

곡선형 RC 중공 슬래브교의 안전성 평가 사례 연구

채원규[†] · 조병완* · 김광일*

신구대학 건설정보과 · *한양대학교 토목공학과
(2006. 10. 17. 접수 / 2006. 12. 10. 채택)

A Study on the Safety Assessment of Curved Hollow RC Slab Bridge Structures

Chai, Won-Kyu[†] · Jo, Byung-Wan* · Kim, Kwang-Il*

Department of Construction Information, Shingu College

*Department of Civil Engineering, Hanyang University

(Received October 17, 2006 / Accepted December 10, 2006)

Abstract : In this thesis, the crack investigation, the damage investigation, the drawing check, and the structural analysis were performed on a curved hollow RC(reinforced concrete) slab bridge structure to assess the structural safety of that. From the crack investigation result, main reason of crack occurrence is guessed with travelling of the large truck. Therefore reinforcement of slab structure is necessary by using the steel plate. When structural analysis, the straight beam model, the curved beam model, and the curved plate model is used. From the results of structural analysis for curved hollow RC slab bridge, the maximum bending moment and the maximum shear force was not a difference in each models. But the vertical displacement of mid span using the curved beam model was greater than that using the other models.

Key Words : crack, curved bridge, hollow RC slab bridge, structural safety

1. 서 론

최근 급속한 지역사회의 발전으로 인해, 교통량의 급격한 증가, 통과 차량의 대형화, 중량화 등의 설계하중을 초과하는 하중조건 및 기타 환경적 요인들은 노후 교량 구조물들의 안전성을 위협하고 있는 실정이다.

이러한 교량 구조물 중 곡선형 RC 중공식 슬래브교는 속빈 구조로서 일반적인 RC 슬래브교에 비하여 자중을 약 25% 정도 가볍게 할 수 있고 공간을 늘릴 수 있는 장점¹⁾을 갖고 있는 반면, 시공이 어렵고 균열 발생 가능성이 큰 단점이 있으며, 곡선형 구조에 의해 안전성 평가시 수행되는 구조해석이 상대적으로 복잡한 경향이 있다²⁾.

이에 본 연구에서는 공용기간이 크고 구조물의 주요부재에 심각한 균열이 발생되어 있는 곡선형 RC

중공 슬래브교를 대상구조물로 선정하였으며, 대상 구조물에 대해 균열 및 기타 손상도 조사, 설계도면 검토, 구조해석 등 일련의 안전성 평가 업무를 수행함으로써, 대상구조물에 대한 안전성 평가를 고찰하였다. 아울러 본 연구에서는 곡선형 RC 중공 슬래브교에 대한 구조해석 시 대상구조물을 직선보, 곡선보, 및 곡선형 판요소 모델로 각각 모델링함으로써, 모델링의 변화에 대한 최대 단면력과 수직변위의 변화를 알아보았다.

2. 대상 구조물 현황

본 연구의 대상구조물의 상부구조 형식은 5경간 연속 곡선 RC 중공 슬래브교로서, 연장은 10@20m=200m이며, 교 폭은 10m이고, 설계하중은 1등급인 DB-24로 설계되었다. 하부구조의 구조형식은 교대와 교각의 경우 각각 중력식과 라멘식이며, 기초 부위는 확대기초를 사용하였다.

본 연구의 대상 구조물의 단면도는 Fig. 1과 같다.

[†] To whom correspondence should be addressed.
cwk@shingu.ac.kr

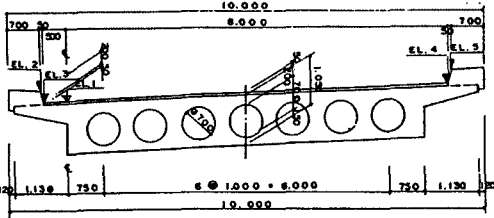


Fig. 1. Cross section.

3. 현장조사 및 설계도면 검토

3.1. 슬래브 균열 조사

콘크리트 구조물은 균열의 발생에 따라 일반적으로 구조내력, 내구성, 수밀성 등이 저하되기도 하며 외관이 손상하는 등 여러 가지 유해현상이 발생하게 된다³⁾. 따라서 콘크리트 구조물의 균열상태를 조사하고, 균열의 발생 원인을 분석하는 것은 구조물의 장기적인 안전성 확보에 주요한 사항이다. 이에 본 연구에서는 대상구조물의 슬래브에 대한 균열 발생 상태를 조사하였다.

