

강재 충돌방호공의 선박충돌해석

A bridge-vessel collision analysis of steel fender system

이계희¹⁾ 홍현석²⁾ 백종균³⁾
Lee, Gye-Hee Hong, Hyun-Seok Paik, Jong-Gyun

ABSTRACT

In this study, the impact analysis for the steel fender system that designed for protection of collision between vessel and bridge was performed. The size of objective collision vessel assumed as 3000 dead weight tonnage(DWT). The impact forces and the impact energies were estimated by formulas of several design codes, and the steel fender system was designed based on the estimated forces and energy. The bow of objective vessel was modeled as rigid body, and bridge substructure was modeled as fixed support. Since, the impact analysis have the dynamic nonlinear features, such as, material nonlinear, large deformation and contact, explicit structural analysis program was used. The analysis results presented that the impact forces formulas in codes have the sufficient conservativeness.

1. 서론

우리나라의 서해안 및 남해안에는 현재 많은 연육, 연도교가 시공되어 공용중이거나 계획되고 있다. 이러한 교량의 설계기준인 도로교 설계기준²⁾에서는 각종 충돌하중에 대하여 고려하도록 명시되어 있지만 차량이나 부유물에 의한 충돌이 주로 고려되고 있고 선박충돌을 고려하여 교량을 설계하는 경우는 드문 실정이다. 그러나 연육, 연도교와 같이 항로상 또는 항로 근처에 건설되는 교량이 선박과 충돌하여 붕괴하는 경우 사회간접자본의 피해는 물론 대규모의 인명 손실이 발생할 우려가 크다. 이러한 선박과 교량과의 충돌사례로 1980년 미국의 플로리다에서 발생한 Sunshine Sky Bridge의 붕괴사고가 대표적이며 이로 인하여 전 세계적으로 통항 선박과 해상교량의 하부구조와의 충돌에 대한 연구가 활성화되었다. 이 사고에서는 DWT35,000의 화물선이 교각에 충돌하여 해당 경간이 붕괴되고 교량상을 통행하고 있던 차량에 탑승한 35명의 인명이 희생되었다.¹²⁾

선박충돌과 관련된 많은 연구는 주로 선박과 선박과의 충돌이나 선박의 좌초 등을 주요 연구대상으로 하고 있으며 선박과 교량구조물과의 충돌에 대해서는 해동시 유빙이나 홍수시 부

1) 정회원, 목포해양대학교 해양시스템공학부 전임강사, 공학박사, 구조기술사
2) 정회원, 청석엔지니어링 구조부 이사, 공학박사, 구조기술사
3) 정회원, 대림산업(주) 토목사업부 차장, 공학박사, 구조기술사

유물들에 의한 충돌하중에 대하여 교량의 하부공을 보호하는 시설의 설계에 대하여 연구되었다. 그러나 1960년부터 1991년까지의 전 세계적으로 발생한 선박 및 바지선의 교량충돌사고 기록자료들에 의하면, 선박통행량의 급격한 증가, 항로를 통과하는 교량의 계획 및 건설 사례 증가, 1960년 이래 25년 이상 교량설계시 선박 충돌하중 미고려, 교량의 부적절한 선박통과 소요 폭 등의 요인으로 선박충돌 사고가 많이 발생하였음을 알 수 있다⁸⁾. 이러한 사고들로 인해 항로를 가로지르는 교량의 안전성 확보에 관심이 모아지게 되었고 여러 나라에서 기존 교량의 취약성 평가, 신설 교량에 대한 설계기준 정립, 선박충돌에 대한 규약과 시방서 개발과 관련한 연구가 수행되었다. 국제교량학회(International Association of Bridge and Structural Engineerings : IABSE)에서는 1983년에 교량과 선박과의 충돌에 관한 학회를 열어 이의 해결책을 도모하였다. 이러한 노력을 바탕으로 미국의 연방고속도로국은 1988년 최초로 시방서에 이를 도입해야 한다는 결론을 내리고 1991년에 선박과 교량의 충돌에 대한 시방서를 제시하였다.⁹⁾ 그러나 이 시방서에 규정된 선박충돌하중에 대해서는 많은 논의가 계속되고 있으며 이 시방서의 개정을 위하여 실선박 충돌실험을 포함한 많은 추가적인 연구가 진행되고 있다.⁷⁾

