

원형강 파일이 횡방향 상호 연결된 가설교량의 안전성 평가

김용곤[†] · 백신원

한경대학교 안전공학과

(2005. 12. 7. 접수 / 2006. 3. 10. 채택)

Safety Evaluation of a Bridge Using Round Piles Connected Laterally to Each Other

Yongon Kim[†] · Shinwon Paik

Department of Safety Engineering, Hankyong National University

(Received December 7, 2005 / Accepted March 10, 2006)

Abstract : The substructure of temporary bridges used during the construction period of main bridges needs to be simple and strong at the same time so that it doesn't block running water. When the water flow is hindered by substructure of the bridges, as it happens when H beams with bracing are used, either the water floods or the bridge gets damaged. Therefore, using round beams for the substructure and connect them together is a preventive choice considering the intensive raining in the summer. The bridges using round beams for the substructure have also benefited by fast construction because of fewer bracing and in-situ welding.

Because the round-pile-connecting method is relatively new, the safety evaluation of the constructed bridge is an essential procedure before being used in the field. The field evaluation of a bridge including the vehicle loading test and moving load analysis has been conducted and the results showed the safety requirement is satisfied.

Key Words : safety evaluation, substructure, round piles

1. 서 론

현재까지 가설교량에 시공되는 하부구조는 H형 파일공법을 적용해오고 있다. 교각에 해당하는 부분에 많은 숫자의 파일을 사용함으로써 공사기간과 공사비가 증가하고, 홍수시 파일로 인한 유수단면의 손실과 부유물 적체로 인하여 교각에 수평하중이 작용하여 교량 주변의 범람이나 교량자체의 붕괴 위험이 지적되어 왔다. 또한, H형 파일에 대한 브레이싱 작업 등으로 외관이 매우 복잡한 등의 문제점을 안고 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 여러 시행착오를 거쳐 횡방향 원형강 파일 연결공법이라는 새로운 공법이 개발되었다. 이 기술은 H형 파일 대신 강관파일을 이용하여 교각을 설치하고 횡방향으로 서로 연결하는 공법이다. 그리하여 횡방향으로 보면 강관을

일렬로 배치하였으므로 기존의 방식대로 H형강을 2열 혹은 3열로 배치하고 브레이싱을 설치하던 방법에 비하여 근입되는 파일의 수량이 적으며 현장 용접이나 연결작업이 크게 줄어 공사기간이 단축되고, 공사비가 절감되며, 단일 원형단면으로 부유물이 적체되지 않으며, 하천 유수단면이 최소화되고, 원형부재로 외부 부식노출단면이 작게 되는 등의 장점이 있다. 그러나, 하부구조의 간결화는 기존의 방법에 비하여 필연적으로 안전에 대한 재검토를 필요로 하며 그만큼 구조적으로 정밀한 계산과 정확한 시공이 필요할 수밖에 없다¹⁾. 그리하여, 본 연구에서는 현재 시험적으로 시공된 횡방향 원형강 연결교량의 재하시험을 실시하여 안전성을 측정하고자 하였다.

2. 안전성 평가방법

연구수행은 예비조사와 현장조사, 재하시험을 실

[†] To whom correspondence should be addressed.
yongon@hknu.ac.kr

시한 후 구조해석 및 내하력 평가를 하였고 마지막으로 공용내하력을 판정하는 것으로 결론을 지었으며 연구의 흐름은 다음 Fig. 1과 같다²⁾.

본 교량은 고속도로 상에 위치하고 있으며, 총 69m의 5경간 I Girder교로써 제원은 Table 1과 같다. 교량의 전경은 Fig. 2에 나타나 있으며 Fig. 3은 원형강을 서로 연결하여 구성된 하부구조를 보여준다.

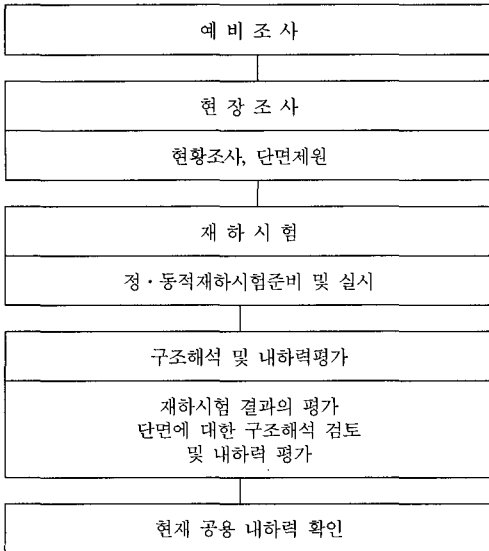


Fig. 1. Flow chart of the safety evaluation.

Table 1. Model bridge

상부형식	I형강 Girder교	연 장	69m
폭 원	6m	하부형식	강관 Pile(Φ508)
사용재료	주 형 : 800 × 300 × 14 × 26 주형받침보 : 588 × 300 × 12 × 20 Post : 100 × 100 × 6 × 8 기둥 : 508mm, 12T 강관 Pile 브레이싱 : 90 × 90 × 10 볼트 : M22 F10T		



Fig. 2. In-situ measurement.

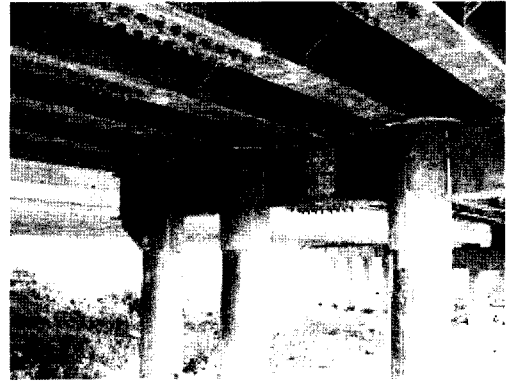


Fig. 3. Substructure using round beams connected laterally.

재하시험은 본 교량의 차량주행여건을 감안하여 시험차량이 가속 및 감속을 하여 규정된 재하속도를 구현할 수 있는 주행거리가 확보된 위치에 시험경간을 선정, 시행하였다. 시험결과는 구조해석 검토를 수행하여 실 차량에 의한 모멘트와 이온치를 상호 비교·검토함으로써 교량의 내하력을 판단하고 이에 따른 교량의 구조적인 안전성 여부를 파악하고자 하였다.

정적재하시험은 작용 외력에 대한 대상교량의 정적거동특성을 파악하고 내하력 평가를 위한 정적 변위 및 응력의 응답비 등을 구하기 위해 실시하였다. 시험측정은 재하차량을 사용하여 교통이 통제된 상태에서 휨모멘트 및 변형이 비교적 큰 지간의 중간에 재하차량을 재하하여 교량의 정·동적 처짐을 측정하였다³⁾.

차량재하 시험에서는 다음의 사항을 측정하였다.

- 주형의 처짐, 변형률
- 교량의 정적 및 동적 거동 평가
- 진동 등에 대한 사용성 검토
- 충격하중에 대한 교량의 동적 특성 파악

차량재하시험의 측정 시스템은 다음 Fig. 4와 같다.

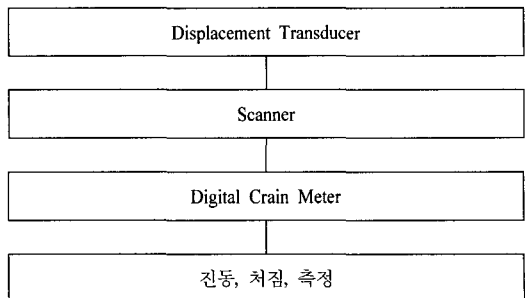


Fig. 4. Measuring vibration and deflection.

재하시험에 사용된 시험차량은 15t 덤프트럭으로서 만차상태의 각 차륜하중을 계량소에서 측정 기록하였다. 사용된 트럭의 제원 및 차륜하중은 다음 Fig. 5 및 Table 2와 같다.

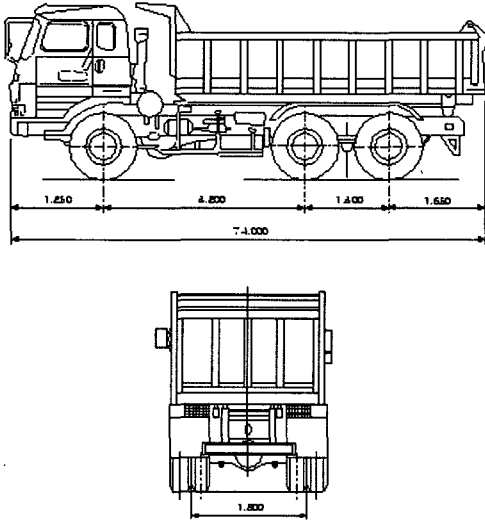


Fig. 5. Vehicle used for the loading test.

Table 2. Details of the loading vehicle

(단위 : m)				
차종	차축 1과 차축 2간 거리	차축 2와 차축 3간 거리	좌,우측 거리	
15 TON D/T	3.2	1.3	1.8	
(단위 : ton)				
차종	앞바퀴	중간바퀴	뒷바퀴	비고
15 TON D/T	3.85	4.96	4.96	총중량 : 27.54

정적재하시험은 작용외력에 대한 대상교량의 정적거동특성을 파악하고 내하력 평가를 위한 정적변위 및 응력의 응답비 등을 구하기 위해 실시하였다. 시험측정은 재하차량을 사용하여 교량이 통제된 상태에서 휨모멘트 및 변형이 비교적 큰 지간의 중간에 재하차량을 재하하여 교량의 정·동적 처짐을 측정하였다. 정적 재하시험의 흐름도는 Fig. 6과 같으며 다음의 1)에서 9)까지의 순서로 진행하였다.

동적 재하시험은 구조물의 동적 거동을 조사, 측정하기 위한 것으로 교량의 실 충격계수와 실교유진동수 등의 동적 특성을 측정 기록하여 본 교량의 안전성을 검토하기 위한 기본자료를 구하기 위해 실시하였다. 재하차량의 주행은 주요위치의 동적처짐

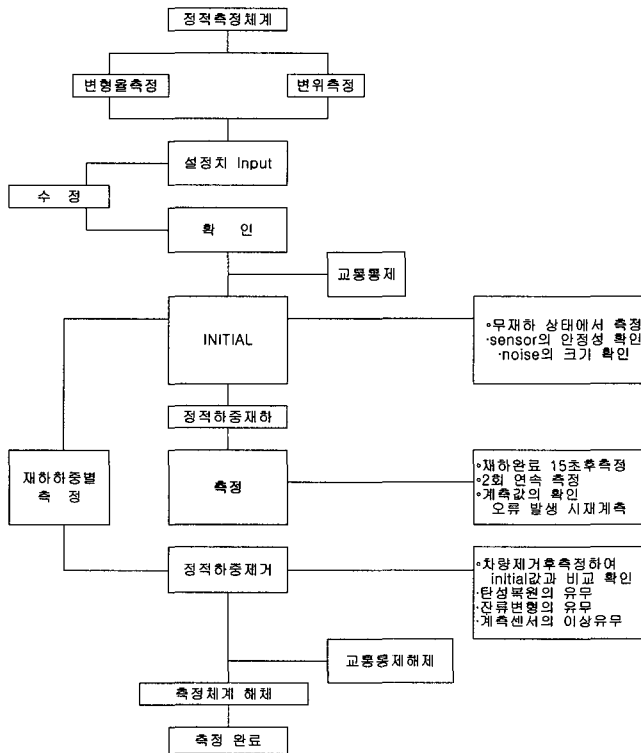


Fig. 6. Static load test flow chart.

과 진동을 기록할 수 있는 위치를 주행하며, 측정값의 일정한 패턴을 유지하고자 능숙한 운전자가 운행하도록 하였다. 동적재하시험은 주행차량에 의한 동적응답을 구하는 시험으로서 주행속도는 10km/hr 부터 10km/hr씩 증가하면서 가능한 최고속도까지 속도별로 주행시켰다. 동적 재하시험의 순서는 정적 재하시험의 경우와 같으며 흐름도는 Fig. 7과 같다.

1) 준비작업

부착된 센서에서 연장한 리드와이어들은 정적변형 측정기와 Switch Box에 센서의 종류별로 연결시키며, 측정기는 모두 지반에 접지 시킨다. 또한 리드와이어의 끝에서 저항을 기록한다.

2) 설정치 Input

부착한 센서들의 보정된 계수값과 측정 단위 등을 계측장비의 특성에 맞게 입력한다.

3) 확인 : 입력된 설정치의 이상유무를 확인하고 수정한다.

4) Initial : 시험경간에 재하차량을 포함한 활하중이 일체 재하되지 않은 상태에서 처짐과 변형률의 초기값을 측정기에서 설정한다.

5) 측정

정적재하시험: 시험차량은 최대 정·부모멘트, 최

대처짐 및 변형률, 최대 전단력이 발생할 수 있도록 계획된 Load Case 별로 변화시켜 가면서 측정한다. 이때, 상부구조의 진동, 소음, 충격 등이 측정결과에 영향을 미칠 수 있으므로 재하차량은 시동을 끈 후 구조체의 응답시간을 고려하여 약 1분 이상의 측정대기 시간을 가진 후 1분 간격으로 2회 정도 측정을 실시한다.

동적재하시험: 시험차량의 주행속도를 10Km/h씩 단계별로 증가하면서 최대 속도까 지주행시험을 한다. 단, 접속도로의 선행, 노면상태, 차량통제 현황 등이 허락되지 않을 경우는 예외로 한다. 시험차량이 대상경간을 완전히 빠져나간 후에도 교량의 자유진동은 계속되므로 여진이 소멸 될 때까지 측정을 계속하고 Computer Hard disk에 저장한다.

6) 재하시험 확인 및 하중 제거

계측 기술자가 시험차량의 주행 상황을 파악할 수 없을 때는 시험차량에 기술자가 동승하여 시험차량의 출발, 대상경간의 진입, 통과 등 일련의 상황을 통보한다. 측정이 끝나면 시험차량을 측정대상 경간으로부터 벗어나 다음의 재하 경우를 준비한다.

7) 계측값의 확인

2~3회 획득한 측정자료의 실측 응답값과 선행구조해석 응답값의 경향을 확인한다. 계측값들이 상이

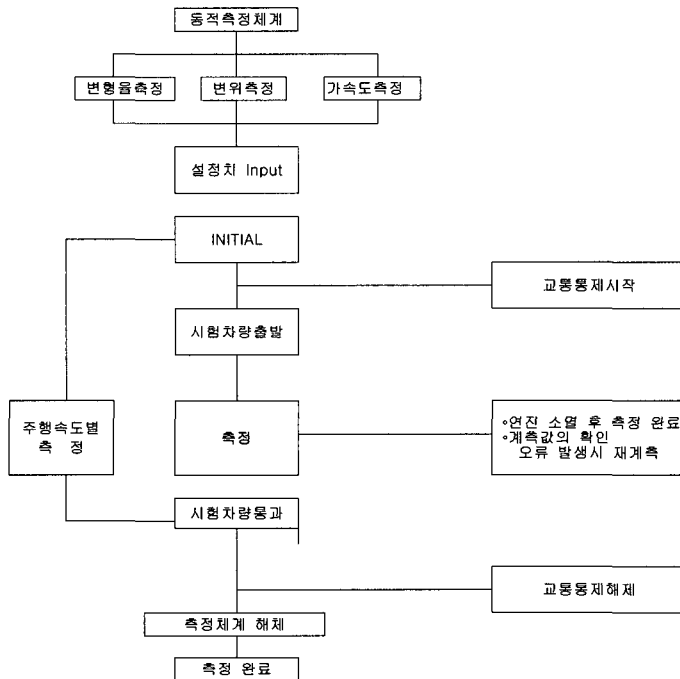


Fig. 7. Dynamic load test flow chart.

하거나, 오류가 발생되었으면 원인을 파악·제거한 후 재측정을 한다.

8) 계측완료

계측된 Load Case 경우별 측정을 완료한다.

9) 교통통제 해제

통행차량의 교통통제를 해제한다.

일반적으로 계측된 변형을, 처짐 등을 이용하여 실측충격계수를 분석하고자 할 때 정적재하, 의사정적(5km/h) 주행시험 등에서 계측된 응답곡선<DCa(mans)>을 정적 응답곡선으로 하여, 속도별로 계측된 동적 응답곡선<Ddyn(max)>과 비교하여 실측충격계수로 산정하는 방법을 이용하였다.

이는 주행시험에서 각 주행속도마다 운전자의 속도, 습관등에 의해서 시험차량은 정적 재하시험에 이용된 부차 게이지 상단으로 동일하게 주행하는 것은 어려운 상태이며, 의사정적 주행시에도 노면의 요철등의 원인으로 대상 교량에 가해지는 충격이 각 속도별로 다르게 나타내고 있는 상태로 이들을 정적응답이력곡선이나, 동적응답 이력곡선으로 보아 실측충격계수로 산정하는 것은 문제점을 내포하고 있는 것으로 판단된다. 그러므로, 이러한 문제점들을 해결하고자 동적주행 시험의 각 속도별의 동적응답 곡선을 Low Pass Filter에 의해서 필터링한 최대 정적응답<DCa(max)> 곡선을 기준으로 하여 계측 최대동적응답치<Ddyn(max)>와 비교하여 실측충격계수를 산정하여 대상 교량 안정성 평가에 적용하는데 목적이 있다. 처짐이력곡선은 Fig. 8과 같다.

재하차량에 의한 주형의 처짐을 차량의 위치를 옮겨가면서 가장 불리하다고 보여지는 곳에 재하하

여 Load Case 별로 측정된 결과 Table 3에 보이는 바와 같이 Dis1의 최대처짐은 2.257mm의 측정값을 나타내었고, Dis2의 최대처짐은 2.271mm의 측정값을 나타내었고, Dis3의 최대처짐은 2.740mm의 측정값을 나타내었다. 그 중 L/C-3의 Dis3 위치에서 최대처짐이 2.740mm가 발생하였다. 동적 재하시험 결과 시험차량에 의해 발생된 처짐은 Table 4와 Fig. 9에 나타내었으며 최대 처짐은 1.956mm를 나타내었다.

동적주행 시험의 각 속도별 동적응답 곡선을 Low Pass Filter에 의해서 필터링한 최대 정적응답<Dsta(max)> 곡선을 기준으로 하여 계측 최대동적응답<Ddyn(max)>와 비교하여 실측충격계수를 산정하여 대상 교량 안정성 평가에 적용한다. 충격계수 계산과정과 결과가 Table 5와 6에 각각 나타나 있다.

Table 3. Deflection at each load case in static loading (mm)

구분	DIS 1	DIS 2	DIS 3	비고
Load Case 1	2.257	2.271	0.794	단위 : mm
Load Case 2	2.226	2.261	0.756	
Load Case 3	0.721	2.264	2.740	
MAX	2.257	2.271	2.740	

Table 4. Deflection at each load case in dynamic loading (mm)

Case	재하시험속도	DIS 1	DIS 2	DIS 3
1	10km	0.09	1.717	0.691
2	20km	0.0925	1.836	0.930
3	30km	0.09	1.956	0.964
4	40km	0.109	1.922	0.998
5	50km	0.108	1.871	0.896

