유한요소법을 이용한 지진하중을 받는 교량의 구조물-유체-지반 동적 상호작용해석

Dynamic Analysis of Structure-Fluid-Soil Interaction Problem of a Bridge Subjected to Seismic-Load Using Finite Element Method

류희룡* · 박영택** · 이재영**

Hee-Yong You* · Young-Tack Park** · Jae-Young Lee**

Abstract

In construction facilities such as bridges, the fluid boundary layer(or water film) is formed at the structure-soil interface by the inflow into the system due to rainfall or/and rising ground-water. As a result, the structure-soil interaction(SSl) state changes into the structure-fluid-soil interaction(SFSI) state. In general, construction facilities may be endangered by the inflow of water into the soil foundation. Thus, it is important to predict the dynamic SFSI responses accurately so that the facilities may be properly designed against such dangers. It is desired to have the robust tools of attaining such a purpose. However, there has not been any report of a method for the SFSI analyses. The objective of this study is to propose an efficient method of finite element modelling using the new interface element named hybrid interface element capable of giving reasonable predictions of the dynamic SFSI response. This element enables the simulation of the limited normal tensile resistance and the tangential hydro-plane behaviour, which has not been preceded in the previous studies. The hybrid interface element was tested numerically for its validity and employed in the analysis of SFSI responses of the continuous bridge subjected to seismic load under rainfall or/and rising ground-water condition. It showed that dynamic responses of the continuous bridge resting on direct foundation may be amplified under rainfall condition and consequently lead to significant variation of stresses.

Keywords : Finite element method, Interface element, Structure-fluid-soil interaction, SSI.

I. 서 론

옹벽-뒤채움, 교각-지반, 빌딩-지반 등 일반적인 건설구조물에는 구조물-지반 접촉경계(structure-soil interface)가 형성된다. 이러한 접촉경계면을 고려한 수치적 해석은 각종 건설 구조물의 거동 분석, 설계 및 모니터링을 위하여 매우 유용한 방법으로 인식되고 있다(Zaman et al., 1984; Desai et al., 1985). 이를 위한 수치적 해석 방법으로는 현재 유한요소법

* 농촌진흥청 원예연구소 시설원예시험장

** 전북대학교 농업생명과학대학 생물자원시스템공학부

† Corresponding author. Tel.: +82-51-602-2151

M.P.: +82-16-614-4000

E-mail address: baradori@rda.go.kr

2008년 4월 10일 투고

2008년 7월 25일 심사완료

2008년 7월 25일 게재확정

(finite element method)을 대표적으로 들 수 있다. 합리적인 수치해석을 위하여 접촉경계면의 특성에 대한 연구(Brumund & Leonards, 1973; Potyondy, 1961; Uesugi & Kishda, 1986) 및 이를 적절하게 표현할 수 있는 수치모델에 관한 연구(Goodman et al., 1968; Clough & Duncan, 1971; Ghaboussi et al., 1972; Herrmann, 1978; Heuze & Barbour, 1982; Desai & Ma, 1992; Sharma & Desai, 1992; Pradhan & Desai, 2006)가 진행되어 왔다. 그리고 이를 기반으로 한 구조물-지반 상호작용(structure-soil interaction, SSI)해석에 대한 연구(Heuze & Barbour, 1982; Toki & Miura, 1983; Viladkar et al., 1994; Shakib & Fuladgar, 2004; Wegner et al., 2005)가 진행되었다.

이러한 SSI시스템에 강우 및 지하수 등이 유입되면 유체 접촉경계층이 발생하여 Fig. 1(a)에 보인바와 같이 구조물-유체-지반 접촉경계(structure-fluid-soil interface)를 이루게 된다. 건설구조물의 경우, 정적 및 동적 하중 상태에서 강우 및 지하수의 상승 등으로 유입수가 발생하면 구조물의 안정성에 위협을 유발할 수 있다. 이를 위해 구조물-유체-지반 접촉경계면을 합리적으로 정식화 하고 해석할 수 있는

특수 유한요소 개발의 필요성이 대두하고 있으나 현재 이에 대한 연구 보고는 찾아보기 어려운 상태이다. 따라서 이와 같은 유한요소의 개발과 이를 이용한 구조해석 방법 및 설계 지침이 절실하게 요구되고 있다.

