

コンクリート製海洋構造物での接合部の耐力評価

運輸省港湾技術研究所 正会員 ○ 清宮 理

運輸省港湾技術研究所 正会員 横田 弘

運輸省港湾技術研究所 正会員 横井 聡之

1. まえがき

海洋空間あるいは海洋資源を有効に利用するため各種の海洋構造物の建設が積極的に計画・実施されている。従来のコンクリート製海洋構造物、例えば、防波堤、貯油施設、人工島護岸等ではコンクリートを連続して打設して建設する場合が多い。プレキャスト部材の採用例は必ずしも多くない。海洋環境下での施工の迅速性、容易性、工費の低減等を考えるとプレキャスト部材のより積極的な導入が望まれる。プレキャスト部材を用いることによりコンクリート製海洋構造物に接合部が存在する。

プレキャスト部材同志の接合方法に関しては、建築物、橋梁等の陸上構造物を対象として既に多くの実施例がある。しかし海洋環境下、特に強大な波浪外力を繰返し受け、かつ鉄筋等の鋼材の腐食の発生・進行を極力押さえねばならないコンクリート製海洋構造物（図-1参照）での接合方法には自ずと制約がある。本研究では、海洋環境下で採用可能な接合方法を選定するため実施した、各種接合法によって製作したプレストレストコンクリート柱～梁供試体の静的載荷実験及び疲労実験の結果について述べる。また一体構造との、強度、変形、ひびわれ等の力学的性状の比較検討を通じて得られた接合部の耐力について考察を行う。

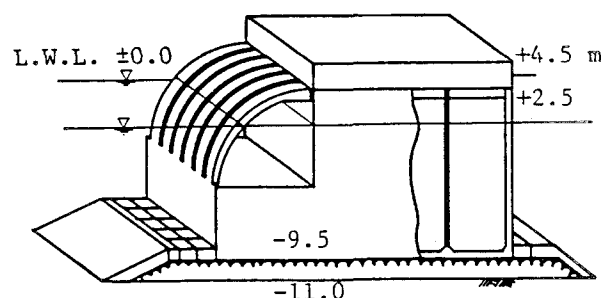
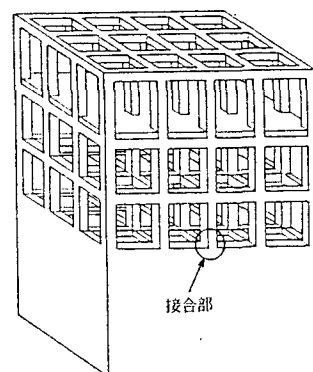


図-1 新しい型式のコンクリート構造物

2. 静的載荷実験の概要

2-1 静的載荷実験の目的

選定した接合構造と一体構造との基本的な力学性状の相違を把握するため静的載荷実験を行う。主に検討を行う項目は、終局に至るまでの耐力、破壊性状、ひびわれ発生状況等である。また限界状態設計法により接合部の設計を行う際の適用性についても検討を行う。

2-2 供試体の種類

静的載荷実験を行った供試体の形状はT字型でその種類は、表-1に示す5種類である。PC柱部材とPC梁部材とを連結して供試体を製作した。柱部材の基本寸法は、断面が30cm×30cm、高さが140cmである。J-1供試体は、接合部のない一体構造である。梁部材の基本寸法は、断面が50cm×30cm、長さが200cmである。J-2供試体での場所打ち部の範囲は、30cmで、その位置で主筋が重ね継手となっている。J-3供試体は、梁部材と柱部材とがPC鋼棒と接着剤を用いて接続されているが主鉄筋は柱部材から梁部材へ貫通されていない。J-4供試体でのハンチの寸法は、高さが30cm、幅が60cmである。φ23のPC鋼棒によって柱部材と梁部材とが接合されている。J-5供試体では、梁部材のかわりに版部材が用いられている。版部材の基本

寸法は、高さが80cm、幅が90cm、長さが150cmであり、柱部材の版部材への差し込み深さは、60cmである。供試体の寸法と図-1で想定した構造物での寸法比は数分の1である。

J-1 供試体の配筋の状況を図-2に示す。柱部材では、主筋はD10 (SD35) が4本、帯筋はD6 (SD35) が15cmピッチに各々使用されている。柱部材と梁部材との接合には、φ17のPC鋼棒2本が用いられており、コンクリート応力で約20kgf/cm²のPC量が導入されている。またJ-3及びJ-4 供試体の接合部に用いられた接着剤は、エポキシ系の接着剤である。

2-3 使用材料

コンクリートの配合を表-2に示す。粗骨材は、最大寸法が10mmの砕石である。J-2 供試体の場所打ち部には、無収縮コンクリートを用いる。

2-4 荷重方法

荷重の種類としては、波力を想定している。波力により柱部材に

水平荷重が与えられる。荷重実験では柱部材の上端から20cm下の箇所まで容量50tfの油圧ジャッキを用いて荷重を行う。梁部材は、4本のPC鋼棒を用いて反力床に固定する。鉄筋が降伏ひずみ量を超すまで、0.5tfあるいは、1.0tf刻みで荷重制御によって、降伏ひずみ量を超える以後は、変位制御によって荷重を行う。荷重は、コンクリートが圧壊するまで繰り返して行うが、波の周期特性、構造物の自重、揚圧力等による鉛直方向の荷重についても特に考慮していない。

2-5 測定項目

荷重荷重は、油圧ジャッキ先端に取付けたロードセルにより計測を行う。5台の変位計を柱部材の上下方向に設置して、柱部材の変形性状を計測する。主筋、帯筋、PC鋼棒及びコンクリート表面にひずみゲージを貼付けして、各材料に生

表-1 接合方法の種類

記号	構造の特徴	供試体の概要
J-1	一体構造 接合面を設けないPC一体構造	柱部材 PC鋼棒 梁部材
J-2	場所打接合構造 2つの部材を鉄筋の重ね継手、場所打コンクリートにより接合。硬化後PCを導入。	場所打部
J-3	接着剤接合構造 2つの部材の接合面に接着剤を塗布し、PCの導入で接合。接合面を貫通する鉄筋はなし。	接着面
J-4	ハンチ接合構造 J-3と同様であるが、ハンチを設けることにより接着面を広くしたもの。	ハンチ 接着面
J-5	差し込み式接合構造 版部材に穴を明け、柱部材を差込んだ後、膨脹モルタル等で充填したもの。構造物の床版等での採用が考えられる。	モルタル充填 版部材

表-2 コンクリートの配合

スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kgf/m ³)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
8±2.5	5±1	60	50	170	283	900	916	2.83

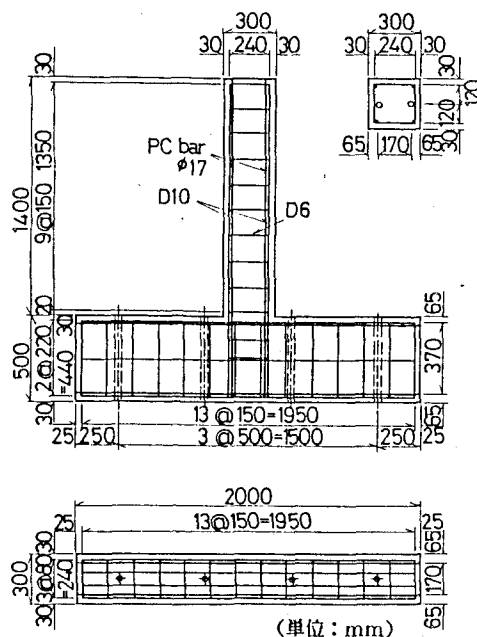


図-2 配筋図

じる応力度を計測する。ひびわれ幅は、コンタクトポイントを10cm間隔に基盤状に接着して、コンタクトゲージで計測を行う。

3. 疲労実験の概要

3-1 疲労実験の目的

コンクリート製海洋構造物に作用する主たる外力は、波浪外力である。波浪外力は繰返し構造物に作用するため、静的な荷重に対する力学特性の確認とともに、疲労に対してもその力学特性を確認する必要がある。図-3に日本沿岸に到着する波浪の波高と波数との関係を示す。一回の強大な台風が通過する際、数千～数万の大きな波高を持った波浪が構造物に到着する。波浪に対する設計法の適用性を、図-3に示す波浪特性をもとに、マイナー則とS-N線図（荷重～繰返し回数との関係図）によって調べる。

