

고유진동수를 이용한 확대기초 교각의 세굴 건전성 평가

Integrity Assessment of Spread Footing Pier for Scour Using Natural Frequency

박 병 철* / 오 금 호** / 박 승 범***

Park, Byung Cheol / Oh, Keum Ho / Park, Seung Bum

Abstract

In Korea more than ninety bridges are collapsed every year by flood, which causes the scour of pier foundation. Researches on the quantitative assessment method to assess the integrity of bridge against scour have not been organized systematically in the bridge design practice and maintenance area.

In this study, dynamic characteristics assessment experiments are carried out as an emergency inspection method to assess the integrity of the pier foundation for scour after a flood.

According to the dynamic characteristics assessment experiment, which simulates foundation scour of the spread footing pier, foundation scour can be evaluated by the first mode natural frequency of the pier.

key words : scour, natural frequency, spread footing pier, integrity assessment

요 지

우리나라에서는 홍수로 매년 90여개 이상의 교량이 붕괴되고 있으며, 이러한 교량의 붕괴는 대부분 기초의 세굴에 기인하고 있다. 그동안 교량의 설계 및 유지관리 분야에서 세굴에 대한 교량의 건전성을 정량적으로 평가하기 위한 평가기법 개발에 관한 연구는 체계적으로 수행되지 못한 실정이다.

본 연구에서는 홍수 발생 후 교각의 세굴 건전성을 평가하기 위한 긴급점검기법으로써 세굴로 인한 교각의 고유진동수 변화를 이용하기 위한 동적특성 평가실험을 수행하였다.

세굴을 모의한 확대기초 교각 모형의 동적특성 평가 실험결과 교각의 1차 모드 고유진동수를 이용하여 기초의 세굴을 평가할 수 있을 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 세굴, 고유진동수, 확대기초 교각, 건전성 평가

1. 서 론

우리나라는 년 강우량의 2/3이 하절기에 집중되는 기상학적 특성을 가지고 있으며, 1년에 수차례 내습하는 태풍이 짧은 시간에 많은 비를 내려 유량과 유속의 크기가 평상시와 달리 매우 크다. 또한 하상경사가 급한 지형적 특성과 골재채취 및 댐의 건설로 모래와 자갈 등이 퇴적되지 못하여 하상이 저하되는 인위적 환경특성 변화도 세굴로 인한 교량 피해 발생 가능성을

높이고 있다.

정부 통계자료(건설부, 내무부, 행정자치부, 1964~2003)에 의하면 1964년부터 2003년까지 40년 동안 총 7,463개의 도로교가 홍수시 붕괴된 것으로 조사되었으며, 그 현황을 그림 1에 나타내었다. 매년 평균적으로 1980년대 이전에는 322개소, 1980년대에는 104개소, 1990년대 이후로는 92개소의 교량이 홍수시 붕괴되고 있으며, 교량피해가 1980년대까지는 급격히 감소하였으나, 이 후부터는 감소하지 않고 일정수준을 유지하거

* 정희원 · 국립방재연구소 토목연구관 (e-mail : bcpark@nema.go.kr)

** 정희원 · 국립방재연구소 토목연구관

*** 충남대학교 토목공학과 교수

나 증가하는 경향을 보여주고 있다.

이는 최근의 국지성 집중호우와 태풍의 설계빈도를 상회하는 강우강도 및 그동안의 교량유지관리 정책에 따라 교량의 홍수피해 위험성을 간과한 결과로서, 교량 계획 및 유지관리시 홍수에 대한 건전성 확보를 위한 적극적 대책마련이 시급함을 보여주고 있다.

