

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 17

NO. 4

DEC. 1978

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P. H. R. I.)

第17巻 第4号 (Vol. 17, No. 4), 1978年12月 (Dec. 1978)

目 次 (CONTENTS)

1. Random Wave Velocity Field From Periodic Wave Theory
.....Koji KOBUNE..... 3
(規則波理論による不規則波中の水粒子の算定.....小舟浩治)
2. 浮体係留における粘性抵抗力および拘束条件の影響について
.....小舟浩治..... 59
(On the Effect of Viscous resistance and Non-linear Mooring System on the Mooring
Force of a Floating Body.....Koji KOBUNE)
3. 直立式円筒浮体の波浪中の動揺振幅に関する研究
.....合田良実・鈴木康正・蜂須賀和吉..... 89
(Prediction of the Oscillation Amplitude of a Bottom-hinged, Vertical Buoyant Cylinder
in Sea Waves.....Yoshimi GODA, Yasumasa SUZUKI, and Kazuyoshi HACHISUKA)
4. 地盤の圧密沈下による斜杭の曲げに関する実験的研究
.....高橋邦夫・沢口正俊..... 121
(Experimental Study on the Bending of Battered Piles due to Ground Settlement
.....Kunio TAKAHASHI, Masatoshi SAWAGUCHI)
5. ダイナフレクトによる空港アスファルト舗装評価とかさ上げ厚設計
.....佐藤勝久・福手 勤・佐藤峰夫・山崎英男..... 169
(The Evaluation and Overlay Thickness Design of Airport Asphalt Pavements by Dynaflect
Deflections.....Katsuhisa SATO, Tsutomu FUKUTE Mineo SATO and Hideo YAMAZAKI)
6. 繰り返し曲げを受ける PC パイルの力学的性質
.....大 即 信 明..... 193
(Strength and Deformation Characteristics of Prestressed Concrete Piles Subjected to
Repeated LoadingNobuaki OTSUKI)
7. 船舶の主要寸法に関する解析
.....寺 内 潔・吉田行秀・奥山育英..... 265
(Analysis on the Interrelations among the Several Dimensions of Ships
.....Kiyoshi TERAUCHI, Yukihide YOSHIDA and Yasuhide OKUYAMA)

8. 差圧式含泥率測定法の実用性について

.....浜田賢二・八木得次・斉藤 勝・是石昭夫... 329

(On Practical Characteristics of Solid Concentration Measurement by Differential
Pressure in Pipes.....Kenji HAMADA, Tokuji YAGI, Masaru SAITO and Akio KOREISHI)

6. 繰り返し曲げを受ける PC パイルの力学的性質

大 即 信 明*

要 旨

海洋環境下における構造部材としてのプレストレストコンクリート部材（以下PC部材と略す）に関する研究の一部として、規格化されかつ大量生産されているプレストレストコンクリートパイル（以下PCパイルと略す）を取り上げ、海洋環境下における代表的荷重である波力によるPCパイルの力学的性質の変化を試験した。さらに、この試験結果を基に海洋環境下における構造部材としてのPCパイルの設計法について検討を行った。

試験の目的は次の通りである。

- (1) 繰り返し荷重を受けない部材の曲げ試験を行い、ひずみ、たわみ、ひびわれ幅と荷重の関係および破壊荷重をは握する。
- (2) 繰り返し荷重を受けた部材の曲げ試験を行い、ひずみ、たわみ、ひびわれ幅と荷重の関係および破壊荷重をは握し、それらに及ぼす繰り返し荷重の影響を検討する。
- (3) 接合部を有する部材について(1)と(2)の試験を行い、単一部材と比較検討した。

この試験結果より、次の結論が導かれる。

- (1) 繰り返し荷重を受けないPCパイル諸特性は、既往の弾性理論および終局強度理論を用いて算定される。
- (2) 繰り返し荷重によるPCパイル諸特性の変化は、金属材料のそれと類似しており、PC鋼材の疲労寿命および累計回数を基に概略予測される。
- (3) 本研究で用いた溶接接合部を有するPCパイルは、繰り返し荷重の有無にかかわらず、単一部材と同等以上の性能を有している。

さらに、この結論に基づき海洋環境下における構造部材としてのPCパイルの設計法について考察を加えた。

* 構造部 材料施工研究室

6. The strength and deformation characteristics of the PCpile subjected to repeated loading

Nobuaki OTHUKI*

Synopsis

Recently prestressed concrete is actively and widely used for marine structures, and many works should be done in this field. The prestressed concrete pile (PC pile), which is one of the most popular precast prestressed concrete, can be used for the basic structural member.

