

충돌위험분배모델을 이용한 해상교량의 설계선박 선정

Design Vessel Selection of Maritime Bridges using Collision Risk Allocation Model

이 성 로* 이 병 화** 배 용 귀***
Lee, Seong Lo · Lee, Byung Hwa · Bae, Yong Gwi

Abstract

In this study ship collision risk analysis is performed to determine the design vessel for collision impact analysis of the maritime bridge. Method II which is a more complicated probability based analysis procedure is used to select the design vessel for collision impact. The AF allocation by weights seems to be more reasonable than the pylon concentration allocation method because this AF allocation takes the design parameter characteristics quantitatively into consideration although the pylon concentration allocation method brings more economical results when the overestimated design collision strength of piers compared to the strength of pylon is moderately modified.

1. 서론

도로교 설계기준(2003)에서는 충돌하중에 관하여 자동차의 충돌, 유목 등의 충돌, 선박의 충돌을 고려하여야 한다고 명시되어 있으며, AASHTO LRFD 설계기준에서도 Method I, Method II, Method III에 의한 선박의 충돌이 예상되는 항로상에 건설되는 교량 구조물은 선박의 충돌하중에 견딜 수 있게 설계되도록 하고 있다. Method II에 의한 설계는 확률기반해석으로 선박의 형태, 크기, 및 하중조건에 의해 분류된 수로를 이용하는 연간 선박의 수, 선박의 항로이탈확률, 항로를 이탈한 선박이 교각이나 상판과 충돌할 기하학적 확률, 항로를 이탈한 선박과 충돌 시 교량이 파괴될 확률을 고려하여 교량의 선박충돌위험도를 평가하고 위험도평가 결과로부터 설계선박을 합리적으로 선정할 수 있는 방법이다.

본 연구에서는 대형 선박이 통행하는 해상교량에 있어 선박충돌위험에 노출되어 있는 교량구조부재에 대한 설계선박을 선정하는 일련의 해석적 연구를 수행하였으며, 연간파괴빈도 허용기준의 분배방법, 선박통행량 및 교각의 배치 및 항로의 특성 등에 의한 영향 검토와 Method I과 Method II에 의한 설계선박 선정 및 비교를 들 수 있다.

2. 선박과 교량의 충돌 위험

2.1 선박충돌에 의한 교량부재의 연간파괴빈도

전 세계적으로 선박과 교량의 충돌에 대한 여러 가지 형태의 위험도 평가모델이 개발되었다. 실질적으로 이 연구들은 식 (1)과 유사한 모양에 근거하는데, 이는 어떤 특정한 교량 구조부재와 관련된 교량의 연간파괴빈도 AF 를 계산하기 위한 것이며 연간파괴빈도의 역수 $1/AF$ 는 연(years) 단위의 재현기간과 같다. 교량 부재의 연간 파괴빈도는 다음과 같이 산정하며, 전 교량에 대한 연간파괴빈도는 모든 부재의 AF 를 합하여 구한다.

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

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

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

**정회원, 목포대학교 대학원 토목공학과 · 석사과정

***정회원, 목포대학교 대학원 토목공학과 · 석사과정

2.2 연간파괴빈도 허용기준의 분배

항로상의 교량은 선박의 충돌에 대해 교각의 횡방향 내하력이 확보되도록 설계되어야 하며 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.

$$AF_i^* = w_i AF_s^* \quad (2)$$

여기서, AF_s^* : 시스템의 허용 연간파괴빈도

AF_i^* : 요소 i의 허용 연간파괴빈도

요소 i의 가중치 w_i 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$w_i = \frac{AF_i}{\sum AF_i} \quad (3)$$

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

2.3 설계선박 결정

Method I에서 설계선박은 “중요교량”에 대해서는 최대선박의 통행량으로부터 50번째와 전체 통행량의 5% 중 작은 값에 해당하는 톤급이고 “보통교량”에 대해서는 최대선박의 통행량으로부터 200번째와 전체 통행량의 10% 중 작은 값에 해당하는 톤급이다.