대상구조물의 슬래브 난간부의 균열들은 교량 우측의 균열 폭이 교량 좌측의 균열 폭보다 더 크고 더 많은 부위에서 균열이 발생되어 있었으며, 이러한 균열들은 설계하중을 초과하는 과적차량의 빈번한 통행, 곡선부에서 발생하는 원심력 및 운전자들의 운전 습관 등으로 인한 환경적 요인 등에 의하여 발생한 것으로 추정된다.

또한 슬래브의 하부에서는 슬래브 상부보다 더 많은 균열들이 발생되어 있었으며, 직선 구간의 시점 쪽에서 1, 2경간 보다는 곡선구간인 3~10경간에서 많은 균열들이 발생되어 있었으며, 특히 중점부인 10경간에서는 기존에 발생되었던 균열들 이외에도 폭이 0.1mm 정도의 미세균열들이 지간 방향으로 약 10~15cm 간격으로 무수히 발생되어 있어서, 균열들이 진전되고 있을 가능성이 있음을 알 수 있었다.

특히 대상구조물에서는 일반적인 RC 교량의 허용 균열폭⁴⁾인 0.3mm를 초과하는 균열들이 상당수 발견되었으며, 이러한 균열들에 대해서는 대상 교량이 하천을 횡단하는 교량임을 감안할 때, 철근부식을 초래하여 교량 내하력을 급속히 저하시킬 가능성이 있으므로 적절한 대책이 시급히 수립되어야 할 것으로 사료된다.

3.2. 손상도 조사

본 연구의 대상구조물에서는 슬래브의 균열발생

이외에도 여러 가지 손상이 조사되었다. 대상구조물의 시점부에는 도로와 교량의 상부 슬래브가 약 3cm 정도 단차가 있어 차량 주행 시 충격을 유발하고 있었으며, 일부 구간의 난간 부위가 파손된 채로 방치되어 있어 통행자들의 심리적 불안감을 유발하고 있었다.

또한 본 연구의 대상구조물은 급한 곡선형 교량이므로 운전자들이 고속으로 진입할 경우 안전사고가 빈번히 발생하는 상태이므로, 교량 시점부에 빨간색 점멸 신호등을 설치하는 조치 등을 취하여 운전자로 하여금 교량 진입 직전에 충분히 속도를 낮출 수 있는 조치가 필요할 것으로 사료된다.

3.3. 설계도면 검토

본 연구의 대상구조물은 중공 슬래브교로서 설계시 고려해야할 사항이 일반 슬래브교에 비해 상대적으로 많다. 본 연구에서는 대상구조물의 설계 타당성을 검토하기 위하여 설계도면을 시방서의 내용과 비교 검토하였으며, 그 결과는 다음과 같다⁵⁾.

- 1) 슬래브의 판 두께 : 시방서에서는 중공 슬래브교의 판 두께를 70cm이상으로 규정하고 있으며, 대상구조물의 판 두께는 105cm로서 시방서 규정을 만족하고 있다.
- 2) 원형공 상부의 슬래브 두께 : 원형공의 윗부분은 윤택중이 직접 재하되는 것을 고려하여 시방서에서는 20cm이상으로 규정하고 있으며, 대상구조물에서는 20cm이므로 타당하다.
- 3) 원형공의 지름 : 원형공 상부의 휨모멘트에 대한 영향 때문에 시방서에서는 원형공의 최대지름을 100cm로 규정하고 있으며, 대상구조물에서 70cm이므로 타당하다.
- 4) 원형공 하부 슬래브 두께 : 시방서에서는 10cm이상으로 규정하고 있으며, 대상구조물에서는 15cm이므로 타당하다.
- 5) 원형공과 원형공의 순 간격 : 시방서에서는 25cm이상 또는 원형공 지름의 1/5이상으로 규정하고 있으며, 대상구조물에서는 30cm이므로 타당하다.
- 6) 외측 원형공 끝에서 단부까지의 간격 : 시방서에서는 30cm이상으로 규정하고 있으며, 대상구조물에서는 40cm이므로 타당하다.
- 7) 반침에서 원형공 시작부분까지 거리 : 시방서에서는 30cm이상으로 규정하고 있으며, 대상구조물에서는 200cm이므로 타당하다.

8) 슬래브 윗쪽 및 아래쪽의 지간방향의 주철근 : 시방서에서는 지간 방향으로 배치되는 인장주철근은 지름 13mm이상의 철근을 각각 20cm이하의 중심 간격으로 배치하도록 규정하고 있다. 대상구조물에서는 슬래브 위쪽의 지간방향 주철근은 H29(C.T.C 20cm), 슬래브 아래쪽의 지간방향 주철근은 H32(C.T.C 10cm)로 배치되어 있어서 모두 시방서 규정에 적합하다.