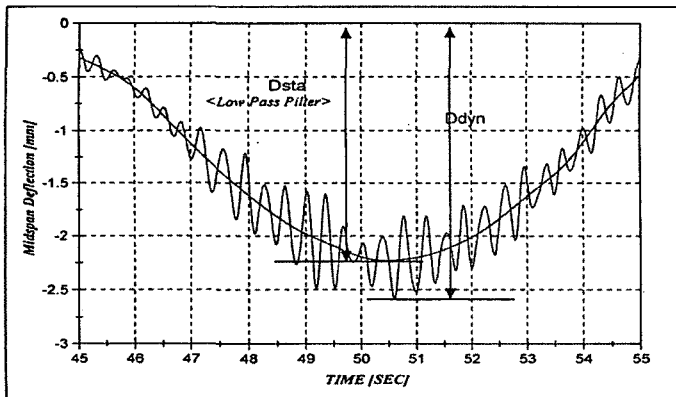
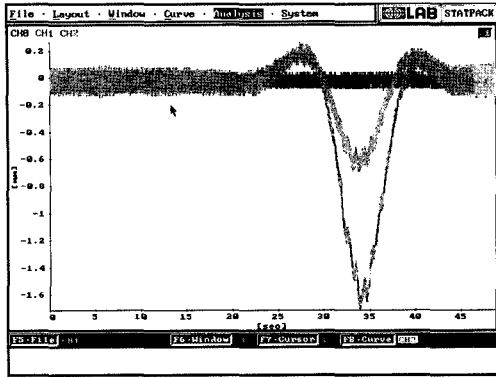
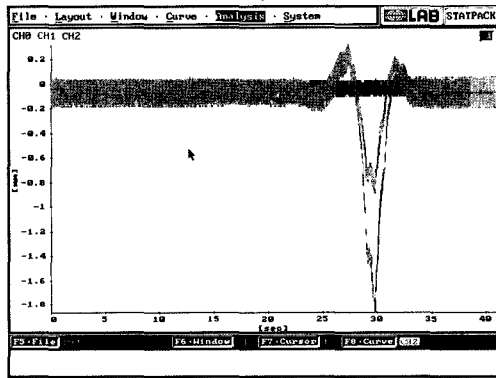


Fig. 8. Deflection - History curve.



(a) Vehicle speed 10km



(b) Vehicle speed 50km

Fig. 9. Dynamic deflection.

Table 5. Calculation of the impact factor (2)

충격 계수(i)	$= (D.L.F - 1) / \sqrt{N}$
	D.L.F = (y _{dyn}) _{max} / (y _{sta}) _{max}
	N = 재하 차량의 갯수
	(y _{dynamic}) _{max} = 최대 동적응답치 (y _{static}) _{max} = 최대 정적응답치

Table 6. Impact derived by dynamic loading test

주행 속도 (km/hr)	게이지 번호	최대동적 응답치 (y _{dyn})	최대정적 응답치 (y _{sta})	동적 증폭계수	충격 계수	비고
10	Dis 2	1.717	1.455	1.18	0.18	최대실측 충격계수 = 0.22 이론 충격계수(4) = 15/(40+L) = 0.272
20	Dis 2	1.836	1.530	1.20	0.20	
30	Dis 2	1.956	1.616	1.21	0.21	
40	Dis 2	1.922	1.575	1.22	0.22	
50	Dis 2	1.871	1.559	1.20	0.20	

재하시험에 의한 최대 충격계수는 0.22으로 측정되어 시방서에서 규정하고 있는 설계 충격계수에 대한 값 0.272보다 작게 나타나 주행차량의 충격에 대한 문제점은 없는 것으로 판단된다. 실측 고유진동수와 비교하기 위하여 고유치 해석을 실시한 결과 그림 10과 같이 평균적인 실측치 고유진동수는 2.64 Hz로 측정되어 계산에 의해 구한 고유진동수인 2.11 Hz보다 크게 측정되었다. 수치해석적으로 계산된 고유진동수보다 실측고유진동수가 크다는 것은 다음의 식에서와 같이 손상계수 D_F 의 값이 크게 되어 양호한 강성을 유지하고 있는 것으로 판단된다²⁾.

