

mente y circunferencialmente para acomodar cargas axiales y de flexión. El acero de refuerzo es usado a través de cada segmento para controlar grietas y dar ductilidad estructural. Todo el acero de refuerzo es de barras deformadas grado 60 según ASTM A-615. Los filamentos de acero pre-esforzado están de acuerdo a la norma ASTM A-416 con una resistencia última de tensión de 1860 MN/m^2 .

3.- DISEÑO DEL ESPECIMEN DE PRUEBA.

Un espécimen de prueba de escala 1:3 lineal fue diseñado, fabricado y ensayado para evaluar el concepto de diseño CWP. Se comprimió la parte extrema media de un segmento CWP y la parte final de forma de campana de otro. Como fue notado anteriormente, el análisis hidrodinámico reveló que la junta localizada 8 m debajo de la estructura del barco-planta fue la más críticamente cargada.

Así, se decidió ensayar el espécimen con cargas y rotaciones a escala de ese conjunto crítico de cargas de prototipo con una escala geométrica 1:3, -- los siguientes factores de ensaye a escala se aplicaron: cargas aplicadas 1:9; momentos aplicados 1:27 y rotaciones de articulaciones aplicadas 1:1. Las cargas de diseño del prototipo CWP y los ensayos de cargas equivalentes para el modelo son mostradas en la Tabla 2.

Modelos estructurales de dimensiones finitas fueron desarrollados y -- usados para establecer y detallar el diseño del espécimen de ensaye y para evaluar y determinar los efectos causados por el ensaye de interfase adaptada con -- el espécimen:

1).- Una sección a 90° de la campana y parte recta del espécimen de -- ensaye fue modelado para evaluar la cinemática de la junta en términos de una matriz de rigidez 3×3 . La estructura CWP fue modelado como una serie de elementos de placas y los cojinetes amortiguadores fueron modelados como elementos de vigas de dureza axial y a corte apropiadas (Fig. 5).

2).- Dos modelos sólidos de elementos tridimensionales (cada mitad de la tubería de salida y de la campana del espécimen de pruebas fueron desarrollados para dar un detallado análisis de fuerza de cada segmento y para evaluar los efectos de ensaye y unión de control en el funcionamiento del espécimen).

Cada modelo fue de una sección de 15° del espécimen e incluyó los efectos de cargas aplicadas externamente y cargas internas de postensado (Fig. 6).

Las dimensiones del concreto y planos del refuerzo estructural fueron establecidos utilizando los resultados de esfuerzos de modelos de elementos sólidos y actuando con diseño por última resistencia según el código de diseño ACI-318-77. Este análisis de diseño asegura que la estructura, aunque alcance un estado crítico tendrá la suficiente capacidad para soportar las condiciones de tormenta de 100 años y continuar funcionando a una efectividad reducida.

Además de los modelos de elementos finitos, resultados empíricos completos de ensayos de modelos estructurales a escala se usaron para diseñar el espécimen de ensaye.

Como el concreto ligero es un material relativamente nuevo no se sabía con certeza si el código de diseño ACI se podía aplicar a esto, donde había dudas de que el código podría ser usado, se coló y ensayó un modelo de prueba en laboratorio de Concrete Technology Corp., Tacoma, Washington.

Se ensayaron cojinetes amortiguadores a escala bajo una combinación de cargas normales y a corte hasta deformaciones máximas para establecer su capacidad última.

Se coló y ensayó hasta la ruptura un sistema de anclaje postensado para verificar el diseño del anclaje. Se fabricó y ensayó bajo carga una asa de la tubería. Cuando se alcanzó la máxima capacidad en el ensaye de la unión, el espécimen de ensaye no mostró agrietamiento u otras indicaciones de falla. La asa de la tubería se rediseñó utilizando menos acero de refuerzo y ensayada nuevamente.

Esta sección rediseñada se usó en un modelo a escala 1:3. Se realizaron ensayos en vigas a corte y pre-agrietadas por empuje para determinar la capacidad de corte del concreto ligero. El coeficiente de fricción cortante del concreto ligero fue determinado y resultó ser 0.5, comparado con 1.4 a 1.5 para concretos de pesos normales, lo cual indica que el concreto ligero puede necesitar más refuerzo por cortante para el control de grietas que el que podría ser indicado por los códigos de diseño existentes. Excepto por el refuerzo de cortante, los ensayos de laboratorio confirmaron que el Código de Diseño ACI se aplica a estructuras hechas de concreto ligero.

El espécimen de ensaye fue hecho por una cuadrilla de producción en Concrete Technology Corp. a los principios de 1980. Las formas de acero fueron fabricadas por Ted Nelson Co., Portland, Oregon y las variaciones se mantuvieron $\pm 1/32$ pulg. 10.8 mm sobre 10 pies. (3.2 m) de diámetro. El armado de refuerzo se complicó debido a efectos de escala.