본 연구에서는 이러한 기존의 연구결과를 바탕으로 대상선박의 충돌시 방호공의 비선형 거동을 수치적으로 분석하여 추후 계속될 선박과 교량의 충돌 상호작용해석에 기본 자료로 삼고자 한다.

2. 선박의 충돌에너지

교각하부구조와 선박의 충돌시 선박의 운동에너지에 의한 충돌에너지는 선박의 선수부와 교각의 파괴하중으로 흡수되게 된다. 이러한 과정은 극도의 비선형성을 요구하며 충돌속도 교각과 선수부와의 상대적인 강성, 충돌강도, 충돌면의 마찰계수등 수많은 인자들에 의해서 지배된다. 따라서 여러 연구자들은 다양한 조건에 대하여 여러 가지 충돌력에 의한 식을 제시하였다. 그중에서 현재 설계에 주로 사용되고 있는 식들을 살펴보면 AASHTO방법⁹⁾, Pedersen의 경험식¹⁴⁾, 본주사국연락교 공단의 방호공설계기준³⁾(이하 본주사국기준)에서 제안한 식 등이 있다. 본 장에서는 이들 식들에 의해서 산정되는 충돌력과 충돌에너지를 산정하여 교량의 개략적인 하중을 살펴보고자 한다. 해석의 대상선박은 항로상은 운항하는 선박들의 통행량과 분포, 항로조건 및 대상교량의 설계조건등을 종합적으로 고려하여 선정한다. 본 연구에서는 DWT3000급의 산물선을 대상으로 선박충돌시 거동을 분석하였다. 또한 충돌시의 충돌속도는 1.32m/sec로 하였으며 선박은 교각에 수직으로 충돌하는 것을 가정하였다.

2.1 AASHTO방법

이 방법은 Woison의 선박충돌시험에 기초한 방법⁹⁾으로 다양한 크기의 선수모형과 선박의 충돌시험을 통해 실험식을 제안하였다. AASHTO에서는 이 방법을 적절한 단위 환산을 통해 다음과 같이 제시하였으며 이식에 대해 대상선박의 충돌력을 산정하면 다음과 같다.

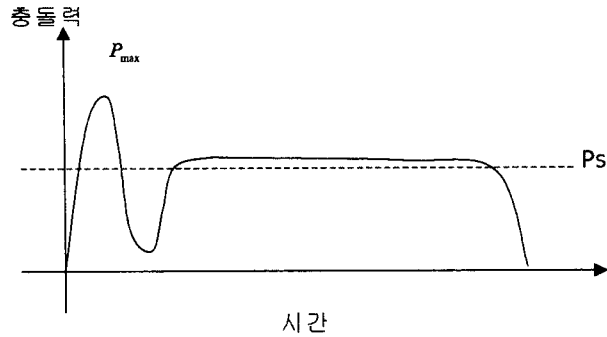
$$\begin{aligned}
 P_s &= 220\sqrt{DWT} \frac{V_{im}}{27} \\
 &= 1933 \text{ kips} \\
 &= 876.6 \text{ Ton}
 \end{aligned}$$

여기서

DWT : 대상선박의 재하중량톤(=3000)

V_{im} : 충돌속도(=4.33 ft/sec = 1.32 m/sec)

일반적으로 충돌이 발생하면 충돌 순간에는 큰 충돌력이 발생하나 선수나 방호재의 파괴가 발생하면서 일정한 힘이 가해지게 된다. AASHTO식에 의해 제시된 충돌력은 이러한 평균적인 충돌력을 의미한다.(그림 1)



AASHTO에서 규정하고 있는 충돌에너지는 충돌선박의 중량과 부가질량이 가지는 운동에너지에

그림 1 시간에 따른 충돌력의 변화

적절한 계수를 도입하여 산정한 것이다. 따라서 운동에너지의 식과 유사한 형태를 가진다. 다음은 AASHTO에서 규정하고 있는 충돌에너지 산정식이다.

$$KE = \frac{C_H W V^2}{29.2} (\text{kip} \cdot \text{ft})$$

여기서

C_H : 부가질량계수(=1.05)

W : 만재배수량(=DWT/0.8)

V : 충돌속도(ft/sec)

위의 식에 의해 본 연구의 대상선박의 349.6 Ton-m의 충돌에너지를 갖는 것으로 나타났다.

2.2 Pedersen의 방법

1993년 Pedersen은 수치해석결과와 기존의 실험결과들을 종합하여 다음과 같은 충돌력에 관한 경험식을 제안하였다.¹⁴⁾ 이 식들은 DWT500~300000범위의 선박에 적용할 수 있도록 하였으며 AASHTO의 방법과는 다르게 충돌시 발생하는 최대충돌력을 설계외력으로 가정하였다. 다음은 Pedersen이 제안한 충돌력의 식이다.

$$P_{bow} = P_o \cdot [EL^2 + (5.0 - l)L^{2.6}]^{1/2} \text{ for } E \geq L^{2.6}$$

$$P_{bow} = P_o \cdot [5.0 EL]^{1/2} \text{ for } E < L^{2.6}$$

여기서

P_{bow} : 최대 선수충돌하중

P_o : 참조충돌하중(=210MN)

L : $L_{pp} / 275m$

E : $E_{imp} / 1425MN$

L_{pp} : 선박길이

E_{imp} : 선박의 운동에너지

이상과 같은 식에 의해 산정된 선박의 충돌력은 1300톤이며 충돌에너지는 330Ton-m이다. 이식으로 얻어진 충돌력은 AASHTO방법에 의해 구한 값에 비하여 약 1.5배의 값을 보이고 있다. 이 차이는 기본적으로 최대 충돌력(Pedersen)과 평균충돌력(AASHTO)의 차이에 기인한다.

2.3 본주사국연락교공단의 기준에 의한 방법

일본의 본주사국기준에서 제안된 식은 강재방호공의 설계에 사용되는 식이다. 이 식에서는 선수부의 제원을 표준화 하고 선수부에 의한 방호공의 좌굴하중에 따른 충돌하중의 식을 제안하였다. 이 식은 앞의 두 식과는 다르게 선박이 강체에 충돌하는 것을 가정한 것이 아니고 방호공에의 충돌을 가정한 것이다. 다음은 본주사국기준에서 제안한 충돌하중이다.

$$P_{crs} = 2Dt \cos(\theta) \sigma_{crs}$$

여기서

P_{crs} : 선수충돌하중

D : 선체높이

θ : 선수각

σ_{crs} : 선수의 좌굴응력

본 교량의 대상선박에 대하여 이 식을 적용한 경우 약 900톤의 충돌력이 발생하는 것을 계산되었다. 방호공의 설계에서는 선박의 운동에너지를 모두 방호공이 흡수하는 것으로 가정하기 때문에 충돌시 발생하는 충돌에너지는 366.5Ton-m으로 계산되었다.

3. 방호공의 충돌해석

3.1 대상방호공의 개요

본 해석의 대상인 방호공은 수평판의 좌굴에 의하여 선박의 충돌에너지를 흡수하도록 되어 있다. 이 방호공은 흡수할 수 있는 충돌에너지가 비교적 크고 충돌에너지에 따라 수평판의 수를 조정할 수 있기 때문에 적용범위가 넓은 편이다. 반면에 제작단가가 높고 충돌이 발생한 후

에는 교체나 대대적인 수리가 필요한 단점이 있다. 이 방호공은 기본적으로 본주사국 연락교 공단의 다실형완충공과 동일한 것이다. 이 방호공의 개략적인 제원은 그림 2와 같다.

본 연구의 경우 본주사국기준에 따라 방호공이 모든 충돌에너지를 흡수한다고 가정하였을 경우 수평판의 좌굴 및 소성변형에 의하여 선박이 정지시까지 약 1.5m가 돌입되는 것으로 계산되었다.

앞에서 제안된 방호공이 실제 선박의 선수 충돌시 어떠한 거동을 보이는 지 확인하기 위하여 유한요소법을 이용한 비선형 동적해석이 수행되었다.

충돌해석의 경우 각 부재는 소성변형을 포함한 대변형을 일으키며 운동체의 운동에너지를 정지물체와의 접촉의 의해 전달하기 때문에 접촉해석을 포함하게 된다. 따라서 이렇게 비선형성이 큰 동적문제의 해석에 적합한 explicit 프로그램을 사용하여 해석을 수행할 필요가 있다. 본 보고서에서 ABAQUS⁴⁾를 이용하여 구조해석을 수행하였다.

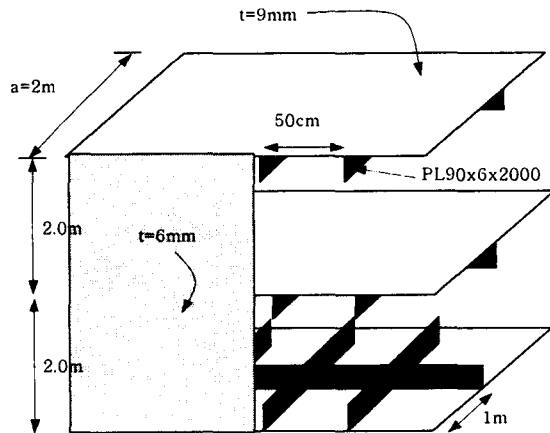


그림 2. 강재를 이용한 방호공

3.2 해석 모델링

해석에 사용한 강재는 소성변형을 일으키는 재료로 가정하였다. 재료의 탄성계수는 2.07E11Pa를 사용하였고 항복후 거동은 표1과 같이 가정하였다.

본 연구에 있어서 선박과 교량간의 충돌에서 발생하는 모든 충돌에너지는 방호공이 흡수하는 것으로 가정하였기 때문에 교각은 강체로 가정하여 지점조건으로 고려하였다.

선박과의 충돌에너지를 흡수하는 방호공의 평판부분은 쉘요소로 모델링되었으며 종방향보강재 역시 동일하게 쉘요소로 모델링되었다. 방호공과 교각이 만나는 부분은 고정지점으로 자유도를 구속하였으나 회전방향자유도는 구속하지 않았다. 모델의 좌우측 단

부는 좌우방향의 변형만 구속하여 경계조건에 의한 영향을 최소화하려고 하였다. 또한 방호공을 지지하는 횡방향 및 수직방향 프레임구조물도 보요소로서 모델에 포함시켰다. 이들 요소들은 방호공의 설계시 에너지를 흡수하지 않는다고 가정되나 실제에 있어서는 방호공의 충돌방향 강성 및 방호공의 변형형상에 영향을 줄 것을 판단된다.

선박은 선수부분을 모델링하여 충돌해석을 수행하였다. 선수부분은 방호공에 비하여 큰 강성을 가지고 있고 방호공이 모든 충돌에너지를 흡수하는 것으로 가정하였으므로 선수부는 강

표 1 해석에 사용된 강재의 재료특성

응력(10^8 Pa)	순소성변형
1.578	0
1.631	0.015
1.863	0.033
1.932	0.044
2.020	0.062
2.070	0.5

체로 모델링하였다. 본주사국기준에서는 선수부를 썬기 형태로 가정하여 관련 식들을 유도하였으므로 본 해석에서도 선수각 35°를 가진 썬기형 선수를 가정하였다. 다만 선수의 선단부분은 곡률반경이 0.4m인 곡면으로 이루어져 있다고 가정하여 정확한 선수의 충돌거동을 나타낼 수 있도록 하였다. 선박의 질량은 배수량(=DWT/0.8)을 기준으로 산정하였으며 충돌시 선박한 인접한 유체에 의한 부가질량은 부가중량계수(=1.1)를 이용하여 고려하였다. 선체의 횡방향회전거동은 관성력모멘트 값으로 나타내었으며 또한 선박의 질량점은 선수부의 선단에서 충분의 떨어진 점으로 하여 횡방향 거동을 명확히 나타낼 수 있도록 하였다.

충돌시 발생하는 접촉현상은 선수부와 외측 판사이에서 발생하도록 하였다. 이 때 강재와 강재간의 마찰계수는 0.15로 가정하였다. 또한 수평판 자체의 대변형에 의해 발생하는 접촉변형도 고려하여 실제적인 거동을 나타낼 수 있도록 하였다. 해석시간은 최초의 접촉후 2초간을 하였으며 해석시간간격은 프로그램 내에서 자동적으로 산정되었다.

전술한 과정을 거쳐 구성된 선박과 방호공의 충돌해석 모델은 그림 3에서 볼 수 있다.

4. 충돌해석결과

해석결과 나타난 단계별 변형형상은 그림 3에서 보는 바와 같다. 이 그림에서는 충돌시 발생하는 변형현상과 von Mises응력의 분포도를 보여주고 있다.