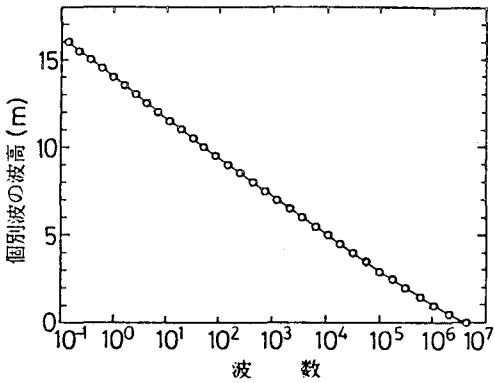


図-3 個別波と波高との関係

3-2 供試体の種類

疲労試験を行った供試体は、表-1に示す、J-1供試体とJ-2供試体である。寸法、配筋、コンクリート配合等は、静的荷重実験での供試体と同じである。ただしJ-2供試体の場所打部でのコンクリートの設計基準強度を3種類（150、350及び550kgf/cm²）とした。

3-3 荷重方法

柱部材の上端から20cm下の箇所で容量30tf、最大変位±100mmの油圧加振機を用いて水平方向に両振り荷重を行う。荷重の振動数は、約2Hzである。

表-3 実験結果の概要

＊）鉄筋降伏せず

供試体	コンクリート	破壊曲げモーメント		鉄筋降伏 曲げモー メント (tf・m)	じん性率	ひびわれ 発生曲げ モーメント (tf・m)
	圧縮強度 (kgf/cm ²)	(tf・m)				
		実験値	計算値			
J-1	375	5.91	6.57	4.30	3.20	2.95
J-2	340	7.09	6.45	4.81	4.46	1.77
J-3	367	4.13	5.23	＊)	＊)	2.36
J-4	367	6.61	6.55	4.69	2.53	2.64
J-5	363	6.96	6.54	4.22	7.47	3.08

*) 鉄筋降伏せず

4. 静的荷重実験の結果

4-1 破壊曲げモーメント

荷重実験により得られた実験結果の概要を表-3に示す。供試体の破壊は、柱～梁接合部に生じ曲げ破壊が卓越する。接着剤接合構造（J-3）での破壊曲げモーメントが、他の供試体と比較してかなり小さい。J-3供試体以外の供試体では、ほぼ同程度の破壊曲げモーメントである。一体構造（J-1）と比較して、今回選定した接合方法が同程度の耐力があることを示している。

表-3に示す破壊曲げモーメントの計算値は、コンクリート構造物の限界状態設計法指針（案）（土木学会、昭和58年）で示される方法で求める。計算に際しては、コンクリート、鋼材の材料強度については、実験値を用い、材料係数等の係数を乗じていない。破壊曲げモーメントに関して計算値と実験値とは、J-3供試体を除いては、10%以内の差であり、同指針（案）での方法でもって破壊曲げモーメントを十分推定できると言える。図-4にJ-2供試体での荷重～変位曲線を示す。いま本報告でのじん性率を、荷重点における破壊荷重時の水平変位と、鉄筋降伏時の水平変位との比で定義する。得られたじん性率は、2.5～7.5の範囲内にある。

4-2 ひびわれ性状

図-5に各供試体でのひびわれの発生状況を示す。いずれの供試体でも曲げひびわれが先行するが、接合方法によってひびわれの発生位置と進展方向はかなり異なる。一体構造では、柱部材のつけ根からほぼ15cm間隔でひびわれが载荷中に分散して発生する。場所打接合及び接着剤接合の供試体では各々打継部及び接着部にひびわれの発生が集中している。ハンチ接合ではハンチの上部に曲げひびわれが最初に発生するが、ひびわれが柱部材を貫通するとハンチ内に曲げせん断ひびわれが生じている。各供試体とも梁部材内にはひびわれが発生していない。図-6に各供試体での最大ひびわれ幅と曲げモーメントとの関係を示す。接着剤接合が他の接合方法よりもひびわれ幅が大きくなる傾向がある。他の接合方法間ではほぼ同様な関係を示している。海洋構造物で許容される最大ひびわれ幅の一つの目安は、0.2mmである。いま最大ひびわれ幅が0.2mmに対応する曲げモーメントを、CEB-FIP(1978年)に示される式で計算して求める。この計算結果を表-5に示す。最大ひびわれ幅が0.2mmに達する曲げモーメントは、各々の供試体での終局曲げモーメントの50~70%である。計算結果と実験結果とを比較すると、最大ひびわれ幅が0.2mmに対応する曲げモーメントは、実験値の方が若干大きい。CEB-FIPで示されるひびわれ算定式が今回の供試体に関して一応安全側の目安を与えると言える。

5. 疲労実験の結果

5-1 疲労破壊の状況

表-5に疲労実験での結果の概要を示す。表中での疲労破壊の定義は、油圧加振機での水平変位量が急激に増大した時点での状況とする。図-7に载荷回数と変形量との関係を示す。変形量の値は、上限荷重時での油圧加振機での水平変位量と下限

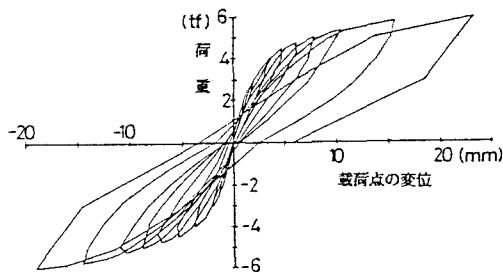


図-4 荷重変位曲線

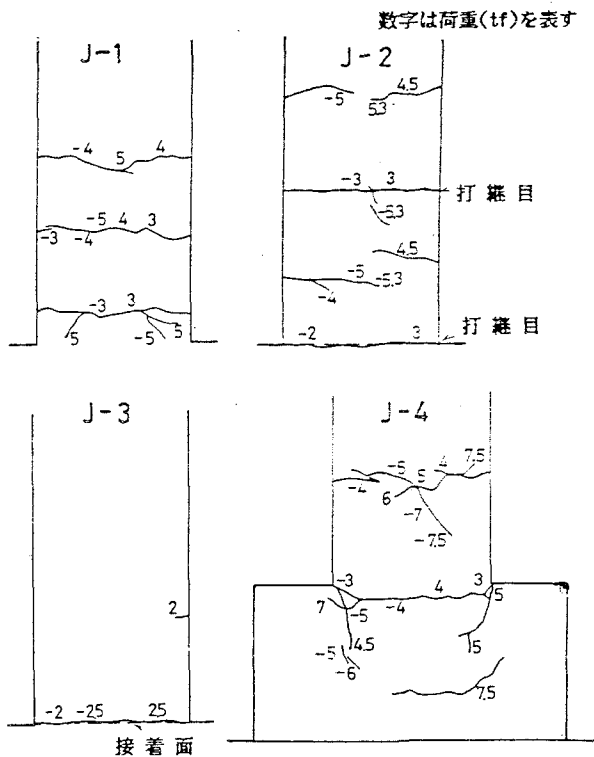


図-5 ひびわれの状況(静的载荷試験)