세굴로 인한 교량피해가 지속적으로 발생하고, 유지관리 대상 교량이 지속적으로 증가하고 있는 현실에서 한정된 예산, 인원 및 시간으로 세굴에 대한 교량의 유지관리를 효율적으로 수행하기 위해서는 홍수 발생 후 개별 교각의 기초세굴을 신속하게 평가하기 위한 효율적인 평가기법의 개발이 절실히 요구된다. 또한 기초는 일반적으로 지중에 위치하고 있으므로, 상부구조와 같이 직접 육안조사에 의해 그 건전성을 판정하는 것이 곤란하다(加藤雅史 등, 1991; 建設省土木研究所, 1997; Nishimura, 1990).

본 연구에서는 세굴에 가장 취약한 확대기초 교각모형에 대하여 기초세굴을 모의한 동적특성 평가실험을 수행하여 고유진동수를 이용한 확대기초 교각의 세굴 건전성 평가 가능성을 검토하였다.

2. 세굴심 증가에 따른 교각의 고유진동수 평가실험

2.1. 실험방법

2.1.1 교각모형의 제작

세굴 건전성 평가실험에 사용한 교각모형의 기초형식은 세굴에 가장 취약한 확대기초형식으로 선정하였다. 교각모형은 일반적인 교각과 유사한 진동거동 특성을 갖도록 사전에 수치해석을 통해 1차 모드의 고유진

동수가 약 20Hz 이내가 되도록 구체 단면이 0.4m, 장변이 0.6m, 높이가 3.5m, 기초 폭이 1.4m×1.2m인 중실 구형교각으로 제작하였다.

교각모형은 설계기준강도가 21MPa이고, 굵은 골재 최대치수가 25mm인 레디믹스트 콘크리트를 사용하여 제작하였다. 강도시험용 시료는 KS F 2401(굳지 않은 콘크리트의 시료채취방법)에 따라 현장에서 채취하여 KS F 2403(콘크리트 강도시험용 공시체 제작방법)에 따라 현장 조건하에서 양생 후 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험방법)에 의해 공시체에 대한 평균압축강도시험을 실시하여 22MPa의 평균압축강도를 얻었다.

교각모형은 교각기초 하단에서 1.9m까지 1차 콘크리트 타설 후 다짐을 실시한 후 2차 타설하여 제작하였으며, 그림 2에 실험에 사용된 확대기초 교각모형의 제원을 나타내었다.

2.1.2 기초지반 제원 및 지반상수

교각이 설치되는 지반의 종류(강성)에 따른 세굴을 모의한 근입깊이별 확대기초 교각의 동적특성 평가를 위하여 기초지반을 PLT-1과 PLT-2의 두 종류로 모의하였다. PLT-1지반은 지반을 5m×5m×2.7m(가로×세로×깊이)로 굴착한 후 쇄석을 1.5m 깊이로 채우고 다짐을 실시한 후 교각모형을 설치한 후 동일한 쇄석을 사용하여 포설 후 다짐을 실시하였다. PLT-2지반은 지반을 5m×5m×1.2m(가로×세로×깊이)로 굴착하여 교각모형을 설치한 후 되메우기를 하고 다짐을 실시하였다. 교각모형은 PLT-1지반과 PLT-2지반 모두 교각높이 3.5m의 34.3%인 1.2m가 지반에 근입되도록 설치하였다. 그림 3에 모의된 지반 제원과 교각설치 방법을 나타내었다.