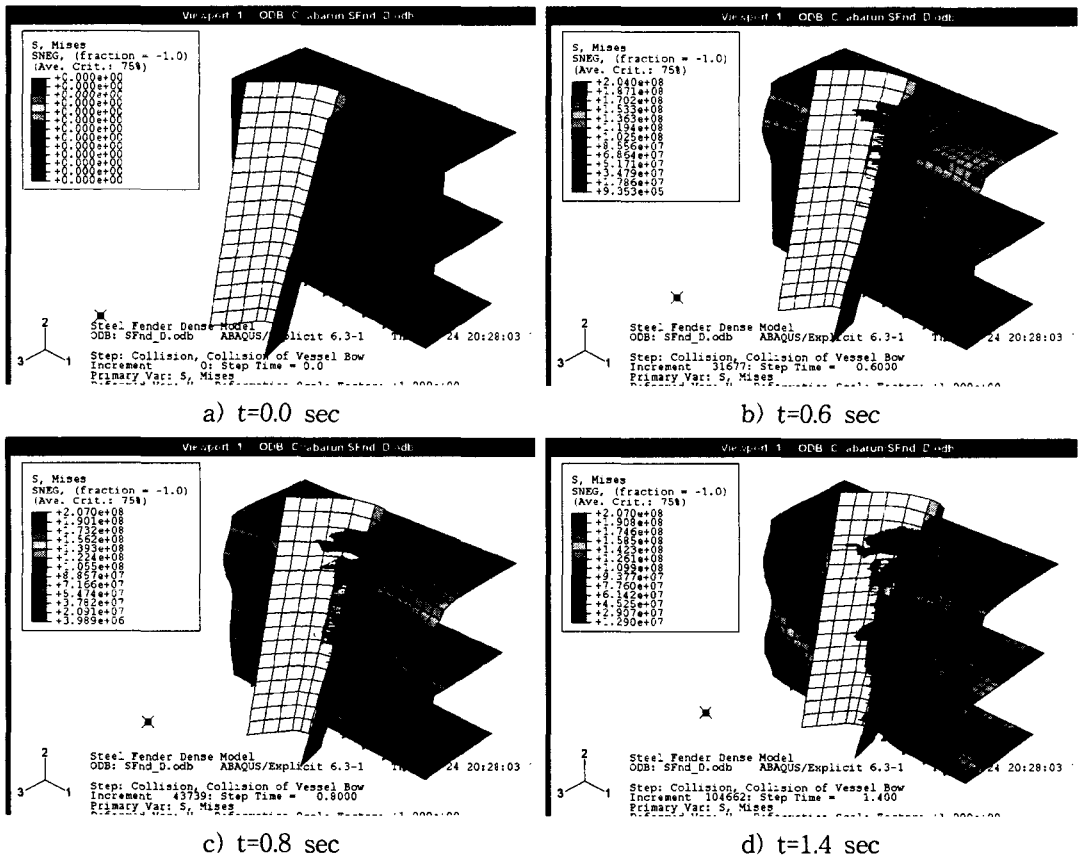
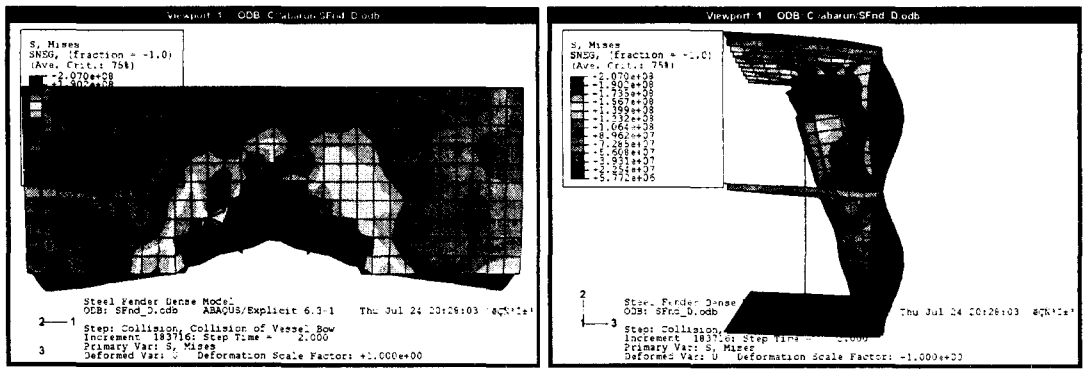


그림 3 강재를 이용한 방호공의 충돌변형

방호공과 선수의 접촉은 선수부의 경사로 인하여 상부의 수평판에서 먼저 일어나며 따라서 상부의 수평판이 가장 큰 변형을 일으킨다. 충돌이 끝난 후 방호공의 최종변형형상은 그림 4과 같다. 최종변형상태에서 선수의 돌입량은 약 1.2m로 방호공의 설계시 본주사국기준에 의해 산정되었던 1.5m보다 작은 값을 보였다. 이 차이는 해석모델에서는 본주사국기준에서 무시되었던 프레임의 강성이 포함되었고 첨각으로 가정되었던 선수부가 곡률을 가지고 완만하게 모델링된 것 등 본주사국기준의 식에서 무시된 보수성의 영향인 것으로 판단된다.

충돌과정에서의 발생하는 모델에서의 에너지 시간이력은 그림 5과 같다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 선박의 운동에너지가 충돌현상을 통해 구조물의 변형에너지로 전이되고 있으며 이 과정은 약 1.7초까지 지속되는 것을 알 수 있다. 따라서 충돌은 1.7초에서 종료된 것으로 판단된다. 또한 구조물에 전달된 변형에너지의 대부분은 소성변형에너지의 형태로 소산이 일어나는 것을 알 수 있다.



