

耐震設計，海洋構造物，建築構造

六 車 熙*

1. ま え が き

第8回 FIP ロンドン大会（1978年4月30日～5月5日）は FIP 創立 25 年を記念する意義深い大会であった。世界各国より 1600 名余の参加があり，わが国からも 50 名近くが出席した。ここでは会議の席で発表された耐震設計，海洋構造物，建築構造の各分野に関する報告の概要を述べ，これら各分野におけるすう勢を紹介する。

2. 耐震設計に関する研究のすう勢

耐震構造に関するセミナーは大会3日目（5月2日）午後開催され，次の七つの報告があった。

- (1) S. Inomata (Japan), Commission on seismic structures, Chairman's report
- (2) G. Wood (UK), Design method
- (3) K. Nakano & S. Okamoto (Japan), Test results on beam-column assemblies
- (4) Yu.D. Bychenkov (USSR), Aseismic structures with precast members
- (5) R. Park & K. J. Thompson (New Zealand), Load deformation behaviour of beam-column assemblies
- (6) T. Y. Lin, F. Kulka & Y.C. Yang (USA), Some basic concepts in aseismic design of prestressed precast concrete structures
- (7) H. E. Chapman (New Zealand), Earthquake resistant design of bridges with ductile reinforced concrete piers

これら七つの報告のうち，(1) は FIP 耐震委員会がかねてより審議され，今大会に先立って公表された PC 構造耐震設計指針 (FIP Recommendations for the Design of Aseismic Prestressed Concrete Structures) の内容と今後の研究課題について，委員長猪股博士より報告されたものである。今回公表された設計指針の特徴は，「比較的頻繁におこる中程度の地震に対し構造物使用上の支障をおこさず，かつ，大地震時にはこれに耐えるための耐力の十分な余力と地震エネルギー吸収に必要な

な十分なじん性を持つこと」という耐震設計基本理念を具体的設計において具現する方策として，使用限界状態および終局限界状態の二つの限界状態設計と，破壊に至るまでの塑性じん性確保のための方策が述べられていることである。設計用地震荷重としては使用限界状態に対しては再現期間 10～20 年の中程度の地震力を，終局限界状態に対しては再現期間 50～100 年の地震力を想定しているが，これらの地震荷重特性値をいかに決めるかは今後の問題として残されている。断面設計に用いる材料強度は FIP-CEB コンクリート構造物設計施工国際指針と同様に特性値を用いる。構造物のじん性については，架構が崩壊メカニズムに達する以前に構成部材の各所に塑性ヒンジが発生し，これが塑性回転変位することによって架構の著しい塑性水平変位が得られるのであるが，この場合，発生した塑性ヒンジは架構が崩壊メカニズムに達するまで回転し続けなければならない。多くの研究では架構のじん性率 3～4 を確保するためには，塑性ヒンジの曲率から計算したじん性率 $\mu = \phi_u / \phi_y$ (ϕ_u : 曲げ破壊時曲率， ϕ_y : 曲げ降伏時曲率) が少なくとも 10 以上でなければならないという。図-1 は PC 長方形はり断面を例にとって PC 鋼材鉄筋係数 $q_p = p f_{pu} / f'_c$ (p : PC 鋼材鉄筋比， f_{pu} : PC 鋼材引張強度， f'_c : コンクリー

