

POST PANAMAX급 6,200 TEU CONTAINER선박의 선수부 BREAKWATER 구조 강도 평가

김영남*, 김경래*, 유종근†*

(주)한진중공업 선체설계팀*

Strength Assessment for Fore-Body Breakwater Structure of Postpanamax Class 6,200 Teu Container Carrier.

Young-Nam Kim*, Gyeong-Rae Kim* and Jong-Keon Yoo†

Hull Design Team, Hanjin Heavy Industries & Construction Co., Ltd.*

Abstract

Until now, we are designing the breakwater of container vessel as cantilever structure typically. Recently, we have designed "side shell touch type breakwater" for the first time to 6,200TEU Class Container Carrier registered on Lloyd Classification.

The Lloyd Rule does not provide requirements for breakwater scantling but only recommend breakwater wave load and Lloyd Class requests for submitting the calculation results. At early design step, we had reviewed the breakwater structure through the calculation of simple beam theory with wave load recommended by Lloyd and referring to already built same size of container vessel. At the same time we had carried out F.E.M analysis of breakwater structure and had updated design, so we could verify the strength of side shell touch type breakwater at final step.

※ Keywords: Breakwater(상갑판으로 넘어오는 파도로부터 화물과 선체구조를 보호하기 위해 주로 선수부에 설치되는 구조물), Cantilever (외팔보, 한쪽 끝단만이 고정된 보)

1. 서론

일반적으로 양호하지 않은 해상상태의 선박 운항시, 선박이 조우할수 있는 Green Water 로부터 Deck 및 Hatch Cover 상부의 화물과 인접구조들을 보호할 목적으로 Container 선박의 선수부에

Breakwater 라는 구조물이 설치된다. 당사에서 지금까지 설계 및 건조한 대부분의 Breakwater 는 Access 를 고려하여 F' cle Deck 상에 독립된 형태로 배치되어 있는 Type 이었다. 최근 설계 완료 하여 건조중에 있는 유럽선사의 POST PANAMAX 급 6,200 TEU Container Project 의 경우 선주의 요구로 인하여 Breakwater 가 Side Shell 까지 연장되는 Type 으로 설계하게 되었다. 설계 초기에

†교신저자: ollyboy@hanjins.com, 051-410-3480

선주측에서는 Breakwater Design 을 선주사의 실적선을 바탕으로 동일한 구조로 설계 요구하였으나 당사에서 검토해본 결과, 지금까지 당사의 Design 과 비교해 보았을 때 과도한 중구조라고 판단하여 Design 을 변경하여 경량화할 필요가 있었고 이에 따라 당사가 Design 한 Breakwater 의 구조강도 검증이 요구되었다.

2. 본론

2.1 Design Of Breakwater

Table 1 Ship's characteristics

Length Overall	299.470 m
Length B.P	286.700 m
Length Scantling	281.945 m
Breadth Moulded	40.0 m
Depth Moulded	24.6 m
Draft Design	12.0 m
Draft Scantling	14.5 m
Cb	0.6463
Max. Speed at Ts	25.62 knots

Fig. 1 은 선주 실적선종 당사에 동일 Type 으로 설계요구한 Breakwater 구조이며, Fig. 2 는 F' cle Deck 상부 Breakwater 의 Stay 하부 보강 구조를 보여준다. 선주가 요구하는 Type 의 Breakwater 는 사진에서 보는바와 같이 보강 Stay 가 매 Long' l Space 마다 설치되어 있고 하부 보강도 Large Bracket 과 Large Built up 부재로 되어있어 중구조인것을 볼 수 있다

최근 선주, 선급들이 Fig. 1 과 같이 Breakwater 의 Primary Member 인 Stay 가 선수 방향으로 배치되어 있는 Type 을 선호하는 경향이 있다. 이는 Green Water 가 Breakwater 에 충격을 가할 시 선수로 돌출된 Primary Member 인 Stay 가 1 차적으로 쇠파하여 Green water 의 Energy 를 감소시킴으로써 Breakwater 의 Main Plate 에 전달되는 Impact 에너지를 줄일 수 있다는 가정 때문이다.