Se construyeron dibujos y modelos de madera a escala natural de una sección de 15° de la tubería y parte de la campana para ayudar en la construcción del armado del refuerzo.

Las varillas se colocaron en módulos y después los módulos se instalaron en las cimbras. La Figura 7 muestra la sección de refuerzo de la campana antes de la instalación de la cimbra exterior. En este punto, las tensiones se depositaron en las varillas de refuerzo en las zonas de alta tensión, determinadas de los resultados de los modelos de elementos finitos. Se usaron las tensiones en exceso previendo que algunas pudieran perderse durante el proceso de colado y curado. Sorpresivamente se perdieron muy pocos esfuerzos. Sin embargo, ninguno de los cables resistió las tensiones aplicadas en el postensado.

Los especímenes de ensaye se colaron a finales de febrero de 1980.

Como el modelo de ensaye tiene paredes de 5 cm. y refuerzo extremadamente congestionado dentro de las paredes, un superplastificante se usó para incrementar la manejabilidad del concreto. No es anticipado que el superplastificante sería necesario para el tamaño prototipo CWP, aunque "Concrete Tech" recomienda que se use uno de ellos. El concreto fue hecho en una revoladora de 2 yd³ y el tiempo de mezclado fue aproximadamente 2 min. por cada revoltura. Se usaron equipo estándar, instalaciones y mano de obra. Se aplicó vibrado en las cimbras y también en la mesa de colado. Los especímenes de ensaye se curaron a 50°C durante 18 horas y secados al aire. La Figura 8 muestra la sección de la campana al ser colado.

4.- PRINCIPIOS Y PROCEDIMIENTOS DEL ENSAYE

La pieza de ensaye y los medios especímenes unidos se ilustran en la Figura 9. Cargas axiales y de rotación se aplicaron al espécimen utilizando cuatro columnas centrales de carga como las mostradas en la Figura 10. Cargas de corte fueron aplicadas utilizando dos tendones diagonales. 68 tensiones dadas fueron utilizadas para medir deformaciones en el exterior del concreto y el acero embebido. 27 potenciómetros fueron usados para medir movimientos y distorciones del espécimen. Las 4 columnas de carga axial y ambos tendones de carga de corte fueron equipados con celdas de carga calibradas.

Los siguientes 4 ensayos se realizaron utilizando un modelo o escala 1:3.

Ensaye I Ensaye de carga axial: La carga máxima axial fue el 25% de la carga de diseño.

Ensaye II Carga axial combinada, carga de corte y ensaye de rotación, las cargas máximas axial y de corte fueron 25% de la carga de diseño.

Ensaye III Carga axial combinada y ensaye de rotación (sin aplicación de carga y de corte). Máxima rotación 30% de la de diseño.

Ensaye IV Carga axial combinada, carga de corte y de rotación fueron hechas hasta llegar a la falla.

Los ensayos I, II y III se realizaron con cargas equivalentes a los estados moderados del mar para establecer características cinemáticas de las juntas CWP. El ensayo 4 se realizó con cargas equivalentes a condiciones extremas del mar.

5.- RESULTADOS DE ENSAYES

Se previó por análisis que el endurecimiento rotacional de la junta varía con distorsiones axiales impuestas y también con cargas de corte aplicadas.

Esto fue verificado por los ensayos del I al III. El endurecimiento del espécimen de ensaye fue aproximadamente 25% menos que el previsto, causando una revisión del procedimiento de diseño del cojinete y de la información básica.

El comportamiento estructural del concreto ligero fue bien definido en el ensayo IV apareciendo grietas estructurales iniciales en el espécimen en las fibras extremas del recubrimiento de la campana para condiciones moderadas de mar, equivalentes a las condiciones del paro del OIEC. Esta área está fuera del área de la presión marina del tubo. Grietas estructurales iniciales en las secciones delgadas de la pared de la campana y el tubo de salida ocurrieron en condiciones de mar de aproximadamente 95% tan severas como las condiciones de tormenta de 100 años. El espécimen alcanzó su capacidad última a un nivel de carga de aproximadamente 138% de las condiciones de tormenta de 100 años. A través de la propagación de grietas progresivas las localizaciones de falla de la estructura y niveles de esfuerzos del concreto fueron exactamente predichos por la metodología del análisis. La falla ocurrió simultánea con la falla de flexión del anillo de tensión de la parte inferior y de la protección de las paredes de la campana más próximas a la ubicación del cojinete amortiguador. Levando la máxima combinación de cargas. La falla fue muy dinámica siguiendo un gran período de comportamiento estable y fue propiciado por falla en la protección del anclaje del postensado en el anillo de tensión superior de la campana. Una fotografía del espécimen fallado se muestra en la Figura 11. La Figura 12 es un acercamiento de una de las 12 superficies de unión mostrando un cojinete amortiguador deformado y grietas muy severas en la estructura del área de la campana.