In case of marine structures, strength and deformation characteristics of PC piles subjected to repeated loading must be considered.

The present paper deals with the results of repeated flexural loading tests (some are reversible repeated flexural loading tests) as well as static flexural loading tests.

And considering the results, the author suggests two design methods of the PC pile used for marine structures. The purposes of the tests is as follows:

- (1) To investigate the strength and deformation characteristics of PC piles subjected to static flexural loading.
- (2) Compared with the results of 1), to investigate the strength and deformation characteristics of PC pile subjected to repeated flexural loading.
- (3) To investigate the strength and deformation characteristics of spliced PC piles.

And the results are as follows:

- (1) The strength and deformation characteristics of PC pile without repeated loading can be estimated from the ultimate strength theory and the elastic theory.
- (2) The influence of repeated loading may be estimated from the calculation of the fatigue life of the PC strand.
- (3) The welded splice shows good performance.

Considering the results, the author suggests two design methods of the PC pile used for marine structures.

* Member of the Materials Laboratory Structures Division

目 次

要 旨	193
1. まえがき	197
2. 海洋環境における構造部材としての PC パイル検討課題	197
2.1 海洋環境におけるコンクリート構造部材で検討すべき事項	197
2.2 海洋構造部材としての PC パイルで検討すべき事項	198
2.3 既往の研究より明らかな事項と新たに検討すべき事項	199
3. 単一部材の検討	201
3.1 従来の研究の経緯および整理	201
3.2 単一部材の曲げ試験	206
3.3 考 察	223
4. 溶接接合部を有する部材の検討	235
4.1 従来の研究の経緯および整理	235
4.2 溶接接合部を有する部材の曲げ試験	236
4.3 考 察	245
5. 設計法への提案	245
5.1 PC 海洋構造物設計の概念	253
5.2 ひびわれ幅制限に関する考え方	253
5.3 設計法Ⅰについて	254
5.4 設計法Ⅱについて	255
6. あとがき	256
付録	256
参考文献	263

1. まえがき

近年、世界的に資源および生活空間を海洋に求める傾向があり、それに伴い、海洋構造物への要求も高まっている。プレストレスコンクリート(以下PCと略す)は海洋構造物として多くの優れた性質を有すると言われており、現在、北海油田の貯油タンクを始めとして相当数のPC海洋構造物が建造され、今後さらにPC海洋構造物建造の機会は増加するものと考えられる。

しかしながら、従来よりPCは橋梁等の陸上構造物での使用がほとんどであり、PCの設計法及び研究も陸上構造物を対象としたものであるため、PCを海洋構造物として設計施工する際の問題点も多く、今後の検討課題として残っている。

本研究では、PCを海洋構造物として用いる研究の一部として、規格化されかつ大量生産されているPCパイルを海洋構造物部材として用いるための検討を行い、さらに設計法について若干の考察を行う。

2. 海洋環境における構造部材としてのPCパイル検討課題

2.1 海洋環境におけるコンクリート構造部材で検討すべき事項

(I) 海洋コンクリート構造物設計法について

ここ数年の間に、海洋コンクリート構造物に関する設計施工の基準類が、諸外国および我が国において作製されている。これらの基準類として「固定式海洋コンクリート構造物の技術勧告(アメリカコンクリート学会:ACI)」、「海洋コンクリート構造物の設計施工に関する技術勧告(国際プレストレスコンクリート学会:FIP)」、「海洋構造物の設計、施工、検査に関する規則(ノルウェイ海事協会:DNV)」,および、「海洋コンクリート構造物設計施工指針(案)(土木学会)」を挙げることができる。このうち、土木学会を除き限界状態設計法を採用しているのに対し、土木学会のみが許容応力度法であるという相違はあるものの、設計の手順としては、ほぼ図-1に示すものが考えられる。