Yard 에서는 Fig. 3 에서와 같이 3 Long' l Space 인 Girder Positions 에만 Primary Member 인 Stay 를 설치하고 Horizontal 방향으로 Secondary Member 인 Unequal Angle 을 배치함으로써 경량화된 Breakwater 및 인접하부구조를 설계할 수 있었다. 또한 Stay 의 간격이 Fig. 1 의 Breakwater 에 비해 넓고 개수도 적어서 선수방향으로 Stay 를 설치한다고 해도 Green Water 에 대한 1 차 쇠파효과가 적으므로 당사의 표준화된 선미방향 Stay Breakwater Design 을 적용하기로 하였다.

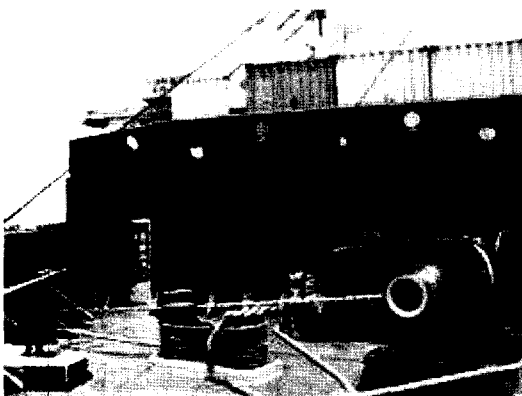


Fig. 1 Side shell touch type breakwater (Owner's request)



Fig. 2 Structure under Fig. 1

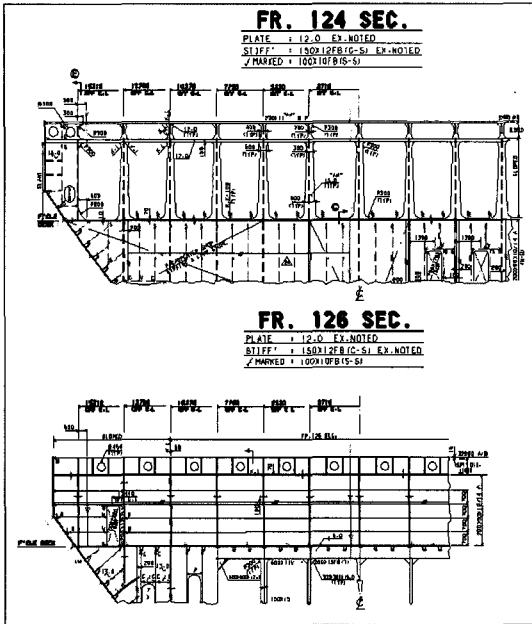


Fig. 3 Side shell touch type breakwater (Yard Design)

