

해상 Crane용 Guide Frame의 안정성에 관한 연구

A Study on Stability Hanging Guide Frame used in Floating Crane

장 동 일* · 민 인 기**

Dong-Il Chang · In-Ki Min

(1998년 11월 11일 접수, 1999년 3월 8일 채택)

ABSTRACT

In this paper, a damaged example of hanging guide frame used in the lifting of shore protection caisson was investigated. An examination of the stress and stability of members was carried out by structural analysis and the causes of damages was investigated. The stability analysis considering local and global stress buckling was performed. As a result of stability analysis, the first structure was unstable structure. Therefore improved structure was examined and the best effective methodology was the reassignment of wire.

1. 서 론

현대문명이 발달함에 따라 지역적 제한성을 극복하기 위한 노력으로 해안·도서지방의 개발이 진행되어 점차 연도교, 연육교 등의 장대교량의 시공이 빈번해 지고 있다. 또 우리 나라는 해안선이 길고 자원이 부족하여 무역의존도가 높기 때문에 항구, 방파제, 호안 등의 항만시설물의 필요가 증가하고 대형화되고 있다. 따라서 해양 크레인선을 이용한 해양 구조물의 인양 및 거처가 빈번하게 발생하고 있다.

해양 크레인을 사용한 공사의 경우, 구조물의 변형을 방지하기 위하여 구조물과 crane hook 사이에 hanging guide frame을 사용한다(Fig. 1). 이 guide frame은 지상으로부터 지지된 구조물과는 달리, crane hook에 휨강성이 없는 wire에 지지되어 있으므로 작은 수평방향의 외력에도 큰 변위를 일으켜 불안정한 구조가 될 가능성이 많다.

본 연구에서는 아산항기지 호안케이슨의 운반시 사용된 guide frame의 손상사례에 대하여 살펴 보고, 구조해석을 통한 부재들의 응력해석

* 한양대학교 지구환경건설공학부

** 대림산업(주) 기술연구소

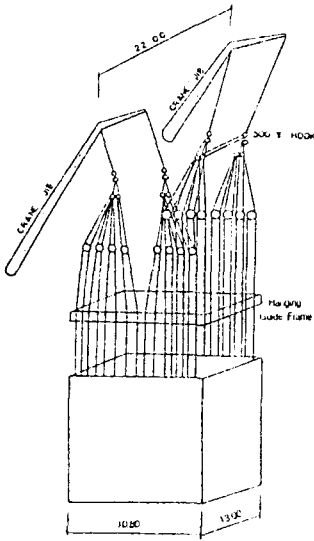


Fig. 1 Construction plan

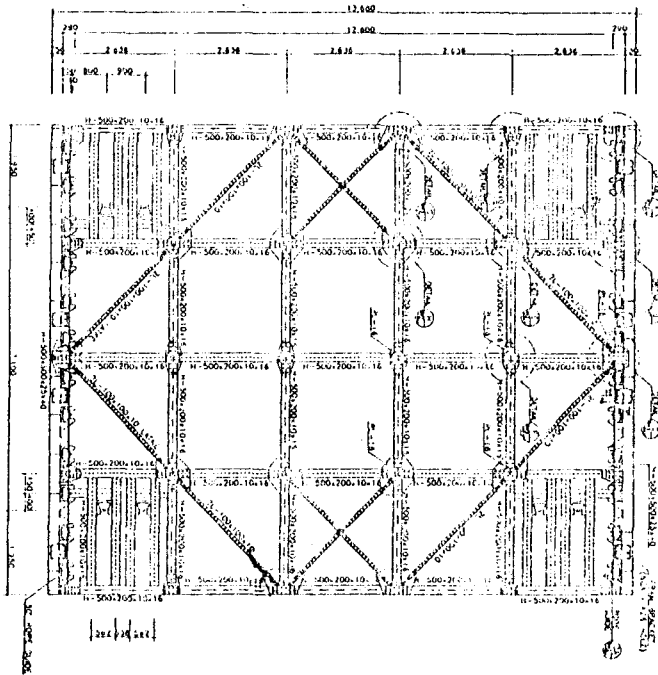


Fig. 2 Guide frame general (1/4)

Table 1 Member properties

구분	단면적 (m ²)	단위부재 (kg/cm)	단면2차모멘트(m ⁴)		단면2차반경(cm)		단면계수(m ³)	
			Ix	Iy	kx	ky	Zx	Zy
H-500×500×25×40	505.00	396.43	227568.33	83388.02	21.23	12.85	9102.73	3335.52
H-500×200×10×16	114.20	98.60	47800	2140	20.50	4.33	1910	214
L-100×100×10	19.00	14.90	175	175	3.03	3.03	7.33	7.33
Wire-φ40			79.90		79.90		15.98	

및 안정성 검토를 수행하여 손상원인을 규명하고, 이를 토대로 guide frame의 안정성 확보에 유리한 구조를 제시해 보고자 한다. 응력해석과 안정성 검토는 부재의 국부좌굴 및 전체좌굴을 고려하여 수행하였다.

2. 손상개요

인양구조물은 Fig. 3과 같이 폭 13m, 높이 17.6m, 길이 10.8m, 중량 1414 ton의 케이슨이고, guide frame은 Fig. 2와 같이 테두리 11m×13.6m의 주부재와 주부재 사이를 이동 가능한 부부재로 구성되어 있어 여러 형태의 구조물에 적용

이 가능한 구조이다. 와이어 가이드 위치의 부재는 H형강(H-500×500×25×40)를 사용하였고, 조금구 인양용 Rug 위치와 수직 수평재는 H형강(H-500×200×10×16)를 사용하였다. 또한, 조금구의 면내좌굴을 방지하기 위하여 앵글(L-100×100×10)를 Fig. 2와 같이 보강하였다. Table 1에 사용한 부재의 구체적인 재원을 나타내었다. 본 사례에서는 인양하중을 다단계로 증가시키고 안정성을 검사하면서 서서히 인양하던 중 rug가 위치한 부재에서 Photo. 1과 같이 좌굴이 발생하였다.

3. 손상원인 분석

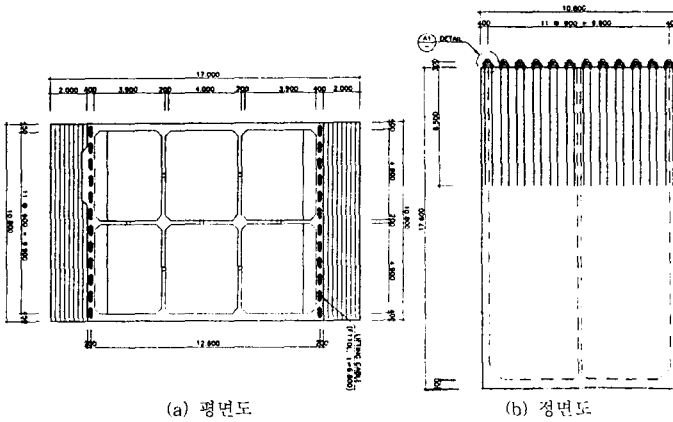


Fig. 3 Caisson plan

Fig. 4 Caisson wire tensions

Table 2 Force vectors on guide frame

구분	좌표(x,y,z)	\vec{RH}_i	\vec{RH}_i	\vec{T}_{RH}	\vec{T}_{RH}	\vec{T}_{RV}	$\vec{T}_{RH} + \vec{T}_{RV}$
1번	R(-6.59,4.95,0)	459i+6.05j+20k	21.393	63.609	13.648i+17.990j+59.467k	-64.609k	13.648i+17.990j-4.142k
2번	R(-6.59,4.05,0)	459i+6.95i+20k	21.665	63.609	13.476i+20.405j+58.721k	-64.609k	13.476i+20.405j-4.888k
3번	R(-6.59,3.15,0)	459i+7.85i+20k	21.970	63.609	13.289i+22.728j+57.905k	-64.609k	13.289i+22.728j-5.704k
4번	R(-6.59,2.25,0)	459i+8.75i+20k	22.308	63.609	13.088i+24.950j+57.028k	-64.609k	13.088i+24.950j-6.581k
5번	R(-6.59,1.35,0)	459i+9.65i+20k	22.676	63.609	12.876i+27.070j+56.102k	-64.609k	12.876i+27.070j-7.507k
6번	R(-6.59,0.45,0)	459i+10.55i+20k	23.073	63.609	12.654i+29.085j+55.137k	-64.609k	12.654i+29.085j-8.472k
Hook	H(2.11,20)						

\vec{RH}_i, \vec{RH}_i : Rope Guide와 Hook의 방향벡터. 값이

3.1 작용하중

3.1.1 Wire 작용하중

케이스의 중량(W)은 본체자중(W_{self})과 매입 와이어, 들고리(Rug) 등의 부가중량(W_{sub})으로 자중의 5%와 인양시 발생하는 케이스와 작업장의 저면부착력(W_{ad} , 부착계수 0.3)의 합이다.

$$\begin{aligned}
 W &= W_{self} + W_{sub} + W_{ad} \\
 &= 1414.00 + 0.05 \times 1414.00 + 0.3 \times 10.8 \times 13.00 \\
 &= 1526.82 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

Wire가 같은 장력을 유지하도록 crane의 each hook과 케이스 인양용 wire 사이에 도르래를 이용한다. 따라서 wire 1개가 분담하는 하중은 64.609 ton(1526.82/24)이다.