Method II에서 설계선박은 선박충돌위험도를 고려한 확률기반 해석에 의해 결정된다. 설계자는 교량 구조물의 수평강도를 적절하게 가정하여 연간파괴빈도를 산정하게 되며, 이로부터 허용기준을 만족하는 최적의 수평강도를 찾아낼 수 있다. 합리적인 설계수평강도가 결정되면, 그 결과로부터 설계선박을 선정할 수 있다. 선정방법은 해당부재의 설계수평강도를 충격력으로 가정하고, 해당부재의 설계속도를 적용하여 등가의 적재중량톤수(DWT)를 산정하는 것으로 선박충돌해석 등의 상세해석에 사용하며 설계선박이 결정되면 선박의 DWT, 충돌속도 등에 의해 등가 정적선박충격하중을 계산한다.

3. 선박 충돌 위험도 평가

3.1 교량 제원

해석예로 사용된 교량 구조부재는 3경간 연속 사장교로 선박충돌의 위험이 있는 주요해석영역은 전체 교량구간에서 주경간교 1300m(300+700+300)를 포함하여 총 1780m의 구간으로 설정하였다. 항로쪽은 양방향 통행이 가능하도록 550m로 설정하였으며 항해하는 선박의 일반적인 평균속도는 6.17m/s, 연평균 유속은 0.15m/s로 하였다. 교량의 중요도 등급은 “중요”로 가정하였으며 하부구조의 형태는 수로의 흐름 등을 고려하여 직사각형 기초를 사용하였으며, 주탑은 25m×40m, 교각은 15m×20m로 가정하였다. 그림 1은 해석예로 사용된 교량 구조부재 단면도로 교각 부재별 위치를 번호로 구분하였다.

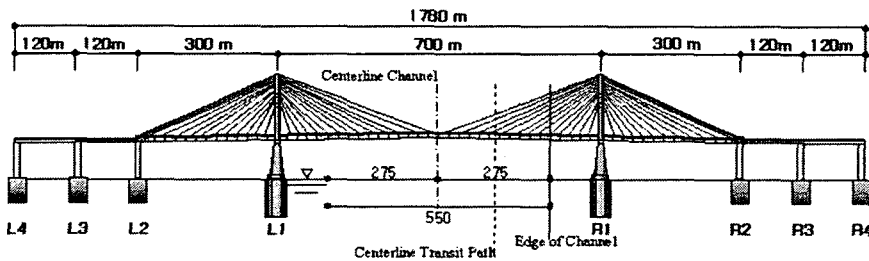


그림 1 교량 구조부재의 일반도

3.2 분배모형을 이용한 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. N은 100대로 가정하였으며, 항로이탈확률은 0.0000987로 계산되었다. 표 1은 기하학적 확률과 붕괴확률을 고려한 선박충돌 시 연간파괴빈도 및 허용기준의 분배과정을 나타내고 있다.

표 1 선박충돌 시 연간파괴빈도 및 허용기준의 분배

교각	L4	L3	L2	L1	R1	R2	R3	R4
PG	0.0035	0.0104	0.0256	0.1170	0.1170	0.0256	0.0104	0.0035
PC	0.0178	0.0712	0.0858	0.0846	0.0846	0.0858	0.0712	0.0178
$AF_{calculate}$	6.0E-7	7.3E-6	2.2E-5	9.77E-5	9.77E-5	2.2E-5	7.3E-6	6.0E-7
백분율	0.24	2.88	8.52	38.35	38.35	8.52	2.88	0.24
$AF_{allocate}$	2.0E-7	2.9E-6	8.5E-6	3.84E-5	3.84E-5	8.5E-6	2.9E-6	2.0E-7

3.3 분배모델을 적용한 통행량에 따른 설계선박 선정

기존의 연구(이성로, 2004)에 의하면 선박크기가 작은 등급의 선박통행량이 선박충돌위험도 평가에 영향을 주지 않기 때문에 본 연구에서는 국내 항만운항정보시스템에서 제공하는 인천항(2003년)의 선박톤수에 따른 통행량의 평균톤수에 대한 등급 간격을 크게 설정하고 선박통행량에 따른 분배모델을 이용하여 설계선박을 선정하였다. 표 2는 인천항의 선박통행량을 각 등급별로 대표하는 톤에 대해 분류하였다.

