

실대형 교각 실험을 통한 교각 세굴안정성 평가 실험 기법 정립

Establishment of Testing Method for Abutment Scour Stability by Real-scale Model Test

이 명 재 ¹	Lee, Myungjae	유 민 택 ²	Yoo, Mintaek
김 기 현 ³	Kim, Kihyun	이 일 화 ⁴	Lee, Il-Wha

Abstract

In this study, a prototype abutment was constructed to establish a safety assessment technique of pier and a series of non-destructive tests using impact load. The surcharge load was loaded from 0 tonf to 2.5 tonf on the prototype abutment, and maximum surcharge load was up to 25 tonf. To analyze the behavior of the piers according to the direction of impact, a total of three types of analysis were performed: the direction of the pier, the direction perpendicular to the pier, and the outer direction of the pier. The height of the impact was also tested at each top and bottom. The measuring instrument used an accelerometer to measure the acceleration response when impacted. Based on the series of experimental results, specific values were calculated according to the direction of an impact and the surcharge load using the Fast Fourier Transform (FFT). In addition, the phase difference was used to analyze the pier from the primary 1st mode to the 4th mode.

요 지

본 연구는 교각 안전성 평가 기법을 확립하기 위해 실대형 교각을 구축하여 충격하중을 이용해 일련의 비파괴 실험을 수행하였다. 실대형 교각에 상재 하중은 0 tonf에서 2.5 tonf씩 적재하여, 최대 25 tonf 까지 적재하였다. 타격 방향에 따른 교각의 거동을 분석하기위해 교축 방향과 교축직각 방향 그리고 교각의 외측방향으로 타격하였고, 타격 높이도 교각의 상단과 하단으로 실험을 수행하였다. 계측기는 가속도계를 사용하여 타격했을 시의 가속도 응답을 측정하였다. 일련의 실험결과를 바탕으로, 고속 푸리에 변환(FFT)를 이용해 타격 방향 및 상재 하중에 따른 고유진동수를 산정했다. 또한 위상차를 이용해 교각의 1차 모드에서 4차 모드까지 분석이 가능했으며, 세굴에 대한 영향을 수치해석을 통해 분석했다. 그 결과, 2차 모드와 3차 모드를 통해 합리적인 교각의 안정성 평가가 가능한 것으로 판단된다.

Keywords : Prototype abutment, Non-destructive test, Surcharge load, Mode number, Scour

1 정희원, 철도기술연구원 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Railroad Structure Research Team, Korea Railroad Research Institute)

2 정희원, 철도기술연구원 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Railroad Structure Research Team, Korea Railroad Research Institute)

3 비희원, 철도기술연구원 선임연구원 (Senior Researcher, Railroad Structure Research Team, Korea Railroad Research Institute)

4 정희원, 철도기술연구원 책임연구원 (Member, Principal Researcher, Advanced Infrastructure Research Team, Korea Railroad Research Institute, Tel: +82-31-460-5326, iwlee@krii.re.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2020년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

철도교량과 같이 구조적 특수성과 역할의 사회적, 경제적 중요성으로 인해 유지관리의 필요성이 높은 구조물의 경우, 합리적인 점검, 계측, 평가, 의사결정, 보수 및 보강의 절차에 따라 목표 성능 이상을 유지 시킬 수 있는 유지관리 기술이 요구된다. 그러나 현실적으로 점검 작업은 대부분 인력에 의하여 수행되고 있다. 또한, 유지관리에 있어 충분한 검토를 위해서는 과거 보수이력을 포함한 중요한 설계도, 시공기록 등의 많은 자료를 필요로 하지만 미비한 경우가 많다. 철도교량의 붕괴는 갑작스럽게 발생하기보다는 사전에 경고를 준다. 이러한 이상 징후는 현행 인력위주의 비정기적 또는 상당히 긴 시간 간격의 점검차량을 이용한 정기점검으로는 파악에 한계가 있다. 국내외적으로 교량 교각의 붕괴를 사전에 감지하는 기술 개발에 대한 연구는 활발하게 진행되고 있다. 1987년 4월 미국 뉴욕주 Schoharie creek에서 교각 확대기초의 저면에 세굴이 진행되어 교량이 유실되는 사고가 발생하였다. 이 사고는 막대한 경제적인 피해뿐만 아니라 10여명의 인명피해까지 발생하였으며, 이후 세굴에만 1,100만 달러의 연구비가 지원되었다. 이후 계속해서 연방도로연구기금(NCHRP ; National Cooperation Highway Research Program)의 주도하에 국가적인 차원에서 연구를 지원하고 있다. 또한 미연방도로국은 1987년 이후의 적극적 연구와 평가 프로그램의 추진결과 교량세굴, 하천안정, 그리고 대책에 대하여 각각 HEC(Hydraulic Engineering Circular)-18(2012), HEC-20(2001), HEC-23(1997)의 기술 매뉴얼을 작성하여 교량세굴의 해석과 설계 등에 이용하고 있다. 그러나 대부분의 연구가 사질토에 세워진 교량에 집중되었고, 이로 인해 사질토 이외의 지반 세굴특성은 고려하지 못하는 실정이다. 세굴해석에는 HEC-18에서 제안하는 공식이 범용되고 있는데, 이는 모래를 대상으로 한 실험