$$D_F = \frac{\omega_D^2}{\omega_1^2}$$

여기서, ω_D = 손상된 부재(사용 중인 상태)의 고유진동수(=실측치)
 ω_1 = 손상되지 않은 부재(사용 전 상태)의 고유진동수 (=계산치)

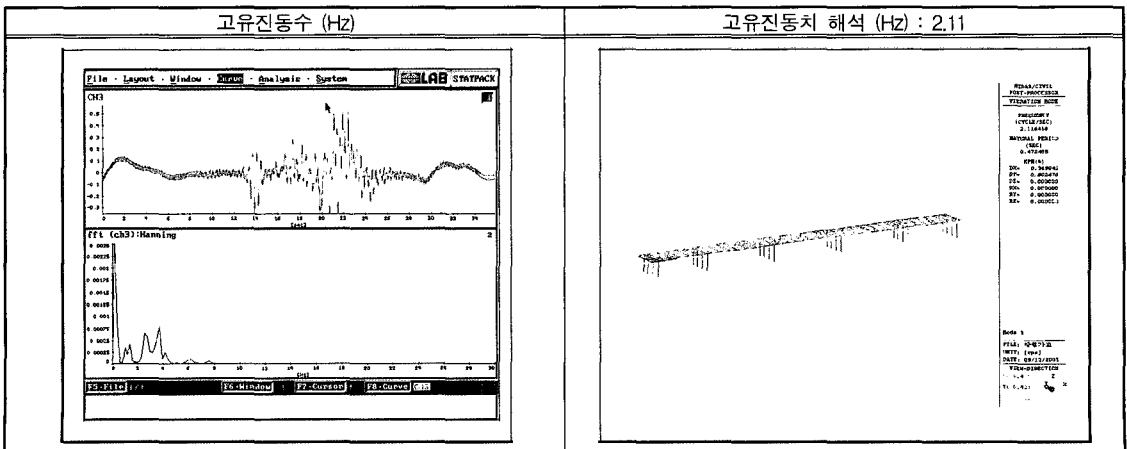


Fig. 10. Natural frequency of the structure.

3. 구조해석 및 내하력 평가

구조해석은 일반적으로 구조물의 보유내하력과 안전성, 사용성 등의 건전성 평가를 수행하기 위하여 실시한다. 또한, 실구조물을 이상화하여 현장에서 획득할 수 없는 자료를 도출하기도 하고 현장에서 실측한 자료와 구조해석 결과를 비교함으로써 구조물의 응답특성을 규명하기 위하여 행한다.

교량을 모델링 할 때 Beam과 Plate 요소로 모델링 하였고, 내하력 평가를 위한 구조해석을 수행하는 것으로 하였다. 하중재하 모델 및 구조해석 결과는 Fig. 11과 같다. 구조해석에서 사용된 설계하중은 다음과 같다.

1) 고정하중

강재 자중, 복공판자중, 포장(보조기층포함), 난간, 기타 하중을 포함한 항상 상재되는 하중

2) 활하중

- DB 24 : $P_f = 2.4 \text{ tf}$, $P_f = 9.6 \text{ tf}$
- DL 24 : $w_l = 1.27 \text{ tf} \cdot \text{m}$, $P_m = 10.8 \text{ tf}$, $P_s = 15.6 \text{ tf}$

3) 충격계수 : $I = 15 / (40 + L) < 0.3$

각 부분에서 발생하는 최대 응력과 강재의 허용 응력을 검토한 결과 Table 7과 같이 어떤 경우도

허용응력을 넘지 않아 충분히 안전한 것으로 파악되었다.