표 2 통행량 분류

등급별	척
14,000	1,873
30,000	1,351
53,000	139
67,000	4
93,000	83
109,000	60
합 계	3,510

설계선박은 해당부재의 설계수평강도를 충격력으로 가정하고, 설계속도를 적용하여 등가의 DWT를 산정하는 것으로 선박충돌해석 등의 상세해석에 사용한다. 각각의 부재에 대하여 설계속도를 변수로 하기 때문에 동일한 설계수평강도를 사용하는 경우 부재별로 다른 DWT를 가지게 된다. 그러나 해석에 사용된 교각에서는 L1, L2의 설계수평강도 산정 시 충격력 비를 적용하였으므로 같은 설계속도의 변수를 가지게 되며, 설계 선박의 크기 또한 거의 같다. 표 3-5는 DWT별 통행량에 따른 연간파괴빈도의 분배와 $AF_{allocate}$ 를 기준으로 하여 $AF_{allocate}$ 와 $AF_{calculate}$ 의 차를 백분율로 산정하여 동일증분에 대한 민감도를 나타낸 것이고 표 6는 수평강도 및 설계선박을 결정한 것이다.

표 3 DWT별 연간파괴빈도의 분배

DWT	교각	L4	L3	L2	L1	L1	L2	L3	L4
109000	$AF_{calculate}$	0	0	4.9E-6	2.06E-5	2.06E-5	4.9E-6	0	0
	백분율	0	0	1.97	1.97	1.97	1.97	0	0
	$AF_{allocate}$	0	0	9.5E-6	4.05E-5	4.05E-5	9.5E-6	0	0

표 4 DWT별 연간파괴빈도의 분배

DWT	교각	L4	L3	L2	L1	L1	L2	L3	L4
93000	$AF_{calculate}$	0	0	3.6E-6	1.54E-5	1.54E-5	3.6E-6	0	0
	백분율	0	0	2.63	2.63	2.63	2.63	0	0
	$AF_{allocate}$	0	0	9.5E-6	4.05E-5	4.05E-5	9.5E-6	0	0

표 5 DWT별 연간파괴빈도의 분배

DWT	교각	L4	L3	L2	L1	L1	L2	L3	L4
67000	$AF_{calculate}$	0	0	1.1E-6	4.5E-6	4.5E-6	1.1E-6	0	0
	백분율	0	0	9.01	9.01	9.01	9.01	0	0
	$AF_{allocate}$	0	0	9.6E-6	4.04E-5	4.04E-5	9.6E-6	0	0

본 연구에서는 주탑-교각에 충격력비를 고려하여 분배모델을 생성하였다. 기존연구자료(이성로, 2004)에서 각각의 다른 주탑-교각의 H_p 를 적용시킬 수 있지만 H_p 의 변화로 인해 붕괴확률(PC)이 달라지게 되어 그에 적합한 새로운 허용기준을 만들어내기 때문에 주탑보다는 교각에 분배율이 커지게 된다. 그러므로 부재별 수평저항력의 비율을 충격력비로 사용하는 경우 합리적인 형태의 분배모델을 만들 수 있으며, 이로부터 주탑-교각의 적절한 H_p 및 설계선박을 산정할 수 있다.

표 6 수평강도 및 설계선박 결정

분류	H_p (MN)	$AF_{allocate}$	$AF_{calculate}$	설계선박	충격력비
주탑(L1, R1)	160	0.0000405	0.0000405	58000 DWT	1.85:1
교각(L2, R2)	86	0.0000095	0.0000095	57800 DWT	

3.4 선박통행량 분류에 따른 설계선박 비교

Method II에 의한 확률기반해석 설계는 Method I에 의하여 가정된 초기설계선박을 가지고 시행착오법을 통하여 최종설계선박을 산정하는 것이다. 본 연구에서는 충돌위험 분배모형을 이용한 설계선박 산정 시 고려해야 할 Method I에 의한 초기설계선박을 선박통행량 분류에 따라 살펴보았다.