이 연구에서는 구조물-유체-지반 접촉경계 거동의 엄밀한 평가를 위한 합리적인 인터페이스 요소인 하이브리드 인터페이스 요소(hybrid interface element)를 제안하였다. 그리고 제안한 하이브리드 인터페이스 요소를 구조물-유체-지반 시스템에 적용하여 그 활용성을 다루고, 강우 및 지하수위 상승조건에서 지진 하중에 대한 연속구조물의 동적 구조물-유체-지반 상호작용(structure-fluid-soil interaction, SFSI)을 고려한 동적 응답 특성을 고찰하였다.

II. 유한요소 정식화

1. 구조물-유체-지반 접촉경계

서로 접하는 두 구조계의 접촉경계면에서는 접촉면 고유의 거동특성이 존재한다. 이러한 접촉경계 거동이 전체 시스템의 거동에 미치는 영향을 평가하기 위하여 그 특성을 파악하고 고려해야 할 필요성이 있다(Potyondy, 1961; Parmelee, 1967). 또한 여기에 Fig. 1(a)에 보인바와 같이 강우가 지속되면 지표면으로부터 유출수가 유입될 수 있으며 이때 구조물과 기초지반의 접촉경계에 유출수가 스며들거나 지하수위가 도달하여 유체층(water film)이 형성된다. 이로써 Fig. 1(b)에 보인바와 같이 유체층의 양압력이 발생할 수 있다. 즉, 구조물-유체-지반 접촉경계의 한계 인장저항력(limited tensile resistance, LTR)과 함께 접선방향의 hydro-plane 거동 현상이 전체 시스템의 SFSI 동적 응답특성에 영향을 미치게 된다(Ryu, 2007). 이와 같은 특성을 유체 접촉경계층을 표현하기 위한 하이브리드 인터페이스 요소의 정식화에 반영하였다.

2. 하이브리드 인터페이스 요소

하이브리드 인터페이스 모델에는 구조물과 지반 사

Fig. 1 The progress of a limited tensile resistance due to water film under dynamic load

이의 유체 접촉경계층에 의해 발생하는 hydro-plane 및 법선 방향으로의 한계 인장저항(limited tensile resistance) 특성이 적용되었다. 이는 구조물과 지반 만을 고려할 수 있는 기존의 인터페이스 요소(Clough & Duncan, 1971; Zaman et al., 1984; Desai & Ma, 1992; Sharma & Desai, 1992; Viladkar et al., 1994)와 비교하여 경우 및 지하수위의 상승으로 인한 유체접촉 경계층 등을 고려할 수 있는 특징이 있다. 구조물-유체-지반 접촉경계에서의 두 가지 특성을 이용하여 Fig. 2에 보인바와 같이 하이브리드 인터페이스 요소(hybrid interface element)의 구성 관계식을 수립하였다. Fig. 2(a)는 짧은 시간 동안의 인장력에 대하여 접촉경계면에서 한계 인장 저항력이 발생하는 과정이 나타나 있다.

접속경계의 응력이 압축 측에서 인장 측으로 이동하여도 일정한 한계 인장저항력, σ_{LTR} 에 도달하기 전까지는 유체층에 의한 인장역으로 인하여 경계분

(a) Measurement of limited tensile resistance stress and the normal constitutive relationship

(b) Schematic of hydro-plane response and tangential stress-strain relationship

Fig. 2 Constitutive relations of hybrid interface element

리에 저항하고 탄성거동을 하게 된다. 또한 동적 거동의 변화에 따라 한계인장강도를 얻는 탄성계수가 변하게 된다. 그러나 발생 응력이 한계 인장저항력을 초과하게 되면 인장 파괴를 일으키고 경계분리가 진행하게 된다. 이에 대한 개념도는 Fig. 1(a)에 나타나 있다.

접속경계의 거동이 경계분리에서 재부착 모드로 돌아올 때 접속경계의 전단저항이 '0'에 가깝게 되면 Fig. 2(b)에 보인바와 같이 hydro-plane현상이 발생하게 된다. 따라서 접속경계를 구성하는 유체층에 의하여 경계분리의 진행 여부가 결정되며 이와 함께 hydro-plane 현상이 구조물의 동적 거동 특성에 영향을 미치게 된다.

