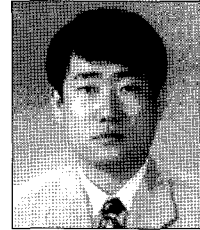


교량과 선박의 충돌해석에 관하여

A Article the for Bridge-Vessel Collision



이 계 희*

*정회원 · 목포해양대학교 해양시스템공학부 교수

1. 서 론

교량기술이 발달하면서 과거에는 선박으로만 통행이 가능했던 해상에 많은 교량들이 건설되고 이에 따라 섬의 개념이 달라지고 있다. 특히 우리나라 서남해는 세계적으로 보기 드문 리아스식 해안으로 많은 섬들이 육지 지근에 위치해 이를 연육화시키기 위한 해상교량 공사가 활발히 진행되고 있다. 그러나 이러한 해상교량은 필연적으로 교량이 놓여지는 해상을 운항하는 선박들의 항로를 방해하므로 다양한 방법으로 선박과 교량과의 충돌을 회피하지만 이러한 해상교량에서 선박과 교량의 충돌사고의 위험을 완전히 없앨 수는 없다. 선박은 빠른 속도로 이동하고 또한 토목구조물에 필적하는 큰 질량을 가지고 있으므로 이러한 선박들이 교량에 충돌하게 되면 교량의 하부나 상부구조에 치명적인 피해를 입힐 수 있다. 이런 이유로 최근 국내외에서 선박과 교량의 충돌에 관한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 선박의 충돌에 관한 연구는 조선공학에서 먼저 시작했으므로 이 부분에 대한 학문적 깊이는 조선공학이 토목공학보다 깊다고 할 수 있으나 본 기사에서는 이러한 선박과 교량의 충돌을 교량구조의 입장에서 간략히 살펴보고자 한다.

2. 충돌사고

선박과 교량의 충돌사고는 한 번 발생하면 많은 인명피해와

교량구조물의 손상을 가지고 올 수 있기 때문에 대부분의 충돌사고는 비극적인 결과를 가지고 온다. 다음 절들에서는 대표적인 충돌사고들에 대해 개략적으로 기술하였다.

2.1 국외사고사례

2.1.1 Sunshine Skyway Bridge(미국, 1980)

1980년 미국의 플로리다에서 발생한 Sunshine Sky Bridge의 붕괴사고가 가장 유명하며 이 사고로 인하여 전 세계적으로 동향 선박과 해상교량의 하부구조와의 충돌에 대한 연구가 활성화되었다. 이 사고는 안개속을 운항하던 35,000DWT의 화물선이 교각에 충돌하여 해당 경간이 붕

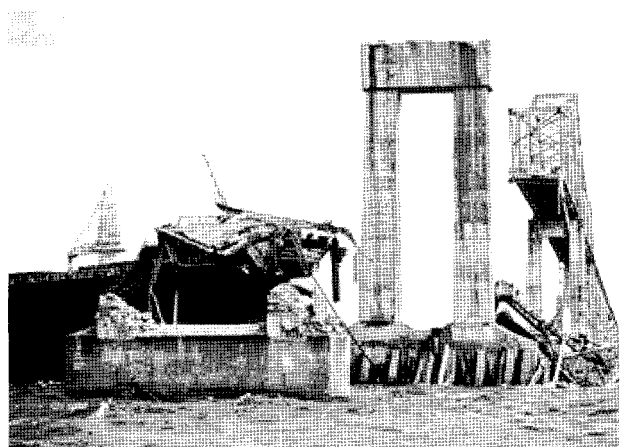


그림 1 Sunshine Skyway Bridge 사고 전경

괴되고 교량위에 있던 버스와 승용차가 바다로 추락하여 35명의 인명이 희생되었다. 이 교량은 현재 충돌방호공이 완비된 사장교로 재건설되어 사용 중에 있다.

