

T형 교각 붕괴 안전진단 사례

박 구 준 우리 협회 토목진단부 전문위원
 곽 성 기 우리 협회 토목진단부 부장
 김 래 현 우리 협회 토목진단부 대리
 송 정 훈 우리 협회 토목진단부 주임
 조 진 석 우리 협회 토목진단부 주임

1. 서론

본 안전진단 사례는 1997년 7월, 준공된지 20일만에 붕괴된 ○○교량 램프 C의 PIER-1에 대하여 붕괴원인 규명과 복구대책을 제시하여 시설물의 안전성 확보를 기함을 목적으로 실시되었으며, 램프 C 상부구조와 교각에 대한 안전성 검토와 붕괴된 교각에 대한 복구대책의 검토를 과업범위로 하였다.

안전진단방법은 램프 C의 T형 교각 PIER-1과 PIER-1의 붕괴 영향범위의 상부구조(Steel Box Girder)에 대한 현장조사(변위, 변형 현황, 시공상태 등)를 실시하고 제공받은 설계도서와 지반조사 자료를 토대로 하여 램프 C의 상부구조와 PIER-1에 대한 구조안전해석을 실시하였다.

2. 진단대상 구조물 현황

2-1. 교량의 제원

■ 램프 C의 PIER-1 개요

- 교각형식 : 철근 Concrete T형 교각
- 상부형식 : 4경간 연속 Steel Box Girder 합성교
- 지 간 : 3@40.000 + 30.685
= 150.685m
- 교 폭 : 9.500m
- 콘크리트 설계강도 : 240kg/cm²
- 철근의 강도 : 3000kg/cm²

2-2. 시공현황

붕괴된 램프 C의 교각 P1은 당초 강관파일 기초로 설계되었으나, 현장에서 실시한 지반조사 결과 기반암(연암, 풍화암)이 지표하 6m 정도에 분포하고 있는 것으로 확인되어, 기반암까지 터파기하고 기초 높이까지 Mass 콘크리트를 타설하여 시공하는 것으로 변경되었으며, 교각은 당초 종구형 교각으로 설계되었으나 코핑상단부에 단차를 둔 철근콘크리트 T형 교각으로 설계변경되어 시공되었다.

붕괴 이후 램프 C 구조물에 대한 조사 결과,

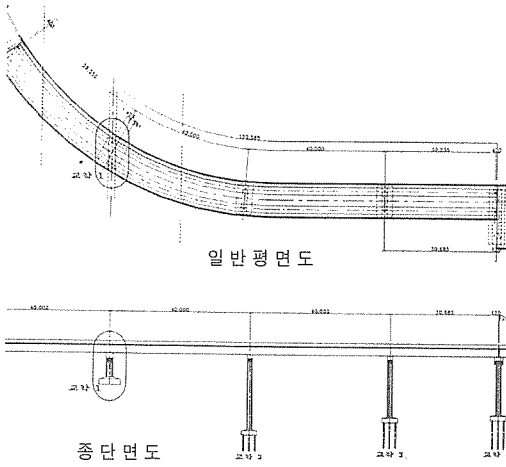


그림 1. C - 램프교 중·평면도

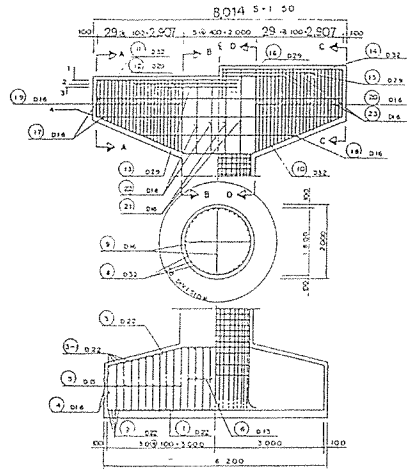


그림 2. 진단대상 교각 정면도

P1 교각의 붕괴로 인하여 상부구조물은 25cm 정도 침하가 발생된 것으로 나타났으며, STEEL BOX가 국부적으로 손상되었으며 CROSS BEAM은 심하게 손상된 상태이다. 그리고 2번 교각(P2) 상부의 연석에 1~2mm 정도의 균열이 일부 발생되어 있는 상태였으며 상부 슬래브는 큰 이상이 없는 것으로 나타났다.

3. 진단대상 구조물에 대한 조사 및 시험

3-1. 교각 기초지반에 대한 조사

램프 C의 Pier 1 구간의 지층 분포상태를 조사한 결과, 확대기초의 지점은 지표로부터 도로 축조시 타설된 콘크리트층 및 기반암층(연암층, 경암층)의 순서로 분포되었으며, 확대기초를 벗어난 구간은 쇄석다짐층, 매립토층 및 기반암층의 순서로 분포하고 있다.

본 지역의 기반암은 중생대 쥐라기에 관입된 화강암으로 연암층은 지표면으로부터 5.8~

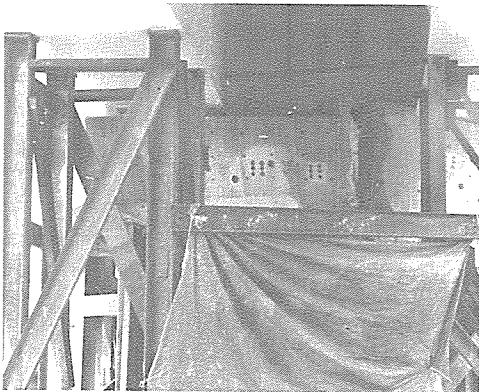


사진 1. 진단구조물 전경

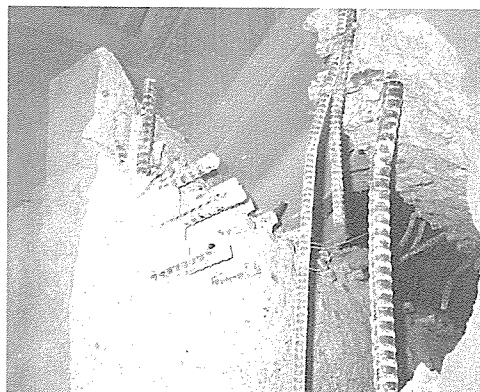


사진 2. 교각파괴부 전경

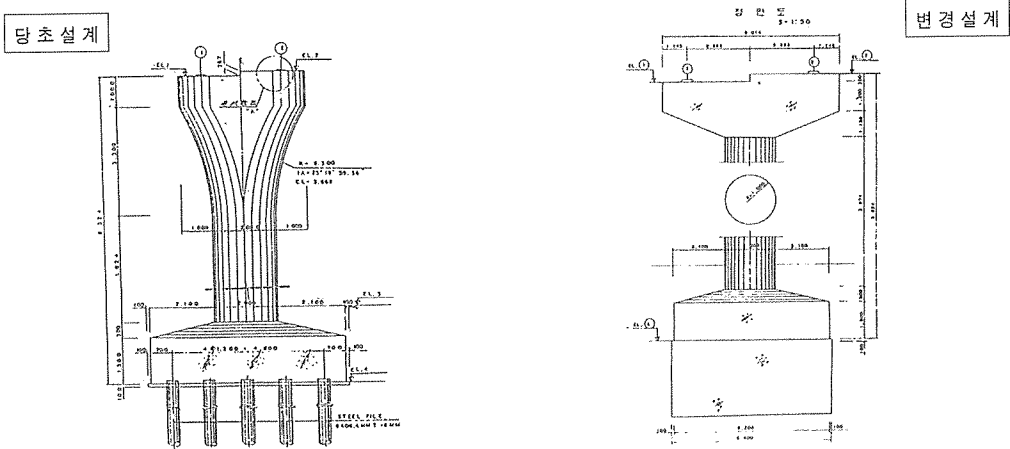


그림 3. 사고교각의 설계변경 전·후의 일반도

6.3m의 심도로부터 2.8~3.5m의 층후로 분포하고 있으며 기반암의 풍화정도는 보통풍화 정도로 장식류가 심한 풍화를 받은 반면 석영입자는 비교적 신선한 상태를 보여주고 있다. 시추코아로부터 측정된 $TCR=87\sim 100\%$, $RQD=0\sim 55\%$ 로 비교적 양호한 암반상태를 나타내고 있다.

이상과 같이 램프 C의 Pier 1 지역의 지반조사 자료를 검토한 결과 교각의 기초는 양호한 암반 위에 시공된 것으로 판단된다.

3-2. 현장시험

가. 콘크리트 강도시험 결과

본 진단대상 구조물인 램프 C의 Pier 1 기둥 및 COPING부에 대하여 비파괴 강도시험 기인 SCHMIDT HAMMER를 이용하여 측정 한 결과, 콘크리트 강도는 $217\sim 244\text{kg/cm}^2$ 로 나타나며, 교각 기둥부 평균강도는 232kg/cm^2 , 교각 COPING부 평균강도는 220kg/cm^2 인 것으로 측정되었다.