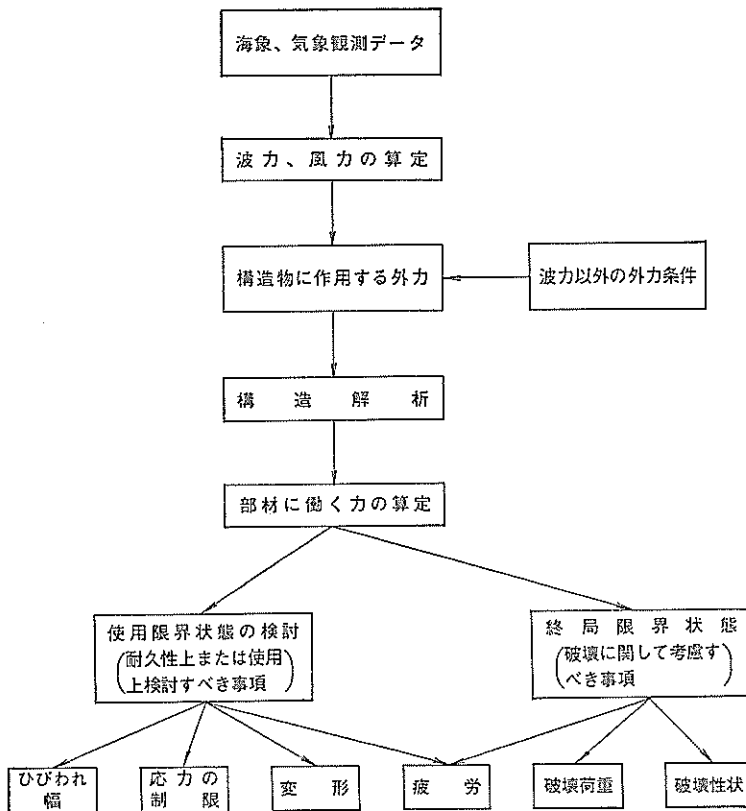


図-1 設計のフローチャート

すなわち、構造物の種類および設置位置が定まると、構造物に作用する外力を調査し、同時に、構造物の機能および重要度を考慮して、構造物に適切な使用限界状態および終局限界状態を定める。

ここで、使用限界状態とは、正常な使用状態または耐久性に関する必要条件を満たさなくなる状態、また、終局限界状態とは、構造物または部材の最大耐荷力に相当する状態とそれぞれ定義される⁽¹⁾。

具体的には、図-1に示すように、使用限界状態として、ひびわれ幅、応力、変形、疲労による劣化等を、また、終局限界状態としては、破壊荷重、破壊性状、疲労破壊等が考えられ、その各々について、図-1に示す手順で解析を行い、それらが許容される範囲となるよう構造物の寸法形状を定めるのである。

(2) PC部材で注意すべき事項 (荷重の大きさ)

海洋環境におけるコンクリート部材で第1に重要な点は、陸上と比べ厳しい腐食環境にあることから、ひびわれに対する配慮であろう。陸上構造物では、従来より、設計荷重時に引張応力を許容せず、したがってひびわれも許容しないというフルプレストレッシングによる設計法(PCの分類を付録-1に示す)が用いられてきた。同様に、陸上構造物より腐食環境の厳しい海洋構造物においても、PC鋼材の腐食という面からは、ひびわれを全く発生させない設計法が望ましい。

しかし、PC海洋構造物に作用する外力および部材力を算定するのは、陸上構造物と比べてかなり困難である。すなわち、設計波として、予想される最大級規模の台風が最悪のコースを通るものとして推算によって求めた最大波を用いることもあるが、波浪推算法自体が絶対的に正確なものというわけでもなく、また計算においても個人差があることもあるので、つきつめてゆくと、ここで想定した最大設計波以上の波浪が発生する可能性があると思わざるをえない。また、設計波を用いて構造物に作用する応力を求めようとする際にも、現状では、算定された部材応力もまた必ずしも実態を正確に表現しているとはいえない。

このような理由で、PC海洋構造部材では、設計で求めた応力よりも大きな応力が作用することを予期せねばならない。

今までと異った視点に立っての議論になるが、さきに述べた最大波浪荷重は当該構造物としては、必ず発生するものとは限らないので、経済的設計を行うとなると、構造物の使用期間(耐用期間)に発生が予想される最大波浪荷重を設計荷重とすることにもなる。さらに、経済的設計を行う場合には、使用期間内にPC鋼材の腐食等

に影響を与えない範囲内でひびわれを許容して設計荷重をさげに下げることもある。このような場合には、使用期間内に、数千〜数万回程度のひびわれが発生するかもしれない。

そのため、設計上の分類としては1種(フルプレストレッシング)であっても、まれにはひびわれが発生し、このひびわれが数千〜数万回以上も繰り返し開くことが考えられる。このことより、PC海洋構造部材では、ひびわれ発生およびひびわれ発生状態での疲労を検討する必要がある。

(3) PC部材で注意すべき事項 (荷重の向き)

PC陸上構造物の場合、荷重作用方向が一定であり、一方向からの荷重を考えれば十分なことが多いが、PC海洋構造物の場合、主な外力である波力の方向性が一定でなく、かつまた荷重が静止状態の上下両方向に変動するものであるから、例えば両振り荷重で部材特性を検討する必要がある。

(4) PC部材で注意すべき事項 (施工上)

一般に、海上工事は陸上工事に比較して困難であるため、PC海洋構造物でも海上工事はできるだけ避けるべきである。この場合、工法としては、①、すべてをドライドック等の陸上部で製作し、現場へ曳航し設置する。②、①の工法で製作した部材を静穏な海面で打ち継ぎ、コンクリート工事完了後に現場へ曳航し設置する。③、①の工法で製作した部材を現場で一体化する、の3つが基本的に考えられる。いずれの工法においても、PCをプレキャスト化することにより、経済面および施工面から利点が考えられる。特に、②および③については、プレキャスト部材を用いると、接合部が不可避となるので、構造上および施工上の弱点とならない接合法が必要である。

2.2 海洋構造部材としてのPCパイルで検討すべき事項

PC海洋構造物の場合、PC部材のプレキャスト化が望まれることを考え、PCパイルは我が国で最も多く使用しているプレキャスト製品の1つであること、有脚式海洋構造部材として使用しうること、および、工場製品で比較的品質が一定で試験し易いこと等を考え、本研究ではPCパイルをとりあげ検討する。

また、本研究では、PCパイルの単一部材および接合部を有する部材について検討を行う。

2.2.1 単一部材で検討すべき事項

(1) 海洋構造部材としてのPCパイルに作用する外力

PCパイルは有脚式海洋構造物の下部工として用いられることが考えられるが、その場合、耐用年数内に作用

する主な外力を挙げると次のとおりである。

①PCパイル施工時海上におけるPCパイルの施工は、打撃工法が採用されると考えられる。この場合、打設時に、種々の破損が起こる⁽²⁾。すなわち、a)パイル頭部の破損、b)パイル中間部の破損、c)パイル先端部の破損、d)パイルのたて割れ破損等である。これらの原因としては、偏打及びパイル先端部のすべり、応力波の反射による引張応力の発生等が考えられる。

したがって、パイル打設時には、種々の計算外の応力が加っていると考えられ、何らかの損傷が生じている可能性もある。

②波力による繰り返し荷重：海洋構造物は、耐用年数内に 10^8 回にもおよぶ波力を受けると考えられ、海洋構造物材としてのPCパイルは当然繰り返し荷重により、種々の性質が変化する。

③波力または地震力等による事後的な荷重：実際に起こる可能性は非常に小さいが、万一起った場合でも大災害とならぬよう考慮する必要がある。

また、②、③は曲げとして作用することが多く、本研究では曲げを対象として検討を行う。

(2) 検討すべき事項

a) 一般に設計に必要な事項

図-1に沿って考えると、使用限界状態の検討で対象とする事項は、①ひびわれ、②応力、③変形、④疲労であり、終局限界状態の検討で対象とする事項は、⑤疲労破壊、⑥破壊荷重、⑦破壊性状である。また、構造解析に必要なものとしてEI等がある。