2.1.2 Bayou Canot Railroad Bridge(미국, 1993)

1993년 미국의 Bayou Canot Railroad Bridge에서 발생한 사고로 졸음운항에 의하여 바지선과 교각이 충돌한 후 교량이 붕괴되고 약 8분후 대륙간 열차가 붕괴사실을 미처 확인하지 못하고 진입하여 모두 47명의 인명이 희생되었다(그림 2). 이 사고는 미국에서 일어난 교량붕괴사고중 가장 치명적인 사고로 이와 관련된 다큐멘터리가 별도로 제작되기도 하였다.

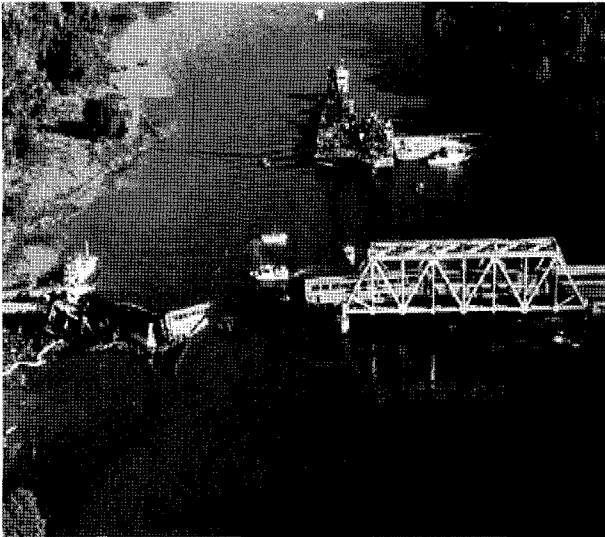


그림 2 Bayou Canot Railroad Bridge사고 전경

2.1.3 구강대교(2007, 중국)

올해 6월 15일 새벽에 일어난 사고로 중국광둥성 포산시에 위치한 구강대교에 모래운반선이 교각을 충돌하여 약 200m구간이 붕괴되었다(그림 3). 총 4대의 차량이 수



그림 3 구강대교 사고전경

중으로 낙하하여 9명이 행방불명되었다. 또한 작업중이던 인부 2명이 물에 빠져 1명만 구조되었다. 선원들은 큰 인명피해 없이 선원들이 약간 부상을 입은 정도이고, 해당교량이 지나가는 중국의 국도 325호선이 불통된 상태이다.

2.2 국내사고사례

국내에서는 대형선박이 운항하는 항로에 교량이 건설되기 시작한 것은 비교적 최근의 일이고 현재 내수면을 이용한 선박운항이 활발하지 않기 때문에 다행히 큰 인명손실이 발생한 선박과 교량의 충돌사고는 아직 일어나지 않았다. 그러나 항로상을 지나는 대형 해상교량의 건설이 증가함에 따라 크고 작은 선박충돌사고가 발생하고 있는데 이중 비교적 최근에 발생한 사고 예를 들어보면 다음과 같다.

2.2.1 신안1교충돌사고

2006년 1월13일 전남 신안군 비금도에서 목포방향으로 진행하던 선박(대흥페리)이 운항사의 부주의로 말미암아

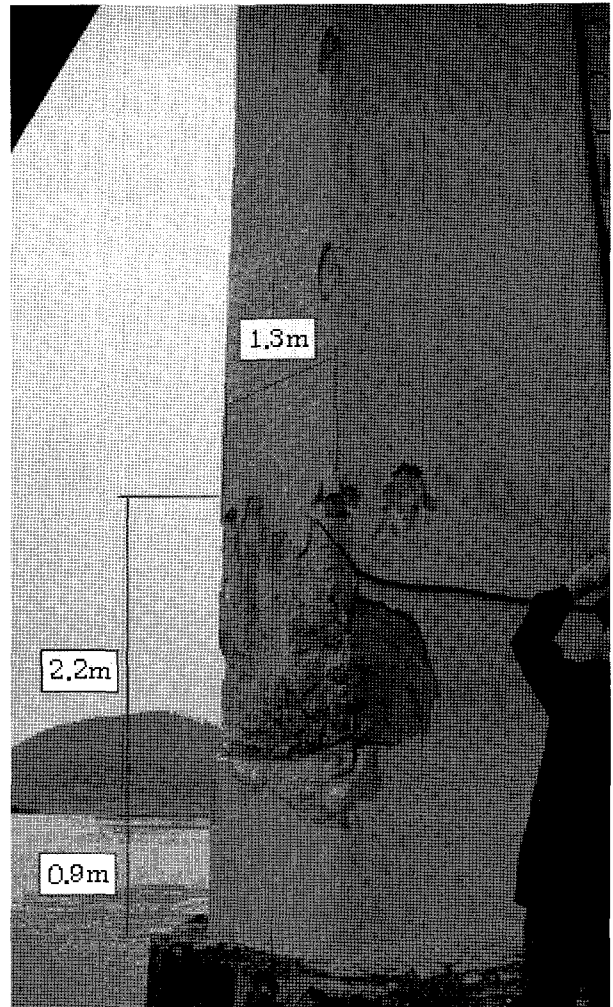


그림 4 선박의 충돌에 의한 교각의 손상

교각의 하단부에 충돌하였다. 교각 하단부 우물통 기초에서 0.9m 지점에 선박이 충돌하여 2.4m×2m, 깊이 18cm 정도의 콘크리트가 파손되어 철근이 노출되었다. 추가적으로 교각에 설치되어 있던 선박용 표시등 등이 파손되었다.

2.2.2 진도대교 충돌사고

진도대교는 우리나라에서 가장 조류가 거센 울돌목에 건설된 교량이다. 이러한 이유로 조류에 밀린 선박이 항로를 이탈하여 충돌사고가 발생하였다. 최근 2006년 8월28일 공사자재를 나르던 바지선이 조류에 밀려 진도대교의 주형에 직접 충돌하였고, 2007년 4월28일에도 공사 중인 바지선이 조류에 밀려 직접 진도대교에 충돌하였다. 일반적으로 발생하는 충돌양상인 자력 추진하던 선박이 선수

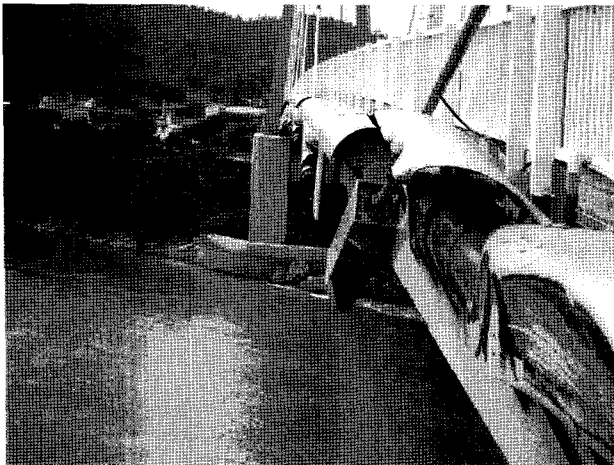


그림 5 진도대교 충돌사고(06.8.28)로 인한 내풍판의 손상형상

충돌하는 경우와는 달리 조류에 밀려 충돌이 발생한 경우로 선박의 회전거동이나 측면충돌, 표류충돌 등 현재 우리나라에서 일반적으로 준용되는 설계시방서에서 명확하게 설정되어 있지 않은 충돌현상으로 보여주었다. 따라서 선박의 다양한 충돌거동에 대한 좋은 예로 삼을 수 있다.

3. 국내외 연구현황

3.1 국외연구현황

앞에서도 잠깐 언급하였듯이 선박의 충돌에 관한 연구는 조선공학쪽에서 먼저 시작되었다. 이런 이유로 초기의 선박충돌에 대한 연구는 조선공학의 연구 성과를 이용할 수 밖에 없다. 이러한 연구들을 간략히 살펴보면 선박의 충돌거동에 대한 연구는 조선업계에서 먼저 시작되었다. 선박의 충돌에 대한 선체강도의 연구는 1950년대말 원자력선내의 용기를 타선박의 충돌로부터 보호하기 위하여 효율적인 구조를 갖추기 위한 목적으로 시작되어(Minorsky, 1959) 근래에는 원유 운반선, LNG 및 LPG 운반선 등과 같은 위험화물 운반선의 경우에 대하여 활발하게 연구되고 있다. Nagasawa(1977) 등은 연안을 항행하는 소형선박이 교각에 충돌할 때 선체 파손모드와 충돌 시 받는 하중 및 흡수에너지를 계산할 목적으로 선체부분모형과 교각모형을 이용하여 준정적으로 압괴실험을 수행하였다. Ohmishi(1982) 등은 선수구조의 최종강도를 계산하기 위하여 유효폭을 이용하여 선수구조를 끝조구조

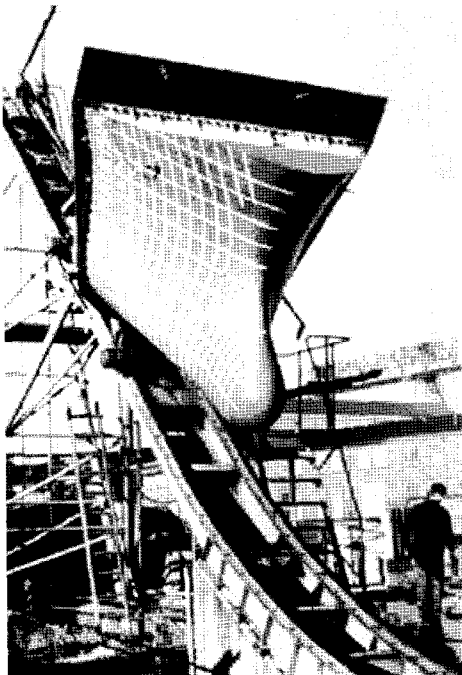


그림 6 Woison의 실험장면 및 선수의 변형형상

로 모델링하여 유한요소 해석을 수행하였다. Lee(1982,1983)는 충돌시 선박의 손상량을 운동에너지의 손실량으로 생각하여 얇은 판의 최종강도와 에너지 흡수에 관한 실험적 연구를 수행하였다. Wang(1995) 등은 선수 충돌 시 선수구조의 압괴강도 간이 계산식을 도출하였다. Paik & Pedersen(1995)은 선박과 선박의 충돌 시 이중 선체 유조선의 선측구조 해석법을 제안하였다. 해석과정은 2개의 부분, 즉 외부역학 및 내부역학의 해석으로 나누어지며 이때 외부역학은 충돌시의 운동에너지의 소실을 제공해 주며 내부역학은 충돌선의 충돌하중-변위응답을 준 것이다. Kuroiwa(1995)등은 선측 충돌실험과 실선 충돌실험 및 이중저 구조모형에 대한 실험 결과를 수치 시뮬레이션하였는데, 범용 비선형 유한요소 프로그램 코드인 LS-DYNA3D를 이용하였다. 그리고 그들은 실제충돌 및 좌초사고에 대한 수치 시뮬레이션을 수행하기도 하였다.

이들 연구 중 특히 주목할 것은 Woison의 충돌시험(1959)으로 선수의 축소모델을 비탈면에서 미끄러뜨려 선수의 충돌력을 파악하였다(그림 6). 이 결과에 기초하여 AASHTO의 설계기준에서의 일반선박의 충돌력이 산정되었다.

선박과 교량간의 충돌에서 또 하나의 큰 충돌물인 바지선의 충돌거동에 관한 연구로는 1983년에 Meier-Dönberg가 유럽형 바지선의 선수를 축소모델로 제작하고 여기에 추를 반복적으로 낙하시켜 충돌에너지와 선수모델의 변형에 대한 관계를 얻었다(Meier-Dönberg, 1983). 현재 설계기준에 반영되는 바지선에 대한 충돌관련 연구는 이 연구가 거의 유일하다(그림 7). 미국의 AASHTO 지방서에서 바지선의 충돌에 관한 부분은 이 연구의 결과를 미국의 내수면을 운항하는 유사한 크기의 바지선에 적용한 것이다.

이 연구 이후 1989년 미공병단에서 Meier-Dönberg의 시험이 갖고 있는 축소모델이라는 단점을 극복하기 위하여 실제

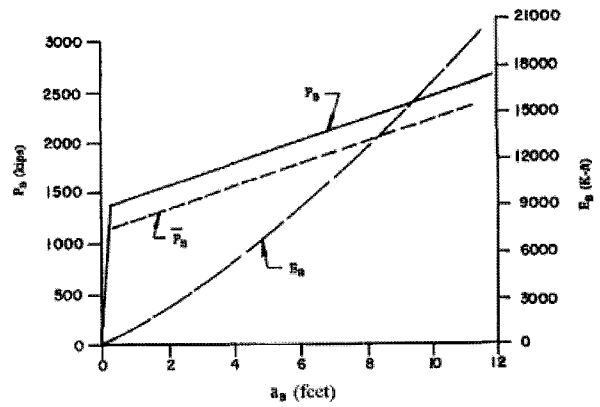


그림 7 지방서에 반영된 Meier-Dönberg의 실험결과(AASHTO, 1991)

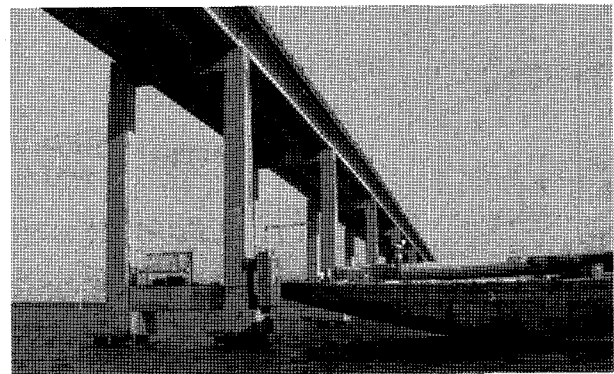


그림 8 바지선충돌시험전경(Consolazio, 2005)

바지선을 갑 문에 충돌시켜 발생하는 충돌력과 바지선의 동적 거동을 계측하였다. 그러나 이 실험의 단점은 충돌속도가 매우 낮았고(0.4knot) 충돌대상이 교량이 아닌 강체벽이라는 점이다(Goble 1990). 그 후 몇 차례 더 바지선의 충돌실험이 행해졌는데 모두 강체벽을 가정하고 충돌력과 충돌거동을 산정하였다. 2002년에 Consolazio등은 실교량에 바지선충돌 실험을 제안하고 최근까지 이를 수행하였는데, 이 연구는

