

바지의 유연성을 고려한 해상 운송 해석

김덕수, 전석희, 허주호
대우조선(주)

Marine Transportation Analysis for the Offshore Structures Considering the Barge Flexibility

Deok-Su Kim, Seock-Hee Jun, Joo-Ho Heo
Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering Co., Ltd.

Key Words ; marine transportation, barge flexibility, unity value, spectral fatigue analysis

Abstract

In this paper, overall planning and design procedure for the marine transportation are examined. For this purpose, marine transportation analysis for the North Nembra deck structure has been carried out. The results of analysis with the rigid barge transportation are compared to those with the barge considering its flexibility. The environmental conditions, especially waves, are shown to be the most important factor which affected on the structural strength, deformation and fatigue damage.

1. 서론

안전한 해상 운송(marine transportation)을 위해서는 해상 운송의 형태들 즉, 운송 바지 자체 추진기의 유무, 운송 바지의 개수 및 운송 구조물과 운송 과정의 복잡성 등에 따라서 운송과 관련된 규칙들을 적절하게 적용해야만 한다. 해상 운송과 관련되어 적용 가능한 규칙들은 SOLAS, MARPOL, IMO Regulations[1], ISO Standards, NMD Rules 및 DNV Rules 등이 있는데, DNV 규칙인 Marine Operation[2]에는 운송과 관련된 전반적인 계획과 설계 과정을 다음과 같은 단계로 다루고 있다.

- 1) 운송 조건에 맞는 적절한 규칙과 운송 전문 회사 등의 설계 시방서나 표준 등을 확인하고, 물리적인 제약 조건 등을 확인한다.
- 2) 운송에 대한 전반적인 계획을 수립한다. 즉,

운송 개념, 운송시 이용 가능한 장비, 운송 제약 조건과 경제성 등을 고려하여 전체적인 운송 계획을 수립해야 한다.

- 3) 운송시 적용될 환경 조건들과 물리적인 제약 조건들을 결정하여 설계 기초 자료로 검토한다. 설계와 증명에 필요한 모든 조건들 즉, 특정 환경 조건, 하중 조합 조건들을 검토해야 한다.
- 4) 운송 해석 등을 수행하여 타당성을 입증한다. 운송 해석 결과로 만족한 결과를 얻었을 때에는 다음 단계로 넘어 가지만 그렇지 않을 경우에는 다시 원점으로 돌아가는 반복적인 방법을 사용한다.
- 5) 전반적인 운송 절차를 확립한다. 운송 설계 개요와 일정, 개념 평가, 운송 해석 결과로 얻어

지는 운송 구조물의 안정성, 강도 평가, 비상 시 계획 및 안전 평가 등에 대한 과정을 확립해야 한다.

본 연구에서는 운송 바지 형태 중의 하나인 Heavy Lift Carrier를 이용하여 운송하는 경우에 대한 전체적인 설계 과정을 정리하고, 운송 바지의 유연성(barge flexibility)을 고려한 해석을 수행하여 구조 부재에 대한 좌굴 및 피로 등을 강체 바지(rigid barge)로 운송하는 경우와 비교/검토한다. 이를 위하여 서아프리카 앙골라 해역에 설치된 노스넴바 데크(North Nembra Deck) 구조물을 선택하고, 운송 해석은 Ultramarine사가 개발한 MOSES 프로그램을 사용한다[3].

2. 설계 하중

해상 운송에 대한 적절한 규칙과 전반적인 계획이 수립되면, 해상 운송 동안에 구조물 등에 작용하는 하중 추정이 요구된다.

작용 하중으로는 사하중(P), 활하중(L), 변형 하중(D), 환경 하중(E) 및 사고 하중(A) 등이 있고, 이들 중에서 변형 하중으로는 설치시의 오차, 구조물 사이의 구조적인 구속, 부분 침하, 온도에 의한 영향 및 운송 바지에 대한 변형 등이 있다. 환경 하중은 바람, 파, 해류, 조류와 빙하 등에 의해서 발생되고, 이는 운송 해석 등에 있어서 구조 강도, 변형 또는 운송 작업의 제한 등을 주는 매우 중요한 인자가 된다.

구조물 설계에 있어서 극한 강도나 피로 파괴 등에 중요한 인자인 동적 하중으로는 진동하는 파력, 돌풍 하중, 바람에 의한 와동 또는 슬래밍 하중 등이 있다. 그리고 하중 추정에 있어서 중요한 영향을 미치는 비선형 하중들에 대하여도 고려되어야 하는데, 재료 및 기하학적 비선형성, 감쇠의 영향, 하중 성분의 조합에 의한 비선형성, 파의 높이 및 파 입자 속도와 해류의 조합에 의해서 야기되는 비선형 항력 등에 대한 효과를 고려하여 평가되어야 한다.

해상 운송은 무엇보다도 날씨의 제한을 받는데, 운송 기간이 72 시간 미만인 경우에는 설계 기준보다 작은 운송 작업 기준이 고려된다.

$$C_o \leq \alpha \cdot C_d \quad (1)$$

여기서, C_o 와 C_d 는 각각 운송 작업 기준과 설계 기준이다. α 는 풍속에 대해서는 0.8을 사용하고, 유의 파고의 경우에는 Table 1에 의해서 결정되어진다.

운송 기간이 72 시간 이상인 경우에는 예상되는 날씨 상태를 계속해서 감시한다면, 확률 통계 해석으로 얻어진 최대값이 설계 환경 기준과 운송 작업 기준이 된다.

3. 구조 설계

구조물의 거동 및 저항 등의 평가에 사용되는 해석 모델에는 설계 개념, 작업 종류, 파괴 형태 등이 고려되어야 한다. 구조물의 안전은 작용하는 하중 효과(load effect)와 구조물의 저항(structural resistance) 사이의 비율이 만족할 때 얻어지는데 상세한 요구 조건 및 기준은 적용되는 설계 방법에 의해 좌우된다. 이에 는 확률적 방법(probabilistic method), 부분 계수법(partial coefficient method), 허용 응력법(permissible stress method) 등이 있다.

구조 강도의 검증을 위해서 부분 계수법이 이용되는데 하중 및 재료 계수는 부분 계수법의 원칙을 따른다. 한계 상태는 구조물이 그 기능을 멈추거나 설계 조건을 만족하지 못할 경우를 의미하는데 이에 는 극한 한계 상태, 점진 붕괴 한계 상태, 피로 한계 상태 및 가동 한계 상태 등이 있다.

한계 상태들 중에서 극한 한계 상태에 대한 하중 조건이 Table 2에서 보여진다. 점진 붕괴, 피로 및 가동 한계 상태에 대한 하중 계수는 모두 1.0이 된다.

운송 구조물은 전체 붕괴 없이 국부 손상에 저항할 수 있어야 한다. 특히, 구조 접합부는 매끄러운 형상 변화와 적절한 배치를 갖도록 하여 응력 집중이 발생하지 않도록 해야 한다. 구조물은 부식, 손상, 도면상에 보이지 않는 수정된 사항 등에 의해 강도가 감소하므로 초기 설계시 이러한 강도 저감 요인들이 고려되어 평가되어야 한다. 손상 상태(risk, explosion or fire)에서 구조물 및 장비 등은 사고 손상의 위험이 최소화되도록 대비해야 한다. 이에 대한 대책으로 보호 구역(sheltered location)을 제공하거나 국부 강도

등을 증가시킨다.

3.1. 구조 모델링

파(wave)에 의해서 6자유도 운동을 하는 해양 부유체에 대한 운동 방정식은 다음과 같다[4].

$$[M]\{\ddot{\Delta}\} + [K]\{\Delta\} = \{h\} + \{d\} + \{k\} \quad (2)$$

$$\{\Delta\} = \{x\} + \{u\}$$

여기서, [M]과 [K]는 각각 부유체의 질량과 강성 매트릭스이다. $\{\Delta\}$ 는 구조적인 거동 벡터로 부유체의 강체 운동 $\{x\}$ 와 탄성 변형 $\{u\}$ 의 합으로 나타낼 수 있다. $\{h\}$ 는 해상 상태와 부유체와의 상호 작용에 의한 힘을 대표한다. $\{d\}$ 는 자중을 $\{k\}$ 는 바람, 해류 등에 의한 힘을 의미한다. 위의 식(2)에서 다음과 같은 가정을 적용하면, 부유체에 대한 강체 운동 해석과 부유체(운송 바지)를 포함한 운송 구조물의 정적 응력 해석을 수행할 수 있다.

- 1) 부유체의 탄성 변형 $\{u\}$ 의 가속도를 무시한다.
- 2) 부유체의 강체 변위 $\{x\}$ 는 유체/구조 상호 작용에 의한 힘 $\{h\}$ 에 포함된다.
- 3) 유체/구조 상호 작용에 의한 힘 $\{h\}$ 는 탄성 변형 $\{u\}$ 와는 독립적이다.
- 4) 운송되는 구조물은 물에 잠기지 않고, 파 강제력은 바지에만 작용한다.

운송 바지의 유체 모델은 접수 표면적의 모양에 기초하고 구조 모델은 구조적인 늑골 형상에 의존하는 부적합성(inherent incompatibility)이 존재하는데 이 문제를 해결하기 위해서는 파하중을 운송 바지에 적절하게 전달하는 여러 형태의 매핑 기법(mapping scheme)이 개발되어야 한다.

파에 의해서 하나의 유체 요소에 작용하는 하중을 운송 바지의 길이 방향으로 적분함으로써 운송 바지 전체의 파 하중을 구할 수 있다. 이러한 하중들은 유체 요소의 형상이 결정된 후에 사용자가 정의하는 여러 개의 구조 절점들에 적절히 매핑되고, 최소자승법(least square technique)을 사용하여 하중들에 대한 적절한 분포를 얻는다.

3.2. 구조 해석

운송되는 구조물의 탄성 변형 $\{u\}$ 를 구하기

위해서는 응력 전달 함수(stress transfer function, RAO)를 계산해야 한다. 주어진 해상 상태에서 구조 요소에 작용하는 반력을 계산한다. 다음으로 요소 주변에 위치한 N 개의 절점에 대해서 각각의 응력 즉, 축 응력(axial stress), 면내 굽힘 응력(in plane bending stress) 및 면외 굽힘 응력(out of plane bending stress)을 결정한다.

주어진 절점에서의 응력 전달 함수는 Kuang, et al[5]과 Smedley[6]의 결과로부터 결정된 응력 집중 계수와 위에서 구한 응력 성분을 고려함으로써 결정된다. 이러한 응력 전달 함수는 구조물의 피로 수명을 평가하기 위한 기초가 된다. 따라서 응력 전달 함수를 계산할 때 경험적인 수치인 응력 집중 계수(stress concentration factor, SCF)를 함께 고려하는 것이 필요하다[7].

어떤 해상 상태 S 에 대한 응력 전달 함수와 이에 대한 파스펙트럼을 이용하여 응력의 단기 응답 분포를 구한다. 주어지는 응력 범위와 피로 파괴 발생 빈도의 관계를 나타내는 S-N 곡선을 이용하여 구조물에 가해지는 누적 손상도(Cumulative Damage Ratio) CDR_s 가 구해지면, 여러 개의 서로 다른 해상 상태 NS 에 대한 총 누적 손상도 CDR 을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$CDR = \sum_{s=1}^{NS} CDR_s \quad (3)$$

4. 해석 사례 연구

운송 해석의 대상으로 서아프리카 앙골라의 캐빈다 해역(Cabinda offshore)으로 운송되었던 노스넴바 데크 구조물을 선정하였다. 해상 운송을 위해서 OHT(Offshore Heavy Transport)사의 Heavy Lift Carrier를 사용하고, 운송은 옥포만을 출발해서 남중국해, 인도양, 남아프리카 희망봉 등을 거치는 총 9680 마일의 거리에서 이루어졌다.

운송 바지 위에 데크 구조물을 적절하게 고정시킨 상태에서 운동 해석을 수행하였고, 운동 해석 결과를 구조 해석을 위한 입력 자료로 해서 각 부재에 대한 전단, 좌굴 및 처짐을 검토하였다. 그리고 운송 경로에 따른 피로 해석을 수행하여 운송 구조물의 안전성을 검증하였다.

강체 바지 또는 유연 바지를 이용한 해상 운송 해석을 위하여 운송 바지는 유체 모델뿐만 아니라 구조 모델을 포함하여 모델링되었다.

4.1. 환경 조건

전체 운송 경로에 대한 최대파는 선수파(head sea) 자료에서 구해질 것이고, 운송 바지의 진행 방향과 일치하는 선수파(180°)와 선미파(0°)에 대한 파고와 파주기의 분포도를 Table 3에 나타내었다.

4.2. 구조 모델링

노스넴바 데크에는 헬리데크(helideck)를 포함하여 총 7개의 데크가 있고, 2행 4열의 주부재인 기둥(column leg)이 있다. 이 기둥들이 운송 바지인 OHT carrier와 스킨 슈(skid shoe)에 의해서 연결되고, 횡동요(roll motion)에 의한 안전성을 위하여 8개의 결박 위치(tie-down point)를 가지고 있다.

데크 구조물과 운송 바지와 연결되는 스킨 슈는 수직 방향의 운동에 대해서만 구속되고, 수평방향의 구속은 운송 바지와 데크 구조물 사이의 8개 결박 위치와 데크 구조물 선수와 선미부의 가장자리 4곳에서 이루어진다. 운송 바지와 데크 구조물 전체에 대한 경계 조건으로는 바지의 선미 부분 요소에 6 자유도에 대한 구속 조건을 주었다. 노스넴바 데크를 포함한 모델링은 Fig. 1에 나타내었다.

4.3. 운송 바지의 안정성

운송 바지의 안정성 검토에는 IMO Standard, DNV의 Marine Operation 등을 적용하였고, 안정성 검토를 위한 풍속은 100 knots로 하였다. 발라스트된 바지의 자유 표면을 고려한 메타센타의 크기는 7.27 m(>0.15 m, IMO)이었고, 침수 위치에서 복원정 곡선 면적은 $0.17 \text{ m} \cdot \text{rad}$ ($>0.09 \text{ m} \cdot \text{rad}$)이었다. 바람에 의한 경사 곡선의 면적에 대한 복원정 곡선의 면적비는 10.84(>1.4 , DNV)로 운송 바지의 안정성에 대한 규정을 만족하고 있음을 알 수 있다.

4.4. 최대 운동 응답

운송 바지의 운동 해석에는 ISSC 스펙트럼을 이용한 스펙트럼 방법을 사용하였다. 바지에 작용하는 부가 질량, 점성력 및 유체력 등을 구하고, 단위 파진폭에 대한 운동 응답 전달 함수를 구하면, 파 스펙트럼과의 선형 조합으로 바지의 최대 운동의 크기를 구할 수 있다.

운동 응답 전달 함수와 Table 3으로부터 구한 유의 파고 8.75 m, 평균 파주기 12.4 sec로 표현되는 ISSC 파스펙트럼과의 선형 중첩으로 구한 운송 바지의 최대 운동 응답은 Table 4에 나타내었는데 운송 바지의 종방향, 횡방향 및 수직 방향에 대한 최대 가속도는 모두 DNV 규칙에서 규정하는 0.45g, 0.65g 및 0.35g를 만족하였다.

4.5. 구조 강도 및 피로 손상도

강체 바지와 유연 바지에 탑재된 데크 구조물에 대한 구조 해석 결과, 데크 구조물과 운송 바지를 연결하는 결박 부재인 8개의 원통형 부재에서 다른 구조 부재에 비해서 비교적 큰 응력이 나타나고 있음을 알 수 있었고, 이들에 대한 응력비(unity value)는 Fig. 2와 Fig. 3에서 비교하였다. 모든 결과가 허용 응력비 1.0보다 작아서 구조물의 안전성을 확인할 수 있었으며, 또한 유연 바지의 응력비가 강체 바지에 비하여 크게 나타나 유연 바지의 경우가 강체 바지에 비해서 더 큰 응력이 작용하고 있음을 알 수 있었다.

운송 바지를 포함한 노스넴바 데크의 처짐 변형에 대한 비교는 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. 구조물에 작용하는 응력과 마찬가지로 유연 바지의 경우에서 강체 바지의 경우보다 더 큰 처짐 변형이 발생함을 알 수 있었다.

운송되는 구조물의 피로 파괴 등에 대한 검토는 전체 운송 경로에 대한 파의 관측 자료(wave scatter diagram)로부터 파의 방향, 발생 빈도 등을 고려하여 수행하였다.

노스넴바 데크 구조물에 대한 허용 누적 피로 손상도는 0.25인데, Table 5에서 알 수 있듯이 가장 큰 누적 피로 손상도는 ROW A-2에서 0.1182로 허용값 0.25를 만족하였다.

5. 결론

해상 운송은 어떠한 기상 악조건이 발생되더라도 운송되는 구조물이 안전한 상태를 유지해야만 하고, 이를 위하여 운송 시스템 장비와 숙달된 인원이 필요하게 된다.

본 연구를 통하여 해상 운송의 전반적인 계획과 설계 과정 및 해석 기술을 개발하였다. 노스뎀바 데크 구조물에 대한 운송 해석을 통하여 운송되는 구조물의 안정성 평가 및 강재 바지와 유연 바지에 탑재되는 경우에 대하여 구조물의 각 부재에 대한 처짐, 허용 응력 및 피로 누적 손상도 등을 비교/검토할 수 있었다.

해상 운송은 해양 공사 발주처와 제작사가 전문 운송 해석 회사에 용역을 주고 있고, 이들의 결과에 따라서 기본 설계에 대한 구조 변경 등이 발생하는 경우가 있다. 기본 설계 후의 구조 변경 등은 생산 설계 및 현장 제작에 많은 어려움을 초래하고 있어서 본 해석 기술 개발은 설계 품질 향상에 기여할 것으로 생각된다.

참고 문헌

- [1] IMO Standard, 1993.
- [2] DNV, "Rules for Planning and Execution of Marine Operation," 2000.
- [3] Ultramarine Ltd., "MOSES Reference Manual Ver. 5.09," 1999.
- [4] Ultramarine Ltd., "MOSES Theoretical Document," 1991.
- [5] Kuang, J. G., et al, "Stress concentration in Tubular Joints," Journal of the Society of Petroleum Engineering, 1977.
- [6] Smedley, G. P., "The Avoidance of Fatigue Failure in Offshore Steel Structures," Proceeding I. I. W. and Metals Technology Conference, 1976.
- [7] API, "API Recommended Practice 2A," 20th Edition, 1993.
- [8] AISC, "Manual of Steel Construction - Allowable Stress Design," 9th Edition, 1989.

Table 1 Significant wave height- α values

Operation Period (hrs)	Design Wave Height(m)		
	$1 < H_s \leq 2$	$2 < H_s \leq 4$	$H_s > 4$
$Tr < 12$	0.68	0.76	0.80
$Tr < 24$	0.63	0.71	0.75
$Tr < 48$	0.56	0.64	0.67
$Tr < 72$	0.51	0.59	0.63

Table 2 Load factor of ULS

Load Condition	Load Categories				
	P	L	D	E	A
a	1.3	1.3	1.0	0.7	NA
b	1.0	1.0	1.0	1.3	NA

Table 3 Relative frequency table of wave height through the whole transportation route

Relative Frequency Table of Wave Height Against Wave Period
Presented as a Proportion of the Whole Route in Parts Per Hundred Thousand

Route: OKPO TO CABINDA
Departure: 1 FEBRUARY
Speed: 12 knots

Sector: WHOLE ROUTE Arrival: MARCH

Direction with respect to Ship Heading: 000°/180°

Significant Wave Height (m)	Zero Crossing Wave Period (seconds)															Cumulative	
	2.3	3.4	4.5	5.6	6.7	7.8	8.9	9.10	10.11	11.12	12.13	13.14	14.15	15.16	Total		ative
0.0 - 0.5																3	37306
0.5 - 0.9							1	1	1							5	37503
0.9 - 0.8						1	2	4	4	3	1	1				16	37468
7.5 - 7.5						2	6	11	11	8	4	2	1			44	37462
6.5 - 7.0						1	7	11	10	8	3	1				43	37438
8.0 - 8.5				1	5	15	21	19	11	5	2	1				60	37396
5.5 - 6.0				1	7	18	23	19	10	6	2	1				64	37316
5.0 - 5.5				4	24	80	77	61	39	14	5	1				270	37231
4.5 - 5.0			1	11	61	141	171	128	67	27	6	2	1			618	36952
4.0 - 4.5			2	25	131	285	322	225	110	41	13	3	1			1158	36334
3.5 - 4.0			4	63	308	610	642	415	189	66	19	5	1			2328	35170
3.0 - 3.5			7	113	500	905	859	509	214	70	19	4	1			3201	32847
2.5 - 3.0			18	227	884	1377	1188	627	241	73	18	4	1			4818	28947
2.0 - 2.5			1	30	384	1245	1721	1288	619	216	60	14	3	1		5887	25028
1.5 - 2.0			2	78	643	1753	2090	1374	589	185	47	10	2			6770	19441
1.0 - 1.5			5	130	629	1786	1700	941	347	96	21	4	1			5848	12871
0.5 - 1.0			8	171	788	1194	862	388	123	29	8	1				3591	6823
0.0 - 0.5			1	66	685	1115	910	410	129	27	5	1				3232	3232
Total	1	81	1006	4183	8773	10295	7439	3733	1424	443	119	29	8	1		37608	
Cumulative	1	82	1091	5274	14047	24312	31751	35486	36908	37351	37470	37498	37595	37506		37506	

