

교각의 선박충돌 설계강도

Design Strength of Bridge Piers against Ship Collision

이성로* · 배용귀**

Lee, Seong Lo · Bae, Yong Gwi

Abstract

An analysis of the AF is performed for each bridge pier exposed to ship collision. From this analysis, the impact lateral resistance can be determined for each pier. The bridge pier impact resistance is selected using a probability-based analysis procedure in which the predicted AF, from the ship collision risk assessment is compared to an acceptance criterion. In this study, the acceptance criterion is allocated to each pier using allocation weights based on the previous predictions. To determine the design impact lateral resistance of bridge components such pylon and pier, the numerical analysis is performed iteratively with the analysis variable of impact resistance ratio of pylon to pier. The design impact lateral resistance can vary greatly among the components of the same bridge, depending upon the waterway geometry, available water depth, bridge geometry, and vessel traffic characteristics.

1. 서론

우리나라는 삼면이 바다로 둘러 싸여 있고 3천개 이상의 크고 작은 섬을 갖고 있다. 이에 따라 국토의 균형개발과 산업발전에 따른 교통량의 증대로 영종대교, 광안대교, 서해대교 등 장대교량의 건설이 많아지고 있다. 장대교량의 증설과 더불어 해상 교통량도 날로 증가추세에 있어 해상교량 및 구조물의 기초가 항로상에 위치할 경우 통항 선박과의 교량의 충돌 가능성이 또한 증가하고 있다.

도로교 설계기준(2003)에서는 충돌하중에 관하여 자동차의 충돌, 유목 등의 충돌, 선박의 충돌을 고려하여야 한다고 명시되어 있으나 선박충돌의 경우 적용사례가 별로 없고, 일부 대형 해상교량의 경우에만 선박충돌에 대한 설계를 고려하고 있다.

본 연구에서는 교량 각 부재들의 연간 파괴빈도를 고려한 가중치를 이용하여 연간파괴빈도 허용기준을 분배할 때 여러 요인들이 미치는 영향을 검토하였다. 또한 선박충돌에 대한 연간파괴빈도 허용기준을 만족하는 교각의 횡방향 설계강도를 계산하여 비교 검토하였다.

2. 선박과 교량의 충돌 위험

교량은 선박의 충돌력에 대해 교각의 횡방향 내하력이 확보되도록 설계하여야 한다. 이 경우 교량의 연간 파괴빈도를 중요 교량에서는 0.0001, 보통 교량에서는 0.001을 목표로 하여 충돌위험모델(Fransen(1980), Larsen(1983))에 의해 설계 선박에 대한 교각의 단면, 교각의 위치 등이 검토된다. 교량의 극한 횡저항은 교각기초의 지지조건과 소성힌지를 고려하여 계산하며 선박충돌에 의한 교량의 붕괴확률은 Fujii(1978)가 제안한 Heinrich Ratio 접근법 또는 확률론적 접근법에 의해 계산한다. 또한, 교량 부재의 연간 파괴빈도는 식 (1)과 같이 산정하며, 전 교량에 대한 연간파괴빈도는 모든 부재의 AF를 합하여 구한다.

$$AF = N \cdot PA \cdot PG \cdot PC \quad (1)$$

*정회원, 목포대학교 건축조경토목공학부 토목공학전공 교수, E-mail : sllee@mokpo.ac.kr

**정회원, 목포대학교 대학원 토목공학과, 석사과정

- 여기서, AF : 선박 충돌에 의한 교량 부재파괴의 연간빈도
 N : 형태, 크기, 및 하중조건에 의해 분류된 수로를 이용하는 연간 선박의 수
 PA : 선박의 항로이탈확률
 PG : 항로를 이탈한 선박이 교각이나 상판과 충돌할 기하학적 확률
 PC : 항로를 이탈한 선박과 충돌할 때 교량이 파괴될 확률

2.1 항로이탈확률(PA)

항로이탈확률 PA 는 항로상에서 장애물을 피하는데 실패할 확률이다. 특히, AASHTO Guide Specification(1991)에서는 항로이탈확률의 크기를 수로굴곡부, 횡방향 흐름, 종방향 흐름, 교통밀도에 따라 수정인자로 조정하고 있으며 항로이탈확률은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$PA = (BR)(R_B)(R_C)(R_{XC})(R_D) \quad (2)$$

여기서, BR : 항로이탈의 기본율

R_B : 교량의 위치에 따른 보정계수

R_C : 선박의 통과경로에 평행한 유속에 대한 보정계수

R_{XC} : 선박의 통과경로의 직각방향 유속에 대한 보정계수

R_D : 통행선박의 밀도에 대한 보정계수

2.2 기하학적 확률(PG)

AASHTO Guide Specification에서는 역사적인 선박과 교량 충돌 데이터에 근거하여 교량 부근에서 사고 선박의 항해 방향을 모델링 할 때 정규분포를 사용하고 있으며, 분포의 표준편차 σ 는 선박의 길이와 같고 평균 μ 의 위치는 항해 수로의 중심선 이라고 가정하였다. 그림 1의 표준정규분포에서 어둡게 표시된 부분이 선박충돌시 기하학적확률이 된다.