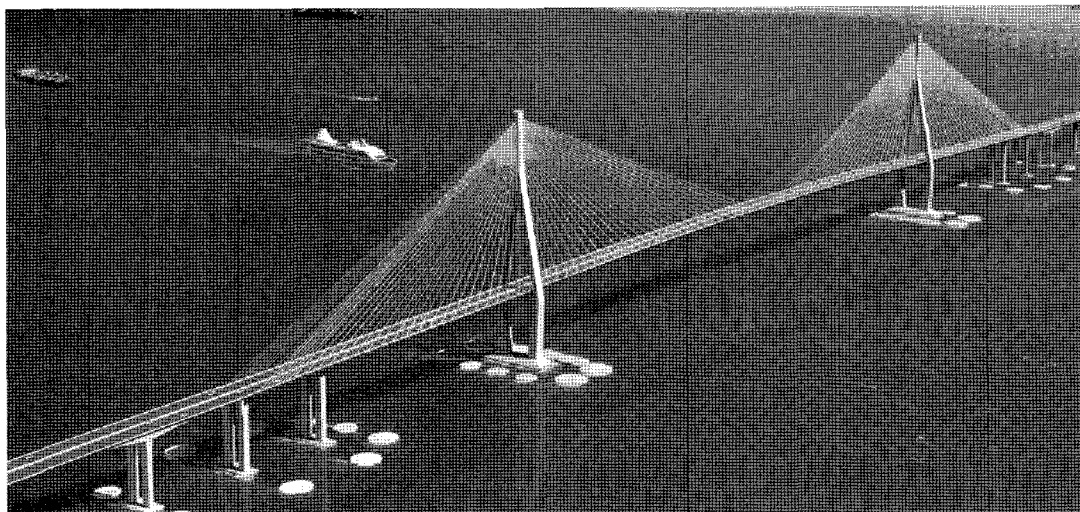


그림 9 인천대교에 적용된 충돌방호공의 배치

미국에서 수행된 최초의 본격적인 바지선 충돌실험으로서 강체벽체에 대한 충돌이 아니라 지반 및 교량의 하부기초를 구성하는 파일등간의 상호작용까지 고려하는 최초의 충돌시험이었다(Consolazio, 2003, 2005).

3.2 국내연구현황

최근에 해상교량의 건설이 본격화되기 전까지는 선박의 충돌을 설계에 실제적으로 고려한 예는 많지 않다. 서해대교에서는 50kDWT를 대상으로 돌핀방호공이 계획되었으나 최종적으로 강관파일로 설치되었고 영종대교에서는 시공 중 사용했던 가시설을 충돌방호공으로 보수하여 사용하기도 하였다. 이와 같이 초기의 대형 해상교량의 충돌방호공의 설계에서는 충돌방호공의 중요성이 다른 교량의 주구조물에 비하여 낮아 전반적으로 일관성이 부족하였던 경향이 있다. 국내에서 선박의 충돌이 본격적으로 중요설계요소가 된 것은 현재 시공 중인 인천대교의 경우부터라 할 수 있다. 이 교량은 인천항을 진출입하는 선박의 주요 항로상에 건설되면서 100kDWT급의 선박의 충돌에 대하여 설계되었다(그림 9).

그러나 현재 교량설계시 충돌하중에 대해서는 도로설계 기준에도 이를 고려해야 한다는 원론적인 언급이 있을 뿐 충돌하중에 대한 기초적인 식도 제공되고 있지 않다. 현재 국내 설계기준서에서 참조할 수 있는 식은 1996년 도로교시방서의 하중저항계수편으로 이는 AASHTO의 설계기준과 동일한 것이다. 토목학회의 케이블 강교량설계지침(2006)에서도 충돌하중에 대한 항목을 두고 있다. 따라서 현재 이러한 충돌하중에 대한 설계는 AASHTO시방서의 방법론이 일반적으로 적용되고 있으며, 장대교량의 건설이 일반화되면서 다양한 수치해석과 방호공에 대한 모형 실험등이 이루어져 실무적인 적용에는 큰 문제가 없는 수준인 것으로 판단된다. 다만 아직 충돌거동에 대한 다양한 연구가 진행되지 못하여 실제보다 보수적인 설계가 주로 이루어지고 있는 것으로 판단되며 이를 개선하기 위하여 현재 자료가 미비한 다양한 충돌조건에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