2.2 Beam theory

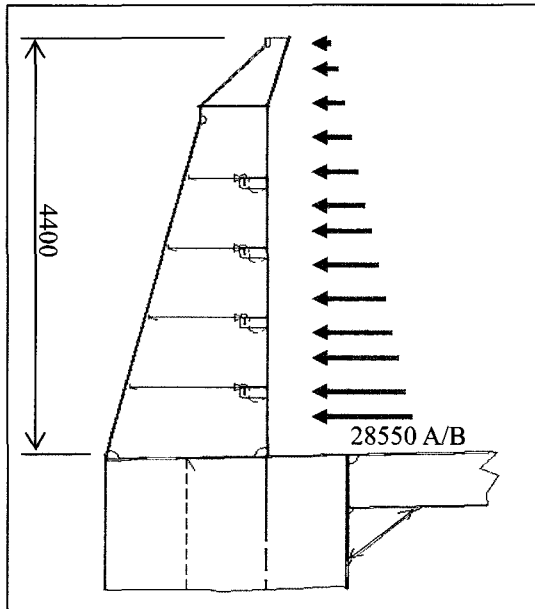
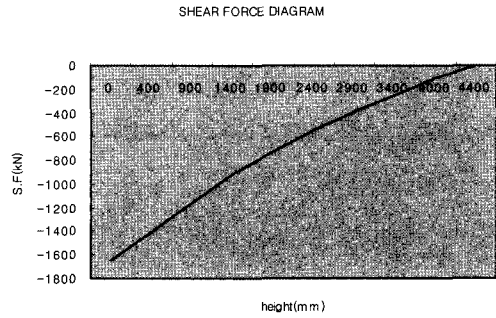
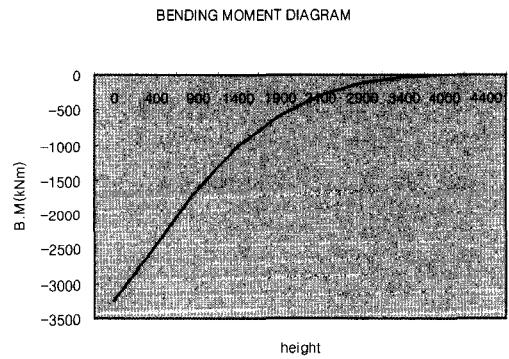


Fig. 5 Breakwater side view



Graph.1 Shear force diagram



Graph.2 Bending moment diagram

- Bending Moment Distribution

$$M = -\frac{w_1 x^2}{2} - \frac{w_2 x^3}{6l}$$

Breakwater 에 작용하는 Load 는 균일분포하중과 삼각형 형태의 하중의 합으로 나타낼 수 있으며, Shear Force 와 Bending Moment 의 분포는 Graph.1, Graph.2 와 같으므로, 고려하는 위치의 Bending Moment 와 Shear Force 를 구하면,

$$M = 2424 \text{ kNm}$$

$$Q = 1413 \text{ kN}$$

- Boundary condition

breakwater 의 bottom 에 Fix 조건 적용.

- Section modulus Z

Width of plate flange : 2.5 m

Thickness of plate flange : 12.0

Depth of web : 1400 mm

Web thickness : 12.0 " AH"

Width of flange : 600 mm

Flange thickness : 15.0" AH"

Z = 9926 Cm³

- Stress in breakwater section

$$\sigma_b = \frac{M}{Z} = 2424 \times 10^3 / 9926 = 245 \text{ N/mm}^2$$

$$A = 140 \times 1.2 = 168 \text{ Cm}^2$$

$$\tau = \frac{Q}{A} \times 10 = 1413 / 168 \times 10 = 84 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_b^2 + 3\tau^2} = 285 \text{ N/mm}^2$$

이상에서와 같이 간단한 beam theory 를 사용해서 stress 값을 도출한 결과 Material 의 Yield 값에 가까운 Stress 가 작용하는 것을 알 수 있었고 인접부재들의 효과를 고려한 더 정확한 Stress 값을 얻기 위해서 F.E.M 해석이 필요하였다.

2.2.2 Germanischer Lloyd

- Design Load

Top of Breakwater : 0.0125 N/mm²

Bottom of Breakwater : 0.083 N/mm²

Pressure p : 40 kN/m²

Spacing : 2.5 m

$$q = p \times a = 40 \times 2.5 = 100 \text{ kN/m}$$

$$M = q \times l^2 / 2 = 100 \times 4.4^2 / 2 = 968 \text{ kNm}$$

- Boundary condition

Breakwater 의 bottom 에 Fix 조건 적용.