Table 4 Accelerations as a result of transportation analysis

	Maximum Single Amplitude Accelerations		
	Longi. g	Trans. g	Vertical g
Beam Sea	0.010	0.211	0.228
Quartering Sea	0.044	0.107	0.103
Head Sea	0.046	0.014	0.075

Table 5 Comparison of cumulative damage ratio the most heavily load point

Joint	Cumulative Damage Ratio			
	Rigid Barge		Flexible Barge	
	In Plane	Out of Plane	In Plane	Out of Plane
ROW A-2	0.1054	0.0574	0.1182	0.0657

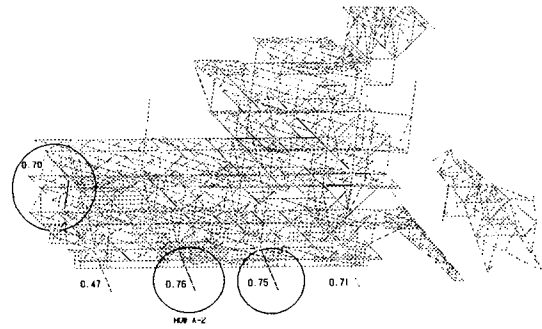


Fig. 3 Unity check for flexible barge transportation

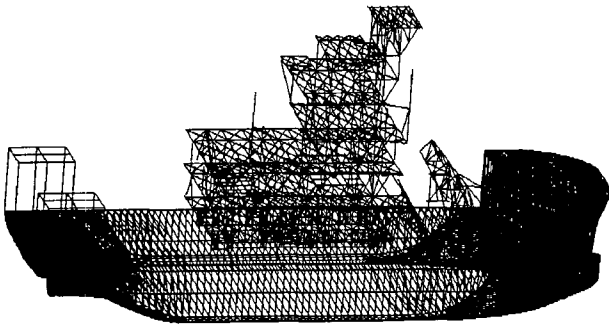


Fig. 1 Model of North Nemba Deck with OHT Carrier

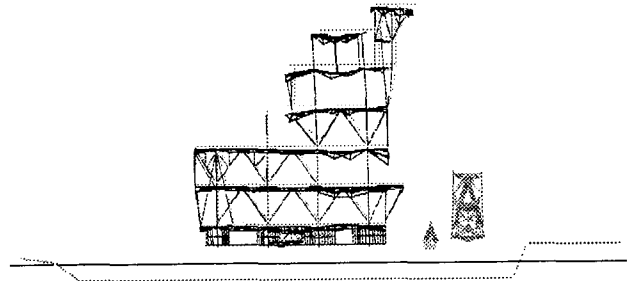


Fig. 4 Global deflection for rigid barge transportation

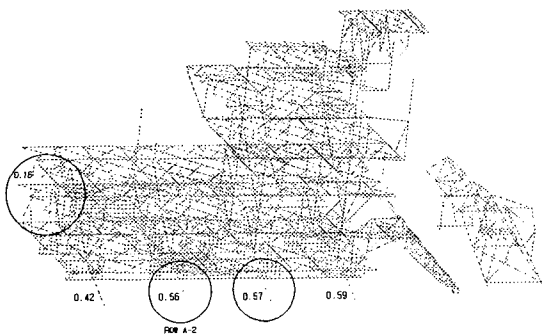


Fig. 2 Unity check for rigid barge transportation

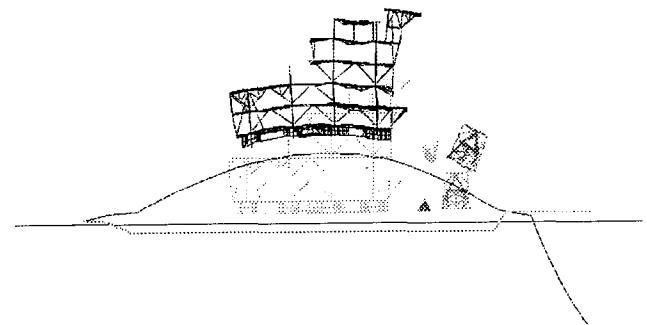


Fig. 5 Global deflection for flexible barge transportation, hogging condition