에서 구한 것으로 모래와 다른 지반조건에서의 적용은 한계가 있다. 최근 점성토 지반에서는 시간에 따른 세굴률과 시간효과를 고려한 방법(Briaud et al., 2001)이 그리고 암반지반에서는 침식지수를 이용한 새로운 접근법(Annandale et al., 1998) 등이 시도되고 있다. 네덜란드는 1953년 이후 Dutch Delta Works라는 국가사업 내에 세굴 양상에 대한 체계적이고 종합적인 연구를 진행하였는데, 이 연구 사업은 네덜란드의 교통, 공공사업 및 수자원관리국(Ministry of Transport, Public Works and Water Management)과 Delft Hydraulics에서 담당하였다. Delft Hydraulics에서는 흐름의 수리학적 특성과 세굴 재료 등에 관한 여러 가지 변수들을 고려한 수많은 실내 실험을 수행하여 시간과 위치의 함수로 된 반경험적 세굴 공식을 도출하였다. 세굴 현상에 대한 종합 기술 매뉴얼을 마련하였는데, 이는 Breusers-equilibrium방법이라 불리며 최대 세굴심에 대한 흐름의 평균 유속과 상대 난류 강도, 시간의 지배적 특성에 기초한 것이다(Breusers, 1966). 일본에서는 유수력을 이용해 교각의 진동을 측정하고 고유진동수 변화를 분석하여 기초의 안정성을 평가하는 기법 개발 및 건전도 진단 지표를 연구하고 있다(Samizo, 2010). 또한, Keita와 Michiko(2016)는 모형실험과 현장 계측에 의한 검증으로부터 고유진동수와 상관관계를 갖는 건전도 진단 지표를 제안하였다. Shibata(2013)는 충격진동시험법을 이용해 여러 측정결과를 기초로 통계식을 제안하였다. 철도 유지관리 표준에 기초형식 및 기초지반 종류별 산정식이 명시되어있으며, Table 1과 같이 직접 기초형식의 단선교각의 고유진동수 산정식을 제안하였다(Japan's Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2007).

이처럼 교량의 붕괴사고는 대부분이 교각의 세굴, 침하, 균열 등에 의해 발생할 가능성이 크며, 교량 하부구조의 안정성은 교량의 안전문제와 밀접한 관계가 있다. 하지만 우리나라의 경우 안전진단 및 점검 시 교량의

Table 1. Natural frequency formula

	Coverage	Formula
Spread foundation	Railway bridge piers supported by spread foundation	$F=25.4 \times \frac{1}{W_h^{0.11} \times H_d^{0.47}} \text{ (Clay)}$ $F=49.0 \times \frac{1}{W_h^{0.24} \times H_d^{0.47}} \text{ (Sand)}$ $F=83.7 \times \frac{1}{W_h^{0.20} \times H_d^{0.71}} \text{ (Rock)}$

W_h : superstructure work reaction force (tf)
 H_d : Pier height (m)

상부 재료 및 구조적인 문제에 초점이 맞춰져 있으며, 하부구조에 대한 정량적인 평가법이 없는 실정이다. 이에 본 연구는 실험형 교각을 구축하여, 비파괴 실험을 통해 교각의 안정성을 평가할 수 있는 고유진동수 산출 기법을 연구하였다. 그리고 타격 조건 및 상재 하중에 따라 교각의 거동이 어떻게 발생하는지에 대한 모드 차수 분석을 수행하여, 교각의 안정성 평가를 위한 실험방법을 확립하고자 했다.

2. 교각의 고유 모드 차수 분석

2.1 실험형 교각 제원

실험형 교각은 노후화된 기초들을 평가하기 위해 직접 기초형식을 사용하였다. 교각 기초 슬래브의 크기는 길이, 폭 그리고 높이가 5.15m × 2.42m × 0.50m이며, 교각은 1.5m씩 콘크리트 타설과 양생을 3번 반복하여 높이 4.5m로 제작하였다. 길이와 폭은 각각 4.15m와 1.42m로 제작했다. 실험형 교각의 제원은 Fig. 1과 같으며, Fig. 2는 제작된 실험형 교각 실험체 전경이다.

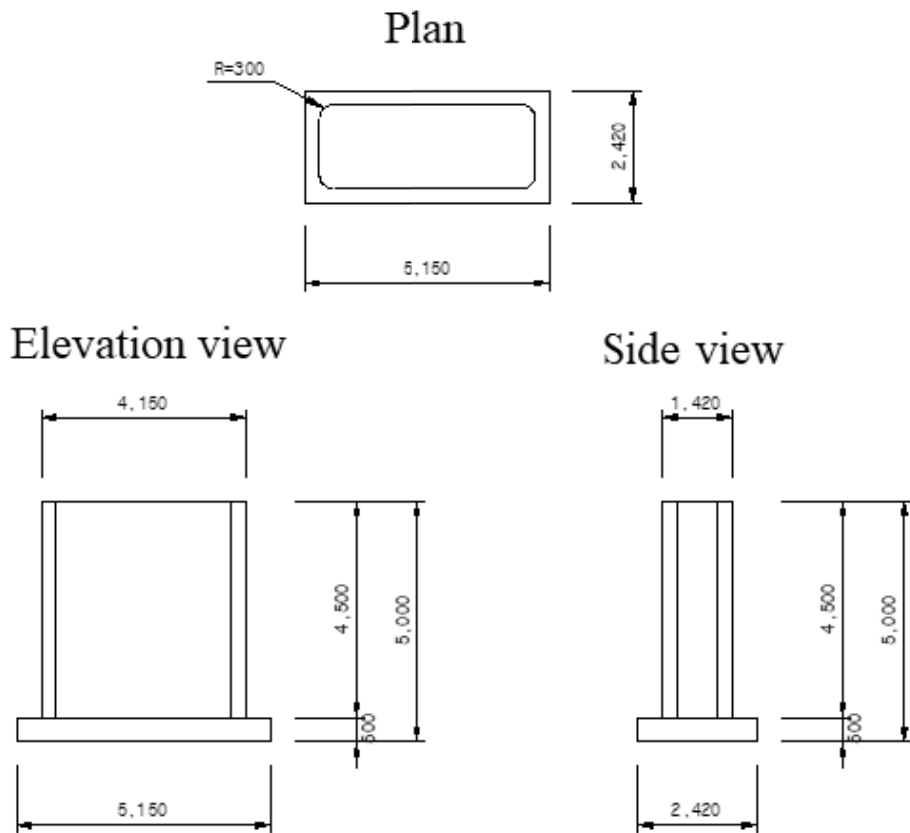


Fig. 1. Design of prototype abutment



Fig. 2. Prototype abutment

2.2 교각 모드 차수 분석

실대형 교각실험 이전에 교각의 거동분석을 위해 유한요소프로그램인 Diana(2017)를 이용하여 교각의 고유치(Eigenvalue)를 도출했다. 해석에 사용된 교각의 크기는 실대형 교각 크기와 동일한 조건으로 수행했다. 그 결과 고유치에 따라 1차~4차 모드에 해당하는 교각의 거동을 분석 할 수 있었으며, Fig. 3과 같이 도출됐다. 1차 모드 경우 교각은 교축 방향으로 변위가 생기며, 2