현재 국내에서 이루어지고 있는 선박과 교량의 충돌에 대한 연구는 다양한 충돌조건에 대한 교량의 거동분석에 초점이 맞춰지고 있다. 이러한 충돌조건에는 다양한 충돌방호공의 종류나 형상에 대한 거동특성의 파악(Lee 등, 2004, Lee 등 2005) 및 일반적인 거동특성(이계희 등, 2005; 이성로 등, 2006a,b,c; 이성로 등, 2007)의 분석에 관한 연구가 있다. 선박의 외부역학을 고려한 연구(이성로

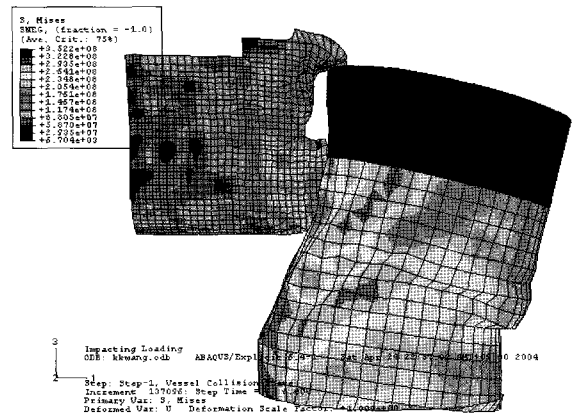


그림 10 돌핀방호공의 충돌해석

등, 2004)도 시도되고 있다.

앞으로 국내의 연구과제로는 현재 근해에서 각종 건설자재나 중량물의 운송에 이용되고, 장래 활성화될 내수면의 운항에 주로 사용되는 바지선의 충돌거동에 대한 연구나, 우리나라 실정에 맞는 충돌하중의 산정을 위한 충돌실험, 확률론적인 하중산정 등의 방향으로 연구가 진행될 것으로 보인다.

4. 결 론

본 기사에서는 선박과 교량의 충돌하중의 일반적인 사항에 대하여 교량구조의 입장에서 간략하게 기술하였다. 본 저자의 얕은 지식 때문에 기술되지 못하거나 바르지 못한 내용에 대해서는 관련연구자들의 질책이 있기를 바란다.

참 고 문 헌

1. 도로교표준시방서(부록:하중저항계수설계편), 건설교통부, 1996.
2. 도로교설계기준, 건설교통부, 2003.
3. 케이블강교량설계지침, 대한토목학회, 2006
4. 이계희, 홍관영, 고재용(2005), “중형 충돌시 선박과 방호공의 충돌거동”, 대한토목학회 논문집, 제25권, 제 6A호, pp1133-1141
5. 이성로, 배용귀(2006a), “교량의 선박충돌위험도 평가”, 대한토목학회논문집, 26권 1-A호, pp1-9
6. 이성로, 배용귀(2006b), “현수교의 선박충돌 위험 및 설계 선박하중”, 대한토목학회논문집, 26권 1-A호, pp11-19
7. 이성로, 이병화, 배용귀, 신호상(2005), “충돌위험분배모델을 이용한 해상교량의 설계선박 선정”, 구조물진단학회지, 10(3), pp123-132