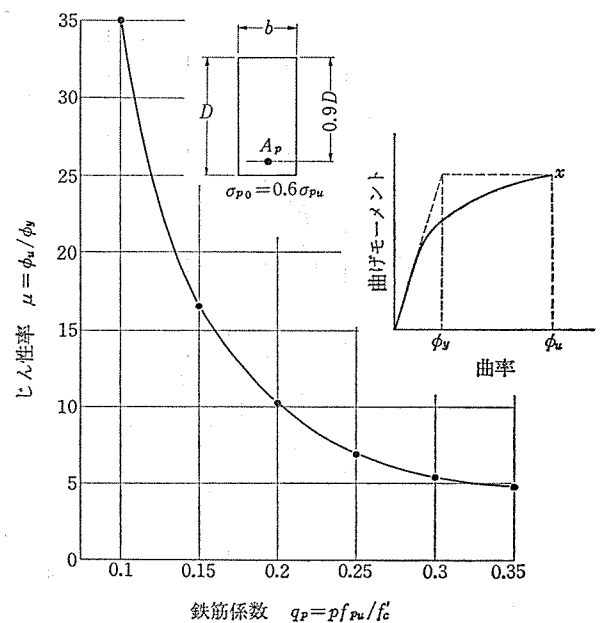


図-1 鉄筋係数 q_p とじん性率 μ との関係 (曲げ材)

* 京都大学教授，工博

ト圧縮強度)とじん性率 μ の計算例であるが、これより明らかなように $\mu \geq 10$ とするためには $q_{p+r} \leq 0.2$ でなければならない。指針には引張側に挿入した普通鉄筋断面積もあわせ考えた全引張鉄筋係数 q_{p+r} を0.2以下とすることを推奨している。 $q_{p+r} \leq 0.2$ という条件は設計上はかなりきびしい。もちろん、架構そのもののじん性率と構性部材断面のじん性率との関係についてさらに研究する必要があるが、断面のじん性を増大する方策(たとえば、フープ筋によるコンクリートの横拘束)を研究することも大切であり、これらの研究成果をふまえて q_{p+r} の制限値の改訂が望まれる。なお、ぜい性破壊である部材のせん断破壊が曲げ破壊に先行することは許されない。したがって、設計ではせん断破壊耐力が曲げ破壊耐力を上回ることを検査しなければならないが、この際、耐力計算に材料強度特性値を用いていること、および、材料強度のばらつきがあることから、材料強度特性値を用いた単純な耐力計算結果の比較では不十分である。猪股博士は一例としてPC鋼材強度の変動係数を2%、コンクリート強度のそれを10%として、これらのばらつきを考慮した断面の曲げ破壊耐力を試算し、材料強度特性値を用いた計算値の1.15倍の耐力となることを示し、上記の耐力比較検討の取扱いに対する材料強度のばらつきの考慮の必要性を強調している。

以上のほかに、耐震設計指針にはプレキャスト部材の接合部の耐震性、アンボンドPC鋼材の利用などについても言及されているが、とくに前者については大会期間中に開かれた委員会において研究推進の必要性が論じられた。

G. Woodの報告(2)の主旨は、構造物の耐震設計にあたって複雑な解析や詳細な設計以前に構造計画上の考慮すべき多くの問題があることを指摘することにある。すなわち、耐震性の観点から構造物は単純かつ対称性のある平面が望ましく、平面上も高さ方向にも剛性の偏在、急変はさげ、また、近接建物のある場合には地震波の相互作用に留意し、さらには地盤の振動と構造物のそれとの共振の可能性に注意をはらうべきであると論じている。これらはわが国での過去の地震災害からも教えられた事項である。さらに、非構造部材や建築物における配管その他の設備については、ともすると地震に対する配慮を行わないことが多いが、これらについても耐震性を考慮すべきであると強調している。昭和53年6月12日の宮城県沖地震において、このような非構造部材や設備機器、配管類の被害が目立ったことから、これらに対する耐震設計上の配慮は極めて重要であろう。とかく構造体の耐震設計に重点がおかれる今日の傾向に対し、さらに広い視野からの耐震性の配慮が必要であることを指摘した点で印象深い発表であった。

架構のじん性には柱はり接合部の挙動が著しく影響する。今回は中野、岡本の報告(3)およびR. Park, K. J. Thompsonの報告(5)がこれに関する実験的研究である。前者はPCはりとはRC柱接合部を取り出した実物の1/2模型供試体に地震時を想定した繰返し高荷重を作用させ、PCはり先端のたわみ実測値から、どの程度のじん性を期待できるかを調べたものである。供試体は図-2の下方に示したT形のものほか十字形供試体を合せて14体、PCはり鉄筋係数は $q_{p+r} = 0.248 \sim 0.153$,