- Section modulus Z

Width of plate flange : 2.5 m

Thickness of plate flange : 12.0

Depth of web : 1400 mm

Web thickness : 12.0 " AH"

Width of flange : 600 mm

Flange thickness : 15.0" AH"

Z = 9926 Cm³

- Stress in breakwater section

$$\sigma_b = \frac{M}{Z} = 968 \times 10^3 / 9926 = 97.5 \text{ N/mm}^2$$

$$Q = q \times l = 100 \times 4.4 = 440 \text{ kN}$$

$$A = 140 \times 1.2 = 168 \text{ Cm}^2$$

$$\tau = \frac{Q}{A} \times 10 = 440 / 168 \times 10 = 26.2 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_b^2 + 3\tau^2} = 108 \text{ N/mm}^2$$

GL Class 의 Design Load 적용하여 beam theory 로 계산시 Breakwater 가 충분한 구조강도를 가진것으로 판명되었고 Lloyd Class 의 Breakwater Requirements 가 상대적으로 높은 구조강도를 요구한다는 것을 알 수 있다.

2.3 Breakwater F.E.M Analysis
(Shell touch type)

2.3.1 Modeling

A) Model Extent

Fig.4 에서와 같이 종방향으로는 Breakwater Position 을 기준으로 선수미로 3 Frame 정도 확장하였고 상하로는 Box Beam Bottom 하부까지 Modeling 하였다.

B) Mesh Size

강도평가의 주관심 영역인 Breakwater 구조의 Model Mesh Size 는 Stiffener Space 의 1/2 로 하였고, 그외 구역은 Stiffener Space 를 적용하였다.

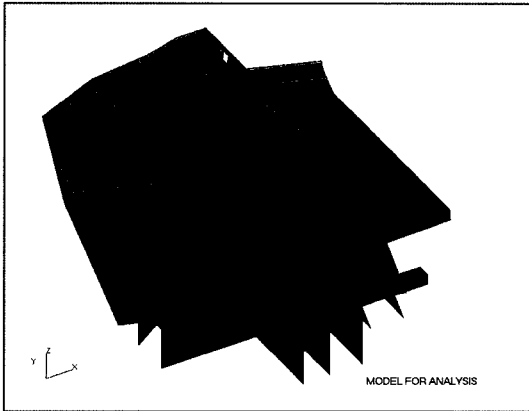


Fig. 4 View of model

2.3.2. Load & Boundary Condition

A) Design Load

◦ Lloyd' s Register

Rule 상에는 명기되어 있지 않지만 Lloyd Class 에서는 Damage Case Study 에 근거하여 다음과 같은 load 를 적용하기를 요구하고 있다.

- . 10 m Static Water Pressure at Top of Breakwater : 0.1 N/mm²

- . 20 m Static Water Pressure at Bottom of Breakwater : 0.2 N/mm²

Intermediate values were determined by linear interpolation.

◦ Germanischer Lloyd

Lloyd Class 가 요구한 Design Load 의 검증을 위해 아래와 같이 GL Class 의 Rule Load 와 비교해 보았다.

$$P_A = n * c * (b * C_l * C_0 - z) \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

$$n = 10 + \frac{L}{12} \quad \text{for 2nd tier unprotected fronts}$$

$$= 5 + \frac{L}{15} \quad \text{for 3rd tier and tiers above of unprotected fronts}$$

$$b = 1.0 + 1.5 \left(\frac{\frac{x}{L} - 0.45}{CB + 0.2} \right)^2 \quad \text{for } \frac{x}{L} \geq 0.45$$

$$c = 0.3 + 0.7 \frac{b'}{B'}$$

$$C_0 = \left[10.75 - \left(\frac{300 - L}{100} \right)^{1.5} \right] C_{RW}$$

z=vertical distance [m] from the summer load line to the midpoint of stiffener span, or to the middle of the plate field

∴ Pressure at Top of Breakwater :

$$0.0125 \text{ N/mm}^2$$

Pressure at Bottom of Breakwater :

$$0.083 \text{ N/mm}^2$$

GL Class Rule 로 Load 를 계산해본 결과는 상기와 같다. Lloyd 가 요구한 Load 가 GL Rule load 보다 Breakwater Bottom 에서는 2.4 배, Top 에서는 8 배정도 큰 것을 알 수 있다. GL Rule Load 는 Summer Load Water Line 에서 Breakwater 까지의 거리에 관한 Parameter “ z ” 를 고려하지만 Lloyd Class 에서는 “ z ” 를 고려하지 않기 때문에 발생하는 현상이다.