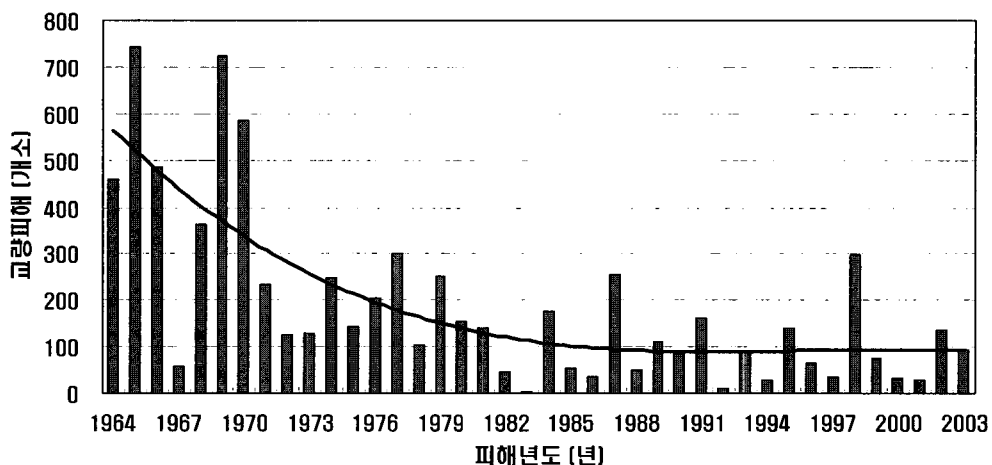
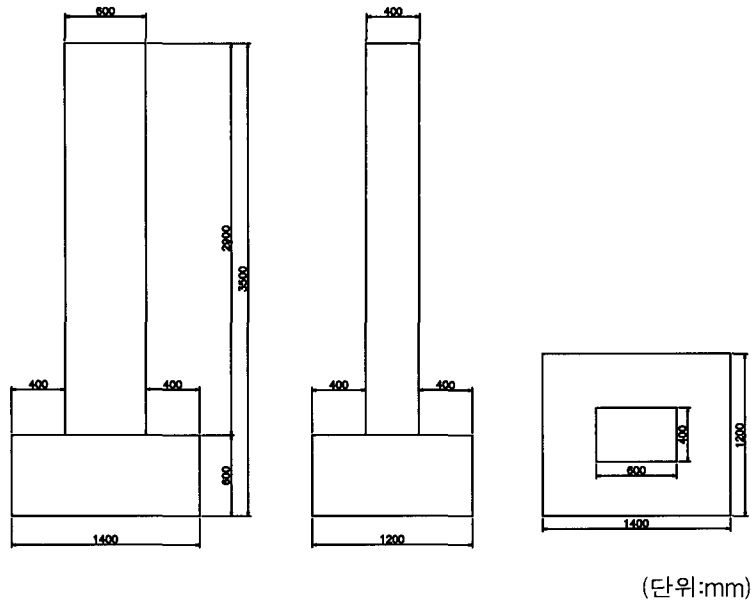
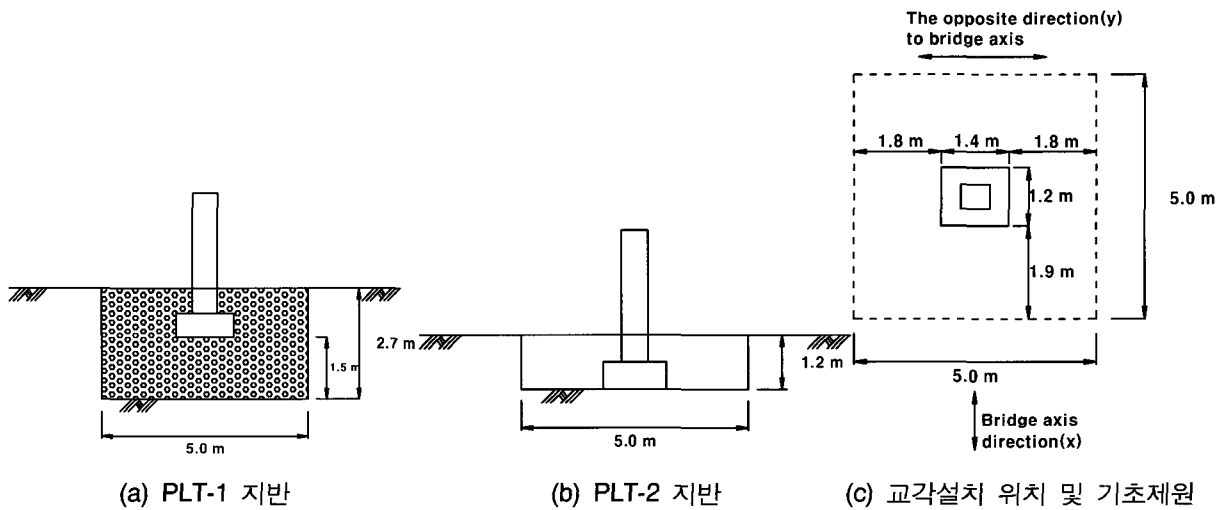