내하율(RF)은 주부재인 주형 및 주형받침보에 부재별 응력작용위치에서 최소값을 적용하여 내하력 평가시 반영한다. 내하율은 (허용응력 - 사하중응력) / 활하중응력으로 계산하여 그중 최소값 2.12로 채택되었다. 기본 내하력은 내하율과 설계하중(DB24)을 곱하여 50.88로 계산되었다.

공용내하력은 재하시험 실시구간인 경간에서 응력보정계수를 이용하여 Table 8과 같이 평가할 수 있었다.

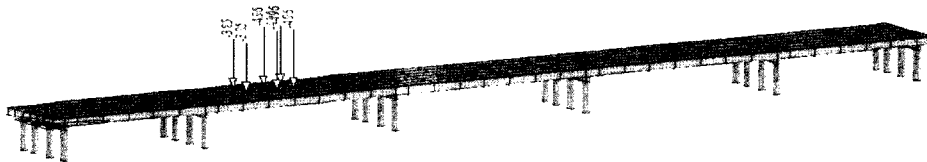
대상 교량에 대한 내하력 평가결과, 내하력은 모든 구간에서 설계하중이상을 나타내었으며, 재하시험결과를 반영한 공용내하력은 DB-33.07로 평가되어 설계하중인 DB-24이상의 내하력을 확보하고 있는 것으로 검토되었다.

Table 7. Calculation of the allowable stress

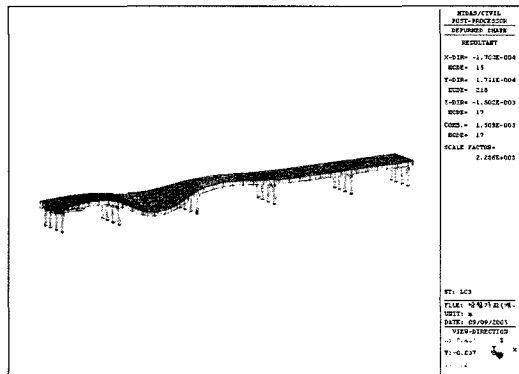
구분	외측주형	내측주형	주형받침보	허용응력
응력 (사하중+활하중)	738.81	548.90	422.18	1400

Table 8. Service load performance

구분	응력보정계수 (Ks)	기본내하력	공용내하력	비고
2경간	0.65	DB-50.88	DB-33.07	



(a) Loading position



(b) Analytical deflection curve due to loading

Fig. 12. Loading position and analytical deflection curve due to loading.

4. 결 론

본 연구에서는 고속도로상에 설치된 가설교량에 대하여 개통전 교량의 상부구조의 안전성 및 기본 내하력과 재하시험 결과 등을 정밀 조사하여 가교의 현재 공용내하력을 도출하고 안전성을 평가하였다.

정적재하시험 결과 주형 최대휨모멘트 발생 구간인 중앙부에 대하여 처짐을 측정된 결과 최대 처짐은 2.74mm가 발생하였다. 동적재하시험 결과 시험차량에 의해 발생된 최대 처짐은 Dis2에서 30km/hr일때 1.956mm를 나타냈으며, 교량의 최대 실측 충격계수는 0.22으로 측정되어 시방서에서 규정하고 있는 설계 충격계수에 대한 기준치인 0.272이내로 측정되어 주행차량의 충격 및 진동에 대한 안전성에 문제가 없는 것으로 판단된다.

내하력 평가 결과 기본내하력은 DB50.88, 공용내하력은 DB33.07로 조사되었다. 내하력은 모든 구간에서 설계하중 이상의 내하력을 나타내었으며, 재하시험 결과를 반영한 공용 내하력은 설계하중인 DB-24이상의 내하력을 충분히 확보하고 있는 것으로 검토되었다.

참고문헌

1. 조효남, “교량의 계획”, 교량공학, 구미서관, pp. 61~79, 2002.
2. 건설교통부, “안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(교량)”, 1996.
3. 강성후, “교량구조물의 내하력 평가”, 토목구조물의 안전진단과 사례, pp. 215~224, 2001.
4. 한국도로교통협회, “도로교 설계기준”, 2005.