3.1.2 Guide frame이 받는 하중

각각의 wire가 guide frame의 rope guide에 작용하는 하중을 정확하게 산정하기 위하여

rope guide의 양방향 장력을 벡터량으로 환산한 다음 합력을 구하여 guide frame에 작용하는 하중을 산출하기 위한 그림은 Fig. 4, 결과는 Table 2와 같다.

3.2 해석모델

Hook의 자유도를 고정하고 wire의 강성이 변하지 않는 것으로 모델링하면 wire의 장력들이 다르게 되어 부정확한 해석이 된다. 이는 wire가 도르래에 의해 장력 재조정을 하기 때문이다. Wire의 장력을 재조정할 수 있는 특별한 요소를 사용해야 하지만 시행착오법으로 wire의 강성을 재조정하여 모든 wire의 장력이 같게 해석하였다. 해석모델은 Fig. 5와 같다.

3.3 해석결과

Table 3 Member forces (origin)

구 분	축력최대시			모멘트최대시			전단력 (V)	
	Pmax	M		P	Mmax			
		My	Mz		My	Mz		
H-500×500×25×40	+139.210	30.490	8.692				21.603	
H-500×200×10×16	수평재	-37.864	5.790	0.097	-35.527	-9.023	0.004	2.291
	Rug부	-14.966	11.996	0.020				2.949
	수직재	3.645	0.641	0.015	0.354	2.062	0.552	0.881
L-100×100×10	-3.367	0.471	0.005				0.752	
Wire-φ40	+23.828							

반적으로 1/180~1/1800의 범위⁵⁾이지만 대상구조물은 약 1/14(9.858/136.8)로 매우 크므로 설계가 부적절하다는 것을 알 수 있다.

각 부재의 부재력을 부재의 종류별로 축력 최대시와 모멘트 최대시로 대별하면 Table 3과 같다.

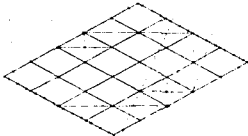


Fig. 5 Analysis model (origin)

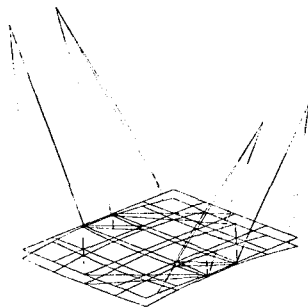


Fig. 6 Deformation (origin)

해석프로그램을 이용하여 해석한 결과, Fig. 6에서 알 수 있듯이 wire를 지지하고 있는 H형강(H-500×200×10×16)이 다른 부재에 비해 많이 변형했다. H형강 중앙부의 처짐은 2.398cm 이고, 끝단의 처짐은 12.256cm이므로 상대처짐은 12.256-2.398=9.858cm이다. 휨을 받고 있는 부재의 부재길이에 대한 처짐량의 비(δ/L)가 일

3.4 응력해석과 좌굴에 대한 안정성

3.4.1 산정식

1) 응력산정식

- 축방향력이 인장인 경우

$$\sigma_t + \sigma_{bty} + \sigma_{btz} \leq \sigma_{ta} \dots\dots\dots (1)$$

$$\sigma_t + \sigma_{bcy} + \sigma_{bcz} \leq \sigma_{cal} \dots\dots\dots (2)$$

- 축방향력이 압축인 경우

$$\sigma_c + \frac{\sigma_{bcy}}{\left[1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{Ey}}\right]} + \frac{\sigma_{bcz}}{\left[1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{Ez}}\right]} \leq \sigma_{cal} \dots\dots\dots (3)$$

2) 좌굴에 대한 안정성

- 축방향력이 인장인 경우

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_{ta}} + \frac{\sigma_{bcy}}{\sigma_{bagy}} + \frac{\sigma_{bcz}}{\sigma_{bao}} \leq 1.0 \dots\dots\dots (4)$$