그림 1. 홍수로 인한 도로교의 피해현황(1964년~2003년)



(a) 교축방향 (x방향) (b) 교축직각방향 (y방향) (c) 단면

그림 2. 확대기초 교각모형의 제원



(a) PLT-1 지반

(b) PLT-2 지반

(c) 교각설치 위치 및 기초제원

그림 3. 모의지반 종류 및 제원

모의된 기초지반의 지지력 등 지반상수를 구하기 위해 기초 바닥의 중심부에서 KS F 2444(확대기초에서 정적하중에 대한 흙의 지지력 시험 방법)와 ASTM D 1194(Plate Bearing Test)에 제시된 방법에 따라 평판 재하시험을 실시하였으며, 그 결과를 표 1에 나타내었

다. 표 1에 나타난 바와 같이 PLT-1지반의 연직방향 지반반력계수가 PLT-2지반에 비해 약 10.2%정도 높은 것으로 분석되어 PLT-1지반이 PLT-2지반에 비해 지반강성이 큼을 확인하였다.

표 1. 모의된 지반의 지반상수

기초종류	응력 (kPa)		침하량 (mm)		하중판(30cm)에 의한 지반반력계수 (MPa/m)	지반탄성계수 (MPa)	연직지반반력계수 (MPa/m)
	항복 하중	허용 지지력	항복 하중	기초크기 보정			
PLT-1	302.428	151.214	8.06	10.90	39.071	4.063	13.039
PLT-2	244.216	122.108	7.17	9.70	35.459	3.687	11.834

2.1.3 가진 및 계측

임팩트 해머로 교축방향(x)과 교축직각방향(y)에 대하여 1차 모드가 가장 크게 되는 위치인 교각두부의 중앙부를 각각 충격 가진하고, 이때의 가진력과 가속도 응답을 동시에 측정하였다. 충격 가진에 사용된 임팩트 해머는 작업성과 교각모형에 대한 가진성 등을 고려하여 교각모형에 대한 충격력 최대값이 7kN 정도 되는 충분한 가진력을 갖는 중량 50N의 원주형 강체로 제작하였으며, 임팩트 해머의 두부에 하중변환센서인 Dytran사의 1061V4 모델을 부착하여 가진시의 입력하중을 측정하였다. 또한 교각모형의 타격위치에 고무판을 부착하여 임팩트 해머의 두부로부터 유발되는 2차 타격을 제거하였다. 그림 4에 교각모형에 대한 충격진동실험의 실시 개요도를 나타내었다.

충격 가진에 대한 확대기초 교각모형의 응답은 Dytran사의 3100B 모델의 가속도센서를 그림 5와 같이 교축방향(x)과 교축직각방향(y)에 각각 구체를 5등분한 0.58m 간격으로 총 6개를 부착하여 응답을 측정하였다. 입력하중과 응답가속도는 브뤼엘 앤 케아(Brüel &