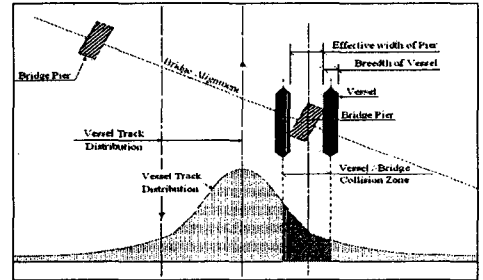


그림 1 기하학적 확률의 정의

2.3 붕괴 확률(PC)

항로를 이탈한 선박이 교량에 충돌하여 교량이 파괴될 확률(PC)은 복합적인 것으로 선박의 크기, 종류, 형태, 속도, 방향, 질량 및 충돌특성에 따라 결정된다. 또한 충돌충격하중에 저항하는 교각과 상부구조의 강성과 내하력의 특성에도 좌우된다. 교량파괴확률(PC)은 선박의 충격하중(P)에 대한 교각의 횡방향 내하력(H_P)과 경간의 횡방향 내하력(H_S)의 비율에 따라 다음과 같이 결정되며, 그림 2와 같은 분포형상을 가진다.

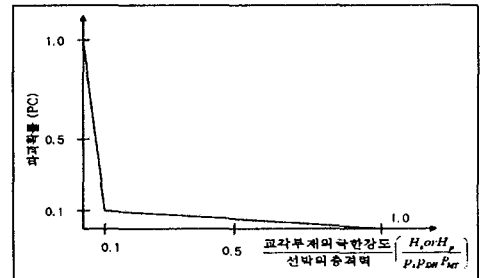


그림 2 붕괴확률의 분포

• $0.0 \leq H/P < 0.1$ 이면, $PC = 0.1 + 9(0.1 - H/P)$ (3)

• $0.1 \leq H/P < 1.0$ 이면, $PC = 0.111(1.0 - H/P)$ (4)

• $H/P \geq 1.0$ 이면, $PC = 0.0$ (5)

여기서, P : 선박충격하중

H : 수평하중에 대한 교량 구조물의 횡저항 강도 (H_P or H_S)

2.4 연간파괴빈도 허용기준

교량설계에서 선박의 충돌위험에 노출된 교각과 경간 구조부재들 간에 연간파괴빈도(AF)의 허용기준을 분배시키는 것은 설계자의 판단에 근거한다. 바람직한 방법은 주된 해석영역에 위치한 구조물의 교체 비용에 근거하거나 구조부재의 예상 연간파괴빈도를 고려한 가중치에 근거하여 교각과 경간부재에 위험도를 배분하는 것이다. 케이블 교량이나 PSC 교량에서 교각 등 부재의 붕괴가 교량 전체의 붕괴를 가져오는 직렬시스템에서의 허용기준 분배는 다음과 같이 고려할 수 있다. 직렬시스템 신뢰성해석에서 시스템의 허용 연간파괴빈도는 요소의 허용 연간파괴빈도의 합이 된다.

$$AF_s^* = \sum w_i AF_i^* \tag{6}$$

여기서, AF_s^* : 시스템의 허용 연간파괴빈도

AF_i^* : 요소 i의 허용 연간파괴빈도

요소 i의 가중치 w_i 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$w_i = \frac{AF_i}{\sum AF_i} \tag{7}$$

여기서, $AF_i = N \cdot PA \cdot PG \cdot PC$

3. 선박 충돌 위험도 평가

3.1 교량 제원

해석에 사용된 교량은 그림 3과 같은 3경간 연속 타정식 현수교로 총연장 1,620m, 주경간교의 연장 900m(200+500+200)의 강상판 상형교이다. 설계선박은 50,000톤, 수로의 폭은 250m이며 교량에 수직으로 통행하도록 설계되어 있다. 하부구조는 우물통 기초위에 주탑이나 교각이 위치하여 주탑부의 경우 지름 20m, 교각부의 경우 지름 14m로 가정하였다. 교량의 중요도 등급은 “중요”로 가정하였다.