a) 평면 b) 측면

그림 4. 강재를 이용한 방호공의 최종변형

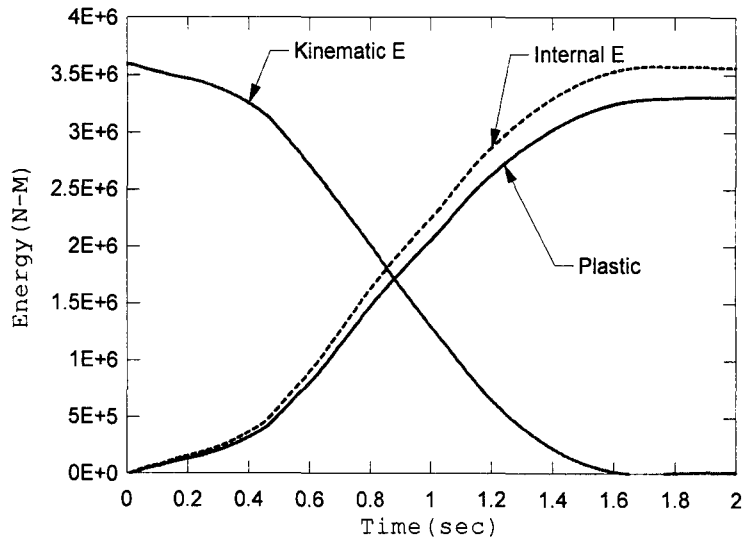


그림 5. 충돌중 에너지 변화

5. 결론

본 연구에서는 DWT3000급의 선박이 교각에 충돌하는 경우를 가정하여 각 설계기준에 의한 충돌력과 에너지를 산정하고 강재방호공에 대한 충돌해석을 수행하였다. 충돌해석은 재료비선형, 대변형, 접촉 및 마찰 등을 고려한 비선형동적해석을 수행되었다. 해석결과 대상 방호공은 선박의 충돌에너지를 소성변형에너지로 변화시켜 적절하게 교각을 방호하고 있는 것으로 나타났다. 이 때 발생한 변형은 시방서에서 규정하고 있는 변형의 80%정도로 나타났는데 이는 시방서에서 고려하지 않았던 방호공의 프레임나 예각으로 가정한 선수부의 만곡등에 기인한 것으로 판단된다. 따라서 설계기준³⁾에 제시된 강재방호공은 충분한 보수성을 가지고 있는 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 도로교표준시방서(부록:하중저항계수설계편), 건설교통부, 1996.
2. 도로교설계기준, 건설교통부, 2003.
3. 多室型緩衝公の 設計要領(案), 本州四國連絡橋公團, 1980
4. ABAQUS User's Guide, HKC Inc., 2002
5. Amdahl, J., Energy Absorption in Ship-Platform Impacts, Division of Marine Structures, University of Trondheim, Report No. UR-83-34, Trondheim, Norway, September 1983.
6. Brown, A.J., Collision Scenarios and Probabilistic Collision Damage, Marine Structures, Vol. 15, pp335-364, 2002
7. G. R. Consolazio, R. A. Cook, Barge impact test of the S.T. George island causeway bridge Phase I : Feasibility study, Depart of civil & coastal engineering, University of Florida, 2002
8. Frandsen, A.G. and Langsoe, H., Ship Collision Problems: I. Great Belt Bridge and II. International Enquiry, IABSE Periodica No.2, 1980.
9. Guide Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges, AASHTO, 1991
10. Kitamura, O., FEM Approach to the Simulation of Collision and Grounding Damage, Marine Structures, Vol. 15, pp403-428, 2002
11. Knott, M.A. and Larsen O. Damgaard, Guide Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges, US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Publ. No. FHWA-RD-91-006, Dec. 1990.
12. Larsen, O.D., Ship Collision: The Interaction between Vessel Traffic and Bridge Structures, IABSE, 1993
13. Nagasawa, H., Arita, K., Tani, M. and Oka, S., A Study on the Collapse of Ship Structure in Collision with Bridge Piers, J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.142, 1977, pp.323-332.
14. Pedersen, P.T., "Ship impact: Bow collision". Int. J. of Impact Engineering, Vol. 13, No.2, pp163-187, 1993.