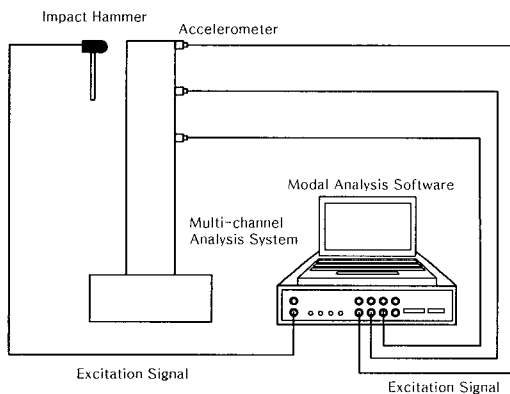
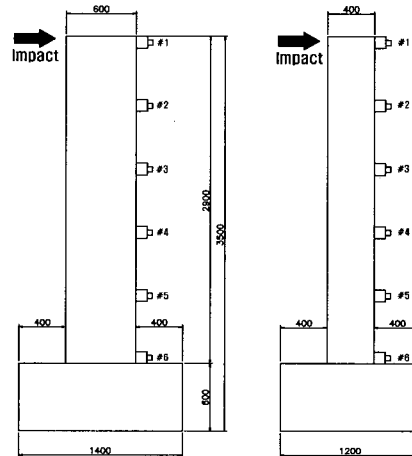


그림 4. 진동실험 구성도

Kjær)사의 3560C 모델의 진동분석기를 이용하여 가진과 동시에 측정하고, 각 측정점의 발생응답을 0.000488 초 간격으로 총 16,384개를 샘플링 하여 각 경우별로 5회씩 측정된 평균값을 분석에 사용하였다. 계측된 자료는 모달해석 프로그램인 SMS사의 STAR-Structure를 이용하여 다중커브피팅(polynomial curve fitting)에 기초한 시간영역에서 동적특성을 분석하였다.

2.2 실험조건

교각 기초의 지반종류와 세굴의 영향을 모의하기 위하여, 확대기초 교각모형의 전체 교각높이 3.5m의 34.3%인 1.2m를 PLT-1지반과 PLT-2지반에 근입시킨 후, 세굴에 의한 근입깊이의 감소를 모의하기 위하여 근입깊이를 0.6m, 0.3m, 0m로 교각 기초가 완전노출 될 때까지 지반을 굴착해 가면서 충격진동실험을 수행하였다. 또한, 교각 기초가 완전히 노출된 상태에서 교축직각방향(y)으로 기초 하부지반을 0.2m, 0.4m 굴착하여 충격진동실험을 수행하였다. 세굴심의 증가를 모의한 근입깊이에 따른 진동실험 조건을 그림 6에 나타내었다.



(교축직각방향계측) (교축방향계측)

그림 5. 가진 및 가속도센서 부착 위치(단위 : mm)

①	②	③	④	⑤	⑥
세굴심 증가율(z,y) : 0%	세굴심 증가율(z,y) : 50%	세굴심 증가율(z,y) : 70%	세굴심 증가율(z,y) : 100%	세굴심 증가율(z,y) : 100%, 14.29%	세굴심 증가율(z,y) : 100%, 28.57%

그림 6. 세굴을 모의한 근입깊이 변화별 실험 순서

확대기초 교각모형에 대한 세굴 건전성 평가실험 실시시의 기온은 34~39℃, 교각 표면온도는 34~38℃이고, 상대습도는 57~70%로 조사되었다.

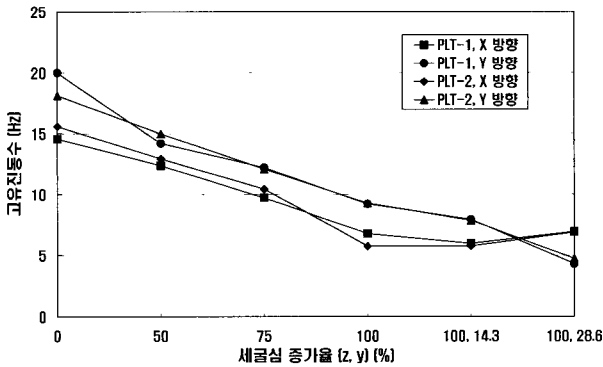
2.3 실험결과

지반종류와 세굴심의 변화에 따른 모드별 고유진동수의 변화를 그림 7에, 초기 근입깊이 1.2m에 대한 세굴심의 변화율별 교축방향(x)과 교축직각방향(y)의 고

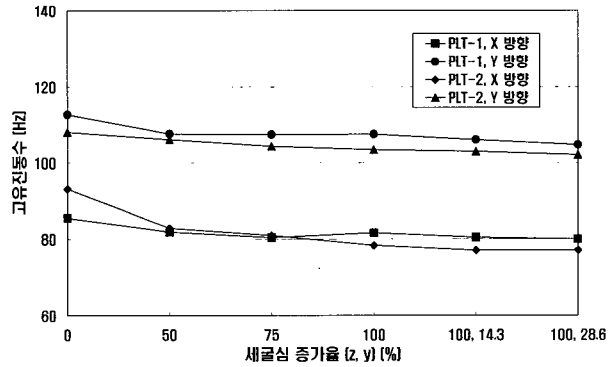
유진동수의 변화율을 그림 8과 9에 각각 나타내었다.

2.3.1 모드별 고유진동수의 변화

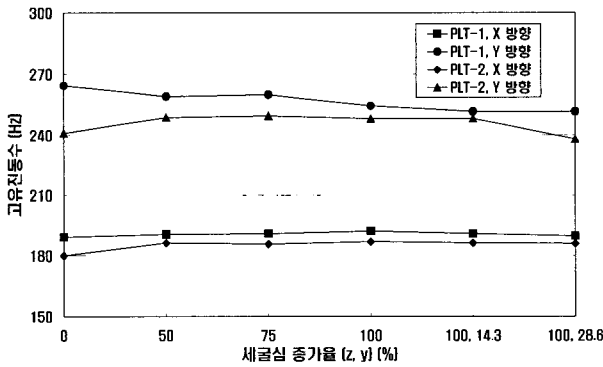
그림 7에 나타난 바와 같이 세굴심의 증가에 의한 지반의 강성저하는 1차 모드의 고유진동수에서는 일정한 감소경향을 보였으나, 고차모드로 갈수록 고유진동수의 변화정도 및 경향이 일정하게 나타나지 않았다.



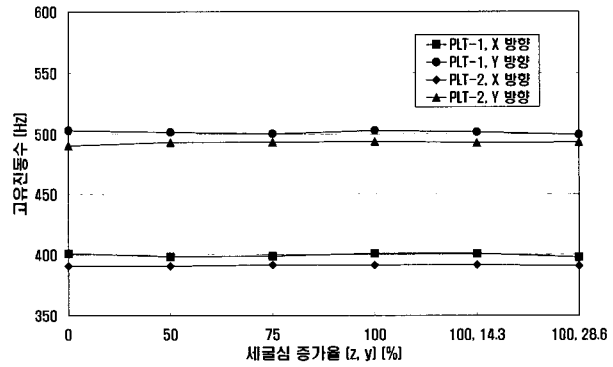
(a) 1차 모드 고유진동수의 변화



(b) 2차 모드 고유진동수의 변화

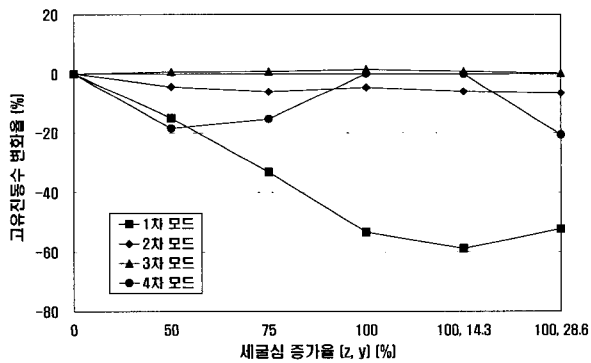


(c) 3차 모드 고유진동수의 변화

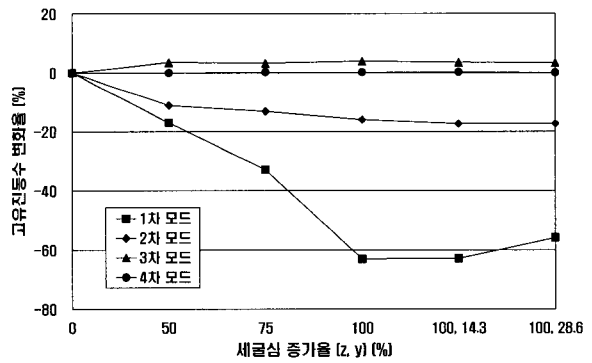


(d) 4차 모드 고유진동수의 변화

그림 7. 세굴심 증가에 따른 모드별 고유진동수의 변화

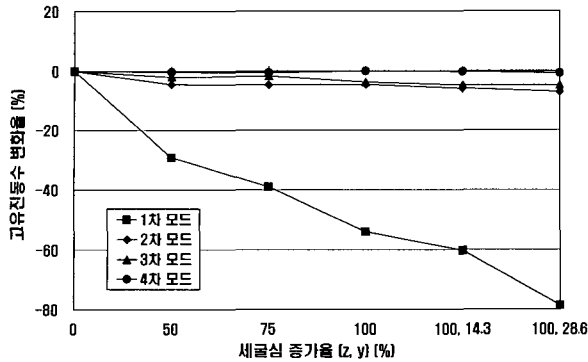


(a) PLT-1 지반

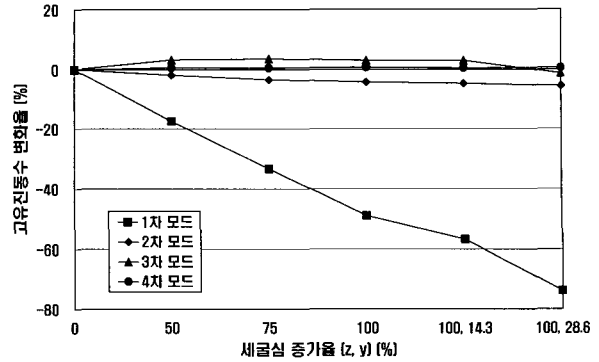


(b) PLT-2 지반

그림 8. 세굴심 증가에 따른 교축방향 고유진동수의 변화율



(a) PLT-1 지반



(b) PLT-2 지반

그림 9. 세굴심 증가에 따른 교축직각방향 고유진동수의 변화율

세굴심 증가에 따른 1차 모드 고유진동수는 세굴이 50% 발생(근입깊이가 초기에 비해 1/2로 감소)한 근입 깊이가 0.6m에서 PLT-1지반에서는 교축방향(x)과 교축 직각방향(y)에서 각각 14.9%와 29.1% 감소하였으며, PLT-2지반에서는 17.0%와 17.5% 감소하였다. 또한 교각기초가 완전히 노출된 세굴심 증가율 100%(근입 깊이가 0m)에서는 교축방향(x)과 교축직각방향(y)에서 PLT-1지반에서는 53.4%와 54.0%까지 감소하였으며, PLT-2지반에서는 63.0%와 48.9% 감소하였다. 그러나 4차 모드의 고유진동수 변화율은 PLT-1지반에서는 교 축방향(x)과 교축직각방향(y)에서 각각 0.07% 증가와 0.01% 감소로 나타났으며, PLT-2지반에서는 0.17% 증가와 0.7% 증가로 나타났다. 따라서 1차 모드의 고유진동수가 세굴심의 증가에 의한 지반의 강성저하를 잘 설명하고 있는 것으로 평가되었다.

2.3.2 지반종류에 따른 고유진동수의 변화

지반의 종류(강성)에 따른 고유진동수의 변화를 살펴 보면, 교축직각방향(y)의 고유진동수는 지반의 강성이 큰 PLT-1지반에서 크게 나타났다. 그러나 교축방향(x)의 1차와 2차 모드 고유진동수는 기초가 완전히 드러나는 근입깊이가 0m까지는 강성이 상대적으로 작은 PLT-2지반에서 크게 나타난 후, 기초하부가 굴착되면서는 강성이 큰 PLT-1지반에서 크게 나타났다. 이는 교각 기초 복토시의 제작오차로 기초를 덮고 있는 지반의 상태가 다짐의 영향을 크게 받았기 때문으로 사료된다.