- 축방향력이 압축인 경우

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{caz}} + \frac{\sigma_{bcy}}{\sigma_{bagy} \left[1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{Ey}}\right]} + \frac{\sigma_{bcz}}{\sigma_{bao} \left[1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{Ez}}\right]} \leq 1.0 \dots\dots\dots (5)$$

- σ_t, σ_c : 축방향력에 의한 인장 및 압축응력
- $\sigma_{bty}, \sigma_{btz}$: 휨모멘트에 의한 휨인장응력
- $\sigma_{bcy}, \sigma_{bcz}$: 휨모멘트에 의한 휨압축응력
- σ_{ta} : 허용축방향 인장응력

σ_{cal} : 국부좌굴에 대한 허용응력
 σ_{caoz} : 허용축방향 압축응력 ($\sigma_{caoz} = \sigma_{calz} / \sigma_{caoz}$)
 σ_{caoz} : 국부좌굴을 고려하지 않은 허용축방향 압축응력
 $-\frac{1}{r} \leq 20$ 인 경우 1400
 $-20 < \frac{1}{r} \leq 93$ 인 경우 $1400 - 8.4(l/r - 20)$
 $-93 < \frac{1}{r}$ 인 경우 $\frac{12,000,000}{6700 + (l/r)^2}$
 (6)

σ_{calz} : 국부좌굴에 대한 허용응력
 k: 회전반경(\sqrt{IA} , Table 1 참조)
 $\frac{b}{39.6f} \leq t$ 인 경우 1400
 $\frac{b}{80f} \leq t < \frac{b}{39.6f}$ 인 경우 $2,200,000 \left(\frac{tf}{b}\right)^2$
 (7)

응력구배계수(f) = $0.65\varphi^2 + 0.13\varphi + 1.0$
 응력구배(φ) = $\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1}$ (압축응력+)
 (8)

σ_{bcoz} : 국부좌굴을 고려하지 않은 허용축방향 압축응력의 상한값
 σ_{bcoz} : 국부좌굴을 고려하지 않은 허용휨압축응력
 $\frac{1}{b} \leq 4.5$ 인 경우 1400
 $4.5 < \frac{1}{b} \leq 30$ 인 경우 $1400 - 24(l/b - 4.5)$
 (9)

σ_{bco} : 국부좌굴을 고려하지 않은 허용휨압축응력의 상한값
 σ_{Ez} , σ_{Ez} : 압축부재에서의 부가적인 휨모멘트의 영향을 고려하는 허용 Euler 좌굴응력 $\left[12,000,000 / \left(\frac{l}{i}\right)^2\right]$

* 허용응력들은 가설시의 허용응력 할증 25%를 적용한다.

3.4.2 H-500×500×25×40

1) 응력검토
 축방향력 최대시의 부재력(Table 3)은 축방향

력이 인장이므로 부재의 인장응력은 식(1)로부터 596.458kg/cm²이었고 압축응력은 식(2)로부터 500.723kg/cm²로 산정되었다. 부재에 발생한 인장응력이 허용인장응력($\sigma_{ta} = 1750\text{kg/cm}^2$)보다 작았다. 식(8)의 응력구배 2.195로부터 식(7)의 응력구배계수가 6.753이므로 국부좌굴에 대한 허용응력(σ_{cal})은 조건식으로부터 1750kg/cm²이고 발생압축응력보다 크다.

모멘트 최대시 부재력(Table 3)은 축방향력이 압축이므로 축방향력과 횡방향 처짐에 의한 2차 모멘트를 고려하기 위해 Euler 좌굴응력에 대한 압축응력의 비를 적용하여 식(3)에 의해 압축응력을 산정하면 854.200kg/cm²이었다. 또한, 응력구배 1.908과 응력구배계수 3.614로부터 국부좌굴에 대한 허용응력(σ_{cal})은 1750kg/cm²이고, 압축응력 보다 작았다. 따라서 H500×500×25×40의 부재는 응력에 대하여 안정하였다.

2) 좌굴에 대한 안정성

축방향력 최대시 인장력에 대한 안정성사 평가기준인 식(4)를 이용하면 부재의 좌굴에 대한 안정성은 0.378로 1.0보다 작고, 모멘트 최대시 압축력에 대한 식(5)에 의해 산정하면 0.626으로 1.0보다 작았다. 따라서 H500×500×25×40의 부재는 좌굴에 대하여 안정하였다.