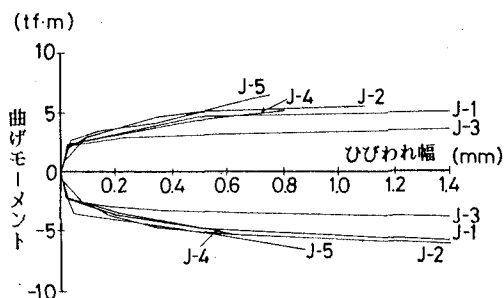


図-6 最大ひびわれ幅

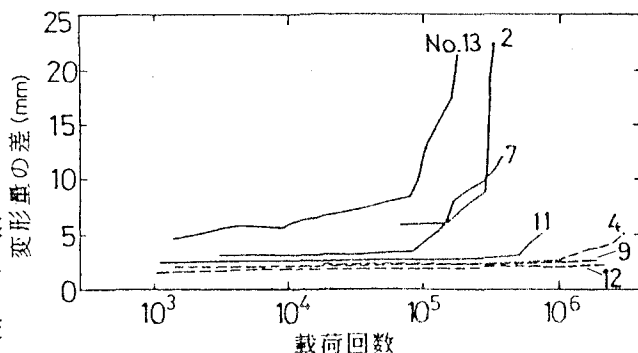


図-7 载荷回数と変位量との関係

荷重時での水平変位量との差で得られる。載荷荷重が大きいつで載荷回数と変形量との関係は、ある載荷回数まで変形量がほぼ一定で、その後次第に変形量が大きくなりある特定の回数以後急激に値が大きくなる。載荷荷重と破壊に至るまでの載荷回数と関係から得られるS-N曲線を図-8に示す。S-N曲線からは、一体構造と場所打ち構造とで疲労寿命に関して有意な差は生じていない。また場所打ち構造で、後打ちコンクリートの強度差によつても疲労寿命に大きな影響を与えていない。静的載荷実験では、コンクリートの圧壊によつて破壊に至つたが、疲労実験では、コンクリートの圧壊、鉄筋の破断、あるいはPC鋼棒定着部の破壊と種々の破壊状況が見受けられる。主鉄筋あるいはPC鋼棒と周辺のコンクリートとの付着が切れることにより定着部に大きな応力が生じたと考えられるが、疲労に対しては、定着部の安全性についても配慮する必要があると考える。

5-2 ひびわれの発生状況

図-9に一体構造と場所打ち構造とでのひびわれの発生状況を示す。一体構造では、ひびわれが柱部材内に分散して発生している。一方場所打ち構造では、2箇所の打継目にひびわれが集中する傾向がある。両者とも曲げひびわれが卓越しており、せん断ひびわれは特に見受けられない。このひびわれ状況は、静的載荷実験でのひびわれの状況と一致している。図-10に載荷回数と最大ひびわれ幅との関係を示す。最大ひびわれ幅は、ある載荷回数以後次第に大きくなるが、その傾向は、図-7に示す載荷回数と変形量との傾向と類似している。ひびわれ幅が急増する載荷回数と変形量が急増する載荷回数とはほぼ同一である。

5-3 マイナー則による疲労の安全性の評価

マイナー則とは、ある応力振幅にたいする波の繰返し回数(n_i)とその応力振幅での疲労破壊に達する繰返し回数(N_{fi})との比が疲労寿命の減少の程度を示し、

$\sum n_i / N_{fi} = 1$ のとき疲労破壊に達すると考える法則である。図-3に示した波浪条件(50年間の使用期間を考える)と図-8に示すS-N線図よりマイナー則を用いて接合部の疲労寿命の減少を推定すると、 $\sum n_i / N_{fi}$ の値はかなり小さく疲労に対してかなりの安全性があることが判明した。

6. まとめ

今回検討の対象とした5種類の接合構造の静的載荷実験及び疲労実験により得られた主要な結論は以下の通りである。

表-4 ひびわれ幅の実験値と計算値

供試体	ひびわれ幅が0.2 mmに達するモーメント(tf・m)		
	実験値	計算値	実験値 / 計算値
J-1	3.54	2.95	1.20
J-2	3.78	2.95	1.28
J-3	2.95	1.89	1.56
J-4	3.44	2.91	1.18
J-5	4.76	2.91	1.64

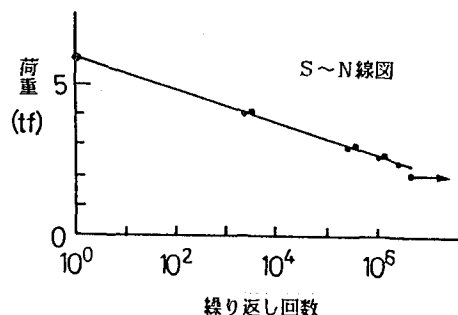


図-8 S-N曲線

表-5 疲労試験の結果

No	種類	f'_c	P	載荷回数	破壊の形態
1	一体構造	—	4.0	5,760	コンクリート圧路破壊
2	"	—	3.0	354,500	コンクリート圧路破壊
3	"	—	2.75	913,900	PC鋼棒定着部破断
4	"	—	2.5	3,023,570	破壊せず
5	"	—	2.0	2,000,000	破壊せず
6	場所打接合	550	4.0	4,110	コンクリート圧路破壊
7	"	550	3.0	386,200	PC鋼棒定着部と鉄筋破断
8	"	550	2.75	1,030,000	
9	"	550	2.5	2,180,000	破壊せず
10	"	350	4.0	6,000	
11	"	350	3.0	730,000	コンクリート圧路破壊
12	"	350	2.5	2,000,000	破壊せず
13	"	150	3.0	195,000	鉄筋破断

f'_c : 後打ちコンクリート圧路強度(kgf/cm²)、P: 荷重振幅(tf)