차 모드는 교축직각 방향으로 변위가 발생한다. 3차 모드는 교각의 비틀림 거동이 발생하며, 4차 모드는 교각의 중단 부분에서 가장 큰 변형이 발생했다. 모드 차수 분석에 의하면 교축직각 방향 타격에 의해서 2차 모드에 해당하는 고유진동수가 나타나는 것으로 분석됐으며, 교축 방향 타격에 의해서는 1차, 3차 그리고 4차 모드에 해당하는 고유진동수가 나타나는 것으로 분석됐다. 1차, 2차, 3차 그리고 4차에 대한 고유진동수 값은 Table 2에 정리하였다. 교각의 고유치 해석을 통해 실대

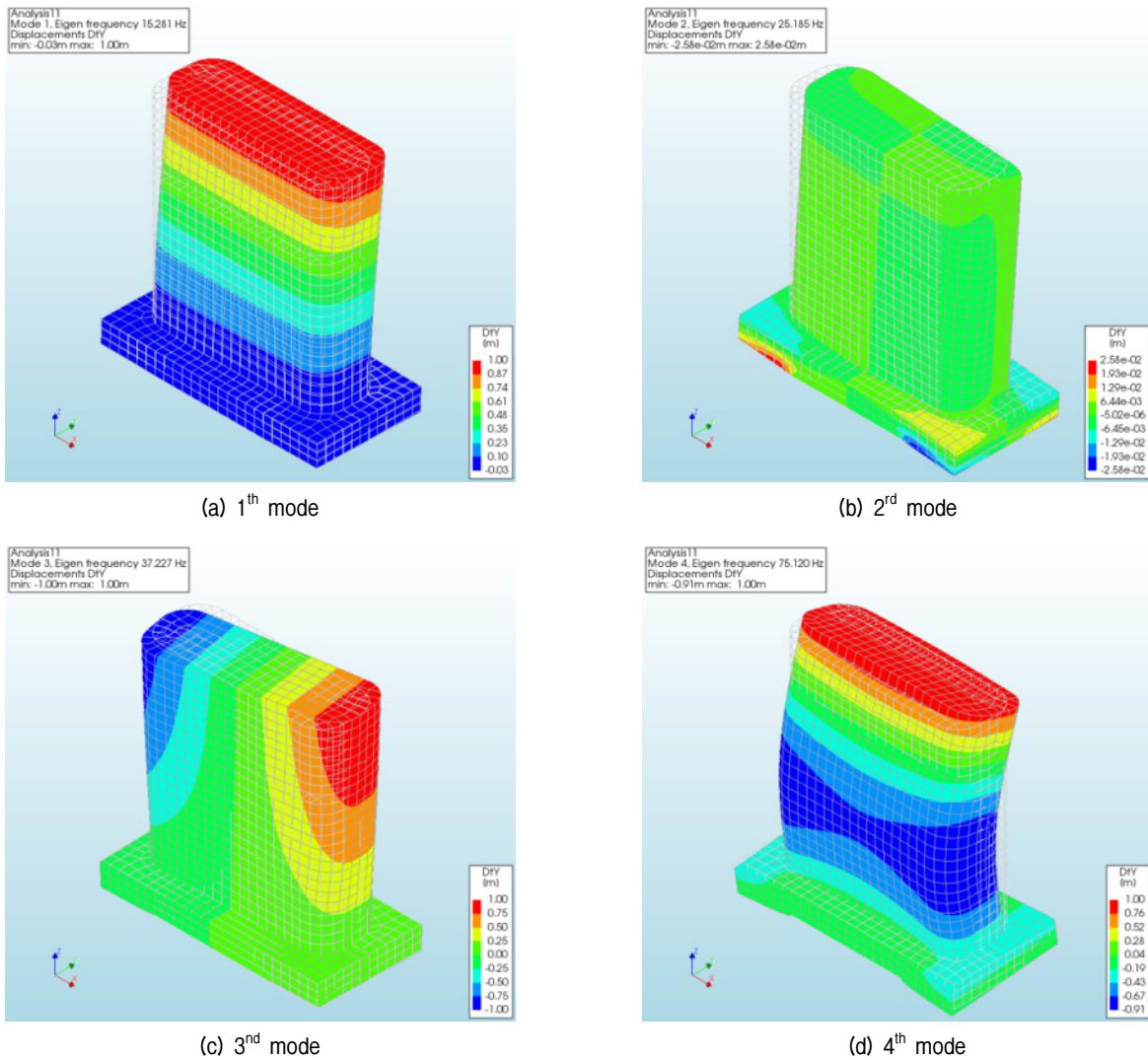


Fig. 3. Mode number of abutment

Table 2. Eigenvalue of abutment and election of impact direction

Mode number	Natural frequency (Hz)	Election of impact direction
1 th mode	15.28	Longitudinal
2 nd mode	25.19	Perpendicular
3 rd mode	37.23	Longitudinal (Side)
4 th mode	75.12	Longitudinal



Fig. 4. Instrument equipment and impact hammer



Fig. 5. Experiment process of prototype abutment

형 교각의 모드 차수를 도출하기 위한 타격 방향을 선정할 수 있었다.