B) Boundary Condition

해석 Model 을 충분히 확장하였다고 판단하여 선미와 선수, Bottom 에 해당되는 Nodes 의 6 자유도를 모두 구속하고 Half model 이므로 Center Line 기준으로 Y 축 Symmetry 조건을 적용하였다.

2.3.3. Acceptance Criteria

Lloyd Class 의 선수부 Plunging 해석 기준으로 breakwater 에도 적용하였다.

- Von-Mises stress (σ_{eq}) = Minimum Yield Stress of Material \times 0.95
- Normal stress (σ_1) = Minimum Yield Stress of Material \times 0.95
- Shear stress (τ) = Minimum Yield Stress of Material $\times 1/\sqrt{3} \times 0.95$

Table 2 Acceptance criteria [N/mm²]

	Yield stress	Allowable Stress		
		Equivalent Stress	Normal Stress	Shear Stress
Mild Steel	235	223	223	129
AH32	315	299	299	173

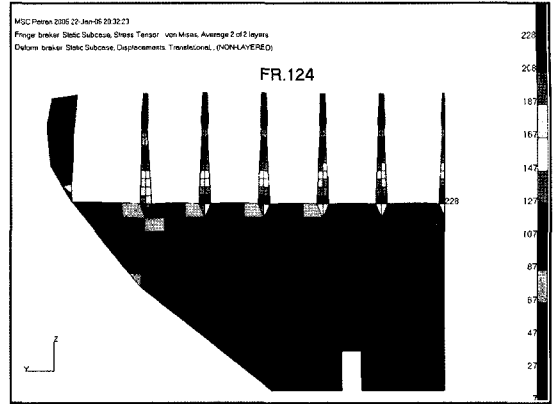


Fig. 6 FR.124 EQV. Stress

2.3.4. Evaluation

A) Yield Check

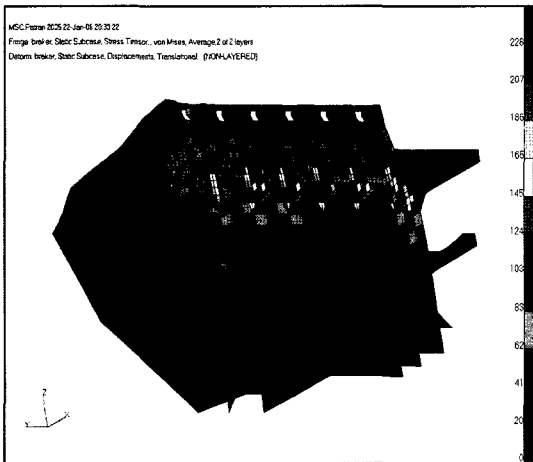


Fig. 5 Eqv. stress

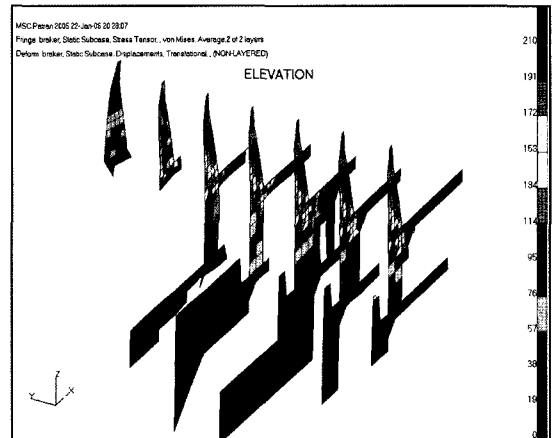


Fig. 7 Girder eqv. stress

먼저, Equivalent Stress 를 보면 Fig. 6 에서와 같이 Breakwater 의 Stay Flange 부분이 228 N/mm² 으로 국부적으로 Stress 가 높게 나타나지만 AH32 Grade 를 사용하였으므로 허용응력을 초과하지 않으며, BEAM이론으로 계산시보다 25%