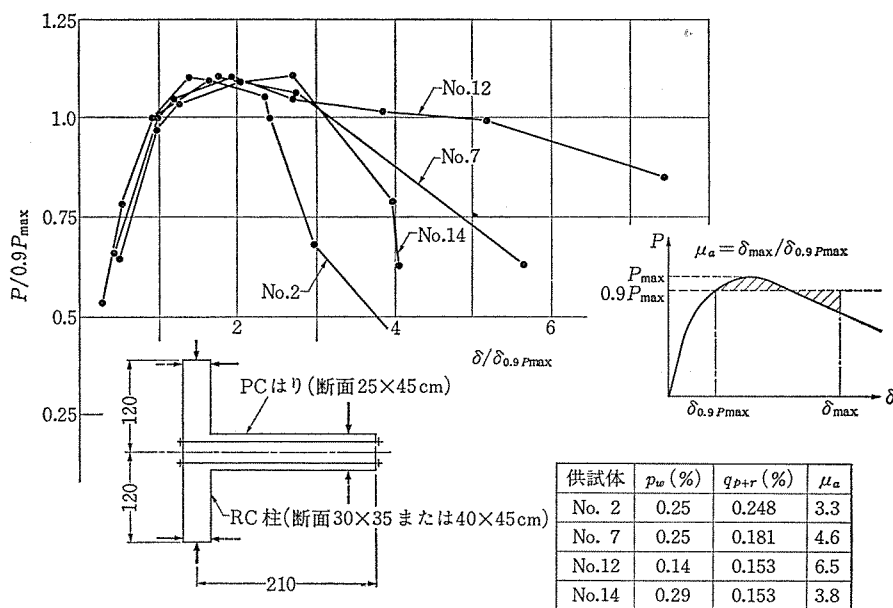


図-2 RC柱-PCはり接合部のじん性実測結果(中野・岡本の実験)

あばら筋比 $p_w = 0.25 \sim 1.14\%$ 、柱主筋量を種々にかえてはり降伏先行型と柱降伏先行型の2種類の降伏タイプを作っている。図-2 ははり降伏先行型供試体のうち、 p_w および q_{p+r} が種々に変化しているもの4体を取り出して、はり先端たわみ実測結果を示したものである。じん性率は図中右側に示したように最大荷重の0.9倍の荷重時たわみ $\delta_{0.9 P_{max}}$ を降伏たわみとし、図中ハッチした部分の面積が等しくなる時のたわみを最大たわみ δ_{max} として、 $\delta_{0.9 P_{max}}$ に対する δ_{max} の比をじん性率 μ_a としている。図-2 から明らかなように、じん性率 μ_a ははりの鉄筋係数 q_{p+r} が小さいほど、あばら筋比 p_w が大きいほど大きくなり、じん性を向上させるには鉄筋係数 q_{p+r} をある限度以内におさえること、および、あばら筋による横補強が効果的であることがわかる。同様の結果が R. Park らの報告(5)でも述べられている。とくに、あばら筋を密に配置することはじん性の向上に有効であると同時に、あばら筋の外側の被覆コンクリートの剝離による断面欠損にともなう曲げ耐力低下を補うためにも必要であることを強調している。さらに、Park らは接合部パネルのせん断破壊防止のためにせん断補強筋の配置が必要であることを実験的に示しているが、詳細は省略する。