9) 슬래브 윗쪽 및 아래쪽의 지간 직각방향의 주철근 : 시방서에서는 지간 직각방향으로 배치되는 인장주철근은 지름 13mm이상의 철근을 각각 30cm이하의 중심 간격으로 배치하도록 규정하고 있다. 대상구조물에서는 지간 직각방향 주철근은 위쪽과 아래쪽에 각각 H19(C.T.C 15cm)로 배근되어 있어서 시방서 규정을 만족하고 있다.

이상의 설계도면의 시방서에 대한 검토 결과, 본 연구의 대상구조물인 중공 슬래브교는 시방서의 규정을 만족하고 있는 것으로 나타났다.

4. 구조해석 및 고찰

본 연구에서는 대상구조물의 구조적 안전성을 알아보기 위하여 대상구조물에 대한 구조해석을 수행하였다. 대상구조물을 직선보 모델, 곡선보 모델 및 곡선형 판요소 모델로 각각 모델링하여 구조해석을 수행하였으며, 구조해석 결과에 의해 곡선형 RC 중공 슬래브교의 모델링 변화에 따른 단면력과 수직 변위의 변화를 알아보았다.

4.1. 설계조건

구조해석 시 사용한 설계조건은 다음과 같다.

- 1) 상부형식 : 5경간 연속 곡선 RC 중공 슬래브교
- 2) 교량 연장 : $2 @ (5 @ 20.0m) = 200.0m$
- 3) 교량폭원 : 10.0m
- 4) 활하중 : DB-24, DL-24
- 5) 사용재료 : $f_{ck} = 210kgf/cm^2$, $f_y = 4000kgf/cm^2$

4.2. 모델링

본 연구에서는 대상구조물에 대한 구조해석을 범용 구조해석 프로그램인 SAP 2000 Nonlinear 를 사용하여 수행하였다. 구조해석에 사용한 직선보 모델, 곡선보 모델, 곡선형 판요소 모델은 각각 Fig. 2~4 와 같다⁶⁾.



Fig. 2. Straight beam modelling.



Fig. 3. Curved beam modelling.

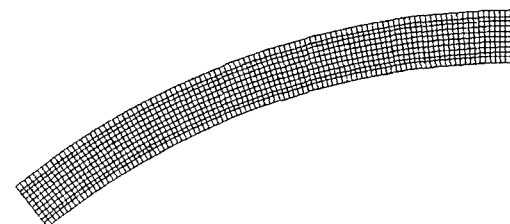


Fig. 4. Curved plate modelling.

4.3. 하중경우

대상구조물에 대한 하중경우는 다음과 같으며, 이들 각 하중경우를 Fig. 5~9에 나타내었다. 한편 Fig. 5~9에서 지간 거리의 단위는 m이다.

- 1) Load case 1 : 고정하중
- 2) Load case 2 : 활하중(DB24 하중에 의한 외측 경간 중앙부 모멘트 검토)
- 3) Load case 3 : 활하중(DL24 하중에 의한 외측 경간 중앙부 모멘트 검토)
- 4) Load case 4 : 활하중(DL24 하중에 의한 지점 부 최대 부모멘트 검토)
- 5) Load case 5 : 활하중(DB24 하중에 의한 최대 전단력 검토)
- 6) Load case 6 : 활하중(DL24 하중에 의한 최대 전단력 검토)

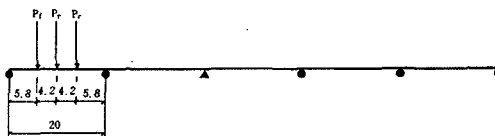


Fig. 5. Load Case 2.

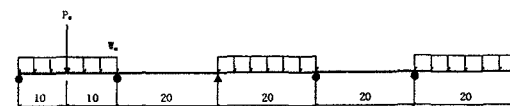


Fig. 6. Load Case 3.

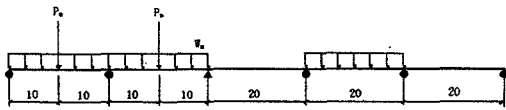


Fig. 7. Load Case 4.

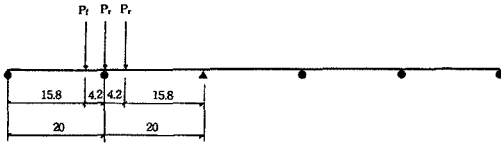


Fig. 8. Load Case 5.