적은 Stress 값을 보여준다. 또한, Fig. 7 에서와 같이 Center, No.3, No.6 Girder 와 Stay 가 만나는 부분도 주변에 비하여 높은 Stress 값을 보이고 Center Girder 로 갈수록 높게 나타나는 경향을 보이고 있으나 Mild Steel 의 허용응력을 초과하지 않으면서 전체적으로 안정된 Stress 분포를 보인다. Nominal Stress 와 Shear Stress 도 모두 Check 하여 보았으나 Maximum 92 N/mm² 으로 모두 허용응력내에 분포하고 있었다.

B) Buckling check

Breakwater 의 Failure Mode 는 Fig.8 에서와 같이 Big Stay 의 선미쪽 하부끝단의 Flange 에 Buckling 이 발생하면서 진행되므로 Lloyd Rule

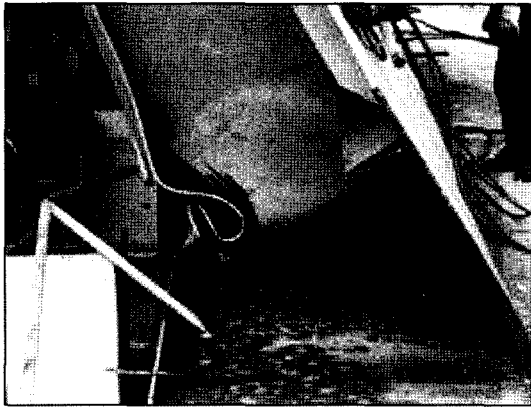


Fig. 8 Stay buckling

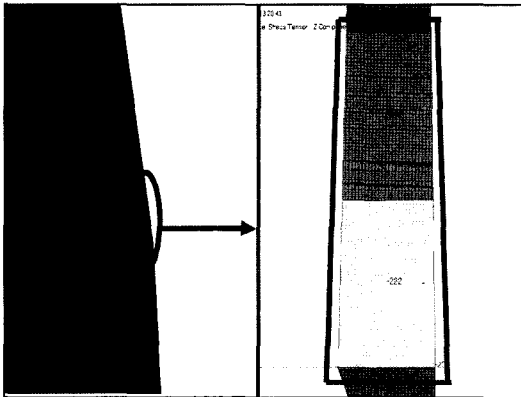


Fig. 9 Flange(nominal stress of z-direction)

상의 Plate Buckling 평가 방법에 따라 상기 Breakwater 의 Flange 와 Web Plate 를 아래와 같이 Check 하여 보았다.

• Flange

Flange Dimension : a=1400, b=500, t_p=15.0,
σ₀=315 N/mm²

$\sigma_e = 3.623\phi E \left(\frac{t_p}{b}\right)^2$: Elastic compressive buckling stress, in N/mm²

$\sigma_c = \sigma_e$ when $\sigma_e < \frac{\sigma_0}{2}$: Critical compressive buckling stress, in N/mm²

$$= \sigma_0 \left(1 - \frac{\sigma_0}{4\sigma_e}\right) \text{ when } \sigma_e \geq \frac{\sigma_0}{2}$$

φ = Stress distribution factor for linearly varying compressive stress across plate width.

$$= 0,47 \mu^2 - 1,4 \mu + 1,93 \text{ for } \mu \geq 0$$

$$= 1 \text{ for constant stress}$$

$$\mu = \frac{\sigma_{d1}}{\sigma_{d2}} \text{ where } \sigma_{d1} \text{ and } \sigma_{d2} \text{ are the smaller and larger average compressive stresses respectively}$$