プレキャスト部材を用いた組立て構造の耐震性については従来比較的研究の少ない分野である。Yu. D. Bychenkov の報告(4)はソ連におけるコンクリート系組立て構造の部材接合法について紹介したもので、大別すると普通鉄筋による接合と埋込鉄板の溶接による方法とに分かれる。これらの多くはわが国でも慣用されているものである。ただし、組立て構造物の耐震安全性についての確認はあまり行われておらず、ソ連でも今後の重要な研究課題のようである。T. Y. Lin らの報告(6)は実例をあげながらプレキャスト部材による組立て構造の耐震設計における三つの基本概念を述べたものである。すなわち、使用するすべてのプレキャスト部材を耐震要素として有効に設計し、非構造部材であっても構造物の耐震性に対する寄与を考え、すべての構成部材の一体性が確保されなければならないこと (Totality)、最少の費用増で最大の耐震安全性が得られるような設計を追求すること (Economic safety) および解析結果は必ずしも真実を示すとは限らず、実験による実物構造物の挙動も重要視すべきであること (Physical reality) の三つをあげている。構造物の実際設計にたずさわる技術者にとっては有用な示唆と考えられる。

H. E. Chapman の報告(7)は New Zealand における橋梁の耐震設計法について述べたものである。大地震に耐えるには構造物はじん性に富む挙動を示すことが必

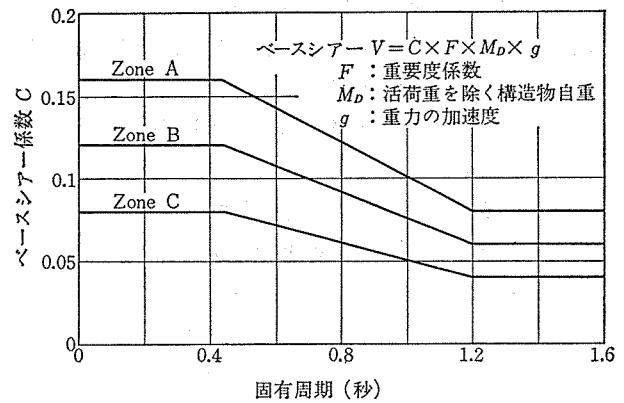


図-3 橋脚設計用ベースシア係数 (New Zealand 設計規準)

要であるが、橋梁の場合にはピアの脚部に生ずる塑性ヒンジの塑性回転変位によってじん性が左右される。したがってピアのじん性確保が最も大切であり、設計指針ではじん性率6が要求されている。設計に用いる地震時ベースシア V は次式から計算される。

$$V = CFM_D \times g$$

C : 水平震度基本値, F : 重要度係数, M_D : 活荷重を除く構造物自重, g : 重力の加速度

係数 C は構造物の固有周期と地盤の性質に対応して図-3 のようにあたえられている。また、係数 F はつぎのように定められている。

- 1日の交通量 2500 台以上の橋梁 $F = 1.0$
- 1日の交通量 250~2500 台の橋梁 $F = 0.85$
- 1日の交通量 250 台以下の橋梁 $F = 0.7$

ピア断面は終局耐力設計によるが、要求される終局耐力は $1.35V$ の地震力に耐えなければならない。さらに、じん性率の計算を行うが、この場合、断面の曲率から計算されるじん性率の計算が必要であり、詳細な計算図表があたえられている。この場合、フープ筋内部のコアコンクリートのみが有効であるとして計算することになっている。

3. 海洋構造物に関する報告

海洋構造物に関するセミナーは大会2日目(5月1日)午後に行われ、次の七つの報告があった。

- (1) J. A. Derrington (UK), FIP Commission on concrete sea structures, Chairman's report
- (2) G. Somerville & H. P. J. Taylor (UK), Concrete properties
- (3) K. H. Runge & H. H. Haynes (USA), Experimental implosion study of concrete structures
- (4) T. Ridley (UK), Foundations of concrete gra-

vity structures in the North Sea

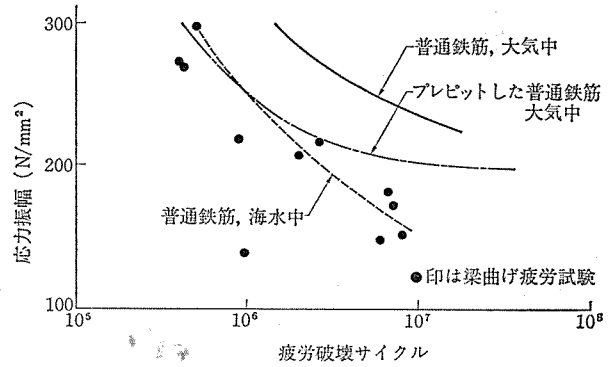
- (5) L. Pliskin (France), Towing and installation of concrete gravity platforms
- (6) H. H. Haynes & R. S. Highberg (USA), Deep ocean study of concrete spheres
- (7) P. Xercavins (France), Some specific problems in the design of concrete sea structures

FIP 海洋構造物委員会 (FIP Commission on Sea Structures) は最も活動的な委員会の一つであり、北海油田開発にともなう各種コンクリート重構造物の建設と関連して多くの研究が続けられ、1977年7月には海洋構造物に関する FIP 設計施工指針(FIP Recommendations for the Design and Construction of Concrete Sea Structures) 第3版が公表されている。委員長 J.A. Derrington の報告(1)は、この委員会の活動状況を紹介したものである。委員会には問題別に 10 のワーキンググループが設けられている。とり上げられている問題をあげれば次のとおりである。

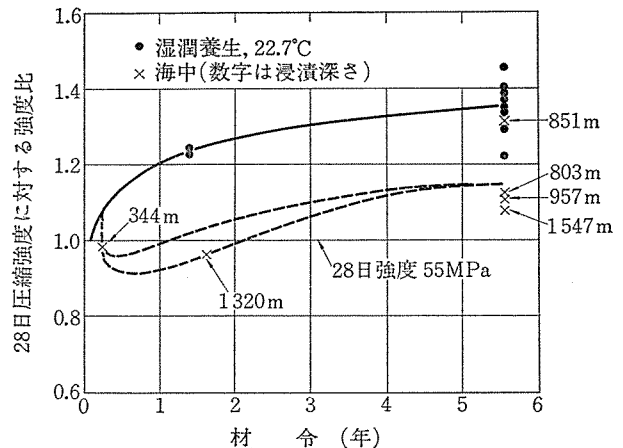
Foundations, Sea operations, Impact problems, Crack problems, Environmental loading, Design procedures, Thermal effects, Seismic problems, Maintenance and repair, Materials.

今回の大会にはこのうちの二、三のワーキンググループの研究成果が発表されている。その一つは G. Somerville ほかの報告(2)である。この報告は海洋構造物に用いるコンクリート、普通鉄筋、PC 鋼材などの個々の材料の海中での性質、問題点などを概説したもので、海水の化学的作用、物理的作用および生物作用の三つの観点からのべている。主要な成果を列記するとつぎのようになる。

- (a) コンクリート：十分締固められた良質のコンクリートであれば、海水の化学作用は問題とならない。物理的作用としては海面付近の乾湿繰返しによる塩分の異常蓄積および凍解の影響を受ける部分では、コンクリートの剝離を防ぐためにとくに高密度高強度コンクリートの使用が望まれる。AE コンクリートは耐久性増大に有効である。問題点としては波浪による繰返し荷重のもとではひびわれ内に浸入した海水がくさび作用をおこして、ひびわれ開口が著しく進行したりコンクリートの剝落がおこる恐れがあり、疲労強度の低下がおこる。これについては今後さらに研究を積み重ねなければならない。
- (b) 普通鉄筋：海中では鉄筋の発せいが問題となるが、コンクリートのひびわれ幅が 0.1~0.3 mm であれば耐久性は損なわれないと考えられる。かぶり厚さについてもそれほど神経質に考える必要はな



図—4 海中での普通鉄筋の疲労試験結果



図—5 深海中でのコンクリート強度の発現 (φ15×30 cm シリンダー供試体)

いようである。もちろん、これは良質のコンクリートを打設するという前提に基づく結論である。むしろ繰返し荷重のもとでの疲労強度が問題である。図—4 は普通鉄筋の疲労強度実験結果の一例で、海中での疲労耐力は大気中のそれよりもかなり低く、腐食をあらかじめおこさせたプレビット鉄筋のそれとほぼ同等である。このことは海中では単なる疲労ではなく、腐食疲労耐力が問題となることを示している。なお、図中には海中で行ったはりの疲労試験結果に基づく鉄筋の疲労耐力もあわせて示してある。

- (c) PC 鋼材：普通鉄筋と同様のことが PC 鋼材についてもいえる。とくに、応力腐食については普通鉄筋よりも敏感であり、ポストテンション工法では高品質のグラウトを完全に注入することが望まれる。
 - (d) 生物作用：海中では種々の海洋動植物が表面に付着するが、これはむしろ表面カバーの役割をするものであって、耐久性の面では一般に良い影響を持つと考えられるが、結論は今後の研究に待ちたい。
- K. H. Runge らの報告(3)はコンクリートシェル

深海中での局部座屈特性を知る目的で、外半径 68.5 cm, 高さ 3.4 m, 外半径に対する壁厚比 0.05, 0.076 および 0.133 のシェル模型 15 個の外圧試験を行ったものである。座屈耐力は寸法の不完全度, 上下端面の支持条件, コンクリート強度のばらつき等によって影響を受けるので, これらの影響を考慮した耐力推定法が望まれる。

これと同様な研究が H. H. Haynes らの報告 (6) に述べられている。外径 1.676 m, 壁厚 10.5 cm のコンクリート球 18 個 (うち 16 個は無筋コンクリート球, 他は $\phi 13$ mm 鉄筋で補強) を 560~1550 m の深海中に浸漬し, 球の水圧強度, クリープ破壊強度, 透水特性などについて大規模な実験を行ったものである。図-5 は海水中に浸漬した $\phi 15 \times 30$ cm コンクリートシリンダー供試体の強度試験結果で, 深海中に浸漬すると強度がある程度低下し, 以後はこの強度低下を回復することなく, 湿潤養生の場合とほぼ相似に強度が増進している。図-6 はコンクリート球の一定外圧のもとでのクリープ破壊試験結果で, 実験室内圧力容器中での結果と比較すると, 深海に沈めたものはクリープ破壊耐力が小さくでている。図-7 は深海中でのコンクリート球中への透水量の実測結果であって, 外表面エポキシコーティングしたものはコンクリート壁内への海水の浸透は認められるが, 球内部への透水はおこっていないのに対し, 無コーティングのものは浸漬後 4~8 か月で球内部への海水の透水が始まり, 浸漬後 5 年ではかなりの海水が球内部に浸入していることがわかる。なお, この研究は現在も進行中であり, 今後の成果が期待される。

海洋構造物の建設はドライドック内で基礎を含む本体の一部が施工され, これを設置位置まで曳航, 沈設するのが一般である。したがって, 基礎構造および沈設接地方には多くの問題点がある。T. Ridley の報告 (4) は北海油田開発用海洋プラットフォーム (建設中のものを含めて 13 基ある) の基礎構造および建設地盤と設置法などの実施経験に基づいて, 設計上考慮すべき事項について述べたものである。最も問題となるのは構造物が沈設された後の構造物の安定性 (使用中の沈下, 波浪による転倒, スライディング等) である。これについては基礎地盤の動的強度, 変形特性等を知ることが大切であり, さらに FEM 解析等により不等沈下, 転倒, スライディングに対する安全性を検討することが大切である。また, 沈設にあたっては, 基礎スカート部または突起部が確実に支持地盤に沈設されることが必要であるが, ある場合には著しい偏心荷重の荷重によって地盤中にスカート部または突起部を圧入する必要も生ずる。また, 沈設位置は現在の技術では予定地点からのずれを 30 m 以内にお