또한 교각기초 밑 부분을 교축직각방향(y)으로 굴착함에 따라 교축방향(x)의 고유진동수가 증가하는 것은 세굴로 인한 지반의 강성저하보다 응력 집중으로 인한 지반의 탄성계수가 더 크게 증가하였기 때문으로 사료된다.

2.3.3 가진방향에 따른 고유진동수의 변화

가진방향에 대해서는 그림 9에 나타난 바와 같이 구 체 강성이 큰 교축직각방향(y)의 고유진동수가 크게 나타나 교각구체 강성의 차이가 고유진동수의 차이로 나타나는 것을 실험적으로 확인하였으며, 세굴심의 증가에 따른 감소율이 크게 나타나 구체 강성이 큰 방향으로의 가진이 지반의 강성변화를 잘 표현하는 것으로 분석되었다.

이상의 결과로부터 실험적 모드해석법을 이용한 확대기초 교각 모형의 세굴 건전성 평가 실험결과 세굴로 인한 지반의 강성저하는 1차 모드의 고유진동수를 이용하여 평가할 수 있음을 확인하였다. 따라서 홍수 발생 후 확대기초 교각의 세굴 건전성 평가를 위한 긴급점검시에 교각 구체의 휨강성이 크고, 상부구조물에 의한 구속이 작은 교축직각방향(y)의 1차 모드 고유진동수를 이용한 세굴 건전성 평가가 가능할 것으로 사료된다.

3. 결 론

고유진동수 변화를 이용한 교각의 세굴 건전성 평가 가능성을 검토하기 위하여 세굴에 가장 취약한 확대기초 교각 모형에 대해 세굴을 모의한 충격진동실험을 수행하였으며, 본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 세굴심의 증가에 따라 1차 모드의 고유진동수는 일정한 감소경향을 보였으며, 지반과 구체 강성의 차이가 고유진동수의 차이로 나타나는 것을 실험적으로 확인하였다. 또한 구체 강성이 큰 방향으로의 가진이 지반의 강성변화를 잘 표현하는 것으로 평가되었다.
- (2) 따라서 확대기초 교각의 세굴 건전성 평가를 위해 1차 모드의 고유진동수를 이용할 수 있음을

확인하였으며, 홍수 발생 후 확대기초 교각의 세굴 건전성 평가를 위한 긴급점검시에 교각 구체의 휨강성이 크고, 상부구조물에 의한 구속이 작은 교축직각방향(y)의 1차 모드 고유진동수를 이용한 세굴 건전성 평가가 가능할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

건설부 (1963~1978). 한국의 홍수.
건설부 (1979~1990). 재해연보.
내무부 (1991~1992). 재해연보.
내무부 (1993~1996). 재해연보.
박병철 (2005). 동적 충격기법을 이용한 교각의 세굴 건전성 평가, 박사학위논문, 충남대학교.
행정자치부 (1997~2003). 재해연보.

加藤雅史, 高宮 進, 田中信治, 二宮公紀 (1991). 橋梁下部工補強に伴う振動特性の變化の検討, 土木學會論文集 No.428/I-15, pp. 57~65.

建設省土木研究所, 社團法人 全國地質調査業協會聯合會 (1997). 橋梁下部構造の計測・診断技術の開発に關する共同研究報告書 - 橋梁基礎の洗掘調査マニュアル(案).

Nishimura Akihiko (1990). Examination of Bridge Substructure for Integrity, *Japanese Railway Engineering*, No.114, pp. 13~17.

◎ 논문접수일 : 2005년 06월 02일

◎ 심사의뢰일 : 2005년 06월 04일

◎ 심사완료일 : 2005년 06월 17일

