite element procedures*, New Jersey: Prentice Hall. (1996).
6. Y.C. Chiang, P. Buskermolen, A. Borgart, Discretised Airy Stress Functions and Body Forces, (2020)
7. M.K. Das, Three-Dimensional Finite Element Model to Study the Behavior of Hyperbolic Paraboloid Shell as Foundation, Master of Science in Civil Engineering Thesis, Bangladesh University of Engineering and Technology. (1989).
8. C. Faber, *Candela: The Shell Builder*, New York, NY, USA: Reinhold Publishing Corporation, (1963).
9. A.A. Nassir, H.M Yee, A. Petchsasithon, S.F. Senin, Optimization of a heavy-duty elevated thin shell structure. *Songklanakarin J. Sci. Technol.* 44 (4) (2022) 1085-1090.
10. A.A. Nassir, H.M Yee, S.F. Senin, Computational Mechanics Analysis in Elevated Shell Platform Structures, *Journal of Mechanical Engineering*. 18 (3) (2021).
11. A.A. Nassir, H.M Yee, S.F. Senin, W.Y. Peen, Sustainable development of elevated shell platform, *Engineerin Journal*. 25 (6) (2021) 123-130.
DOI:<https://engj.org/index.php/ej/article/view/4355/1133>
12. A.J. Sadowski, J.M. Rotter, Solid or Shell Finite Elements to Model Thick Cylindrical Tubes and Shells under Global Bending, *International Journal Mechanical Science*, 74 (2013) 143-153.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2013.05.008>
13. J.C. Yu, Q.T. Wang, Modal analysis of the rotating shell structure based on Absolute Nodal Coordinate Formulation, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 531 (2019).
DOI:<https://doi.org/10.1088/1757-899X/531/1/012061>
14. A. Astakhova, Calculation of thin isotropic shells beyond the elastic limit by the method of elastic solutions, *MATEC Web of Conferences*. 196 (2018).
15. Q. Chai, Y.Q. Wang, F.L. Yang, Frequency response of spinning cylindrical shells with discontinuous boundary conditions: A semi-analytical method. *Thin-Walled Structures*. 182 (2023).
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110253>
16. J. Kandasamy, M. Madhavi, N. Haritha, Free Vibration Analysis of Thin Cylindrical Shells Subjected to Internal Pressure and Finite Element Analysis, *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 5 (13) (2016) 40-48.
DOI:<https://doi.org/10.1007/s13296-019-00277-5>
17. R.W. Clough, J. Penzien, *Dynamics of structures (3rd Edition)*, NewYork: McGraw-HillBookCo.Inc.(2003).
18. T.R. Chandrupatla, A.D. Belegundu, T. Ramesh, C. Ray, *Introduction to finite elements in engineering*, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall. (2) (2002).
19. J. Zhao, Q. Tian, H.Y. Hu, Modal Analysis of a rotating thin plate via absolute nodal coordinate formulation, *Journal of Compu-*

- tational and Nonlinear Dynamics. 6 (4) (2016).
DOI:<https://doi.org/10.1115/1.4003975>
20. N.D. Lagaros, C.C. Mitropoulou, M. Papadrakakis, Time History Seismic Analysis, Encyclopedia of Earthquake Engineering. (2013).
21. X.T. He, X.G. Wang, J.Y. Sun, Application of the Variational Method to the Large Deformation Problem of Thin Cylindrical Shells with Different Moduli in Tension and Compression, Materials. 16 (4) (2023).
DOI:<https://doi.org/10.3390/ma16041686>
22. Q. Chai, Y.Q. Wang, F.L. Yang, Frequency response of spinning cylindrical shells with discontinuous boundary conditions: A semi-analytical method, Thin-Walled Structures. 182 (2023).
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110253>
23. I. M. Smith, D. V. Griffiths, L. Margetts, Programming the Finite Element Method, 5th Edition, John Wiley & Sons. (2013).
24. LUSAS Ltd. LUSAS User Manual [Manual]. (2021).
25. Y.C. Chiang, P.J. Buskermolen, A. Borgart, Discretised Airy Stress Functions and Body Forces, Advances in Architectural Geometry 2020. (2021) 62-83.
26. R. Yu, Q. Zhang, Z. Wei, L. Li, Z. Yue, X. Wang, T.J. Lu, Dynamic response of fully-clamped steel plate under laboratory-simulated sequential fragment impact and blast loading, Thin-Walled Structures. 182 (2022).
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110144>
27. LUSAS Ltd., Worked Example: Seismic Analysis of a 3D Frame (Time Domain). (n.d.).
28. Y. Wu, S. Fan, Y. Guo, S. Duan, Q. Wu, Experimental study and numerical simulation on the seismic behavior of diagonally stiffened stainless steel plate shear walls under low cyclic loading, Thin-Walled Structures. 182 (2023).
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110165>
29. BS 5400 Part 7:1992. Steel, concrete and composite bridges - Part 7: Specification for materials and workmanship, concrete, reinforcement and prestressing tendons. British Standards Institution. (2013).
30. T. Uenaga, P. Omidian, R.C. George, M. Mirzajani, N. Khaji, Seismic Resilience Assessment of Curved Reinforced Concrete Bridge Piers through Seismic Fragility Curves Considering Short and Long Period Earthquakes, Sustainability. 15 (10) (2023).
DOI:<https://doi.org/10.3390/su15107764>
31. M.D. Duong, V.M. Nguyen, Q.T. Dao, T.H. Do, Reference Response Based Time-Varying Vibration Suppression, Journal of Engineering Science and Technology. 18 (1) (2023) 604-623.
- Received : February 06, 2024
 - Revised : June 05, 2024
 - Accepted : June 05, 2024