3.4.3 H500×200×10×16

1) 응력검토

Table 3의 부재력 중에서 rug부가 가장 크고, 최대 축력과 최대 모멘트가 같은 부재에서 발생하였다. 축방향력이 압축이므로 Euler 좌굴응력에 대한 압축응력의 비를 적용하여 식(3)에 의해 압축응력을 산정하면 3699.584kg/cm²이었다. 이는 허용압축응력의 상한값(σ_{cao}) 1750kg/cm²을 크게 초과한 것이라고 볼 수 있다.

2) 좌굴에 대한 안정성

축방향력이 압축이므로 좌굴안정성을 검사기 위해 식5를 적용하면 2.156으로 1.0을 크게 상회하여 좌굴에 대하여 불안정하였다. 이것은 처짐형상으로부터 알 수 있듯이 케이스 lifting용 wire는 guide frame의 H-500×500×25×40 부재에 Table 2와 같이 3분력으로 집중되어 있는 반면 guide frame lifting용 wire는 H-500×200×10×16에 연결되어 있기 때문에 H-500×500

×25×40부재의 전단력이 H-500×200×10×16 부재에 큰 휨변형을 일으켜 허용응력이 초과되어 부재가 좌굴된 것으로 판단된다.

3.4.4 Wire의 안정성

도르레의 장력재조정과 guide frame의 대칭성으로 wire의 장력은 모두 24.231ton이었다. 사용된 ϕ40 wire의 파단강도는 79.90ton으로 안전율 5를 적용하여 허용하중을 산정하면 15.98 ton으로 사용장력이 약 52%를 초과하고 있다. 물론 사용장력이 파단강도 보다는 작지만, 반복되는 작업으로 인해 wire gripe의 풀림이나 일부 wire 소선의 절단으로 인한 단면감소 등으로 파단강도의 저하가 우려되는 경우에는 wire가 절단될 수도 있으므로, wire의 장력이 허용장력 이하가 되도록 하여야 한다.

4. 보강대책

4.1 부재의 보강

H-500×200×10×16 부재를 H-500×500×25×40으로 치환하여 안정검토를 수행한다. 부재의 강성이 증가하므로 모멘트의 재분배가 되므로 정확한 부재력을 산정하기 위하여 재해석하여야 하나 근사적으로 기존의 부재력을 사용하였다.

Euler 좌굴응력, 응력구배, 응력구배계수 등을 계산정하여 검사식에 적용하면 압축응력은 2093.164kg/cm²로 보강전 보다는 작아졌지만 허용압축응력의 상한값(σ_{cao}) 1750kg/cm²을 초과하였고 SS400강의 항복기준점인 2400kg/cm²에 근접하였다.

허용축방향 압축응력과 허용휨 압축응력을 계산정하여 식(5)를 적용면 1.677로 좌굴에 불안정하였다. 따라서 하중점부재보다 더 큰 강강성을 가진 부재로 보강하여야 하나, 이는 효과적인 보강방법이 아니다.

4.2 Wire의 재배치

케이슨 lifting wire의 3분력 중 수직방향분력(Fz)과 guide frame 자중의 감쇄를 유도하기 위하여 H-500×200×10×16 부재의 rug를 H-

500×500×25×40 부재로 전환배치 한다. 해석 모델은 Fig. 7과 같다.

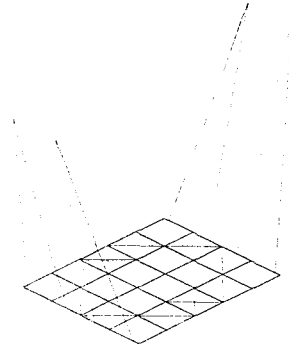


Fig. 7 Analysis model (rug change)

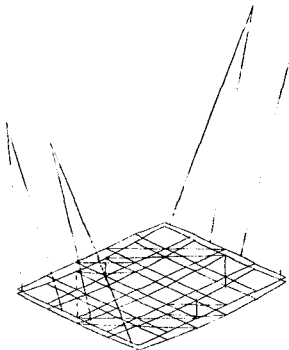


Fig. 8 Peformation (rug change)

4.2.1 해석결과

변경전의 변형도(Fig. 6)에서는 y축을 기준으로 볼록하게 변형되었지만 재해석의 변형(Fig. 8)은 오목한 형상을 나타내었다. 이것은 rug의 위치변화에 따른 당연한 결과이지만 H형강(H-500×200×10×16)의 상대처짐이 변경전에는 9.858cm인 반면 변경후의 상대처짐은 2.802cm로 매우 감소하였다. 부재길이에 대한 처짐량의 비가 약 1/50(2.802/136.8)로 1/180 ≤ δ/L ≤ 1/800의 범위 내에 있으므로 적절한 처짐이라고 사료된다. 매달기식 구조에서는 wire의 배치에 따라 구조적 안정성이 크게 좌우되므로 실제 상황과 일치하는 모델링을 통하여 구조해석을 실시한 후, 각부재가 충분한 안정성을 갖도록 wire를 배