C = stiffener influence factor for panels with stiffeners perpendicular to compressive stress

$$= 1,3 \text{ when plating stiffened by floors or deep girders}$$

$$= 1,21 \text{ when stiffeners are built up profiles or rolled angles}$$

$$= 1,10 \text{ when stiffeners are bulb flats}$$

$$= 1,05 \text{ when stiffeners are flat bars}$$

∴ Critical Compressive Buckling Stress

$$\sigma_c = 278 \text{ N/mm}^2$$

Actual Compressive Stress

$$\sigma_d = 222 \text{ N/mm}^2$$

• Web Plate

Plate Dimension: a=700, b=700, t_p=12.0,
σ₀=235 N/mm²

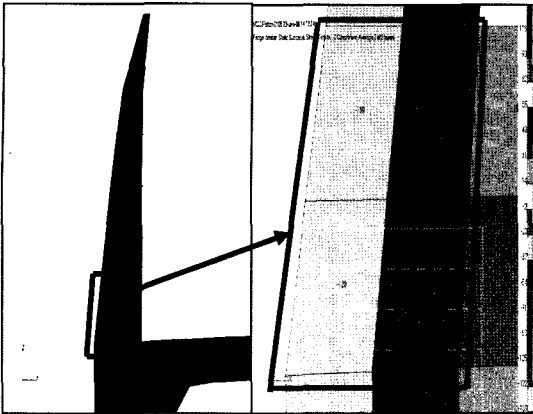


Fig. 10 Web plate(nominal stress of z-direction)

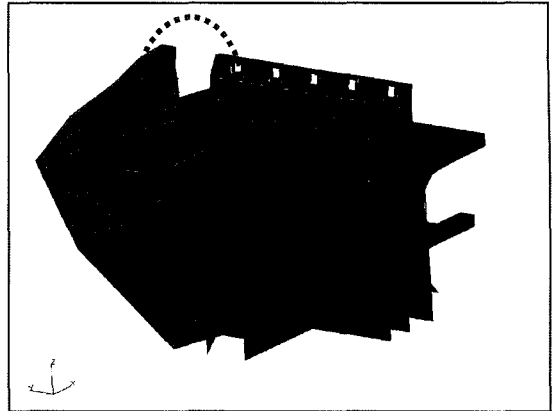


Fig. 11 Model view

∴ Critical Compressive Buckling Stress
 $\sigma_c = 173 \text{ N/mm}^2$

Actual Compressive Stress
 $\sigma_d = 139 \text{ N/mm}^2$

상기와 같이 Breakwater 의 Flange 와 Stay Web 의 Z 방향의 Compressive Stress 가 Critical Buckling Stress 내에 분포하며 안정된 구조응답을 보이는 것을 알 수 있다.

2.4 Breakwater F.E.M Analysis(cantilever type)

2.4.1 Modeling

Side shell touch type 과 Cantilever type breakwater 의 구조응답 차이를 보기위해 본론의 FEM MODEL 에서 Fig. 11 에서와 같이 Side shell 부근의 breakwater plate 를 제거하여 Cantilever type breakwater model 을 생성한 후 동일한 load 와 boundary 조건에서 재해석을 해보았다.