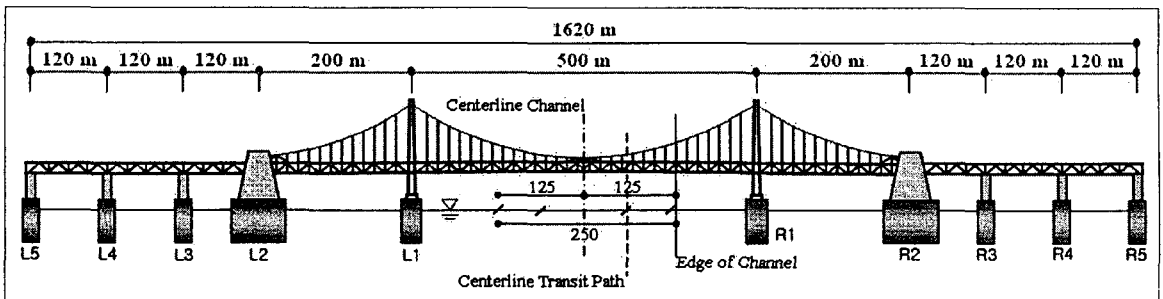


그림 3 교량 일반도

3.2 연간파괴빈도

동일한 교량에 대하여 선박의 연간운행 횟수(N)와 선박의 항로이탈확률(PA)은 같은 값을 가지지만 선박충돌의 기하학적 확률(PG)과 붕괴확률(PC)은 교량 중심으로부터 거리와 교각의 강도에 따라 다른 값을 가지게 된다. 선박의 연간운행횟수는 100으로 가정하였으며 항로이탈확률은 식 (2)에 의해 0.0001051로 계산되었다. 다음의 표 1은 기하학적 확률과 붕괴확률을 고려한 선박충돌시 연간파괴빈도 및 허용기준의 분배과정을 나타내고 있다.

3.3 주탑의 설계강도 산정

위와 같이 설계자는 교량의 형상이나 위치 등에 따라서 목적에 부합하는 AF분배모델을 만들어 낼

수 있다. 그러나 이러한 과정을 거치지 않고 케이블 교량의 특수성을 감안하여 주탑에만 전체 허용기준을 분배하는 모델을 사용할 수도 있다. 본 연구에서는 위의 두가지 경우에 대하여 교량의 길이변화와 그에 따른 부재의 위치 및 수로 폭의 변화에 의한 영향을 네가지로 구분·검토하였다. 먼저 Case I은 수로의 폭, 보조경간장은 변하지 않고 주경간장만 늘어나는 경우이며 Case II는 수로의 폭은 변하지 않고, 주경간장이 변함에 따라 보조경간장이 주경간장의 1/2.5로 늘어나는 경우를, Case III은 보조경간장은 변하지 않고, 주경간장이 변함에 따라 수로의 폭이 주경간의 1/2로 늘어나는 경우를, Case IV는 주경간장이 늘어남에 따라 보조경간장 및 수로의 폭이 Case II, Case III과 같은 형태로 늘어나는 경우를 표현하였다. 다음의 표 2는 주경간장이 길어짐에 따른 주탑 설계강도와 감소정도를 나타낸 것으로 주탑집중 분배모델의 설계강도는 AF분배모델의 86.9%정도의 값을 가진다.

표 1 선박충돌시 연간파괴빈도 및 허용기준의 분배

교각	L5	L4	L3	L2	L1	R1	R2	R3	R4	R5
PG	0.0005	0.0027	0.0106	0.0313	0.1070	0.1070	0.0313	0.0106	0.0027	0.0005
PC	0.0000	0.0171	0.0765	0.0899	0.0853	0.0853	0.0899	0.0765	0.0171	0.0000
AF _{calculate}	0	4.9E-7	8.6E-6	3.0E-5	9.6E-5	9.6E-5	3.0E-5	8.6E-6	4.9E-7	0
AF _{allocate}	0	1.8E-7	3.2E-6	1.1E-5	3.6E-5	3.6E-5	1.1E-5	3.2E-6	1.8E-7	0

표 2 주경간장의 길이변화에 따른 주탑의 설계강도 변화

분배모델	주경간장(m)	Case I (MN)	Case II (MN)	Case III (MN)	Case IV (MN)
AF분배모델	500	148.81	148.81	148.81	148.81
	550	133.27(89.6%)	130.85(87.9%)	138.59(93.1%)	136.17(91.5%)
	600	116.72(78.4%)	111.81(75.1%)	127.60(85.8%)	122.71(82.5%)
주탑집중 분배모델	500	129.29	129.29	129.29	129.29
	550	114.30(88.4%)	114.30(88.4%)	119.30(92.3%)	119.30(92.3%)
	600	98.13(72.6%)	98.13(72.6%)	108.47(83.9%)	108.47(83.9%)

4. 결론

선박충돌에 교각의 수평내하력은 선박충돌 위험도 평가로부터 예측된 연간파괴빈도가 분배모델에 의해 결정된 허용기준을 만족하도록 비교하는 확률기반 해석과정을 통해 결정된다. 케이블교를 해석에 의해 수치해석 결과에 의하면 연간파괴빈도 허용기준 분배는 교량의 구조부재별 수평저항력의 비율을 충격력비로 사용하는 경우 합리적인 형태의 분배모델을 만들 수 있다. 그리고 동일한 교량에 대해 주탑집중 분배모델을 적용할 때 주탑의 수평내하력이 AF분배모델을 적용할 경우보다 작게 평가되지만 교각의 수평내하력은 선박충격력비에 의해 결정하는 것이 합리적이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2003-000-10144-0)지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 도로교표준시방서(부록:하중저항계수설계편), 건설교통부, 1996.
2. AASHTO, Guide Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges, February, 1991.
3. Frandsen, A.G., Olsen, D., Fujii, Y. and Spangenberg, S., Ship Collision Studies for the Great Belt East Bridge, Denmark, IABSE Symposium on Bridges-Interaction between Construction Technology and Design, Leningrad, 1991.