Table 4 Member forces (rug change)

구 분	축력최대시			모멘트최대시			전단력 (V)	
	Pmax	M		P	Mmax			
		My	Mz		My	Mz		
H-500×500×25×40	+139.210	30.490	8.692				21.603	
H-500×200×10×16	수평재	-37.864	5.790	0.097	-35.527	-9.023	0.004	2.291
	Rug부	-14.966	11.996	0.020				2.949
	수직재	3.645	0.641	0.015	0.354	2.062	0.552	0.881
L-100×100×10	-3.367	0.471	0.005				0.752	
Wire-φ40	+23.828							

열해야 한다. 변경후의 부재력은 Table 4와 같다.

4.2.2 응력해석 및 좌굴안정해석

1) H-500×500×25×40

Table 4로부터 축방향력은 인장력만 발생하였고, 인장응력은 982.967kg/cm², 압축응력은 431.640kg/cm²로 산정되었다. 이는 허용응력보다 충분히 작은 값이다. 부재의 좌굴에 대한 안정성은 0.525로 1.0보다 작았다. 변경 전의 축방향 압축력이 발생시의 응력·좌굴안정성에 비하여 향상됨을 알 수 있다.

2) H500×200×10×16

Table 4의 부재력 중에서 모멘트 최대인 경우가 가장 불리할 것으로 예상된다. 이 부재력에 대해 압축응력은 816.345kg/cm²이었고, 좌굴 안정성은 0.525로 충분히 안정하였다. 변경 전에 비하여 rug의 위치변경에 따른 안정성이 확보되었다.

5. 결 론

본 논문에서는 hanging guide frame의 손상 사례에 대해 구조해석을 실시하여 응력해석 및 안정성을 분석하였고, 안정 구조를 제시하면 다음과 같다.

- 1) 일반적으로 매달기 형식의 구조에서 도르래(대차)를 사용하여 wire의 장력을 일정하게 유지된다. 범용프로그램을 이용한 구조계의 해석에서 wire의 장력을 일정하게 유지하는 것은 어렵다. Wire의 강성을 변화시켜 시행착오법으로 장력을 동일하게 조정하였다. 해

석결과 wire의 장력들의 오차는 1/1000 ton이었다.

- 2) 손상된 구조의 구조해석을 실시한 결과 들고리(rug)가 위치한 부재의 처짐이 다른 부재에 비해 크게 발생하였고, 응력과 좌굴에 대한 안정성을 평가한 결과 불안정하였다.
- 3) Guide frame의 구조적 안정성 확보를 위해 부재의 강성을 증가시켜 응력과 좌굴에 대한 안정성을 검토한 결과 당초보다는 향상되었지만 역시 불안정하였다.
- 5) Wire를 재배치하여 구조해석을 수행한 결과 부재의 상대처짐량이 2.802cm로 작아졌으며, 주부재 모두에서 응력과 좌굴에 대한 안정성도 확보되었다.

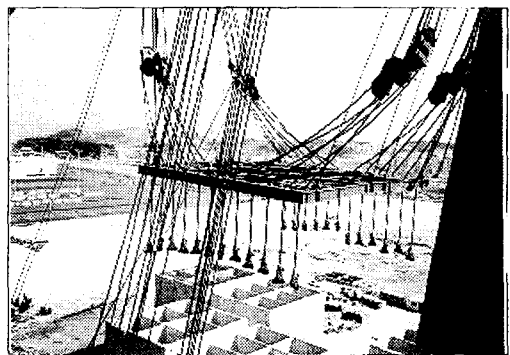


Photo. 1 Failure shape

참 고 문 헌

- 1) 건설부, "한국도로교표준시방서", 1996.
- 2) 日本土木學會編, "Design Rules for Erection

- of Steel Structure”, 1998.
- 3) 이종득, “교량가설계획·계산법”, 도서출판 일광, 1997.
 - 4) 락계환, “항만건설을 위한 케이슨 들고리의 안정성에 관한 연구”, 한국강구조학회논문집, Vol. 10, No. 1, March, 1998.
 - 5) 조효남, “강구조공학”, 구미서관, March, 1993.
-