

T형 교각의 구조안전성 검토 사례 연구

A Case Study on the Structural Safety Assessment of T-Type Piers

은충기 · 채원규 · 손영현* · 김광일** · 홍성욱***

신구대학 토목과 · *현대건설 기술연구소 · **한양대학교 토목공학과 · ***한림정보산업대학 토목과

1. 서론

본 연구에서는 교각구조물의 안전도 평가를 위하여 먼저 대상구조물을 선정하고, 현장조사에 의해 구조물의 제원 및 손상도를 조사하였으며, 구조해석 결과에 의해 휨에 대한 안전성 검토 및 전단에 대한 안전도 검토를 강도설계법에 의해 수행하였다.

본 연구에서 수행된 풍하중을 고려한 교각구조물의 구조안전도 평가 사례는 차후의 교각구조물 안전성 검토에 대한 기초자료로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

2. T형 교각에 대한 구조해석

본 연구에서는 T형 교각의 구조안전성을 검토하기 위하여 대상 구조물에 대한 모델링, 하중계산, 하중조합 등 일련의 구조해석을 수행하였다.

2. 1. 대상구조물

본 연구의 대상구조물은 높이가 5.6m, 폭이 1.8m, 코핑부의 폭이 12.54m인 T형 교각이다. 대상구조물의 일반도는 그림. 1과 같다.

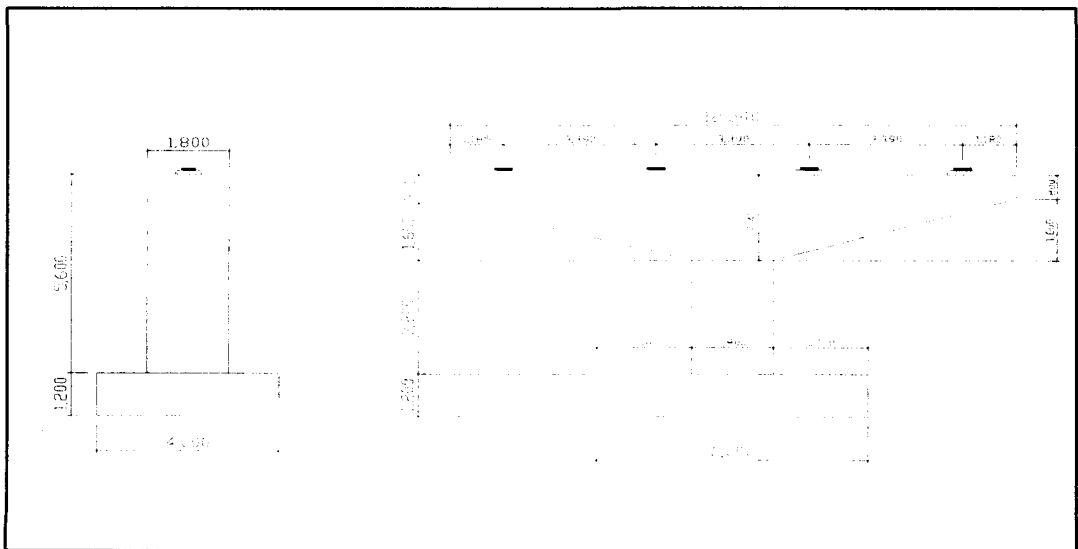


그림 1. 대상 T형 교각의 일반도.

2. 2. T형 교각의 모델링

T형 교각에 대한 구조해석은 범용 구조 해석 프로그램인 SAP 2000 프로그램을 사용하여 수행하였다. T형교각을 총 18개의 절점과 17개의 부재로 모델링 하였으며, 기초는 고정지점으로 형상화 하였다. 본 연구에서 구조해석 시 사용한 모델링은 그림 2와 같다.¹⁾

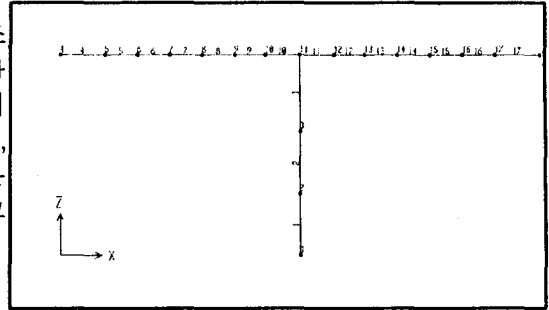


그림 2. T형 교각의 모델링.