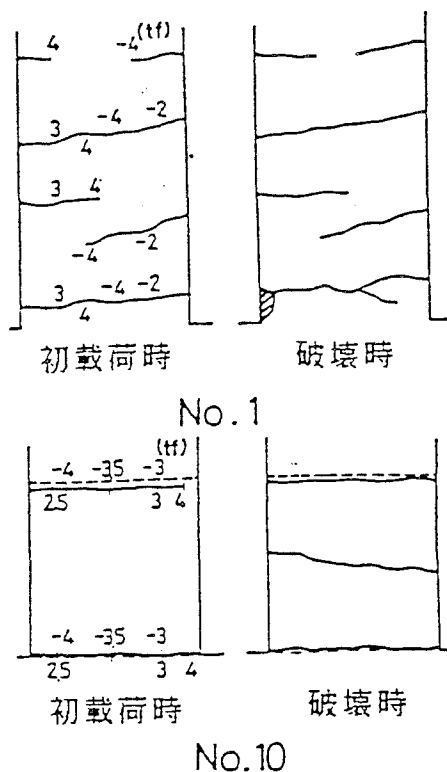


図-9 ひびわれの状況（疲労荷重試験）

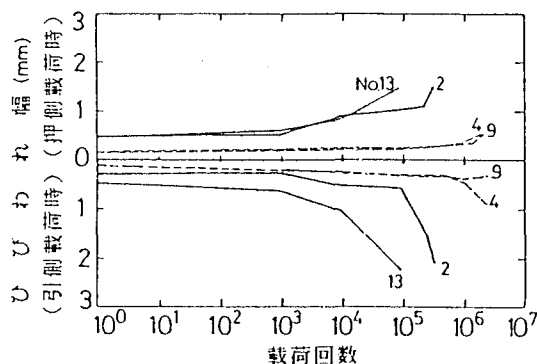


図-10 荷重回数とひびわれ幅

- ①静的な終局耐力及び疲労強度に関して、一体構造と接合構造とでは、大きな差はない。ただし接着剤接合構造の終局耐力は他の構造よりも下回った。
- ②破壊形状は、曲げ破壊が卓越している。静的荷重実験では、コンクリートの圧壊で終局に至っているが、疲労試験では、コンクリートの圧壊以外にも、鉄筋の破断あるいはPC鋼棒の定着部での破壊が見られた

③ひびわれは、一体構造では柱部材に分散して生じるが、場所打接合では打継目に集中して生じる。しかし、いずれの供試体でもCEB-FIP（1978年）で示される式による計算値よりも実験値は小さく、同式によりひびわれ幅を安全側に算定できた。

④マイナー則によって、日本近海の50年間の波浪に対して疲労強度を推定すると、各接合構造とも疲労に対する安全性があることが判った。

あとがき

本研究は、科学技術庁の科学振興調整費による「海洋構造物による海洋空間等の有効利用に関する研究」の一環として、港湾技術研究所に（社）プレストレストコンクリート技術協会とが共同で実施した。今回は、主に各種接合部の基本的な力学性状についてのみ検討を行っており、施工法、設計法等十分に検討されていない面もある。今後とも他種類の接合方法も含めて更に解析を進めていく予定にしている。

なお、疲労試験は、長岡科学技術大学の施設で行った。丸山助教授をはじめ当施設関連の方々に多大なる協力を頂いた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 例えば、谷本勝利、吉本靖俊、和泉田芳和：立体骨組構造防波堤の透過率の推定について、港湾技術研究所資料、No.394、Sept、1981年
- 2) 下伊豆隆三：PC構造のジョイント、PC建築の話、建築技術選書15
- 3) 横井聡之他：海洋構造物での各種接合部の荷重実験、第6回コンクリート工学年次講演会論文集、1984年6月、pp、673～676
- 4) 土木学会：コンクリート構造物の限界状態設計法指針（案）、昭和58年