2.4.2 Evaluation

◦ Prediction

Side shell touch type 과 Cantilever type breakwater 는 breakwater 의 boundary condition

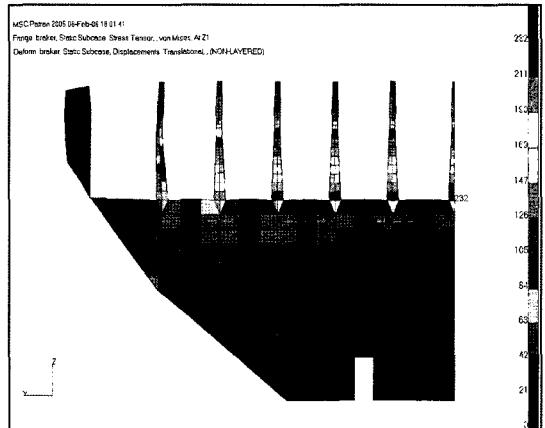


Fig. 12 FR.124 eqv. stress

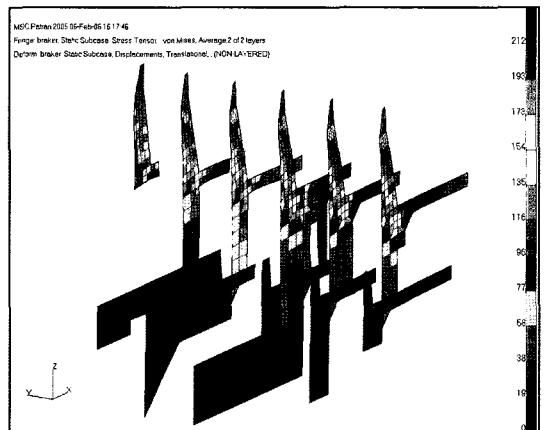


Fig. 13 Girder eqv. stress

이 3 변 고정과 1 변 고정으로 다르므로 구조응답 자체가 비교적 다르게 나타나리라 예상하였다.

• Results

Side shell touch type 의 Equivalent stress 를 보여주는 Fig.6, Fig. 7 과 Cantilever type 일 때의 Equivalent stress 를 보여주는 Fig.12 와 Fig.13 을 비교했을 때 Highest stress 가 2~3 N/mm² 가량 차이가 나는 것을 볼 수 있고 Deformation 조사 결과 Breakwater top 에서 2mm 가량 차이가 남을 알 수 있었다. 즉 Breakwater 의 구조강도는 Shell touch type 과 Cantilever type 이 차이가 거의 없다는 것이며 이는 Side shell touch type 의 Breakwater 일지라도 Cantilever beam 인 각각의 Big stay 가 모든 하중을 견디는 역할을 하기 때문이라고 판단할 수 있다.

3. 결론

당사에서는 처음으로 적용하는 Side shell touch type Breakwater 에 대한 F.E.M 구조해석을 수행하여 구조강도상 문제가 없음을 증명하였고, Breakwater 의 역할인 Hatch Cover 상부의 화물에 대한 Protection 효과를 최대화하고자 하는 선주 요구를 충족시키면서 경량화된 Breakwater 를 Design 할 수 있었다.

본론에서도 언급한 바와 같이, 현재 Lloyd Class 에서는 수면으로부터 Breakwater 까지의 거리를 고려하여 설계하중을 규정하지 않고 선박의 Size 에 무관하게 Breakwater 의 Design Load 를 동일하게 적용하고 있음을 알 수 있었으며, 또한 Lloyd Class 에서 제시하는 Load 를 적용하여 Breakwater 설계시 타 선급에 비해 Breakwater 의 Rigidity 가 비교적 크게 설계됨을 알 수 있었다.

Side shell touch type 의 Breakwater 는 Protection 효과상으로는 Cantilever type 에 비해 크게 기여를 하지만 구조강도상에는 거의 기여를 하지 않음을 stress 와 deformation 의 비교를 통해 알 수 있었다.

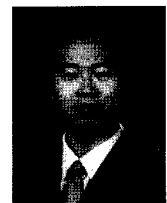
실제로 선박운항중 Breakwater 에는 Green Water 의 충격하중이 가해지며, 충격하중을 받는 시간변화에 따라 구조 응답이 달라질 것이다. 향후, 이러한 부분에 대한 좀 더 면밀한 검토가 필요하리라 사료된다.



< 김영남 >



< 김경래 >



< 유종근 >