

## 노후된 잔교식 부두의 신뢰성 및 내하력 평가 Assessment of Reliability and Load Carrying Capacity of Aged Wharf Structure of Pier Type

조 효남\*    김 성훈\*\*    김 종규\*\*\*    이 승재\*\*\*\*    최 영민\*\*\*\*\*  
Cho, Hyo-Nam Kim, Sung-Hoon Kim, Jong-Kyu Lee, Seung-Jae Choi, Young-Min

### ABSTRACT

The main objectives of the study may be stated as follows : ① the acquisition of fundamental updated data for the assessment of aged wharf structures of pier type based on systematic static/dynamic load testing ② the study of techniques and methods for field testing ③ realistic safety and load carrying capacity assessment based on practical reliability analysis.

In this study field testing of real structure is performed and the results are compared with those of the 2D and 3D linear structural analysis. It may be seen that the practical reliability methods can be applied for the safety and capacity assessment of aged wharf structures of pier type.

### 1. 서 론

지난 20~30년간 국가경제성장을 위하여 사회간접자본에 대한 투자가 집중적으로 이루어져 왔으며 이중 대량 수출입 물량을 처리할 수 있는 부두와 같은 항만구조물의 건설이 3면이 바다인 국내의 지리적 여건과 맞물려 활발히 진행되어 왔다. 항만구조물은 다른 토목구조물에 비하여 해수 및 화학물질 등 보다 열악한 자연환경에 노출될 뿐 만 아니라, 끊임없이 대형크레인, 대형화물 운반차량 및 파이프라인과 같은 상재하중과 접안선박에 의한 횡하중 등 설계하중에 가까운 대형하중을 끊임없이 받게된다.

따라서 건설된지 20~30년 이상된 부두의 경우 열화손상의 정도가 점점 심화되고 있으며 경제 성장에 따른 수출입 물량이 증가하고 있으며, 항만구조물의 건설비용이 일반구조물에 비해 엄청나다는 점 등을 감안하면 기존의 노후된 부두에 대한 안전성 및 건전성의 평가는 사회간접자본의 효율적 관리라는 측면에서 매우 중요한 실질적 분야인 것으로 사료된다. 최근 국내에서는 노후된 부두구조물에 대한 안전진단[장동일,1993 ; 이성우,1993]이 수차례 수행된 바 있으며, 본 연구에서

\* 한양대학교 토목공학과 교수  
\*\* 쌍용양회공업주식회사 연구개발본부 진단기술실 과장  
\*\*\* 쌍용양회공업주식회사 연구개발본부 진단기술실 대리  
\*\*\*\* 한양대학교 생산공학연구소 선임연구원  
\*\*\*\*\* 한양대학교 토목공학과 박사과정

는 노후된 잔교식 부두의 건전성평가를 위한 지속적이고 체계적인 연구로서 과학적 시험방법과 합리적인 신뢰성, 안전성 그리고 내하력평가 방법을 제안하고자 하는 것이다.

## 2. 잔교식 부두의 한계상태모형

부두의 강도가 휨, 전단 그리고 축력등의 어느 하나에만 지배되는 경우, 한계상태방정식은 저항  $R$ 과 고려하여야 하는 여러 하중효과  $S_i$ 의 항으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$g(\cdot) = R - \sum S_i \quad (1)$$

휨이 지배적인 경우를 예로 들면, 한계상태방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$g(\cdot) = M_R - (M_D + M_L) \quad (2)$$

여기서,  $M_R$ =실저항모멘트 ;  $M_D, M_L$ =사하중과 활하중 각각에 의한 모멘트를 나타낸다. 한편 실저항 모멘트  $M_R$ 은 노후손상계수  $D_F$ 를 도입하여 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$M_R = M_n N_M D_F \quad (3)$$