유한요소해석 과정에서는 요소별로 이러한 과정이 계산되고 평가되어 접속경계 거동에 반영된다. 예를 들어 접속경계의 분리는 식(1)에서와 같이 법선 구속력이 한계 인장 저항력을 초과하면 발생하게 된다. 그 다음 과정에서는 접속경계의 재부착 또는 경계분리를 결정하게 되며 하중의 변화에 따라 이러한 과정이 반복된다.

$$\{(\sigma_{nn}^o)^t + \Delta\sigma_{nn}\} > \sigma_{LTR} \quad (1)$$

여기서, $(\sigma_{nn}^o)^t$, $\Delta\sigma_{nn}$, σ_{LTR} 는 각각 시간 t에서의 접속경계 전 법선응력, 접속경계에서 계산된 증분 법선응력 그리고 한계 인장저항 응력을 나타낸다.

제한된 하이브리드 인터페이스 요소를 유한요소해석 프로그램인 VisualFEA(Lee, 2006)의 요소라이브리리에 추가하고 일반적인 유한요소와 결합하여 수치해석을 수행할 수 있도록 하였다.

III. 동적 상호작용 해석

한계 인장저항력, hydro-plane거동 등이 발생할 수 있는 건설 구조물을 설정하고 이와 같은 조건들이 적용된 구조물-유체-지반의 동적 상호작용 해석을 수행하였다. 유한요소법을 사용하여 구조 시스템의 동적 응답 해석을 수행하기 위해서는 식(2)와 같이 주어진 동적 운동 방정식의 해를 구해야 한다.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = [M]\{I\}\ddot{u}_g(t) \quad (2)$$

여기서, $[M]$, $[C]$ 및 $[K]$ 는 각각 요소 질량행렬, 감쇠행렬 및 강성행렬을 나타내고, $\{\ddot{u}\}$, $\{\dot{u}\}$, $\{u\}$ 는 각각 상대 절점 가속도, 속도 및 변위 벡터, $\{I\}$ 는 작용벡터이고 $\ddot{u}_g(t)$ 는 기반부의 시간이력 입력가속도를 나타낸다.

시간영역에서 식(2)의 방정식을 풀기 위하여 Newmark 법(Newmark, 1959)을 사용하였으며 적분 시간 간격에서 무조건 안정 조건인 평균 가속도 가정($\beta = 1/4$)을 선택하였다. 지반조건은 등가선형이론을 적용하였으며 비선형 문제의 반복 계산을 위하여 Newton-Raphson방법 및 수정 Newton-Raphson방법을 조합하여 사용하였고 감쇠행렬의 조립을 위해서는 Rayleigh감쇠를 사용하였다.

해석 구조물은 Fig. 3(a)에 보인 바와 같이 N치 50이상의 견고한 지반위에 놓인 총 연장 200m의 5경간 연속교이며 2기의 교대와 4기의 철근 콘크리트 교각으로 지지되어 있다. 구조물-유체-지반의 상호작용에서 중요 단면인 교축 직각방향의 해석을 수행하였다. 이를 통하여 상부 하중을 고려한 독립적인 교각의 동적 응답 거동 특성을 고찰하였다.

Fig. 3(b)에는 해석을 위한 유한 요소망을 보였다.

(a) 5-span continuous bridge

(b) Finite element idealization of structure-fluid-soil interaction problem

Fig. 3 A continuous elevated highway bridge and finite element mesh for analysis

지층은 직접기초를 지지하는 기반층과 상부 표층 등 두 종류의 지반으로 구성 되어 있다. Soil 1로 표시한 요소망이 교각 기초를 직접 지지하고 있는 기반층이며 전단파 속도 $V_s = 609\text{m/sec}$ 의 매우 견고한 암반 지반으로 구성되어 있다. Soil 2는 상대적으로 유연한 지표층을 나타내고 있으며, 평면 변형을 2차 사변형 요소로 지반을 모델링하였다. 횡방향 지반 요소망 길이는 경계조건에 의한 간섭을 피하기 위하여 총 지반 깊이 H에 대하여 횡방향 지반 층 연장 $L = 6H$ 로 모델링하였다(You, 2007). 교각 구조물은 지반 요소와의 적합조건을 만족하기 위하여 평면 변형을 2차 사변형 요소로 모델링하였으며 선형 탄성 모델을 사용하였다. 굵은 점선으로 표시한 부분이 인터페이스 요소를 나타낸다.

시스템의 물성조건은 지반 특성 주기에 따른 동적 응답 특성 변화를 고찰하기 위하여 구조물과 지표층의 일정한 강성비를 결정하여 Table 1과 같이 설정하였다. 입력하중으로는 1995년 일본의 효고켄 난부 지진에서 관측된 JMA Kobe해양기상청(이하 KJMA), JR Takatori역(이하 KJRT) 및 Kobe Port island(이하 KPI)의 EW성분 기록을 선택하였다.