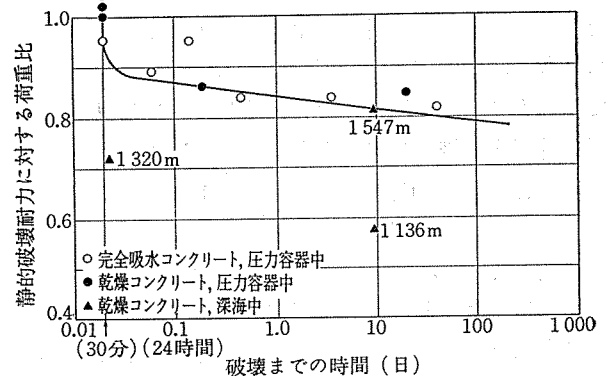


図-6 コンクリート球のクリープ破壊試験結果

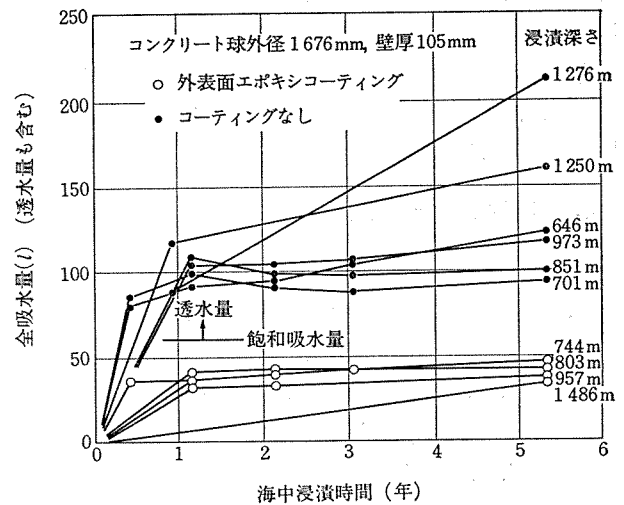


図-7 コンクリート球中への海水の透水

さめることができるという。接地圧は多くの場合 1~3 Mn/m^2 である。L. Pliskin の報告 (5) は北海油田での多くのプラットフォームの曳航経験をまとめたもので, 曳航中の構造物の波浪中での挙動, 曳航ルートを選定, 曳航に必要なタグボートその他の選定等について述べられている。ここでは詳細は割愛する。

P. Xercavins の報告 (7) は 1973 年に建設された Ekofisk プラットフォームの実際設計に考慮されたコンクリートの許容応力度, 変形解析のためのヤング率の仮定, 疲労強度の考え方などについて述べたものである。コンクリートの品質の局部的なばらつき, 寸法のばらつきなどが構造物耐力 (とくに, その形態がシェル構造が多いので局部座屈耐力が問題である) の劣化に著しく影響すること, 深海中では静水圧を常に受けていることから, コンクリートの最大許容圧縮応力度 σ は CEB-FIP コンクリート構造物設計施工国際指針のコンクリート圧縮強度特性値

$$f_{ck} = f'_c / r_m = f'_c / 1.5$$

f'_c : コンクリートの圧縮強度, $r_m = 1.5$: 特性係数をもとにして

$$\sigma = f_{ck}/r_m = f_{ck}/1.5$$

を、また、上記 σ に対するヤング率（セカントモデュラス） E は、最大応力時の圧縮ひずみ $\epsilon = 0.2\%$ に至るまでの応力ひずみ関係を 2 次放物線と仮定した場合のヤング率計算式を修正して、安全側の値として

$$E = 500 f_{ck} \left[1 + \sqrt{1 - \frac{r_m^2 \sigma^2}{f_{ck}^2}} \right]$$

を提案している。さらにクリープも含めたみかけのヤング率としては、上記の値の 1/2（比較的限られた期間のみ静水圧を受けるときには 1/1.4）を提案している。また、疲労耐力については種々の波高の波浪繰返し荷重を受けることから、Miner の累積疲労耐力の考え方を採用し、これにさらに特性値 r_f を考慮して海水中での疲労耐力の低下を考慮する必要があることを強調している。ただし、 r_f の値については提案がなく、今後の問題として残されている。