2. 3. 단면특성

본 연구에서 구조해석 시 사용한 교각구조물의 재료적 특성은 다음과 같으며, 부재별 단면특성은 표 1에 나타내었다.

- 콘크리트 : $f_{ck} = 240 \text{ kg/cm}^2$ (가정)
- 인장철근 : D32@100 (2단배근) $f_y = 3000 \text{ kg/cm}^2$ (가정)
- 압축철근 : D32@100 $f_y = 3000 \text{ kg/cm}^2$ (가정)
- 철근피복두께 : 압축 및 인장철근 10cm

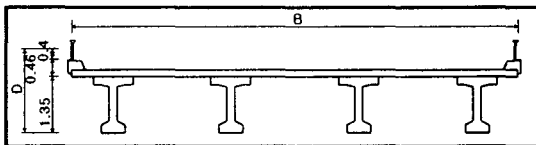
표 1. 교각구조물의 부재별 단면특성.

Element No.	Element Length [m]	Diameter [m]	Width [m]	Height [m]
1, 2	1.6	1.8	-	-
3	1.6	1.8	-	-
4, 17	1.17	-	1.8	0.975
5, 16	0.85	-	1.8	1.275
6, 15	0.85	-	1.8	1.53
7, 14	0.85	-	1.8	1.785
8, 13	0.85	-	1.8	2.035
9, 12	0.80	-	1.8	2.280
10, 11	0.90	-	1.8	2.400

2. 4. 교각구조물의 풍하중 산정

본 연구에서는 교각구조물의 구조해석 시 교각의 자중과 슬래브교에 작용될 수 있는 상부 고정하중, 상부 활하중, 풍하중 등을 하중으로 재하하였으며, 이들 하중이 조합되어 작용될 때의 교각구조물의 부재에 발생하는 단면력을 산출하였다.²⁾

o 상부구조 풍하중

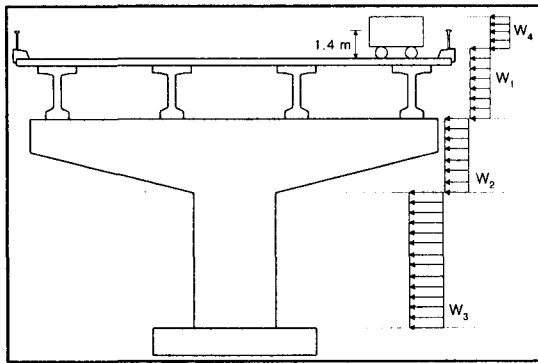


$$D = 1.35 + 0.46 + 0.4 = 2.21 \text{ m} \approx 10 \text{ m}$$

$$\therefore \frac{B}{D} = \frac{10}{2.21} = 4.53 < \frac{B}{D} < 8$$

$$\therefore \text{풍하중 } w_1 : \left[400 - 20 \times \frac{B}{D} \right] \times D = 683.8 \text{ kg/m} = 0.684 \text{ t/m}$$

○ 하부구조 풍하중(평균교장 $l = 25.3375\text{ m}$)



- 활하중 재하시
 $w_2 = 0.15\text{ t/m}^2$ (좌형)
 $w_3 = 0.075\text{ t/m}^2$ (원형)
- 활하중 비재하시
 $w_2 = 0.30\text{ t/m}^2$ (좌형)
 $w_3 = 0.15\text{ t/m}^2$ (원형)

○ 풍하중

① 활하중 재하시

$$w_1 = \frac{1}{2} \times 0.684 \times 25.3375 = 8.67\text{ t}$$

$$w_2 = 0.15\text{ t/m}^2 \times 1.8\text{ m} = 0.27\text{ (좌형)}$$

$$w_3 = 0.075\text{ t/m}^2 \times 1.8\text{ m} = 0.135\text{ (원형)}$$

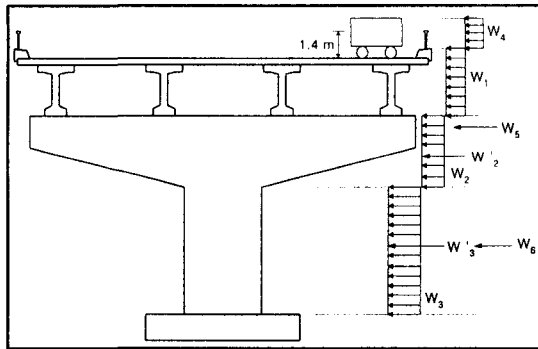
$$w_4 = 0.15 \times 25.3375 = 3.80\text{ t}$$