Table 1 Elastic parameters for concrete and equivalent linear model parameters for materials for soils.

Materials Parameters/SSI types		Structure	Soil I	Soil II
E, MPa	Type 01	2.7E+04	2.10E+04	1.35E+02
	Type 02	2.7E+04	2.10E+04	2.70E+02
	Type 03	2.7E+04	2.10E+04	2.70E+03
γ , kg/m ³	Type 01	2400	2300	2000
	Type 02	2400	2300	2000
	Type 03	2400	2300	2200
V_s , m/sec	Type 01	-	609.2	51.8
	Type 02	-	609.2	73.2
	Type 03	-	609.2	221.6
Thickness, m	Type 01	-	10.0	4.5
	Type 02	-	10.0	4.5
	Type 03	-	10.0	4.5
ν	Type 01	0.17	0.23	0.26
	Type 02	0.17	0.23	0.26
	Type 03	0.17	0.23	0.25

IV. 구조물-유체-지반 동적 상호작용/ 특성 및 고찰

한계 인장저항 특성 및 hydro-plane 현상을 표현할 수 있는 하이브리드 인터페이스 요소를 적용하여 구조물-유체-지반 동적 상호작용 응답 결과를 얻었다. 일반적인 조건 즉, no-tension 인터페이스 요소를 적용한 건기 시의 구조물-지반 상호작용(structure-soil interaction, SSI) 동적 응답결과와 비교하고 SFSI 동적 응답 변화 특성을 고찰하였다.

Fig. 4는 KJRT 입력 지진 하중에 대하여 세 종류

(a) Horizontal seismic response of the bridge resting on type 01 condition

(b) Horizontal seismic response of the bridge resting on type 02 condition

(c) Horizontal seismic response of the bridge resting on type 03 condition

Fig. 4 Influence of interface condition on horizontal displacement-time history at top of the bridge resting on type 01, type 02 and type 03 condition due to Kobe Takatori record

의 지반조건에 놓인 교량 구조물 상부에서의 동적 수평변위 응답이력을 나타내었으며, no-tension 인터페이스 요소 및 하이브리드 인터페이스 요소를 적용한 응답을 각각 나타내었다. Fig. 4(a)~(c)에 나타난 바와 지표층의 특성 주기가 가장 짧은 Fig. 4(c)를 제외한 다른 두 종류의 지반 조건에 대하여

(a) Horizontal displacement-time history due to KJRT

(b) Minimum principal stress contour of column on hybrid interface condition

(c) Minimum principal stress contour of column on no-tension interface condition

Fig. 5 Influence of interface condition on horizontal displacement-time history at top of the bridge and response stress(Pa) contour

하이브리드 인터페이스 조건의 응답이 no-tension 인터페이스 조건의 응답에 비하여 큰 값을 보이고 있다.

Fig. 5(a)는 Fig. 4(a)를 확대한 그래프이며 그림에서 나타난 바와 같이 지진 하중에 대하여 하이브리드 인터페이스 조건의 응답(실선)이 no-tension 인터페이스 조건의 응답(점선)에 비하여 큰 값을 보이고 있다. 즉, 접촉경계의 조건에 따라 동적 응답 주기의 경향이 다르게 나타나고 있다. [A] 지점에 보인 바와 같이 하이브리드 인터페이스 요소를 적용한 응답은 유체 접촉경계층이 형성되지 않은 조건의 응답과 비교하여 응답 주기의 위상이 늦춰지는 현상이 발생하고 있다.

이는 유체 접촉경계층의 동적 상호작용 영향으로 수평변위가 증가하고 그 결과로 응답주기가 길어짐으로써 나타나는 현상으로 판단된다. 또한 [B] 지점에 보인 바와 같이 각 주기의 마루 및 골에서 수평 응답이 커지고 있음을 확인 할 수 있다. 이와 같은 결과는 유체 접촉경계에서의 hydro-plane 현상이 발생하여 구조물 상부의 수평 응답에도 큰 영향을 끼치고 있는 것으로 분석되었다.

Fig. 5(b), (c)는 KJRT 지진하중 조건에서 구조물-지반의 응답 변형 결과 및 응력 분포를 나타낸 그림이며 Fig. 5(b)는 하이브리드 인터페이스 요소를, Fig. 5(c)는 no-tension 인터페이스 요소를 적용했을 경우의 최소 주응력 분포를 나타내고 있다. 인터페이스 조건에 따라 구조물의 압축 및 인장부의 발생 응력 분포 및 응력 변화 양상이 다르게 나타나고 있음을 알 수 있으며, 하이브리드 인터페이스 조건에서의 최대 응력이 크게 나타나고 있다.

Fig. 6은 KJMA지진 조건에서의 교각 기초 좌[L]·우측[R]의 수직 변위 응답을 나타내었다. 그래프에 나타난 바와 같이 교각기초의 좌우 끝단 지점의 수직 응답은 하이브리드 인터페이스 조건에서 그 크기가 감소되는 것으로 나타났다. 즉, 그림에 표시한 바와 같이 부양 현상 및 가라앉음 현상이 나타나는 교각기초의 수직 응답의 크기가 전체적으로 작아지는 경향을 보였다. 또한 그림의 'L' 및 'R'측의 세 번째 주기인 $T = 10\text{sec}$ 구간의 경우 상대적으로 크

Fig. 6 Influence of interface condition on vertical displacement-time history at bottom of the bridge due to KJMA

기가 작은 불규칙한 수직 응답이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 유체 접촉경계층의 hydro-plane 현상에 의하여 수평변위 응답 시간이 길어지고 동시에 한계 인장저항력에 의하여 수직 응답이 구속되면서 나타나는 현상으로 분석되었다.

Fig. 7은 각 지반 조건 및 지진 하중에 대한 응력 변화 특성 곡선을 나타내었다. Fig. 7(a)에 나타난 바와 같이 단주기적 특성의 지진이 연약지반 및 보통지반에 발생하였을 경우 유체 접촉경계층이 형성되면 구조물에 발생하는 주응력이 감소하는 경향을 보인다.

Fig. 7(b), (c)는 넓은 대역의 주기 성분을 포함한 강진(KJRT) 그리고 보통 강도의 장주기성 지진하중(KPI)이 입사되는 경우의 응답을 나타내었다. 그림에서 나타난 바와 같이 KJRT조건의 연약지반의 응답을 제외한 연약 또는 보통 지반 조건에서 유체 접촉경계층의 영향이 발생하면 구조물의 주응력이 증가하는 것으로 나타났다.

이를 통하여 연약 지반 및 보통 지반의 조건에서 강우 및 지하수위가 상승하고, 이때 넓은 대역의 주기 성분을 포함한 강진이 발생하면 구조물 전체에 이례적인 피해를 끼칠 수 있을 것으로 예측되었다.

V. 요약 및 결론

구조물의 동적거동을 고려한 현재의 탄성 및 비탄성 설계에서는 설계 하중에 의한 구조물의 최대응답을 기준으로 필요한 강도를 결정하기 때문에 시간이

(a) Maximum principal stress of column due to KJMA

(b) Maximum principal stress of column due to KJRT

(c) Maximum principal stress of column due to KPI

Fig. 7 Effect of interface condition on maximum principal stress at various point of the column along the height

력 거동 중의 동적응답은 고려하지 못하고 있다. 또한 시간이력 중의 동적응답을 산정하더라도 일반적인 인터페이스 요소를 사용한 동적 응답 해석에서는

강우 조건 및 지하수위 상승 등 위험 조건에서의 다양하고 급격한 동적응답 변화를 고려할 수 없는 한계가 있다. 이는 위험 조건에서 구조물의 설계 응답

과 실제 응답이 달라져서 예측하지 못하는 피해를 입게 되는 주요 원인이 될 수 있다.

이에 이 연구에서는 하이브리드 인터페이스 요소를 제안하고 이를 교량 구조물에 대한 구조물-유체-지반 동적 상호작용 유한요소해석에 적용하였다. 그 결과 강우 조건 등 구조물의 위험 조건을 설정하여 효과적으로 동적 상호작용 응답 변화 특성을 파악할 수 있음을 보였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 구조물-유체-지반 접촉경계의 한계 인장저항력 및 hydro-plane 현상을 표현할 수 있도록 하이브리드 인터페이스 요소를 정식화 하였으며, 인접 요소와의 적합 조건을 만족 시키면서 접촉경계의 거동을 현실적으로 나타낼 수 있었다.
2. 하이브리드 인터페이스 요소를 적용한 교량의 구조물-유체-지반 동적 상호작용 해석 결과 넓은 대역의 주기성분을 포함한 강진이 발생할 경우 유체경계층은 지표층이 보통지반일 경우 구조물의 동적 응답에 큰 영향을 끼치는 것으로 나타났다.
3. 구조물-유체-지반 동적 상호작용 거동에서 장주기적 특성의 지진하중이 발생할 경우 유체층의 영향으로 인하여 연약 및 보통지반에서 구조물에 발생하는 응력이 커지는 것으로 나타났다. 이와 같은 현상은 구조물 상부 및 하부에 이례적인 피해 발생을 야기할 수 있으며 설계 단계에서 이러한 사항이 고려되어야 할 것으로 판단된다.