그리고, 진단대상 구조물의 교각 기둥부와 코핑부에서 5개의 콘크리트 코아를 채취하여 압축

강도시험을 실시한 결과, 교각 기둥의 압축강도는 $248\sim 256\text{kg/cm}^2$ (평균 252kg/cm^2)으로 측정되었다.

교각에 대한 콘크리트 강도 조사 결과 SCHMIDT HAMMER를 이용한 비파괴 조사 결과 설계기준 강도에 미치지 못하는 것으로 나타났다. 콘크리트 코아를 채취하여 압축강도시험을 실시한 결과 설계기준강도($\sigma_{ck} = 240\text{kg/cm}^2$)를 유지하고 있는 것으로 측정되었다. SCHMIDT HAMMER를 이용한 비파괴 조사 결과는 교각의 붕괴와 콘크리트 균열발생 및 표면의 요철 등이 콘크리트 강도조사에 영향을 미친 것으로 사료된다.

나. 철근 배근조사 결과

본 진단대상 구조물인 램프 C의 Pier 1의 교각 및 COPING부에 대한 철근 배근상태를 조사한 결과, COPING부의 조사된 철근 배근상태는 설계도면에 나타난 바와 같이 코핑부 중앙에서 좌우로 주철근을 분리시켜 배근한 것으로 나타났으며, 배근간격은 대체적으로 설계도면과 일치하고 있는 것으로 나타났다.

다. 콘크리트 염분함량 조사

본 진단대상 구조물에 대한 염분함량시험을

염분함량 측정장비인 EM-250 장비를 이용하여 균은 콘크리트내의 염분함량을 개략적으로 파악한 결과 콘크리트 구조물내의 염화물의 함량은 0.000 ~ 0.003kg/m²으로 허용함량(0.3kg/m²)을 초과하지 않는 것으로 나타났다.

4. 진단대상 구조물에 대한 구조안전검토

본 진단대상인 램프 C의 Pier-1과 상부구조에 대한 구조안전검토 결과는 다음과 같다.

4-1. 상부구조에 대한 검토 결과

상부구조에 대한 안전검토는 원설계에서 코핑의 방향을 원의 중심방향으로 설계되어 있는 것을 도로 진행방향과 평행하게 변경시공한 상태이므로, 단면검토는 변경시공한 상태와 교각의 파괴 후 상부구조의 처짐이 발생한 상태를 감안한 검토를 실시하였다.

가. 교각 및 상부구조가 기시공된 상태(설계 변경된 후)의 단면 검토

- 하중재하 : 현장의 교량은 경수산업도로와 교차시키는 RAMP로서 교각1이 교축방향의 직각에 일치하지 않고 경수산업도로와 평행하게

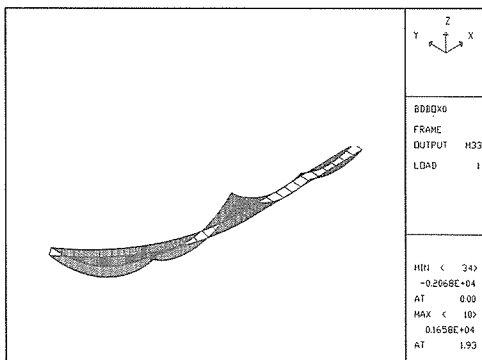


그림 4. 교각파괴로 상부구조 처짐시 최대모멘트도

므로 이를 고려하여 지점 위치를 MODELING 하였으며, 각 지점 및 지간의 최대 단면력이 발생되도록 활하중(DL-24)을 재하하여 계산을 실시하였다.

- 검토 결과 : 최대 및 최소 휨모멘트 발생시 상부구조의 안전성을 검토한 결과, 상부구조에 작용하는 응력은 허용응력 이내로 나타나고 있어 상부구조의 안전성이 확보되는 것으로 검토되었다.

나. 교각파괴로 인한 상부구조가 처짐을 갖고 있을 때의 단면 검토

- 하중재하 : Pier-1 교각이 붕괴로 인하여 상부구조는 우측 지지점 26.5cm 및 좌측 지지점 23.6cm 정도 침하된 것으로 조사되었으며, 하중재하에 기발생된 처짐을 고려하였으며 사하중만을 재하시켜 안전검토를 실시하였다.

- 검토 결과 : 최대 및 최소 휨모멘트 발생시 상부구조의 안전성을 기발생된 처짐을 고려하여 검토한 결과, 최대휨모멘트 발생시 상부슬래브 콘크리트에 작용하는 응력은 콘크리트의 허용응력보다 크게 나타나 안전성이 확보되지 않는 것으로 검토되었다.