여기서,  $M_n$ =공칭모멘트;  $D_F$ =노후손상계수 ;  $N_M = M_n$ 과  $D_F$ 의 추정에 관련된 불확실량을 내포하는 랜덤변량(=MFPD); 이때,  $M$ =재료강도관련 랜덤변량;  $F$ =제작시공 관련 랜덤변량;  $P$ =해석과 모델링 관련 랜덤 변량;  $D$ =노후손상 추정관련 랜덤변량 나타낸다. 여기서 노후손상계수  $D_F = \omega_D^2 / \omega_I^2$ 로 평가할 수 있는데, 이때,  $\omega_D$ 는 손상된 현상에서의 교량의 고유진동수로서 동적재하시험을 통해 얻을 수 있으며,  $\omega_I$ 는 무손상상태에서의 고유진동수로서 공용직전 재하시험을 통해 얻은 값이 가장 바람직하지만 통상 설계도상의 무손상단면에 대한 고유진동해석으로부터 구할 수 있었다. 단순보의 경우  $\omega_I$ 는 식(4)와 같이 표현될 수 있다.

$$\omega_I = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{EIg}{wl^2}} \quad (4)$$

여기서,  $E$ =무손상상태에서의 탄성계수;  $I$ =무손상상태에서의 단면2차모멘트;  $g$ =중력가속도;  $w$ = 단 위길이당 사하중;  $l$ =길이를 나타낸다.

또한, 사하중과 활하중 각각에 의한 모멘트  $M_D, M_L$ 은 식 (5), (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_D = m_D D_n N_D \quad (5)$$

$$M_L = m_L L_n K N_L \quad (6)$$

여기서,  $m_D, m_L$ =단위사하중 및 활하중에 의한 모멘트 영향계수;  $D_n, L_n$ =공칭 사하중 및 활하중 모멘트;  $K$ =응답비=  $K_s(1+i)$ , 이때  $K_s$ =축정응력/계산응력;  $i$ =충격계수;  $N_D, N_L = D_n, L_n$

의 추정에 관련된 불확실량 및 실제 하중효과에 대한 편기를 조정하기 위한 각각의 랜덤변량을 나타낸다.

### 3. 신뢰성 및 안전성평가

#### 3.1 신뢰성평가

잔교식 부두구조물은 슬래브, 거더, 파일 등의 여러 구조요소로 이루어진 복잡한 구조시스템을 형성하고 있기 때문에 전체구조로서의 실질적인 안전도를 평가하기 위해서는 체계신뢰성해석 [Moses and Fu, 1989; Cho and others, 1993]을 수행해야 하지만 본 논문은 잔교식 부두구조물의 신뢰성해석을 위한 기초연구로서 그 범위를 휨, 전단 그리고 축력 등 단일 파괴모드만을 고려하는 경우에 대한 요소신뢰성해석에 국한하였다.

구조신뢰성은 파괴확률에 의해서 개념적으로 추정되고 수치적으로 평가될 수 있지만, 실제적으로는 구조요소나 시스템의 상대적인 보유안전율은 신뢰성지수  $\beta$ 에 의해서 가장 잘 표현될 수 있다. 한편, 파괴확률  $P_F$ 와 신뢰성지수  $\beta$ 의 관계는 다음과 같다.

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_F) \quad (7)$$

여기서,  $P_F$ =파괴확률;  $\Phi^{-1}$ =표준정규분포함수의 역함수를 나타낸다.

신뢰성해석에는 다양한 수치해석방법이 사용될 수 있지만, 본 논문에서는 가장 간편하고 실용적인 해석기법인 AFOSM 알고리즘[Ellingwood, and others, 1980]을 사용하여 신뢰성해석을 수행하였다.

#### 3.2 안전성평가

신뢰성해석을 통해 산출된 신뢰성지수  $\beta$ 를 이용하면 공칭안전율  $n'$ 를 식 (8)과 같이 구할 수 있다.

$$n' = \frac{\eta_s}{\eta_R} \exp[ \beta \sqrt{(V_R^2 + V_S^2)} ] \quad (8)$$

여기서,  $\eta_R, \eta_s$ =저항 및 하중의 평균공칭비;  $V_R, V_S$  = 저항 및 하중의 변동계수를 나타낸다.