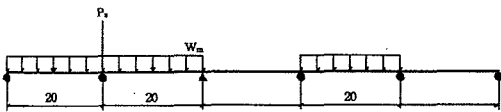


Fig. 9. Load Case 6.

한편 구조해석 시 대상구조물에 대한 최대 단면력을 산정하기 위한 극한하중은 고정하중의 1.3배와 충격계수를 포함한 활하중의 2.15배로 하중조합하여 적용하였다⁷⁾.

본 연구의 대상구조물에 사용한 활하중에 의한 충격계수는 다음 값을 사용하였다⁸⁾.

$$i = \frac{15}{40 + L} = \frac{15}{40 + 20} = 0.25 < 0.3$$

4.4. 구조해석 결과 및 고찰

구조해석 결과에서 최대 휨 모멘트와 최대 전단력은 각 모델링 형태에 따라 큰 차이는 없는 것으로 나타났으며, 직선보 모델에 따른 구조해석 결과 중 휨모멘트도, 전단력도 및 수직변위도를 각각 Fig. 10~13에 나타내었다.

본 연구에서는 Fig. 10~12의 구조해석 결과에 의한 극한 휨모멘트와 극한 전단력을 각각의 설계강도인 설계 휨모멘트와 설계 전단력과 비교하여 대상구조물의 안전성을 검토하였으며, 그 결과를 Table 1에 정리하여 나타내었다.

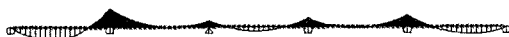


Fig. 10. Bending moment diagram (LC 2).



Fig. 11. Bending moment diagram (LC 4).

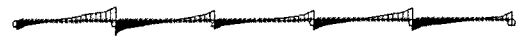


Fig. 12. Shear Force diagram (LC 6).



Fig. 13. Vertical displacement (LC 2).

Table 1. Comparison between ultimate strength and design strength

Member force	Load Case	Ultimate strength [kN · m]	Design strength [kN · m]	Safety
Positive moment	2	1649.7	2405.9	O.K
Negative moment	4	-2800.4	-4431.2	O.K
Shear force	6	756.8	1057.0	O.K

Table 1의 결과에서 극한 모멘트는 설계 모멘트의 약 2/3 정도로 대상 구조물은 휨에 대하여 충분히 안전함을 알 수 있었으며, 극한 전단력도 콘크리트 만에 의한 설계 전단력보다 작아서 안전함을 알 수 있었다. 특히 전단력 검토 시 대상 구조물에는 전단 철근(H13, C.T.C 30cm)이 보강되어 있기 때문에 이를 고려할 경우 전단에 대한 문제는 더욱 안전측으로 평가 될 것으로 사료된다.

한편, 각 모델링에 따른 수직 변위 결과를 Fig. 14에 나타내었다. Fig. 14에서 괄호안의 숫자는 활하중과 충격에 의한 수직 변위이며, 그 이외의 숫자는 고정하중과 활하중을 하중조합계수로 조합한 설계하중에 의한 수직변위를 나타낸다.

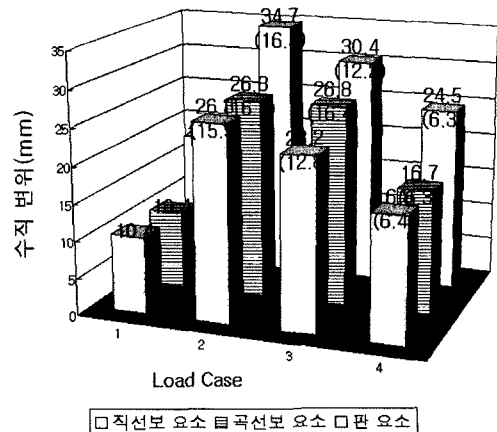


Fig. 14. Vertical displacement result.

Fig. 14의 결과에서 알 수 있듯이 대상구조물의 지간 중앙부의 수직변위는 모델링에 따라 변화가 심하였으며, 대상구조물을 직선보 요소로 모델링하여 해석한 경우가 가장 낮게 나타났고, 대상구조물을 판 요소로 모델링하여 해석한 경우가 가장 크게 나타났다.

Fig. 14에서 지간 중앙부의 최대 수직 변위는 Load Case 2의 판 요소로 해석하였을 경우로서 활하중과 충격에 의한 수직 변위는 16.5mm이었다. 이 값은 시방서에서 규정하고 있는 허용 처짐 값⁹⁾인 20mm(지간의 1/1000)보다 작아서 시방서 규정을 만족하고 있는 것으로 나타났다.