② 활하중 비재하시

$$w_1 = 0.684\text{ t/m} \times 25.3375 = 17.33\text{ t}$$

$$w_2 = 0.3\text{ t/m}^2 \times 1.8\text{ m} = 0.54\text{ (좌형)}$$

$$w_3 = 0.15\text{ t/m}^2 \times 1.8\text{ m} = 0.27\text{ (원형)}$$



- 활하중 비재하시
 $w_1 = 17.33\text{ t}$
 $w_2' = 0.27 \times 1.8 \times 2.4 = 1.296\text{ t}$
 $w_3' = 0.15 \times 1.8 \times 3.2 = 0.864\text{ t}$
- 활하중 재하시
 $w_1 = 8.67\text{ t}$
 $w_2' = 0.27 \times 2.4 = 0.648\text{ t}$
 $w_3' = 0.135 \times 3.2 = 0.432\text{ t} = 3.80$

○ 활하중 비재하시(L.C 5)

$$w_5 = \frac{w_1 \times (1.105 + 5.6) + w_2' \times 4.4}{5.2} = 23.44\text{ t} \quad w_6 = w_3' = 0.864\text{ t}$$

○ 활하중 재하시(L.C 6)

$$w_5 = \frac{w_1 \times 6.705 + w_2' \times 4.4 + w_4 \times (5.6 + 1.5 + 2.21)}{5.2} = 18.53\text{ t}$$

$$w_6 = w_3' = 0.432\text{ t} \quad w_3 = 0.135\text{ t/m}$$

2. 5. 하중조합

본 연구에서 교각구조물의 구조해석 시 사용한 하중들의 하중조합은 다음과 같다.

- (1) Load Case 1 (교각 자중) : 자동계산
- (2) Load Case 2 (상부 사하중 반력) : $P_z = -157.16t$ (절점 5, 9, 13, 17)
- (3) Load Case 3 (상부 활하중 반력 편측재하) : $P_z = -108.52t$ (절점 5, 9)
- (4) Load Case 4 (상부 활하중 반력 양측재하) : $P_z = -108.52t$ (절점 5, 9, 13, 17)
- (5) Load Case 5 (풍하중, 활하중 비재하시) : $w_5 = 23.44t$ $w_6 = w_3' = 0.864t$
- (6) Load Case 6 (풍하중, 활하중 재하시) : $w_5 = 18.53t$ $w_6 = w_3' = 0.432t$ $b_3 = 0.135t/m$
- (7) Load Case 7 : $1.3 \times \text{L.C. 1} + 1.3 \times \text{L.C. 2}$
- (8) Load Case 8 : $1.3 \times \text{L.C. 1} + 1.3 \times \text{L.C. 2} + 2.15 \times \text{L.C. 3}$
- (9) Load Case 9 : $1.3 \times \text{L.C. 1} + 1.3 \times \text{L.C. 2} + 2.15 \times \text{L.C. 4}$
- (10) Load Case 10 : $1.3 \times \text{L.C. 1} + 1.3 \times \text{L.C. 2} + 2.15 \times \text{L.C. 5}$
- (11) Load Case 11 : $1.3 \times \text{L.C. 1} + 1.3 \times \text{L.C. 2} + 1.3 \times \text{L.C. 3} + 1.3 \times \text{L.C. 6}$
- (12) Load Case 12 : $1.3 \times \text{L.C. 1} + 1.3 \times \text{L.C. 2} + 2.15 \times \text{L.C. 4} + 1.3 \times \text{L.C. 8}$

2. 6. 구조해석 결과

본 연구에서는 교각구조물의 구조안전성을 검토하기 위하여 각 하중경우에 대한 구조해석을 수행하였다. 구조해석 결과에 의한 교각구조물의 최대 단면력은 표 2와 같다.

표 2. 최대 단면력 집계

Load Case	Beam			Column		
	Node No.	Moment [tonf · m]	Shear Force [tonf]	Node No.	Axial Force [tonf]	Moment [tonf · m]
7	10	-899.0	367.1	1	797.5	0.0
8	10	-1441.6	584.1	1	1014.5	737.9
9	10	-1441.6	584.2	1	1231.6	0.0
10	10	-899.0	367.1	1	797.5	160.3
11	10	-1229.9	499.5	1	929.9	576.3
12	10	-1229.9	499.5	1	1062.3	126.2

3. T형 교각에 대한 구조안전성 검토

본 연구에서는 T형 교각의 구조안전성을 검토하기 위하여, 구조해석 결과를 기초로 강도설계법에 의한 휨에 대한 안전성 검토와 전단에 대한 안전성 검토를 수행하였다.³⁾

3. 1. 휨에 대한 안전성 검토

① 철근비

$$A_s (= D32@100) = \frac{7.942 \times 100}{10} \times 2(2\text{단}) = 158.84 \text{ cm}^2 \quad A'_s = \frac{1}{2} \times A_s = 79.42 \text{ cm}^2$$

$$\rho_b = 0.85 \beta_1 \frac{f_{ck}}{f_y} \frac{6000}{6000 + f_y} = 0.85 \times 0.85 \times \frac{240}{3000} \times \frac{6000}{6000 + 3000} = 0.0385$$

$$\rho_{\max} = 0.75 \rho_b = 0.0289 \quad \rho = \frac{158.84}{100 \times 230} = 0.00691 \quad \left(\frac{14}{f_y}, \frac{0.8 \sqrt{f_{ck}}}{f_y} \right)_{\min} = 0.00413$$

$\therefore \rho_{\min} < \rho < \rho_{\max}$ -----> 단철근보로 해석.

② 중립축위치 및 설계강도

$$a = \frac{A_s \cdot f_y}{0.85 f_{ck} \cdot b} = \frac{158.84 \times 3000}{0.85 \times 240 \times 100} = 23.36 \text{ cm}$$

$$M_d = \phi M_n = \phi A_s \cdot f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) = 0.85 \times 158.84 \times 3000 \times \left(230 - \frac{23.36}{2} \right) = 884.3 \text{ t} \cdot \text{m}$$

③ 계수모멘트 (DB-18하중)

· 교각자중 + 상부사하중 반력에 의한 모멘트 : $M_u = 899/1.8 = 499.4 \text{ t} \cdot \text{m}$

· 교각자중 + 상부사하중 및 활하중 반력에 의한 모멘트 : $M_u = 1441.6/1.8 = 800.9 \text{ t} \cdot \text{m}$

④ 휨에 대한 안전성 검토

$$M_d = 884.3 \text{ t} \cdot \text{m} > M_u = 800.9 \text{ t} \cdot \text{m} \quad \therefore \text{O.K}$$

3. 2. 전단에 대한 안전성 검토

① 극한전단력 V_u

· 최대 전단력 : $V_{\max} = 584.2 \text{ t}$

· 위험단면에서의 전단력 : $V_u = 334.0 \text{ t}$

② 콘크리트가 부담하는 전단강도 V_c

$$V_c = 0.53 \sqrt{f_{ck}} \cdot b_w \cdot d = 0.53 \sqrt{240} \times 100 \times 230 = 1888467.7 \text{ kg} = 188.9 \text{ t}$$

③ 전단철근이 부담하는 전단강도 V_s

· 스트립 철근 : D13, $f_y = 3000 \text{ kg/cm}^2$ (가정)

· 스트립 철근량 : $A_v = 2 \times 1.267 \text{ cm}^2 = 2.534 \text{ cm}^2$

· 스트립 간격 : $s = 20 \text{ cm}$

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} = \frac{2.534 \times 3000 \times 230}{20} = 87423.0 \text{ kgf} = 87.4 \text{ t}$$

④ 설계전단력 V_d

$$V_d = \phi \cdot V_n = \phi \cdot (V_c + V_s) = 0.8 \times (188.9 + 87.4) = 221.0 \text{ t}$$

⑤ 전단에 대한 안전성 검토

$$V_d = 221.0 \text{ t} > V_u = 334.0 \text{ t} \quad \therefore \text{N.G}$$

3. 3. 안전성 검토에 대한 고찰

교각구조물의 당초 설계하중인 DB-18 및 DL-18 하중에 대한 구조해석 검토 결과 표 3과 같은 결과를 얻었다.

표 3. 구조해석 결과정리

검토부재	Mu [tonf·m]	Md [tonf·m]	Vu [tonf]	Vd [tonf]	비고
교각 (휨)	800.9	884.3	-	-	O.K
교각 (전단)	-	-	334.0	221.0	N.G

표 3의 구조해석 결과에서, 교각의 휨에 대한 안전성 검토 결과 극한 휨모멘트는 800.9 tonf·m로서 설계 휨모멘트인 884.3 tonf·m의 약 90%로 대상 교각구조물은 휨에 대한 안전성을 확보하고 있는 것을 알 수 있다.

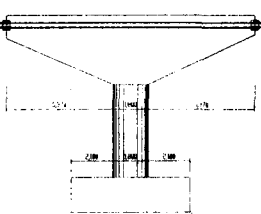
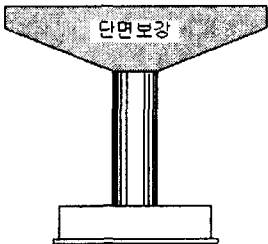
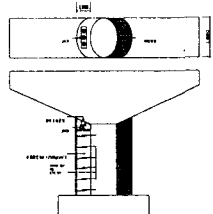
한편 전단에 대한 안전성 검토에서는 극한 전단력이 334.0 tonf으로 설계전단력인 221.0 tonf을 넘어서고 있어 불안전함을 알 수 있다.

4. 교각 구조물의 보수, 보강 방안

본 연구에서 검토한 대상 교각 구조물은 구조안전성 검토결과 전단에 대한 안전성이 부족한 것으로 나타났으며, 이는 대상 교각 구조물에 0.2~0.3mm 정도의 균열이 평균 50cm 간격으로 다수 분포하고 특히 사인장 균열이 코핑부 높이의 반 정도까지 진행되어 있는 상태 외관조사 결과와 일치하고 있다.

이에 대해 본 연구에서는 교각 두부에 대한 보수·보강 방안들을 제시하고 각 방안들에 대한 개요와 장단점을 표 4에 비교하여 나타내었다.

표 4. 교각 두부의 보수·보강 방안

구분	제 1안 : PS 도입공법	제 2안 : 단면보강공법	제 3안 : 기둥확장공법
개요			
	PC강선을 구체 외측면에 배치하고 Prestress 를 도입시켜 교각 두부를 보강하는 방법	인장강성이 우수한 보강 재료를 교각 두부에 접착 하여 교각 두부를 보강하는 방법	상부하중의 작용점이 기둥내에 들도록 하여 상부 하중에 대한 교각의 안전도를 확보함
장단점	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 내하력 증진효과 ▶ 공정이 비교적 단순 ▶ 시공실적이 많음 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 단면보강 효과 우수 ▶ 부착 시공관리 난이 ▶ 시공실적이 적음 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 기둥 단면보강 효과 ▶ 공기가 비교적 길다 ▶ 공사비 저렴

5. 결론

본 연구에서는 교각 구조물에 대한 안전도 평가를 위하여 대상 교각 구조물에 대한 모델링, 하중 산정, 활하중 재하시와 비재하시의 풍하중 계산, 하중조합, 구조해석 및 각 하중경우에 대한 최대 단면력 집계, 휨 및 전단에 대한 안전성 검토 등을 수행하였으며, 아울러 교각에 대한 보수·보강 방안을 제시하였다.

본 연구에서 수행된 풍하중을 고려한 교각구조물의 구조안전도 평가 사례는 타 연구자들의 차후의 교각구조물 안전성 검토에 대한 기초자료로 사용될 수 있을 것으로 사료되며, 아울러 본 연구에서 제시할 교각 구조물에 대한 보수·보강 공법은 구조안전도 평가 결과가 불리한 교각구조물의 안전도 확보를 위한 대책으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. "SAP 2000 Nonlinear Structural Analysis User Manual", Computer & Structures Inc.
2. "도로교 표준시방서-설계/시공 및 유지관리편", 건설교통부, 1996, pp. 56~65.
3. "콘크리트 구조설계기준", 건설교통부, 1999, pp. 106~110.