이와 같이 산출된 공칭안전율은 허용용력설계법에서 사용하는 재료안전율과는 달리 하중과 저항의 불확실량과 구조물의 실제상태를 고려한 실질적 안전율로서 실무자가 이해하기 쉬운 구조안전도의 개념으로 사료된다.

### 4. 내하력평가

내하력 평가를 위하여 기존에 사용되어오던 허용용력법과 하중계수법은 단면의 손상정도와 실 하중 및 실저항 관련 불확실량의 정도, 측정용력에 대한 응답비 등을 명확하게 포함시키지 못하기 때문에 실제적인 내하력평가가 어려운 것으로 사료된다. 따라서 손상된 구조물의 실 저항강도와 관련된 손상계수( $D_F$ )와 재하시험에 의한 실응답비( $K$ )를 명확하게 포함시킨 개선된 방법에 의한 내하력평가가 합리적인 것으로 사료되며 이 방법을 다음에 간단히 정리하였다.

· 허용응력법(WSR ; Working Stress Rating)

$$RF = \frac{P_n}{P_L} = \frac{\sigma_a D_F - \sigma_D}{\sigma_L K} \quad (9)$$

$$P_n = P_L \times RF \quad (10)$$

· 하중-저항계수법(LRFR : Load and Resistance Factor Rating)

$$RF = \frac{\phi' D_F R_n - \gamma_D' c_D D_n}{\gamma_L' c_L K} \quad (11)$$

$$RF = \frac{P_n}{P_r} \quad (12)$$

여기서,  $RF$ =내하율;  $\sigma_a$ =허용응력;  $\sigma_D, \sigma_L$ =사항중 및 활하중 응력;  $P_n$ =공용내하력;  $P_L$ =판정하중;  $\phi', \gamma_D', \gamma_L'$  =각각 공칭저항, 사하중 및 활하중 관련 안전계수;  $c_D, c_L$  = 단위사하중 및 활하중에 의한 영향계수를 나타낸다.

이때,  $\phi', \gamma_D', \gamma_L'$  등은 저항 및 하중관련 안전모수들로서 신뢰성이론에 근거하여 현행시방서의 안전수준을 점검한 후 공학적 판단하에 구조형식별로 code calibration을 실시하여 결정되는 값이지만 본 논문에서는 최근 도로교시방서의 강도설계법에서 채택한 안전규정에 따라  $\phi_f = 0.85, \phi_v = 0.70, \gamma_D = 1.3, \gamma_L = 2.15$ 를 사용하였다.

## 5. 적용예

### 5.1 대상구조물

본 연구의 대상구조물은 전남여천시 소재 낙포부두로서 표 1에는 부두의 개요, 그림 1, 2에는 부두의 평면과 시험이 수행된 블럭단면을 나타내었다.

### 5.2 시험내용

#### 5.2.1 센서 부착위치

구조물의 부재별 정, 동적 거동특성을 파악하기 위해서 변형계이지와 변위계, 그리고 가속도계를 설치하였으며 부착위치는 그림 3에 나타내었다. 블럭간의 상대적변위나 블럭의 횡변위를 측정하기 위해서는 레이저데오돌라이트와 비디오카메라를 이용하였으며 변위계를 이용하여 파일코평부에 대한 거더나 슬래브의 상대적 처짐을 측정하였다. 또한 파일의 경우 축력 뿐만 아니라 휨에 의한 변형을 고찰하기 위하여 변형계이지를 4면에 부착하였다.

표 1. 부두의 개요

시설명	제 1 선석	제 2, 3 선석	제 4 선석	제 5 선석	
소재지	전남 여천시				
형식	잔교식				
준공연도	1974년	1974년	1974년	1979년	
재원	연장	110m	2 @ 210m	268m	270m
	폭	18m, 30m	30m	30m	30m
	선석	3000DWT×1	20000DWT×2	50000DWT	50000DWT

### 5.2.3 정적재하시험

정적재하시험에서는 크레인, 트럭을 사용하여 최대처짐, 최대전단력, 최대휨모멘트 등 응답의 획득 목적에 따라 각각의 load case로 나누어 재하시험을 실시하였으며 각 load case에 대해 pile, 거더, 슬래브의 변위 및 변형율을 측정하였다. 표 2에는 정적시험의 종류 및 측정내용을 나타내었다.

표 2. 정적시험 종류 및 내용

정적시험종류	측정항목	시험내용
차량 재하시험	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 슬래브의 휨응답</li> <li>• 횡거더의 휨응답, 처짐응답</li> </ul>	차량재하시험별 정적응답
크레인 재하시험	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 종/횡거더의 휨응답</li> <li>• 파일의 휨 및 처짐응답</li> </ul>	크레인 재하시험에 의한 정적응답

### 5.2.4 동적재하시험

대상간교에 동적인 외력을 가하는 방법으로서 크레인 주행시험, 차량주행시험, 차량충격시험 및 선박충격시험 등이 검토되었으나, 본 시험에서는 대형선박의 운용에 따른 현지의 제반 여건상 선박충격시험은 실시하지 못하였다.

크레인 이동시험에서는 크레인을 지정속도로 주행궤도상을 이동하였으며 차량주행시험에서는 속도를 5 km/h 부터 최대 60 km/h까지 단계적으로 실시하였고, 차량충격시험은 20, 40, 60km/h에 대해 각목을 이용하여 수행하였다. 표 3에 동적재하시험의 종류 및 내용을 요약하였다.

표 3. 동적재하시험 종류 및 내용

동적시험종류	측정항목	시험내용
크레인 이동시험	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 상판 및 거더의 동적처짐 및 변형율</li> <li>• 상판/거더의 가속도</li> <li>• Pile의 동적변형율</li> </ul>	크레인 운행구역의 크레인 이동간 동적응답계측
차량주행/충격시험	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 상판 및 거더의 동적처짐 및 변형율</li> <li>• 상판/거더의 가속도</li> <li>• Pile의 동적변형율</li> </ul>	만제트럭의 속도별 주행 및 각목 충격에 의한 응답계측
선박충격시험	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pile의 동적처짐</li> <li>• 횡변위</li> <li>• 횡방향 가속도</li> </ul>	50000DWT의 접안시 동적응답 계측

### 5.3 구조해석 및 시험결과 분석

본 연구에서는 부두의 3차원 정·동적거동을 파악하기 위하여 그림 5과 같은 구조해석모델을 적용하였으며 특히 슬래브의 거동을 고찰하기 위하여 부구조해석 모델을 그림 6과 같이 적용하였다. 구조해석 프로그램은 범용 패키지인 Algor Super Sap을 사용하였다. 표 4에는 구조해석을 통한 구조요소별 응답비와 노후손상계수를 수록하였다.

### 5.4 내하력 / 안전성 / 신뢰성해석

대상구조물에 대한 내하력/안전성/신뢰성평가 결과를 요약하면 표 5과 같다. 표 5로부터 종거더의 신축이음부는 휨에 대하여  $RF=0.47$ ,  $\beta=1.2$ ,  $n' =0.7$ 로서 내하력 및 안전성이 크게 저하되어 있는 상태로서 외관조사에 의한 결과와 부합되고 있음을 알 수 있었다.



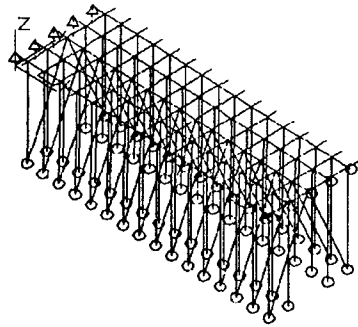


그림 5. 3차원 구조해석 모형

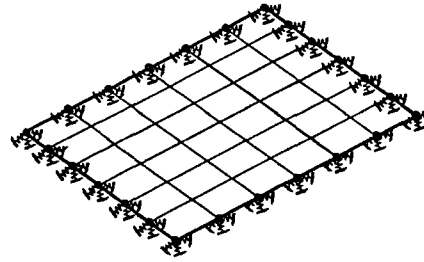


그림 6. 슬래브의 부구조해석 모델

표 4. 응답비, 충격계수, 노후손상계수

구분		응답비 $K_S$	노후손상계수 $D_F$
Pile	직항	0.85	1.0
	사항	1.88	1.0
중거더	일반부	1.47	0.9
	신축이음부	0.92	0.5
횡거더		0.99	0.9