6.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1.- Se han desarrollado herramientas de análisis las cuales pueden ser usadas para predecir el comportamiento cinemático y estructural del prototipo de concreto ligero CWP.

2.- La revoltura de concreto ligero es un material estructural viable y puede ser usado para fabricar un OIEC CWP con costo efectivo. Se necesita desarrollar más trabajo para definir mejor el agua de absorción, la Fatiga, el corte por fricción y características de este material.

3.- Variaciones en la fabricación y colado fueron establecidas para el modelo a escala CWP. Variaciones equivalentes pueden ser establecidas para el prototipo CWP. Las variaciones CWP serán menores es decir, habrá más concreto entre ellos que en el modelo.

- 4.- Se ha desarrollado un proceso de postensado aplicable para el uso del prototipo CWP.
- 5.- Se ha diseñado una técnica para el diseño de los cojinetes amortiguadores. Se ha obtenido información empírica que define las características de deflexión de la carga del cojinete amortiguador elastómero, mejor que la información previamente disponible por la industria.
- 6.- El diseño de la articulación CWP ha sido verificado por medio de ensayos.
- 7.- El comportamiento estructural del concreto ligero CWP expuesto a condiciones extremas de mar ha sido calificado. Los comportamientos de primera grieta, de carga última y modos de falla se produjeron por el proceso de análisis y se verificaron por ensaye.
- 8.- Diseños adicionales y análisis de esfuerzos son necesarios para cuantificar y chequear aún mejor las características dinámicas de los cojinetes amortiguadores elastómeros y la producción de curado de material de concreto ligero.
- 9.- Un ambiente ha sido desarrollado para observar el comportamiento en el mar del concreto CWP sección por sección, verificando, a través de la perforación en la plataforma (Ref. 1). Este ambiente depende de considerar 15 días de clima estable en esa área.

En conclusión, un tubo pretensado de concreto ligero para agua fría puede ser diseñado, fabricado y colocado en el mar para soportar un medio ambiente OTEC. El diseño estructural y el concepto de la junta han sido verificados por ensayos. El diseño CWP presentado representa una solución única para un conjunto de restrictivos y severos requerimientos de diseño. El precedente, para el uso de concreto pre-esforzado como un material estructural en medio ambiente estructural flotante, fuera de tierra, gana un incremento de crédito, mientras que, más plataformas flotantes y plantas de proceso son diseñadas, construidas y puestas en funcionamiento.

7.- RECONOCIMIENTOS

El trabajo reportado en sí, fue realizado por ingenieros de ABAM Inc. y su subcontratista Concrete Technology Corp., ambos de Tacoma, Washington. El esfuerzo fue llevado a cabo bajo la dirección del Laboratorio de Física Aplicada de la Universidad John Hopkins del Departamento de Energía de los Estados Unidos. El expositor del problema DOE fue el Dr. Lloyd Lewis.

Contribuciones significativas para el proyecto fueron hechas por los -

Laboratorios de Tecnología de Construcción de la Asociación del Cemento Portland, Skokil, Ill., quienes desarrollaron el concreto ligero usado en el proyecto, y el profesor J. Randolph Paulling de la Universidad de California Berkeley, quien desarrolló la simulación por computadora usada para determinar las cargas de diseño.

REFERENCIAS

- 1.- George, J. F., et al., Baseline Designs of Moored and Grazing 40 MWe OTEC Pilot Plants, Vol. A Detailed Report, JHU/APL SR 80-1A, June 1980.
- 2.- O'Connor, J. S., Lightweight Concrete Development Program Phase I, JHU/APL SR 79-1, April 1979.
- 3.- OTEC Modular Experiment Cold Water Pipe Concept Evaluation, Vol. I, Technical Report, SAI-063-80R-008-1A, Science Applications Incorporated, Los Angeles, CA, March 1979.
- 4.- O'Connor, J. S., Cichanski, W. L., et. al., Phase II - Light-weight Concrete OTEC Cold Water Pipe Test, APL/JHU SR-80-5A, to be published.
- 5.- Paulling, J. R., Theory and User Manual for OTEC C. W. Pipe Programs NOTECF and SEGPPI, JHU/APL, July 1980. (Note: Both the report and the codes are available from NOAA Through Giannotti & Associates, Inc., Annapolis, MD).
- 6.- Evans, D. J., McDonald, K. R., OTEC Environmental Package, Sep. 1, 1979 (Note: Package is available from NOAA and is updated semi-annually).

Tabla 2.- Cargas de diseño para secciones críticas para prototipos y modelos a escala CWP.

| Parámetro | Unidades | 1) Operaciones máximas (Prototipo) | 2) 100-año tormentas (Modelo) |
|-------------|----------|------------------------------------|-------------------------------|
| Carga axial | KN | 25.8 | 3.24 |
| Corte | KN | 0.613 | 0.106 |
| Rotación | DEG | 0.67 | 0.68 |
| Momento | KN-m | 31.7 | 3.34 |