다. 고 찰

교각(P1)의 파괴로 인한 상부구조가 처짐이 발생되어 있는 현 상태에 대한 상부구조에 대한 검토 결과 계산상 제1경간 중앙부의 슬래브 콘크리트의 응력이 허용치를 초과하는 것으로 검토되었다.

현재 상부구조물은 가벤프에 의해 지지되고 있으며, 현장조사 결과 상부구조물에는 치명적인 손상이 발생되지 않은 상태이며, 계산상 상부 콘크리트 부재 외에는 안전한 것으로 검토된 점을 감안할 때, 현재의 상부구조물은 구조상 큰 문제는 없는 것으로 판단된다.

그러나 상부구조의 실제의 처짐(23.6 ~ 26.5cm)이 허용치 1/500(16.0cm)보다 많이 발

생되어 있는 상태이므로 가벤트를 조속히 재설치하여 상부구조를 원래의 상태로 회복시킬 필요가 있으며, 교각의 재시공이 완료될 때까지 더 이상의 변형이나 기타 위험요소가 발생되지 않도록 주의가 요망된다.

4-2. 하부구조에 대한 검토결과

가. 코핑부

코핑부에 대한 검토 결과, 코핑부에 작용하는 극한 휨모멘트($M_u = 1792 \text{ ton.m}$)는 공칭 휨모멘트($\phi M_n = 2523 \text{ ton.m}$) 이내인 것으로 나타났다. 그러나 코핑부 상부 주철근에 대한 철근량과 철근의 정착길이에 대한 검토 결과, 사용된 철근량은 395 cm^2 로서 요구되는 철근량 275.73 cm^2 보다 큰 것으로 나타나 문제가 없는 것으로 검토되었으나 철근의 정착길이에 대한 검토 결과 사용된 정착길이(39cm)가 필요한 정착길이(90.174cm)에 크게 부족한 것으로 검토되었다.

나. 기둥부

(교각 코핑부 철근의 정착길이 검토)

A) D32 철근에 대하여

$$A_b = 7.942 \text{ cm}^2$$

$$\text{기본정착길이 } l_d = 92.278 \text{ cm}$$

보정계수 상부철근에 대하여 1.4

$$\text{배근량 비율에 의하여 } req A_s / used A_s = 0.698$$

$$\text{필요한 정착길이 } l_d = 90.174 \text{ cm}$$

$$\text{사용된 정착길이 : } 39 \text{ cm} < l_d (90.174 \text{ cm}) \text{ N.G}$$

기둥부에 대한 검토 결과, 기둥부에 작용하는 극한 휨모멘트($M_u = 746.4 \text{ ton.m}$)는 공칭 휨모멘트($\phi M_n = 1183.2 \text{ ton.m}$) 이내인 것으로 나타나며, 극한 축력($P_u = 1296 \text{ ton}$)도 공칭 축력($\phi P_n = 2054.43 \text{ ton}$) 이내인 것으로 나타난다. 그러나 사용철근량에 대한 검토 결과 사용철근비

($\rho = 0.0096$)는 허용철근비($\rho_s = 0.01$)에 다소 미치지 못한 것으로 검토되었다.

다. 교각기초부

교각기초부에 대한 검토 결과, 교각기초부에 작용하는 극한 휨모멘트($M_u = 400 \text{ ton.m}$)는 공칭 휨모멘트($\phi M_n = 181.21 \text{ ton.m}$)보다 크게 나타나므로 단면의 검토가 필요한 것으로 파악되었다.

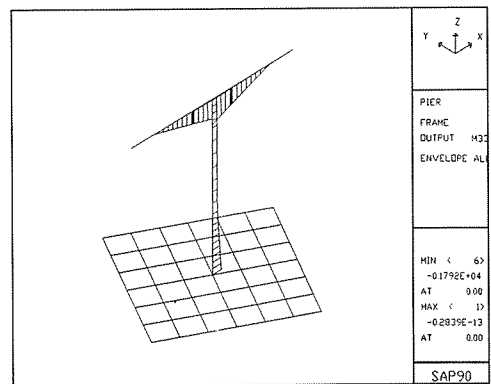


그림 5. T형 교각의 최대 모멘트도

5. 붕괴된 교각에 대한 복구

붕괴된 교각에 대한 재시공안은 교각의 기초는 안전한 상태이므로 파괴된 교각만 철거한 후 기초와 연결하여 재시공하는 것으로 계획되었으며, 교각의 재시공은 현재 임시로 설치되어 있는 가벤트를 위치 변경 및 고정을 실시하여 상부구조를 안전하게 지지하게 한 후 파괴된 교각을 기존 확대기초 윗 부분까지 철거하고, 기존 기초와 기둥과의 연결부를 보강하여 교각을 재시공하도록 계획되어 있다.