표 5. 내하력 / 안전성 / 신뢰성해석 결과

내하력 평가		재래적인 방법						개선된 재래적방법						신뢰성방법	
		WSD			LFR			WSR			LRFR			신뢰성 지수 ( $\beta$ )	공칭 안전율 ( $n'$ )
		휨	전단	축력	휨	전단	축력	휨	전단	축력	휨	전단	축력		
중거더	일반부	2.97	1.25	-	2.91	1.3	-	1.20	2.40	-	1.74	1.68	-	3.8	2.6
	신축이음부	0.63	1.18	-	1.06	1.62	-	0.28	1.21	-	0.47	1.11	-	1.2	0.7
횡거더	일반부	3.12	6.09	-	4.81	3.94	-	2.7	11.7	-	4.16	4.91	-	4.5	3.1
파일	직항	-	-	3.38	-	-	3.54	-	-	2.96	-	-	4.16	4.8	3.2
	사항 (120t)	-	-	6.85	-	-	2.28	-	-	1.68	-	-	1.22	3.5	2.3

## 5. 결론

본 연구에서는 체계적 정·동적 시험 및 2D, 3D 구조해석을 바탕으로 노후된 잔교식 부두구조물의 수직하중에 대한 안전성 및 내하력평가를 수행하였다. 실용적 신뢰성방법을 사용함으로써 잔교식 부두구조물의 신뢰성/안전성/내하력을 정량적으로 분석할 수 있었으며 보다 실제적인 안전성의 평가를 위해서는 선박충격시험 등을 통한 횡하중에 대한 안전성 평가도 수반되어야 할 것으로 사료된다.

## 6. 감사의 글

본 연구는 쌍용양회공업주식회사의 연구비 지원 및 업무보조로 수행되었는 바 이에 감사드립니다.

## 7. 참고문헌

1. Cho, H. N. , Yun, J. B., Ang, H-S. and Shinozuka, M., "A Reliability-Based Capacity Rating of Existing Bridge By Incorporating System Identification," Proc. of the Fourth Rail Bridge Centenary Conference, Dept. of Civil Eng., Heriot-Watt University, Riccarton, Edinburgh, Scotland UK, 21-23 Aug. 1990, p. 200~209
2. Cho, H. N. , Lee, S. J. and Kang, K. K. "Assessment of System Reliability and Capacity-Rating of Composite Steel Box-Girder Highway Bridges," Proc. of JSCE, No. 195/I -28, Vol. 11, No. 2, July, 1994. pp. 85s - 92s.
3. Cornell, C. A., "A Probability-Based Structural Code," Jour. of the American Concrete Institute, Vol. 66, No.12, Dec. 1969.
4. Ditlevsen, O, "Generalized Second Moment Reliability Index," J. Struct. Mech. , 7, No.4 , 1979, pp. 435~451.
5. Hasofer, A.M. and Lind, N. C. , "Exact and Invariance Secand Moment Code Format," Jour. of Eng. Mechanics Div. , ASCE, Vol. 100, 1974. pp. 829-844
6. Komatsu, Sadao and Salman, A. H., "Generalized Method for Designing Retractable Fenders System," Proc. of JSCE, No. 188, April, 1977
7. 장동일, "중흥부두 진입잔교 안전도 검사", 한양대학교 산업과학연구소, 1993. 5.
8. 조효남, 윤정방, "동특성 추정기법과 신뢰성해법에 의한 기설 교량의 내하력 판정 방법", 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집, 제 3권 제 1집(통권 제 4호), 1990. 4, p. 37~43.
9. 이성우, "호남정유 제 품부두 안전성 검토 보고서", 대림엔지니어링/국민대학교 생산기술연구소, 1993. 2. 10.