또한 직선보 요소나 곡선보 요소로 해석할 경우보다 판 요소로 해석할 경우 수직 변위 값이 크게 계산되므로, 일반적으로 설계시 곡선 슬래브교를 직선보 요소나 곡선보 요소로 해석하는 것을 감안할 때 설계시에는 곡선형 RC 중공 슬래브교의 수직 변위를 판 요소로 검토할 필요가 있다. 한편 계산값과 실측값의 비교에 의해 안전성을 평가하는 안전진단 수행 시에는, 직선보 요소에 대한 수직변위의 계산값이 상대적으로 적게 나타나므로 직선보 요소에 의해 안전성을 평가하는 것이 바람직하다.

5. 결 론

본 연구에서는 곡선형 RC 중공 슬래브교의 안전성 평가 사례 고찰을 위하여 대상구조물에 대한 균열조사, 손상도 조사, 설계도면 검토, 구조해석 검토 등의 일련의 안전성 검토를 수행하였으며, 대상구조물에 대한 안전성 평가 결과는 다음과 같다.

대상 구조물에 발생되어 있는 균열의 주원인은 설계 하중 이상의 대형차량에 의한 이상 진동으로 추정되며 성장 가능성이 매우 높은 것으로 추정된다. 더욱이 본 교량은 하천을 횡단하는 교량임을 감안할 때 균열을 방치할 경우 철근부식에 의한 교량의 내력을 급속히 저하시킬 우려가 있다. 이에 대한 보강대책으로는 상판을 교체하는 것이 가장 확실한 방법이나 현재 국도를 통행하는 교통량을 감안할 때 이 방법은 현실적으로 매우 어려울 것으로 사료되므로 교량하부에서 시공 가능한 강판접착공법 등의 보강공법을 사용하여 슬래브를 보강하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

본 연구의 대상구조물은 급곡선 교량이고 안전사고 위험성이 잠재하고 있으므로 교량진입부에 빨간 점멸신호등 등의 안전시설을 설치하여 운전자로 하

여금 교량 진입 직전에 충분히 속도를 낮추게 함으로써 차량 충격으로 인한 교량 노후화를 지연시킬 뿐만 아니라 안전사고 예방을 할 수 있는 조치로 필요하다. 또한 기타 손상도 조사에서 나타난 교량 진입부의 단차로 인해 발생하는 충격을 없애는 대책도 아울러 강구되어야 한다.

대상구조물을 직선보, 곡선보, 및 곡선형 판요소 모델로 각각 모델링하여 구조해석을 수행한 결과, 최대 휨모멘트와 전단력은 각 모델 형태에 따라 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 그러나 지간 중앙부의 수직변위는 모델링에 따라 변화가 심하였으며, 대상구조물을 직선보 요소로 모델링하여 해석한 경우가 가장 낮게 나타났고, 대상구조물을 판 요소로 모델링하여 해석한 경우가 가장 크게 나타났다. 일반적으로 설계시 곡선 슬래브교를 직선보 요소나 곡선보 요소로 해석하는 것을 감안할 때, 곡선형 RC 중공 슬래브교의 수직 변위는 판 요소로 검토할 필요가 있다고 판단된다. 이러한 결과는 설계시에는 곡선형 RC 중공 슬래브교의 수직 변위를 판 요소로 검토할 필요가 있으며, 계산값과 실측값의 비교에 의해 안전성을 평가하는 안전진단 수행 시에는, 직선보 요소에 의해 안전성을 평가하는 것이 바람직함을 의미한다.

참고문헌

- 1) “교량공학”, 조효남, 구미서관, pp. 218~220, 1999.
- 2) 은충기, 채원규, 한석주, 김광일, 홍성욱, 원일석, “개구부가 있는 슬래브교의 휨 거동 사례 연구”, 2000년도 한국산업안전학회 추계학술발표회, pp. 176~182, 2000.
- 3) “건설재료학”, 문한영, 동명사, pp. 136~137, 2006.
- 4) “콘크리트 구조설계기준”, 건설교통부, pp. 51~53, 1999.
- 5) “도로교 표준시방서”, 사단법인 대한토목학회, pp. 455~465, 1996.
- 6) “도로교 표준시방서”, 사단법인 대한토목학회, pp. 78~80, 1996.
- 7) Wilson, E. L. and Habibullah, A., “SAP2000 Structural Analysis Users Manual”, Computers and Structures Inc.
- 8) “도로교 표준시방서”, 사단법인 대한토목학회, pp. 41~45, 1996.
- 9) “도로교 표준시방서”, 사단법인 대한토목학회, pp. 326~328, 1996.