먼저 표 7-9는 각각 중대형 선박의 통행량 변화, 대형선박의 통행량 변화, 설계선박 선정에 따른 변화로서 케이스별로 Method I에 의한 설계선박은 두껍게 표시하였으며 통행량은 총 1000대로 가정하였다. Method II에 의한 설계선박은 그림 2-4처럼 설계선박이 선정되었으며 초기설계선박과의 차이는 전체적인 선박통행량을 축소시켜 적용하였기에 다음과 같은 결과가 나온 것이라 본다, 또한 소수의 대형선박이 설계선박 선정에 영향을 미치는 것을 알 수 있으며 Method I에 의한 초기설계선박이 설계선박 선정에 미치는 영향을 알 수 있었다.

표 7 중대형 선박통행량(DWT)

구분	10000	20000	30000	60000	90000	120000	150000	설계선박
Case I	500	300	70	110	20	0	0	32000
Case II	500	300	60	100	30	10	0	37000
Case III	500	300	50	105	20	15	10	41000
Case IV	500	300	40	115	15	15	15	44000

표 8 대형 선박통행량(DWT)

구분	10000	20000	30000	60000	90000	120000	150000	설계선박
Case I	400	200	100	100	100	90	10	63000
Case II	400	200	100	90	90	100	20	78000
Case III	400	200	100	80	80	110	30	82000
Case IV	400	200	100	70	70	120	40	86000

표 9 설계선박 선정에 따른 선박통행량(DWT)

구분	10000	20000	30000	60000	90000	120000	150000	설계선박
Case I	400	200	140	220	30	10	0	47500
Case II	400	200	140	130	90	30	10	48000
Case III	400	200	140	100	80	50	30	70000
Case IV	400	200	140	70	70	70	50	80000

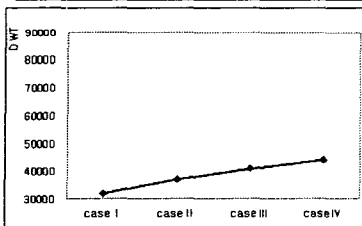


그림 2 중대형 선박통행량의 설계선박

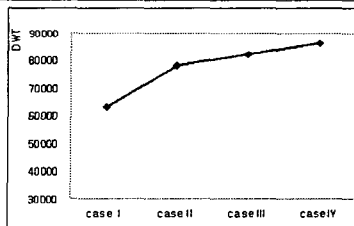


그림 3 대형 선박통행량의 설계선박

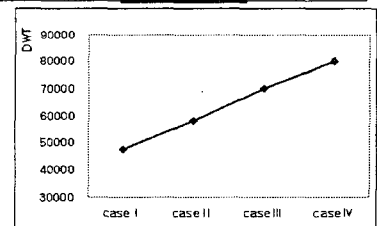


그림 4 설계선박의 선정에 따른 설계선박

4. 결론

본 연구에서는 충돌위험분배모형을 확률기반 해석과정을 통하여 선박통행량을 고려한 해상교량의 설계선박을 선정하였다. 연구 결과에 의하면 연간파괴빈도 허용기준 분배는 교량의 구조부재별 수평저항력의 비율을 충격력비로 사용하는 경우 합리적인 형태의 분배모형을 만들 수 있고, 중대형선박과 대형선박 그리고 Method I에 의한 초기설계선박의 영향성을 각각의 Case별로 살펴보았으며 해상교량의 설계선박 선정은 통행하는 선박의 통행량과 대형선박의 통행량에 많은 영향을 미치며 같은 통행량이라 할지라도 Method I에 의한 초기설계선박 선정이 최종 설계선박 선정 시 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 도로교표준시방서(1996)(부록:하중저항계수설계편), 건설교통부.
2. 이성로,배용귀(2004) 교량의 선박충돌 위험 및 교각의 설계강도. 대한토목학회 정기 학술대회, Vol.4C, 강구조학회 세미나, 대한토목학회, pp.79-88.
3. AASHTO(1991), Guide Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges.