

심해 계류인장각 플랫폼의 모형시험 연구(II) - 모형시험 및 해석 -

김진하 · 홍사영 · 최윤락 · 홍섭 · 김현조
한국해양연구소 해양개발시스템연구센터

The Study on Model Test of Tension Leg Platform(II) - Model Test & Analysis -

Jin-Ha Kim, Sa-Young Hong, Yoon-Rak Choi, Sup Hong, Hyun-Joe Kim
Ocean Development System Department, KRISO/KORDI, Taejon 305-600, Korea

KEY WORDS: Model Test Technique 모형시험기법, Ocean Engineering Basin 해양공학수조, Tension Leg Platform 심해 계류인장각플랫폼, Motion Response 운동응답, Wave Drift Force 파랑 표류력, Sum-Frequency Excitation 합주파수 파기진력

ABSTRACT: Linear and nonlinear motion responses of a Tension Leg Platform(TLP) was investigated by model tests. The model tests were carried out at KRISO's Ocean Engineering Basin which has a deep pit of which diameter and depth are 5 meters and 12.5 meters, respectively. Optical sensors were used for measuring drift motions, and a set of accelerometers were employed for analyzing wave frequency motions. ISSC TLP was chosen as the model for the present study. Scale ratio was 1/65 and elastic modelling of tether system were conducted. Very good agreement was obtained between experimental results and theoretical calculations not only in linear motion responses but tension responses, nonlinear wave drift force and double frequency excitations.

1. 서 론

심해 계류인장각 플랫폼(이하 TLP로 명기함)은 1차 파기진력에 대한 공진현상의 회피, 파랑중 상대적으로 작은 운동응답 등의 장점과 우수한 작업성능 및 경제성 관점에서 심해용 플랫폼으로 각광을 받고 있다.

최근, 국외 선진연구기관에서는 바람, 조류와 저주파수 파랑 표류력에 의한 표류운동 및 합주파수 기진성분의 비선형 파강제력에 의한 "Springing" 과 "Ringing" 등 비선형 거동특성과 계류인장각과 주변유체간 상호작용의 영향에 대한 이론 및 실험을 병행한 연구가 활발히 진행중에 있다(Irani et al., 1992; Huse et al., 1995; J. Zou et al., 1998). 국내에서도 1980년대부터 심해자원개발에 관심을 기반으로 TLP와 같은 심해 부유구조물과 관련한 다양한 연구가 수행되어왔다(홍 등, 1990; 박, 1991; 박, 1992; 김, 1995; 최, 1997; 이, 1998). 그러나, 국내시험시설의 취약성에 의해 주로 TLP에 대한 이론적 연구만이 진행되어 왔다. 한국해양연구소 선박해양공학분소(KRISO)에서는 바람, 파, 조류등을 생성할 수 있는 복합 환경재현장치와 관련 모형시험설비를 구비한 해양공학수조를 보유하게 되어 국내에서도 TLP에 대한 본격적인 실험연구가 가능하게 되었다(홍 등, 1998; 홍 등, 1999). 앞선 연구논문에서는 한국해양연구소 선박

해양공학분소의 해양공학수조(Ocean Engineering Basin)의 심수부(직경: 5m, 깊이: 12.5m)를 활용한 TLP의 운동모형시험과 관련하여 시험장치와 모형시스템 구성 및 제작, 자료취득 및 해석시스템의 구성등에 대해 상세히 기술하였다(김 등, 1999).

본 논문에서는 이전 연구를 바탕으로 해양공학수조에서 수행된 파랑중 TLP의 모형시험과 관련한 시스템 구성 및 설치, 계측항목 및 파랑시험조건, 시험해석기법, 모형시험과 이론계산 결과의 해석등에 대해 기술한다.

2. TLP 모형시험

2.1 모형시스템 구성

TLP 모형시험은 해양공학수조의 대수심용 계류시스템 설치를 위한 인공시반구조물과 회전테이블 장치등의 주변설비를 갖춘 심수부(Pit)설비를 이용하여 수행하였다(홍 등, 1998; 김 등, 1999).

본 모형시험을 위한 대상 TLP는 상세 실선 물성치와 실험 및 수치계산 결과자료(Tan S. Gie and W.C. de Boom, 1981; E. Taylor and E.R.Jefferys, 1986)의 확보가 용이한 표준 ISSC TLP의 축척비 1/65 모형을 사용하였다.

TLP 모형 플랫폼은 강체모형으로 고려하여 경량, 고강성 및 방수성이 우수한 알루미늄판을 판금가공하고, 폰툰(Pontoon)과

컬럼(Column)의 이유부를 용접하여 제작하였다(김 등, 1999).

TLP 모형 테더시스템은 외경, 축강성, 단위길이당 중량 등을 상사시킨 탄성모델링을 수행하여 제작하였다. 테더모형은 길이 6m 의 알루미늄 튜브를 인발가공하여 튜브내부에 황동봉을 설치함으로써 단위길이당 중량을 상사시켰다. 또한, 테더의 상하단은 볼조인트를 사용하여 TLP운동에 따른 굽힘응력을 완화하도록 제작하였다. 단면 축강성은 스프링을 연결하여 조절하고, 스프링의 하단에는 선장력 중량을 연결하여 선장력을 부가하였다(Irani et al., 1992; 홍 등, 1998, 김 등, 1999).

Table 1 과 Fig. 1에 ISSC TLP의 주요제원 및 물성치를 나타내었다.

Table 1 Characteristics of ISSC TLP Prototype

Description	Value
Spacing between column centre lines [m]	86.25
Column radius [m]	8.44
Pontoon width [m]	7.5
Pontoon Height [m]	10.5
Total platform height [m]	67.5
Operating draft [m]	35.0
Displacement [ton]	54500
Platform weight [ton]	40500
Total system pre-tension in tethers [ton]	14000
Longitudinal & Transverse metacentric height [m]	6.0
Platform mass [ton · sec ² /m]	4130
Roll & Pitch moment of inertia [ton · m ²]	82.37*10 ⁶
Yaw moment of inertia [ton · m ²]	98.07*10 ⁶
Vertical position of C.O.G. above keel [m]	38
Gyradius of Pitch(Roll) [m]	45.1
Gyradius of Yaw [m]	49.21
Length of the mooring tethers [m]	415
vertical stiffness of the combined tethers [ton/m]	8.2*10 ⁴
Roll/Pitch restoring force coefficients due to tethers [ton · m/rad.]	1.53*10 ⁸

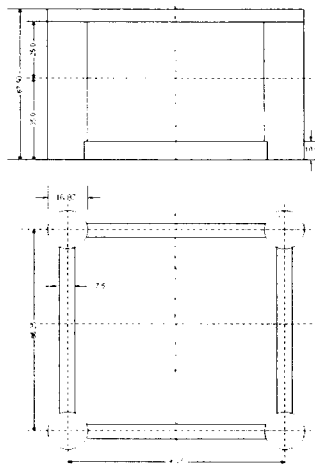


Fig. 1 Configuration of ISSC TLP

2.2 계측항목 및 조건

TLP 운동모형시험은 심수부를 활용하는 플랫폼과 테더가 결합된 종합 계류모형시험이다. 비선형 파면효과 등에 의해서 발

생되는 TLP 주기동(Column) 주변 수면의 급격한 변화는 부력과 인장력간의 평형상태에 영향을 줌으로써 고주파수 공진운동인 "Ringing"현상의 주요 발생기구조로 이해되고 있다(Narvig, 1994).

이러한 물리량의 검출을 위한 주파수 영역별 주요 계측항목과 계측시스템을 아래와 같이 나타내었다(김 등, 1999).

(1) 저주파수 영역

- 플랫폼의 장주기 운동(drift motion) 및 옵셋 : 광학센서시스템(Optical Photo Sensor System)

(2) 파주파수 영역

- 플랫폼 운동 : 스트랩다운 가속도계 시스템 (Strap-Down Accelerometer System)
- 테더 장력 : 방수형 로드셀(50Kgf)
- 상대파고 : 저항식 파고계(Resistance Wave Probe)

(3) 배주파수 및 합주파수 영역

- 고차 비선형 파랑운동 : 스트랩다운 가속도계 시스템
- 테더 배주파수 장력 : 방수용 로드셀(50Kgf)

Fig. 2는 TLP 모형시험의 각종 센서의 배치도와 사진을 나타내었다. 본 TLP 모형시험에는 16비트의 ADC (Analog to Digital Converter)를 지닌 IOTECH 사의 Daq시리즈와 P/C를 이용하여 자료 취득시스템을 사용하였다. 데이터의 취득은 실험에 사용된 입사파의 주기에 3배 진동수에 대해서도 계측치의 해상도가 충분하도록 50Hz로 이루어졌다.

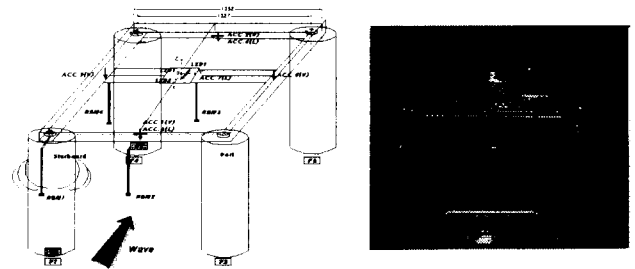


Fig. 2 Configuration & Installation of Measuring system

2.3 모형시스템 설치

해양공학수조에서의 TLP 모형 운동시험을 위한 모형시스템의 설치절차를 Table 2 에 나타내었다.

Table 2 Installation Flow of Model System for TLP Model Test

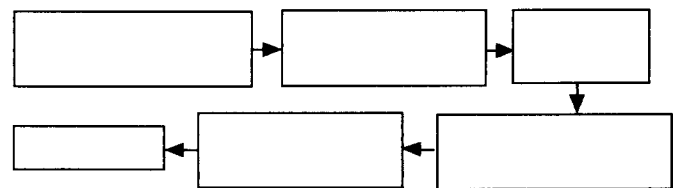


Fig. 3과 Fig. 4는 각각 모형시스템의 주요 설치장면과 구성도를 보여주고 있다.

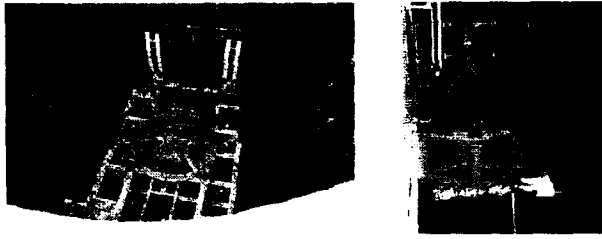


Fig. 3 TLP Model Installation in Ocean Engineering Basin

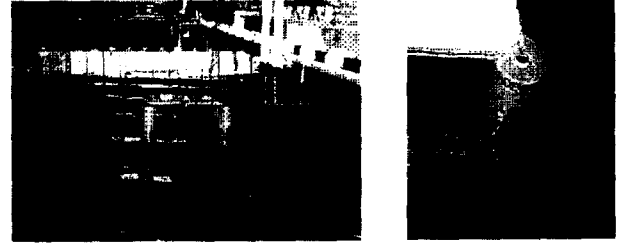


Fig. 6 TLP Model Test in Waves

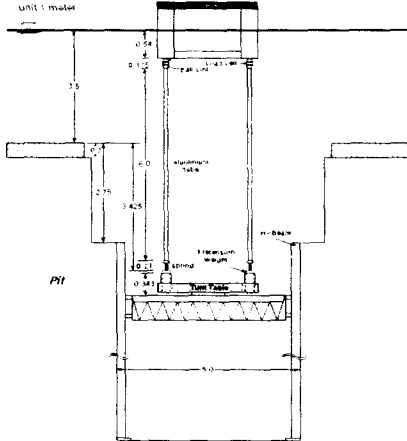


Fig. 4 Configuration of TLP Model Installation

2.4 시험조건

TLP 모형시험조건은 MARIN에서 수행된 실험결과(Tan S. Gie and W.C. de Boom, 1981)와 비교를 위해 규칙파 및 불규칙파에 대해 파고와 주기를 Table 2와 같이 결정하였다. 파향은 선수파(180도)와 선수사파(157.5도, 135도)이고, 좌표계는 Fig. 5의 직각우수좌표계를 사용하였다. Fig. 6과 Fig. 7은 각각 모형시험의 수행사진과 계측된 신호의 일례를 나타내고 있다.

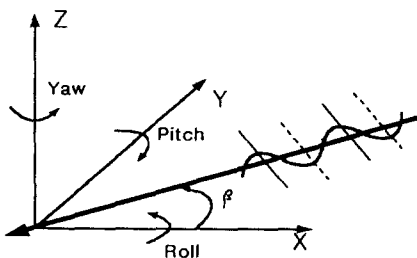


Fig. 5 The Coordinate System

Table 2 Wave Characteristics for TLP Model Test

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
H(m)	4.0	4.0	4.0	6.0	8.0	4.0	6.0	8.0	8.0	4.0	8.0	12.0	8.0
T(sec)	6.0	6.5	7.5	7.5	7.5	9.0	9.0	9.0	9.0	11.0	15.0	15.0	21.0
Irregular Waves			T (sec)		H1/3 (m)								
Heading : 180° , 157.5°			13.7		9.8								

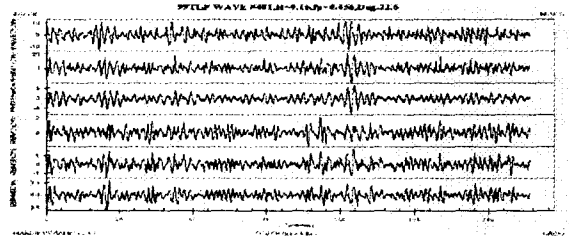


Fig. 7 Example of Measured Signal for TLP Model Test

3. 결과해석 및 고찰

본 논문에서는 선수사파(157.5도)중에서의 TLP 모형시험의 결과를 MARIN 실험치(Tan S. Gie and W.C. de Boom, 1981) 및 HOBEM을 이용한 이론계산치(최, 1997)와 비교하여 대표적으로 나타내었다. 규칙파(REG)와 불규칙파(IRREG)중에서 수행된 실험치(KRISO)는 각각 흑점(●)과 파선, 규칙파중의 MARIN 실험치는 (▲)로 표기하였다. 불규칙 파랑중의 응답은 입사파와 응답스펙트럼의 FFT해석(Fast Fourier Transform Analysis)으로 산정하였고, 이론계산은 고차경계요소법(Higher Order Boundary Element Method)으로 구하였다(최, 1997).

Fig. 8 - Fig. 11은 파랑중의 TLP의 운동응답(RAO)를 나타내고 있다. 여기서 A는 파진폭이고 K는 파수이다.

규칙파중 운동응답 실험결과가 산정된 불규칙파중 응답뿐만 아니라 MARIN 실험치와도 좋은 상관관계를 보이고 있다. 수평운동응답의 모형시험결과가 MARIN 실험치보다 계산치에 더욱 근접함을 알 수 있다. 그러나, 상하운동응답의 시험결과는 계산치와 상대적으로 큰 차이를 보이고 있다. 이는 본 모형시험에 계측된 TLP의 수직모드의 파랑응답이 수평모드에 비해 약 1/100 정도에 해당하는 매우 미소한 양으로서 운동계측장비의 해상도 범위를 벗어난 계측장치의 실험오차에 기인하는 것으로 사료된다. 향후, 수직운동의 계측에 있어서는 보다 정밀한 계측장비의 사용이 요구된다.

Fig. 12 - Fig. 15는 파랑중 테더의 변동장력을 나타내고 있다. 파랑중 테더장력 실험과 이론계산 결과가 좋은 일치율을 보이고 있다. 특히, 변동장력의 극부최대응답이 나타나는 주파수 범위에서 MARIN 실험결과보다 이론계산치에 더욱 근접한 결과를 보여주고 있다. 동일 주파수에서 파고변화에 따른 장력응답의 차이는 미소한 것으로 나타났다. 불규칙 파랑중의 장력응답은 규칙파의 실험결과와 좋은 상관관계를 나타내고 있으며,

테더 장력의 최대진폭응답은 약 800톤 정도로 산정되었다.

Fig. 16은 파랑중 상대파고의 실험결과를 나타내고 있다. 불규칙 파랑중에서의 계측치가 규칙파와 좋은 상관관계를 보이고 있다. 특히, 상대파고의 최대계측치는 주기동사이의 중앙에 설치된 위치(RBM 3 & 4)에서 약 12m 로 나타났으며, 이는 수면과 플랫폼 갑판사이의 Air Gap의 약 50%이하로 계측되었다. Fig. 17은 파랑중 주기동 하부의 변동압력의 실험결과이며, 0.6 rad/sec 이하의 저주파수 영역에서 변동압력이 증가되는 반면 고주파수에서 변동압력이 감소되는 경향을 보여주고 있다.

Fig. 18 - Fig. 19는 평균표류력과 모우먼트 결과를 보여주고 있다. 평균 표류력과 선주요 모우먼트의 실험치는 광학센서로부터 얻어진 수평방향의 평균표류변위로부터 각각 식(1)과 식(2)를 이용하여 구하였다.

$$\begin{aligned} F_x &= T \sin \theta \cos \psi \\ F_y &= T \sin \theta \sin \psi \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, F_x 와 F_y 는 각각 종방향 및 횡방향 평균표류력이며 T 는 테더장력, $\theta = \tan^{-1}(X/h)$, $\psi = \tan^{-1}(Y/X)$ 로 나타나는 표류변위 각도이고, X 와 Y 는 수평방향의 평균표류 변위이다.

$$\begin{aligned} \overline{M}_\psi &= \sum_{j=1}^n \overline{F}_a \ell \\ &= 4 \ell^2 \frac{F_0}{h} (1 + \sin \psi - \cos \psi) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, \overline{F}_a 는 수평방향의 표류력이고 F_0 는 테더장력, ψ 는 평균 횡 동요각도, ℓ 은 TLP 모형의 중앙에서 테더까지의 수평거리이다.

식(1)과 (2)를 이용한 평균표류력과 모우먼트의 실험치가 계산치 및 MARIN 의 실험치와 좋은 일치를 보이고 있다.

파랑중 상하운동 및 종동요의 합주파수 2차 기진력은 FFT 해석결과를 통해 얻을 수 있다. 구해진 실험결과는 합성된 상하동요와 종동요 파강제력의 신호를 이용하여 아래의 절차를 통해 구한다.

- ① 상하동요와 종동요의 파강제력을 테더 장력을 합성하여 구한 후 시계열 데이터를 생성한다.
- ② 생성된 데이터를 FFT 해석을 통해 스펙트럼의 1차항 성분과 스펙트럼의 진폭을 구한다.
- ③ 파도 스펙트럼의 배주파수(double frequency)에 해당되는 상하동요 및 종동요 파강제력 2차항 성분 주파수의 진폭을 구한다.
- ④ 구해진 파와 파 강제력 진폭의 전달함수를 구한다.

Fig. 20은 ②번에서 기술한 FFT 해석결과의 일례를 나타내었다. Fig. 21과 Fig. 22은 위의 절차에 의해 구해진 본 모형시험의 상하동요 및 종동요 파강제력의 실험치와 이론 계산치이다.

여기서, ρ 는 유체밀도, g 는 중력가속도, L 은 주기동 중심

사이 거리의 1/2이다. 본 모형시험의 실험치가 계산치와 좋은 일치를 보여주고 있으며 특히, 고주파수에서의 급격한 변화는 TLP의 복잡한 형상에 의한 유체의 상호간섭현상으로 사료된다(최 등, 1997). 합주파수 기진력 성분중 종동요 모우먼트의 실험치가 상하동요 기진력에 비해 고주파수 영역에서 이론계산치와 일치도가 떨어지는 것은 실험의 종동요 모우먼트의 수평력성분이 무시된 이유로 사료된다.

4. 결 론

본 논문에서는 해양공학수조의 심수부를 활용한 TLP 운동모형시험결과를 고찰하였다. 규칙파중 선형운동응답 뿐만 아니라 파랑 표류력, 합주파수 파랑기진력 응답에서도 이론해석치와 매우 높은 상관관계를 얻음으로써 본 연구에서 사용한 실험방법과 결과의 신뢰성을 확인하였다. 아울러 타 기관의 실험치와도 비교하여 매우 좋은 상관관계를 가짐을 확인하였다. 향후, 보다 거친 환경조건에서 "Ringing" 과 같은 TLP의 대표적 비선형 거동현상을 실험적으로 규명하고 이를 시간영역 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있는 통합 거동해석기법의 개발이 필요하며 비선형 파랑하중의 발생기구 이해를 위해 수치 파수조를 이용한 기본적인 연구가 지속되어야 할 것으로 사료된다.

후 기

본 논문은 과학기술부가 기관고유사업으로 지원한 "심해 계류인장각 플랫폼의 모형시험 기법개발" 과제의 수행결과와 일 부임을 밝힌다.

참 고 문 헌

- 김진하(1995). "인장계류식 해양구조물의 동적응답 해석", 부경대 석사학위논문
- 김진하 등(1999). "심해 계류인장각 플랫폼의 모형시험 연구(I) -시험모형 및 계측시스템-", 한국해양공학회 추계학술대회
- 박우선(1991). "파랑하중에 대한 Tension Leg Platform의 신뢰도 해석", 한국과학기술원 박사학위논문
- 박정일(1992). "3차원 곡면 경계요소법을 이용한 텐션레그플랫폼의 동적해석", 서울대 박사학위논문
- 이창호(1998). "불규칙파중의 인장계류식 해양구조물의 비선형 응답해석", 부경대 박사학위논문
- 최윤락(1997). "고차경계요소법을 이용한 이차항 파랑하중 해석", 서울대 박사학위논문
- 홍사영 등(1991). "TLP 운동특성 연구", 해사기술연구소 연구보고서
- 홍섭 등(1998). "심해 계류인장각 플랫폼의 모형시험 기법 개발", 한국기계연구원 연구보고서
- Eatock Taylor and E.R.Jefferys(1986). "Variability of Hydrodynamic Load Predictions for Tension Leg Platform", Ocean Engineering, Vol.13, No.5
- Huse, E. and Stansberg, C.T(1995). "Third and Higher Order

Content of TLP Springing Excitation", Proc. Offshore Technology conference, OTC7813, pp. 97-103.

Irani, M.B., Mogridge, G.R. and Funke, E.R.(1992). "Model Testing of Tension Leg Platforms -Part II: Experimental Hardware and Data Analysis". ISOPE Journal, Vol.2, No.2

J.Zou, Y.Xu & C.H.Kim(1998). "Ringing of ISSC TLP Due to Laboratory Storm Seas", International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol.8 No.2

Narvig, B.(1994). "A Proposed Ringing Analysis Model for Higher Order Tether Response". ISOPE, Vol.1

Tan S. Gie and W.C. de Boom(1981). "The wave Induced Motions of A Tension Leg Platform in Deep Water", OTC 4074

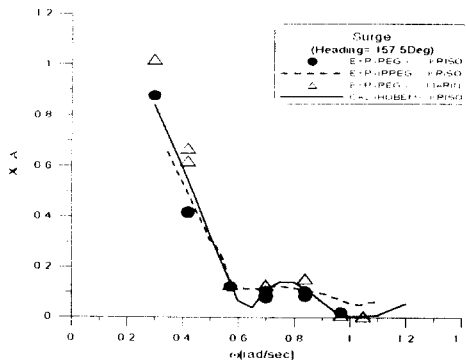


Fig. 8 Surge Motion Response (H=157.5°)

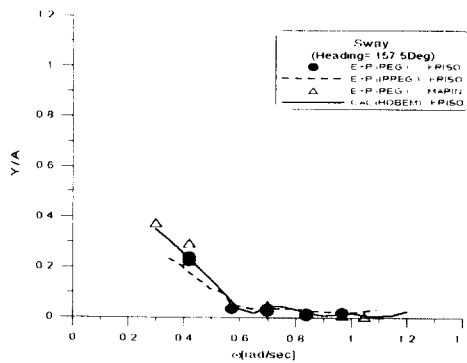


Fig. 9 Sway Motion Response (H=157.5°)

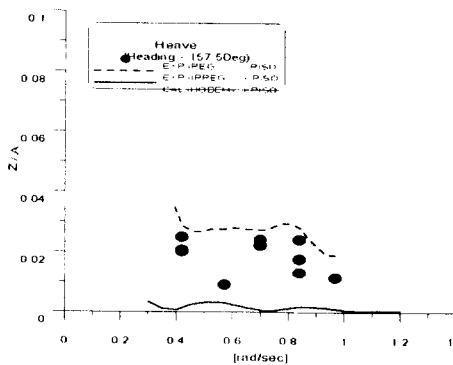


Fig. 10 Heave Motion Response (H=157.5°)

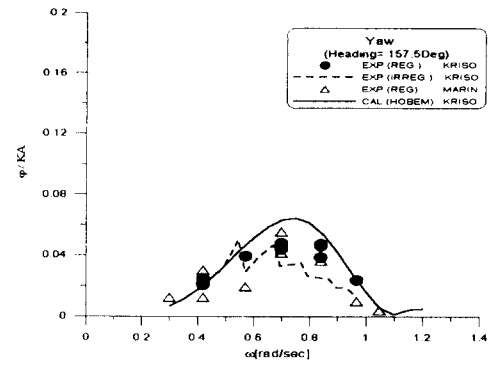


Fig. 11 Yaw Motion Response (H=157.5°)

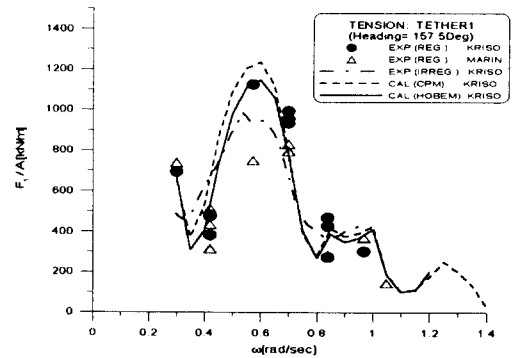


Fig. 12 Tension Response (Tether#1, H=157.5°)

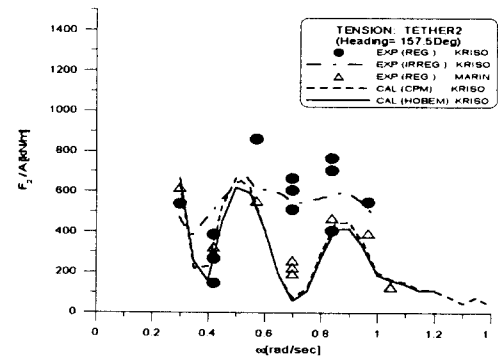


Fig. 13 Tension Response (Tether#2, H=157.5°)

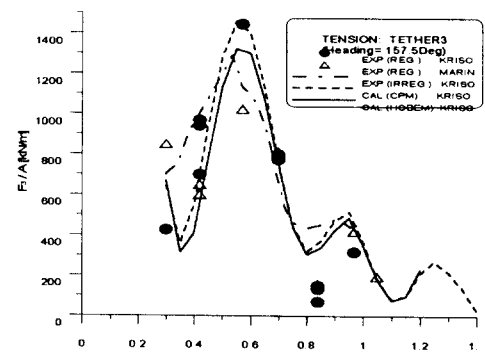


Fig. 14 Tension Response (Tether#3, H=157.5°)