보강 설계된 교각에 대한 검토 결과, 붕괴된 교각의 문제점인 코핑부 주철근의 배근과 기둥부 주철근의 철근비 등의 문제점을 개선하였으며 보다 안전한 설계가 된 것으로 나타났다.

보강설계된 교각은 기초 Footing 저판의 두께를 1.0m 증가시키며 교각의 기둥은 철근을 2열로 추가 보강배근하는 것으로 계획되었다. 그리고 교각의 코핑부는 상단의 주철근과 장철근을 사용하여 중앙에서 끊지 않고 연결시공하여 철근의 정착장의 결함이 발생되지 않도록 설계되었다. 이러한 교각보강설계안에 대한 안전성 검토 결과 교각구조물은 구조적인 안전성이 확보되는 것으로 검토되었다.

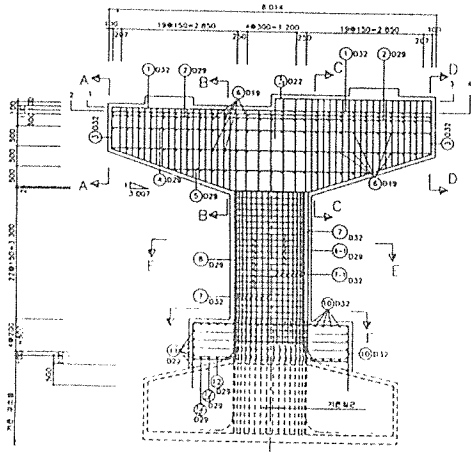


그림 6. 복구 교각의 정면도

6. 교각 붕괴 원인

본 사고 교각 붕괴의 원인은 코핑이 노면의 횡단구배에 의한 단차를 두어 설계 시공됨으로 인하여 코핑부 중앙에서 좌우로 주철근을 분리시켜 정착하도록 설계·시공되어 있으며, 붕괴된 램프 C P1 교각에 대한 검토 결과, 코핑부 상부 주철근에 대한 철근량과 철근의 정착길이에 대한 검토 결과, 코핑부는 계산상 철근량에는 안전한 것으로 되나, 배근 설계에서 중간부에서 좌우측 철근을 별도로 취급하고 이들의 부착에 의해 정착할 수 있는 겹침을 고려치 않아 휨 인장응력에 견디지 못하고 파괴된 것으로 판

단된다. 따라서 철근의 정착장이 부족하여 코핑상단에서의 인장력을 감당하지 못한 것이 붕괴의 직접적인 원인인 것으로 판단된다.

램프 C의 Pier-1은 당초 종구형 교각으로 설계되었으나 종구형 교각은 교좌의 위치가 상부 구조물의 Sole Plate 위치에 크게 벗어나 코핑상단길이가 7m인 T형 교각으로 1차 설계 변경되었던 것으로 보이며, 코핑상단길이는 7.0m에서 도로상의 건축한계에 문제가 되어 코핑의 방향을 도로와 나란하게 하고 코핑의 길이를 8.014m로 재차 변경한 것으로 보인다.

이러한 설계변경과정에서 교각에 대한 구조안전검토가 실시되지 않은 것이 근본적인 문제로 나타났으며 시공과정에서 재검토가 이루어지지 않은 것으로 파악되었다.

7. 결론

본 붕괴교각과 같이 코핑상단부에 단차를 둔 철근 콘크리트 T형 교각의 설계는 코핑부는 주철근을 장철근을 사용하여 일체로 시공하고 우측의 높은 쪽 코핑부는 교좌에서부터의 하중 분배 및 지압력을 고려하여 설계하여 시공하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

본 진단사례와 같이 교각의 붕괴로 인하여 상부구조의 과도한 처짐이 발생될 경우 인접한 교각에 하중이 집중됨으로 인하여 인접교각에 2차적인 피해가 발생할 수 있으며, 2차적인 피해를 방지하기 위하여는 교각붕괴시 상부구조를 가시 설 등을 설치하여 본래의 위치로 조속히 복구시킬 필요는 있는 것으로 판단된다.

(붕괴된 램프 C P1에 대한 복구는, 코핑부는 당초 설계상의 문제점인 코핑부 주철근배근과 기둥부 철근비 등을 보완하여 붕괴된 교각을 철거 후 재시공하였으며 1997년 11월 차량의 통행이 재개되었다.)