8. 이성로, 배용귀, 이계희(2006c), “구조물의 선박충돌해석”, 한국구조물진단학회, 제10권, 제4호, pp87-96
9. 이성로, 배용귀(2007), “소형선박충돌에 의한 독립수직파일 방호구조물의 구조특성분석”, 대한토목학회논문집, 27권 2-A호, pp
10. 이성로, 이계희, 이완수(2004), “교량의 선박충돌에너지산정”, 대한토목학회논문집, 제24권, 제5A호, pp951-960
11. AASHTO (1991), Guide Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
12. AASHTO (1994), LRFD Bridge Design Specifications and Commentary, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
13. Consolazio, G.R., and D.R. Cowan (2003), “Nonlinear Analysis of Barge Crush Behavior and Its Relationship to Impact Resistant Bridge Design”, Computers and Structures, Vol. 81, Nos. 8-11, pp. 547-557.
14. Consolazio, G.R., and D.R. Cowan (2005), “Numerically Efficient Dynamic Analysis of Barge Collisions with Bridge Piers”, ASCE Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 131, No. 8, pp. 1256-1266.
15. Frandsen, A.G., Olsen, D., Fujii, Y. and Spangenberg, S(1991), Ship Collision Studies for the Great Belt East Bridge, Denmark, IABSE Symposium on Bridges-Interaction between Construction Technology and Design, Leningrad
16. Goble G., Schulz J., and Commander B. (1990), Lock and Dam #26 Field Test Report for The Army Corps of Engineers, Bridge Diagnostics Inc., Boulder, CO.
17. Gye-Hee Lee, Hwan-Woo Lee, and Seong-Woon Yoo(2004), “AN ANALYSIS OF STEEL FENDER SYSTEM FOR VESSEL COLLISION”, European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, JyvAaskylAa, 24-28 July 2004
18. Knott, M., Prucz, Z. (2000), Vessel Collision Design of Bridges: Bridge Engineering Handbook, CRC Press LLC.
19. Larsen, O.D. (1993), Ship Collision with Bridges: The Interaction between Vessel Traffic and Bridge Structures, IABSE Structural Engineering Document 4, IASBE-AIPC-IVBH, Zurich, Switzerland.
20. Lee, J.W., The Crushing Behaviour of Thin Plates subjected to Compression, J. of the Society of Naval Architects of Korea, Vol.19, No1, March 1982, pp.33-39.
21. Lee, J.W., On the Optimization Design of Soft Bow Structure, Proc. of the Int. Symposium on Practical Design in Shipbuilding, Tokyo & Seoul, 1983, pp.429-435.
22. Lee, GyeHee, Lee, SeongLo, Kim, HoKyoung, Yu, Wonjin(2005), “A collision analysis of the navigating vessel and the dolphin protection system”, 6th International Conference on SHOCK & IMPACT LOADS ON STRUCTURES 7 - 9 December 2005, Perth, W. Australia
23. Lee, GyeHee, Lee, SeongLo, Ko, JaeYoung(2006), “The collision behaviors between the navigating vessel and the fender systems against the medium collision event”, IABMAS'06 - Third International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management July 16-19, 2006, Porto-Portugal
24. LS-DYNA (2003), LS-DYNA Keyword User's Manual: Version 970, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA.
25. Meier-Dönberg, K.E. (1983), Ship Collisions, Safety Zones, and Loading Assumptions for Structures in Inland Waterways, Verein Deutscher Ingenieure (Association of German Engineers) Report No. 496, 1983, pp. 1-9.
26. Minorsky, V.U. (1959), “An Analysis of Ship Collisions with Reference to Protection of Nuclear Power Plants”, Journal of Ship Research, Vol. 3, pp. 1-4.
27. Nagasawa, H., Arita, K., Tani, M. and Oka, S., “A Study on the Collapse of Ship Structure in Collision with Bridge Piers (3rd Report)”, J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.142, 1977, pp.323-332.
28. Ohnishi, T., Kawakami, H., Yasukawa, W. and Nagasawa, H., On the Ultimate Strength of Bow Construction, J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 151, 1982., pp.174-186.
29. Patev, R.C. and Barker, B.C. (2003). Prototype Barge Impact Experiments, Allegheny Lock and Dam 2, Pittsburgh, Pennsylvania. ERDC/ITL TR-03-2, US Army Corps of Engineers.

30. Paik, J.K. and Pedersen, P. T., On Design of Double Hull Tankers Against Collisions, Proc. of the Int. Symposium on Practical Design of Ships and Mobile Units(PRADS), Seoul, September 1995, pp.992-1009.
31. Wang, G. and Suzuki, K., "The Crushing Mechanics of Bow Structure in Head on Collision (2nd Report)", J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.177, 1995, pp.357-363.
32. Woisin(1959), G. "The Collision Tests of the GKSS." Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, Vol. 70, pp. 465-487, Berlin. 