3. 실험조건 및 결과

3.1 실험 방법

비파괴 실험을 통한 교각의 안정성 평가를 위해 총 8개의 가속도계와 충격하중을 적용하기 위해 임팩트 해머(Impact hammer)를 사용하였다. Fig. 4과 Fig. 5는 실험에 사용된 장비 및 실험과정을 보여준다. 실험에 적용한 상재 하중은 0 tonf 부터 2.5 tonf 씩 점차적으로 증가시켜 25 tonf 까지 총 11가지 상재 하중을 적용했다.

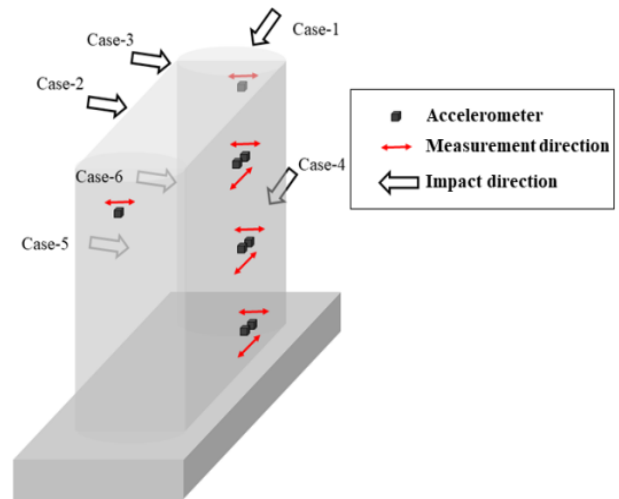


Fig. 6. Schematic view of instrument position and impact direction

Table 3. Experiment case of prototype abutment

Classification	Impact direction	Impact point	Surcharge load
Case-1	Perpendicular	Top	0 ~ 25 tonf (Increased by 2.5 tonf)
Case-2	Longitudinal	Top	
Case-3	Longitudinal (Side)	Top	
Case-4	Perpendicular	Middle	
Case-5	Longitudinal	Middle	
Case-6	Longitudinal (Side)	Middle	

Fig. 6은 타격 방향에 따른 실험케이스를 보여준다. 가속도계 위치는 교각의 상단에서 50cm 떨어진 지점과 하단에서 50cm 떨어진 지점, 그리고 교각의 중심지점 3 개소로 결정하였다. 그리고 교축 방향과 교축직각 방향을 측정할 수 있게 2 개씩 총 6개소에 부착했다. 교각 외측면에는 교축직각 방향으로 가속도를 측정할 수 있게 총 2개의 가속도계를 부착했다. 타격의 방향은 총 6 곳이며 상재 하중을 고려하여 총 66번의 실험을 수행하였다. Table 3에 실험 케이스에 대해 정리하였다.

3.2 실험 데이터 분석 방법

실험을 통해 측정된 가속도 값은 그림 Fig. 7과 같이 나타나며, 상재하중이 0 tonf 일 때 교축 방향 타격의 측정결과이다. 충격진동시험의 경우, 여러 차례의 기록 파형을 반복해 얻어진 반복 파형의 스펙트럼을 해석함으로써 고유진동수와 진동 모드를 결정할 수 있다. 스펙트럼 해석은 주파수 별로 신호를 나누는 것이 가능한 고속 푸리에 변환(FFT) 기법을 이용하는 것이 좋다. 고속 푸리에 변환법을 이용해 주파수 도메인에서 Fig. 8과

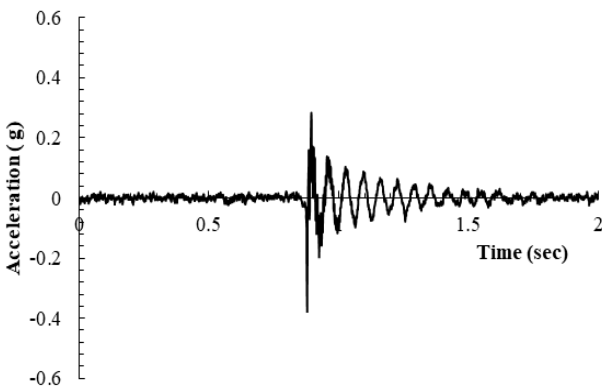


Fig. 7. Time - acceleration history

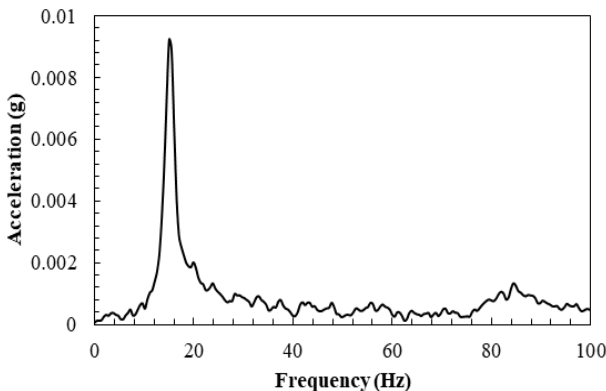


Fig. 8. Calculation of natural frequency

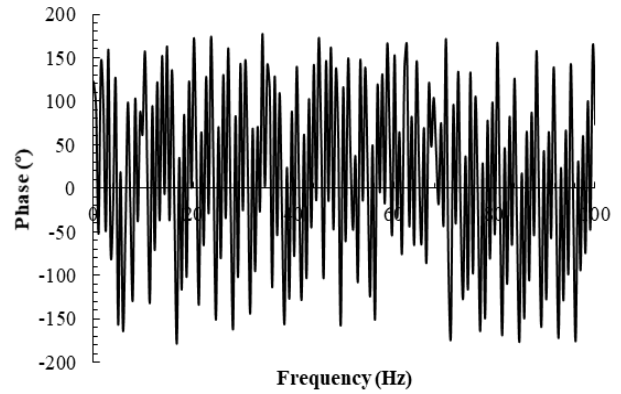


Fig. 9. Calculation of phase

같이 교각의 고유진동수를 도출할 수 있다. 또한 그림 Fig. 9와 같이 계측된 곳의 위상을 나타낼 수 있으며, 이를 통해 계측기 간의 위상차를 구하여 교각의 전체적인 거동을 분석할 수 있다.

3.3 실대형 교각 실험을 통한 모드 차수 도출

일련의 실험을 통하여 교각의 모드 차수를 분석하였고, 모드별 교각의 고유진동수를 도출하였다. Fig. 10은 교각의 상단 부분을 교축 방향으로 타격한 Case-2에 해당하는 교각의 고유진동수 값이다. 그 결과 고유진동수 값은 15.14Hz 수준에서 발생하였다. 또한 교각의 거동을 분석하기위해 높이마다 측정한 계측 값을 이용해 위상을 구했다. Fig. 11은 위치별 위상을 이용해 위상차를 나타낸 결과이다. 그 결과 고유진동수가 발생하는 지점의 위상차는 모두 0°로 수렴하는 경향을 보였다. 이는 높이마다 부착된 계측기들이 모두 같은 방향으로 변형되는 것으로 판단되며, 즉 교각이 같은 방향으로 거동하는 것을 뜻한다. 교각 고유치(Eigenvalue) 해석의 1차 모드와 유사한 경향이 나타나는 것으로 분석됐다.

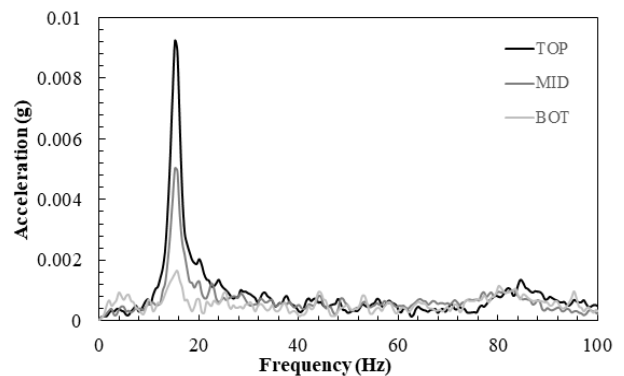


Fig. 10. 1th mode of prototype abutment (Surcharge load 0 tonf)

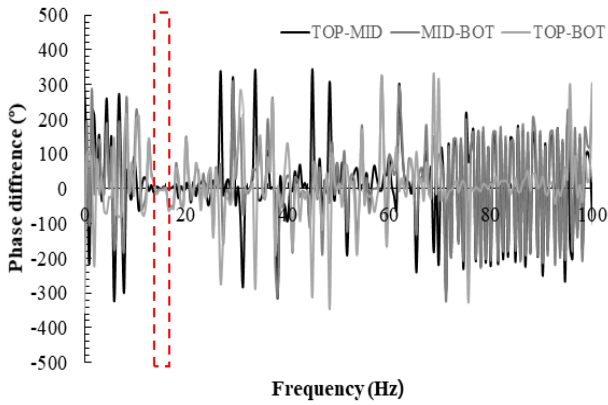


Fig. 11. Phase difference of prototype abutment (1th mode)

Fig. 12는 교축직각 방향으로 교각의 상단부분을 타격하여 높이별 고유진동수를 도출한 case-1의 결과이다. 교각의 고유진동수는 교축 방향보다 약 7Hz가 높은 22.4Hz 수준에서 발생하였다. 이는 교각의 교축직각 방향이 교축 방향보다 강성이 크기 때문에 고유진동수의 차이가 나타나는 것으로 분석되며, 강성의 차이가 고유진동수에 영향을 미치는 것으로 확인할 수 있었다. 교축 직각 방향에서 교각의 거동을 확인하기 위해 Fig. 13과

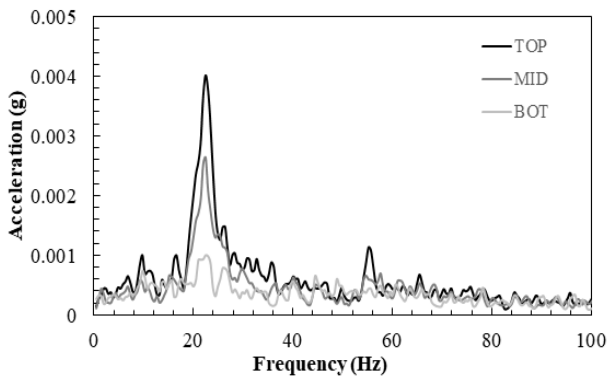


Fig. 12. 2nd mode of prototype abutment (Surcharge load 0 tonf)

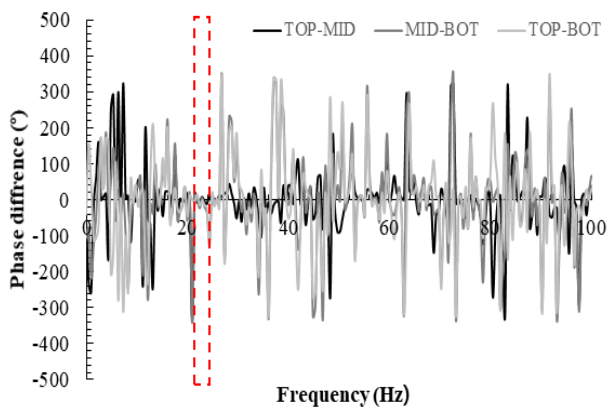


Fig. 13. Phase difference of prototype abutment (2nd mode)

같이 위상차를 분석하였다. 이 때 앞선 1차 모드의 거동과 같이 고유진동수가 발생했을 때 위상차는 0°로 수렴하는 것을 분석되며, 이는 교각의 고유치(Eigenvalue) 해석에서 분석된 2차 모드의 거동과 유사한 것으로 판단된다.

Fig. 14는 교각 상단 외측 부분을 타격하여 가속도를 측정된 case-3에 대한 고유진동수 결과이다. 그 결과 명확한 고유진동수가 2 곳의 Hz에서 발생하였다. 2 곳의 고유진동수는 각각 15.14Hz와 54.19Hz이다. Fig. 15의 위상차를 보면 15.14Hz 수준에서는 위상차는 0°로 수렴하는 것으로 분석되며, 이는 앞선 1차 모드와 동일한 거동과 유사한 고유진동수로 1차 모드가 발생한 것으로 판단된다. 하지만 54.19Hz 수준에서의 위상차는 180°로 분석되었다. 이 결과, 교각의 외측부분은 서로 반대 방향으로 거동하는 것으로 분석되며, 비틀림 거동을 하는 것으로 판단된다. 이는 3차 모드와 유사한 거동을 나타내며, 교축 방향으로 교각의 외측방향을 타격 시 1차 모드가 발생한 후 교각의 비틀림 거동의 3차 모드가 발생하는 것으로 분석된다.

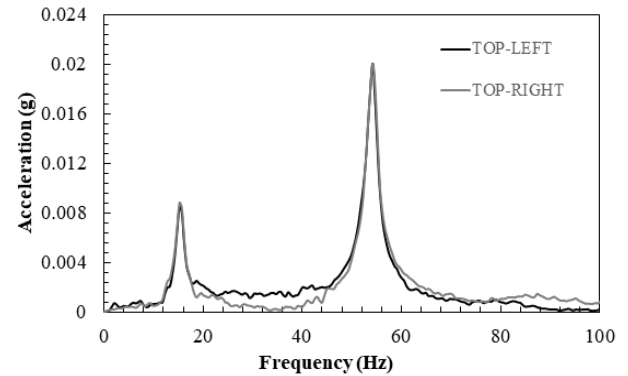


Fig. 14. 3rd mode of prototype abutment (Surcharge load 0 tonf)

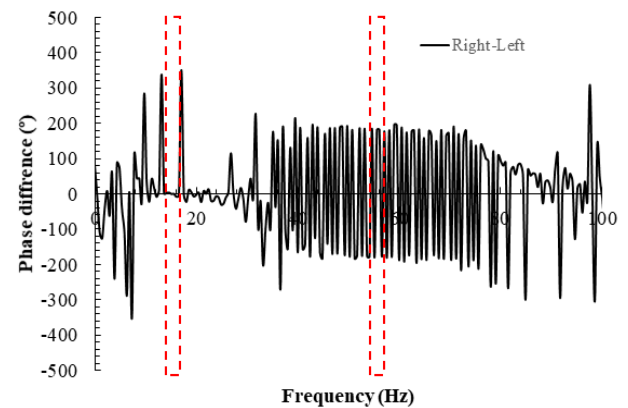


Fig. 15. Phase difference of prototype abutment (3rd mode)

Fig. 16은 case-2의 결과에서 60~100Hz의 영역대를 확대 결과이다. 60~100Hz에서는 이전 결과와는 명확한 고유진동수는 아니지만 Fig. 17의 위상차를 살펴보면 교각의 상단과 하단에서의 위상차는 0°로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 중단과 중단 그리고 중단과 하단의 위상차는 180°로 반대의 거동이 분석된다. 이는 고유치(Eigenvalue) 해석에서의 4차 모드와 유사한 거동을 보이는 것으로 판단되며, 1차 모드 후에 타격 진동이 감쇄되면서 4차 모드가 나타나는 것으로 분석된다.

상재 하중이 0 tonf 일 때 일련의 실험 교각 실험으로부터 가속도 값을 이용해 실험 교각의 고유진동수를 도출하였으며, 위상차를 이용해 1차~4차 모드의 거동을 판단하였다. 실험 교각 실험의 고유진동수는 Table 4과 같이 수치해석을 통한 고유치(Eigenvalue) 분

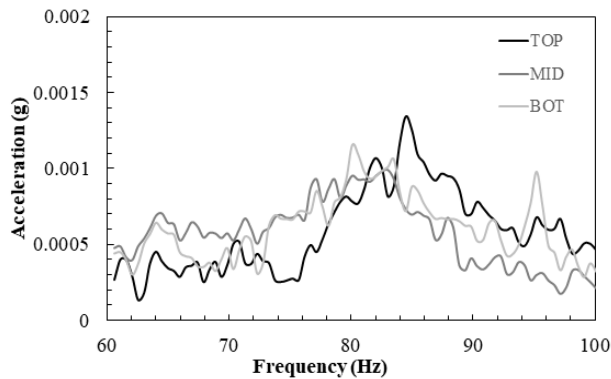


Fig. 16. 4th mode of prototype abutment (Surcharge load 0 tonf)

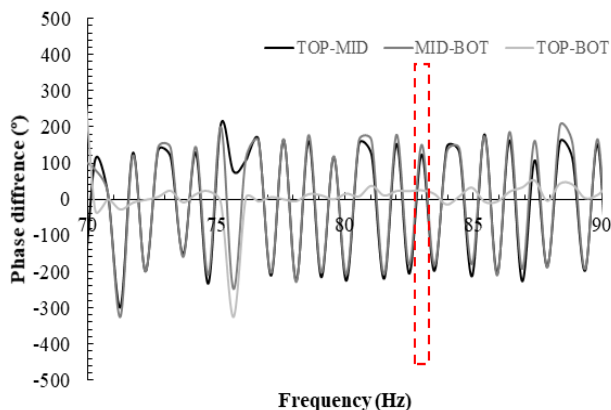


Fig. 17. Phase difference of prototype abutment (4th mode)

석결과와 비교하여 정리하였다. 그 결과 실험 교각 실험과 고유치(Eigenvalue) 분석의 고유진동수는 1차 모드, 2차 모드, 3차 모드 그리고 4차 모드에서 오차율이 5% 미만인 유사한 영역에서 나타나는 것으로 분석됐다.

4. 매개변수연구

4.1 수치해석을 이용한 세굴의 영향

실험 교각의 실험 제한상, 세굴에 대한 교각의 고유진동수 영향은 수치해석으로 수행하여 분석했다. 상재하중 0 tonf인 실험 교각을 사용했으며, 해석 조건은 교각기초 아래의 지반을 한 쪽에서 10%씩 제거하여 최대 50%까지 세굴을 모사하였다. Fig. 18은 해석조건을 표현한 개념도로 총 5 case를 수행하여 세굴에 대한 영향을 분석하였다.

Fig. 19는 수치해석 결과를 통해 세굴 진행도에 따른 고유진동수 변화를 나타냈다. 그 결과, 세굴이 진행될수록 1~4차 모드의 모든 고유진동수는 감소하는 것으로 분석되었다. Table 5와 같이 상재하중의 증가에 따른 고유진동수 최대감소비율은 1차 모드가 15.39Hz에서 10.24Hz로 33% 감소하였다. 2차 모드는 57%, 3차 모드

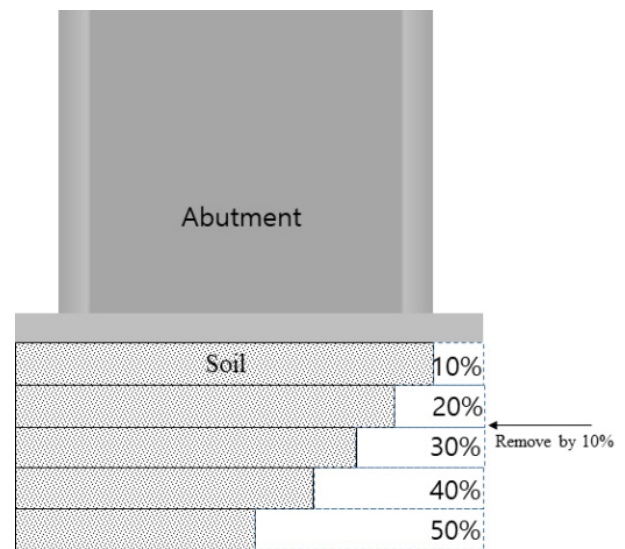


Fig. 18. Numerical analysis condition of scour progression

Table 4. Comparison of natural frequency by mode number

Classification	1 th mode	2 nd mode	3 rd mode	4 th mode
Natural frequency by numerical analysis (Hz)	15.39	23.18	52.04	88.30
Experiment by numerical analysis (Hz)	15.14	22.4	54.19	83.94
Percentage gap (%)	1.62	3.37	-4.13	4.94

Table 5. Natural frequency by mode number according to scour progression

Scour progression (%)	1 th mode	2 nd mode	3 rd mode	4 th mode
0	15.39 Hz	23.18 Hz	52.04 Hz	88.30 Hz
10	15.14 Hz	22.40 Hz	54.19 Hz	83.94 Hz
20	13.95 Hz	18.53 Hz	41.56 Hz	80.65 Hz
30	12.92 Hz	15.80 Hz	35.23 Hz	76.01 Hz
40	11.69 Hz	12.90 Hz	28.98 Hz	71.65 Hz
50	10.24 Hz	9.95 Hz	23.28 Hz	67.52 Hz

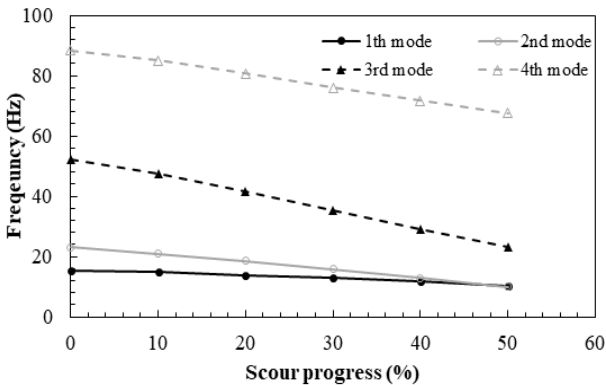


Fig. 19. Variation of natural frequency according to scour progression

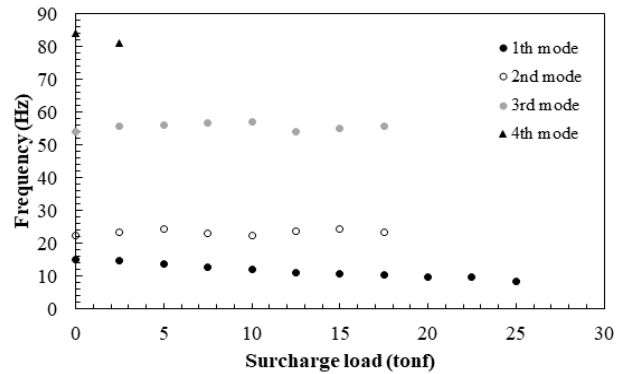


Fig. 20. Variation of natural frequency according to surcharge load (1th ~ 4th mode)

는 55% 그리고 4차 모드는 23% 감소하는 것으로 분석됐다. Fig. 19와 같이 2, 3 그리고 4차 모드의 세굴에 대한 고유진동수 감소기울기는 유사한 것으로 분석됐다. 그러나 4차 모드의 고유진동수는 현장에서 측정하기 어려운 고영역대의 주파수임으로 지반 세굴에 대한 영향을 판단하기 위해선 2차 모드와 3차 모드의 시험방법이 합리적인 것으로 판단된다. 그 중 3차 모드는 교각의 비틀림 거동을 나타내기 때문에 세굴에 대한 평가로 적합한 것으로 판단된다.

4.2 실대형 교각 실험을 통한 상재하중의 영향

Fig. 20은 상재 하중에 따른 실대형 교각의 모드 차수별 고유진동수를 도출한 결과이다. 상재 하중은 2.5 tonf 씩 순차적으로 증가시켜 0 tonf부터 25 tonf 까지 적용시켰다. 그 결과, 1차 모드의 경우 상재 하중이 증가함에 따라 고유진동수는 0 tonf에서 15.14Hz, 25 tonf에서 8.3Hz로 점차적으로 감소하는 경향을 보였다. 하지만 2차, 3차 모드의 경우에는 상재 하중변화와 무관하게 유사한 Hz 영역에서 고유진동수가 나타나는 것으로 분석되었다. 2차 모드와 3차 모드의 경우 상재 하중이 20 tonf 이상에서는 명확한 신호를 얻을 수 없어 고유진동수를

산정할 수 없었다. 4차 모드의 경우 상재 하중 5 tonf 이상부터 명확한 가속도 신호를 얻을 수 없었다. 이 결과를 토대로 교각의 안정성 평가를 위해선 상재 하중에 영향을 받는 1차 모드 보다는 상재 하중에 영향을 받지 않는 2차 모드를 사용하여 안정성을 평가하는 것이 더 합리적인 것으로 판단된다. 2차 모드의 경우 교각과 지반의 경계면 상태에 따라 큰 영향이 있을 것으로 판단되며, 또한 앞선 설명과 같이 3차 모드의 경우 교각 기초에서 지반의 세굴 정도를 판단할 수 있을 것으로 보인다.

5. 결 과

본 연구에서는 실대형 교각을 구축하여 실내실험을 수행하였으며, 세굴 영향에 대해 수치해석을 수행하였다. 충격하중을 받는 교각에 대해 가속도를 측정해 고유진동수 및 위상차를 산정하였고, 교각의 상태를 판단할 수 있는 안정성 평가 방법을 확립하였다. 또한 교각의 모드 차수를 분석하였다. 연구의 결과를 다음과 같이 정리하였다.

(1) 수치해석을 이용해 교각의 고유치(Eigenvalue)와 모

드 차수를 도출하였다. 이를 통해 실대형 교각 실험에서 1, 2, 3 그리고 4차 모드까지 도출 가능한 교각의 안정성 평가를 위한 실험 방법을 확립하였다.

- (2) 상재하중을 받는 교각에서 1~4차 모드까지 분석 가능했지만, 4차 모드의 경우 상재하중이 증가하면서 도출하기 어려운 것으로 분석되었다. 또한 1차 모드의 경우 상재하중이 증가함에 따라 고유진동수가 점차 작아지는 경향을 보이며, 상재하중에 대한 영향이 큰 것으로 분석됐다. 그러므로 교각의 안정성 평가에 있어 상재하중에 영향을 받는 1차 모드보다 2차 모드를 사용하는 것이 더욱 적합한 것으로 판단된다.
- (3) 수치해석을 통해 세굴에 대한 교각의 고유진동수 영향을 분석한 결과, 세굴 진행도가 커질수록 모든 모드 차수의 고유진동수가 감소하는 것으로 분석되었다. 이 중 2차 모드와 3차 모드에서의 영향이 가장 컸으며, 교각의 비틀림 거동을 보이는 3차 모드를 이용하면 교각기초지반에서의 세굴 진행도를 판단할 수 있을 것으로 사료된다. 그러나 세굴에 대해 제한적인 형상만으로 분석하였기 때문에 향후 연구에서 세굴의 여러 형상에 대해서도 연구할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원의 주요사업(PK1902A4) 연구비 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌 (References)

1. Arneson, L. A., Zevenbergen, L. W., Lagasse, P. F., and Clopper, P. E. (2012), "Hydraulic Engineering Circular No. 18: Evaluating Scour at Bridges", US Department of Transportation.
2. Annandale, G. W., Wittler, R. J., Ruff, J. F., and Lewis, T. M. (1998), Prototype validation of erodibility index for scour in fractured rock media. In *Water Resources Engineering'98*, pp.1096-1101. ASCE.
3. Breusers, H. N. C. (1966), "Conformity and time scale in two-dimensional local scour."
4. Briaud, J. L., Chen, H. C., Kwak, K. W., Han, S. W., and Ting, F. C. K. (2001), Multiflood and multilayer method for scour rate prediction at bridge piers, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.127, No.2, pp.114-125.
5. DIANA, F. (2017), "Finite element analysis user's manual-release 10.2", *TNO DIANA*.
6. Japan's Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2007), "Railway Institute of Technology, Railway Structures Maintenance Standard · Explanatory Notes (Structures) Basic Structures, Hose Structure", Tokyo: Maruzen (In Japanese).
7. Keita, A. and Michiko N. (2016), "State Monitoring Method on the Soundness of River Bridge Pier (Special Issue Disaster Technology), Railway Research Report = RTRI report: Railway Technical Journal Article, Vol.30, No.3, pp.29-34 (In Japanese).
8. Lagasse, P. F., Byars, M. S., Zevenbergen, L. W., and Clopper, P. E. (1997), "Hydraulic Engineering Circular 23: Bridge Scour and Stream Instability Countermeasures: Experience", Selection and Design Guidance. FHWA HI-97-030. FHWA, US Department of Transportation.
9. Lagasse, P. F., Schall, J. D., and Richardson, E. V. (2001), "Hydraulic engineering circular No. 20: Stream stability at highway structures", Rep. No. FHWANHI-01, 2.
10. Masahiko, S., Satoshi, W., Akira, F., Tomoyasu, S., and Katsuya, O. (2010), "Proposal on a Method for Identifying the Natural Frequency of a Railway Piers during River Rising", *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers F*, Vol.66, No.4, pp. 524-535 (In Japanese).
11. Shibata, M. (2013), "Diagnostic Technology of Railway Bridge Substructure Using Vibration", *Acoustical Society of Japanese*, Vol.69, No.3, pp.133-138.

Received : February 26th, 2019

Revised : May 29th, 2019

Accepted : June 1st, 2019