4. コンクリート船

海洋構造物への PC の利用の一つにコンクリート船があり、これに関するセミナーが 5 月 4 日（大会 5 日目）午後開催された。発表は次の 5 件である。

- (1) R. G. Morgan (UK), Historical development of concrete ships
- (2) T. P. Tassios (Greece), Requirements for light structural weight of concrete hull
- (3) F. H. Turner (UK), Shipshape in concrete : the problem of mouldability
- (4) J. Buijs (Netherlands), Impact
- (5) F. K. Lightenberg & C. Gouwans (Netherlands), Safety and reliability of concrete ships

コンクリート船は鉄鋼船と比較すると、積荷重量が同じとすると船体重量が重いだけに航行コストが割高となる傾向があるが、反面、航行安定性が高く、LPG または LNG などの爆発性液化ガスの運搬には向いており、この意味から将来の発展が期待される。過去においてもコンクリート船は古くから建造されており、R. G. Morgan の報告 (1) によると、本格的なコンクリート船は 1918 年にスウェーデンで建造された Linnea 号 (700 ton) が最初である。最近では 56 000 ton の LNG タンカーも提案されているという。

船体重量を軽くすることは種々の面で有利である。T. P. Tassios の報告 (2) は比重 1.85~2.05、圧縮強度特性値 $f_{ck} = 40 \sim 50 \text{ N/mm}^2$ の高強度軽量コンクリートの利用、パーシャルプレストレスの利用、フェローコンクリートや繊維コンクリートの利用等による軽量化の

可能性を述べたものである。とくに高強度軽量コンクリートの利用については FIP 軽量コンクリート委員会から下記のレポートが 1978 年 4 月に刊行されているので付記する。

FIP State of Art Report : Lightweight aggregate concrete for marine structures

コンクリート船の建設にあたって最近問題とされているのはコンクリート打設である。F. H. Turner は報告 (3) においてこれを論じている。とくに、船体の軽量化の要求から高強度コンクリートを密な配筋の中に打設しなければならないことが多いこと、寸法誤差は通常 0.1~0.5% 程度におさまるが、重量誤差は 1.5% 程度を見込まなければならないこと、複雑な形の船体の場合にはプレキャスト工法の適用も考えられるが、接合部に構造的問題を残す懸念があることなど、さらに研究の必要な問題が数多くあることを指摘している。

コンクリート船で重要な問題の一つに衝撃に対する抵抗力がある。船体に加わる衝撃力は航行時の波浪のほか積荷の爆発、他船との衝突などの事故時の衝撃があり、J. Buijs の報告 (3) ではこのような予期せざる衝撃力に対して、たとえば、2 重シェル構造の採用、スチフナーの適正配置等により、破損個所の面積をできるだけ少なくすることが必要と述べている。もちろん、このような事故の発生確立はそれほど多いものではなく、F. K. Lightenberg 等の報告 (5) によると年間事故発生確率は 69×10^{-6} という。

5. 建築構造物関係

5 月 3 日（大会 4 日目）午前 24 か国の代表からそれぞれの国における注目すべき PC 建築物の紹介があった。午後は建築家とエンジニアとの関係について 3 人の建築家を招いての討論があったが、筆者は出席することができなかった。なお、建築物に関する特別のセミナーは以上のほかには企画されていないが、他の Session において二、三の関連報告があった。とくに、アンボンド工法を用いるフラットスラブ構造については、P. Matt (Switzerland), FIP design recommendations for flat slabs in post-tensioned concrete using unbonded and bonded tendons, が発表され、アンボンド工法の利用拡大に期待が持たれた。わが国でもアンボンド工法の利用が強く望まれているところであるが、やがて公表されるであろう FIP 指針に大いなる期待を寄せたい。なお、アンボンド PC の耐震性については論議の多いところであるが、2. のべた FIP 耐震規定に別項で現状がまとめられているので参考にされたい。