이 논문은 한국학술진흥재단에서 지원한 해외 공동연구과제 수행결과입니다.

References

1. Brumund, W. F. & G. A. Leonards, 1973, Experimental study of static and dynamic friction between sand and typical construction materials, Journal of Testing and Evaluation, 1(2), pp.162-165.
2. Clough, G. W. & J. M. Duncan, 1971, Finite Element analyses of retaining wall behavior, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division-ASCE, 97(12), pp.1657-1673.
3. Desai, C. S., Drumm, E. C., & M. M. Zaman, 1985, Cyclic testing and modeling of interfaces, Journal of Geotechnical Engineering-ASCE, 111(6), pp.783-815.
4. Desai, C. S. & Y. Ma, 1992, Modeling of joints and interfaces using the disturbed-state concept, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 16(9), pp.623-653.
5. Lee, J. Y., 2006, VisualFEA-Finite element analysis software-User's manual(var. 2.26), Intuition Software.
6. Ghaboussi, J., Wilson, E. L., & J. Isenberg, 1973, Finite element for rock joints and interfaces, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division-ASCE, 99(10), pp.833-847.
7. Goodman, R. E., Taylor, R. L., & T. L. Brekke, 1968, A model for the mechanics of jointed rock, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division-ASCE, 94(3), pp.637-659.
8. Herrmann, L. R., 1978, Finite element analysis of contact problems, Journal of the Engineering Mechanics Division-ASCE, 104(5), pp.1043-1057.
9. Heuze, F. E. & T. G. Barbour, 1982, New models for rock joints and interfaces, Journal of the Geotechnical Engineering Division-ASCE, 108(5), pp.757-776.
10. JSCE, 2002, Specification for Highway Bridge · Part V : Seismic Design, Japan.
11. Kramer, S. L., 1996, Geotechnical earthquake engineering, Prentice-Hall, NJ.
12. Newmark, N. M., 1959, A method of computation for structural dynamics, Journal of the Engineering Mechanics Division, 85(3),

- pp.67-94.
13. Parmelee, R. A., 1967, Building-foundation interaction effects, *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, 93(2), pp.131-152.
14. Potyondy, J. G., 1961, Skin friction between various soils and construction material, *Geotechnique*, 11(4), pp.331-353.
15. Pradhan, S. K. & C. S. Desai, 2006, DSC model for soil and interface including liquefaction and prediction of centrifuge test, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(2), pp.214-222.
16. Ryu, H. R., 2007, Finite element modelling for structure-fluid-soil interaction analysis, Ph.D. Thesis, Chonbuk National University, Korea.
17. Sharma, K. G. & C. S. Desai, 1992, Analysis and implementation of thin-layer element for interfaces and joints, *Journal of Engineering Mechanics-ASCE*, 118(12), pp.2442-2462.
18. Shakib, H. & A. Fuladgar, 2004, Dynamic soil-structure interaction effects on the seismic response of asymmetric buildings, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(5), pp.379-388.
19. Toki, K. & F. Miura, 1983, Non-linear seismic response analysis of soil-structure interaction systems, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 11(1), pp.77-89.
20. Uesugi, M. & H. Kishida, 1986, Influential factors of friction between steel and dry sands, *Soils and Foundations*, 26(2), pp.33-46.
21. Viladkar, M. N., Godbole, P. N., & J. Noorzadei, 1994, Modelling of interface for soil-structure interaction studies, *Computers and Structures*, 52(4), pp.765-779.
22. Wegner, J. L., Yao, M. M., & X. Zhang, 2005, Dynamic wave-soil-structure interaction analysis in the time domain, *Computers and Structures*, 83(27), pp.2206-2214.
23. You, H. Y., Lee, J. Y. & Y. T. Park, 2006, Site response analysis in time domain using finite element, *Journal of the Korea Society of Agricultural Engineers*, 48(6), pp.45-56.
24. Zaman, M. M., Desai, C. S., & E. C. Drumm, 1984, Interface model for dynamic soil-structure interaction, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 110(9), pp.1257-1273.