以上の事項にそれぞれ対応する許容範囲に、構造物が耐用年数内にあるよう設計する必要がある。これらの事項は互いに不可分な面もあるが、本研究では、次の手順で検討する。

(i)繰り返し荷重を受けない試験体で、疲労を除く上記の事項を検討する。

(ii)耐用年数内に作用する繰り返し荷重をモデル化して与え、それによって上記事項の変化を検討する(疲労による物性の変化)。また、疲労破壊については別途検討する。

b) 繰り返し荷重を受けない試験体で検討すべき事項

(i)ひびわれに関して

ひびわれ発生荷重、引張応力発生荷重(再びびわれ発生荷重)、荷重ひびわれ幅の関係

(ii)応力、変形に関して

荷重鋼材応力、荷重コンクリート応力の関係

荷重たわみの関係

(iii)破壊荷重、破壊性状について

破壊荷重及び破壊時の諸性状

c) 耐用年数内での諸特性の変化

種々の荷重履歴について、b)に挙げる諸特性の変化を検討する必要がある。

(i)打設時の応力による諸特性の変化

(ii)繰り返し荷重による諸特性の変化

本研究では、PCパイルのひびわれの限界状態を考え、引張応力発生荷重を対象とした荷重とひびわれが発生する荷重による諸特性の変化を検討した。

(iii)繰り返し荷重による破壊(疲労破壊)の3点である。

2.2.2 接合法で検討すべき事項

(1)単一部材との諸特性の比較

PCパイル接合法は、接合部を有する部材であっても設計上は単一部材と同一の取り扱いができるものであることが望ましい。一步譲っても、接合部を有する部材の諸特性を十分把握し、その弱点を補うような構造上の配慮を行えるような接合法であるべきである。

いずれにしても、2.2.1で述べた単一部材で検討すべき事項に関してと同様の検討を行う必要がある。

(2)現場での施工性

性能が完璧な接合法であっても、現場での施工が困難であれば、使用出来ないのので、施工性に関しても検討すべきである。

2.3 既往の研究より明らかな事項と新たに検討すべき事項

本節では、2.2で述べた検討すべき事項の中で、既往の研究より明らかなものについては、その手法あるいは研究成果の概略を述べ、新たに検討すべき事項についてまとめる。

2.3.1 単一部材について

(1) 繰り返しを受けない部材の曲げ特性について

繰り返しを受けない部材の曲げ特性については、2.2で述べたように、大別してひびわれに関するもの、応力と変形に関するもの、破壊荷重と破壊性状に関するもの3つに分けることができる。このうち、ひびわれに関する事項は、ひびわれ発生荷重に関するものと、荷重ひびわれ幅の関係に関するものとの2つに分けられ、この4点についてそれぞれ述べる。

(a)引張応力発生荷重およびひびわれ発生荷重

両者ともに既往の理論により算定される。引張応力発生荷重は、有効プレストレス σ_{se} および換算断面の断面二次モーメント I_e を用いて弾性理論で計算される。

ひびわれ発生荷重に関しては、コンクリートの曲げ引張強度 σ_m を用いた弾性理論による算定法とコンクリートの引張塑性性を考慮した塑性理論による算定法がある。

既往の文献⁽³⁾によれば、塑性理論の方がより理論的ではあるが、精度は弾性理論によるもので十分とされている。

引張応力発生荷重およびひびわれ発生荷重の算定では、理論的な面よりも、PC鋼材有効引張力 P_e の算定精度およびひびわれ発生を確認する手法が問題である。

本研究では、弾性理論を用いて P_e およびひびわれ発生確認の手法について検討する。

(b)破壊荷重及び破壊性状

破壊荷重（破壊曲げモーメント）は、基本的には、平面保持及びコンクリートの引張強度無視の2つの仮定と鋼材及びコンクリートの応力ひずみ曲線より求まる。この理論を用いるには、コンクリートの応力ひずみ曲線を、コンクリートの最大圧縮ひずみまで求める必要があり、厳密にはさらに曲げによる応力勾配の影響を考慮する必要がある。しかし、これを正確に求めるのは困難であり、既往の研究では、種々の仮定を用いて簡略化している。本研究では、PCパイルの破壊荷重を種々の仮定を用いて算出し、どの程度の精度であるかを検討する。

また、破壊性状については、それを全体的にとらえることは困難ではあるが、一つの評価方法として、塑性設計法に取り入れようとしている塑性ヒンジがどの程度まで回転できるか（塑性ヒンジの回転能）が考えられる。しかし、PC部材の場合、塑性範囲と弾性範囲との境界があいまいなため、塑性ヒンジのみの回転能を求めるのは困難である。そのため、本研究では、塑性範囲と弾性範囲とを併せた破壊荷重時での回転能を破壊時の曲率により評価した。破壊時の曲率は、破壊荷重時の等曲げモーメント区間のたわみより求めた。また、理論的には、平面保持およびコンクリート引張強度無視の仮定を用い、さらにコンクリートの応力ひずみの関係は、破壊荷重を求める際と同じ仮定を用いて算定し、試験値と比較、検討した。

(c) たわみ、ひずみ、 EI 、曲率と荷重の関係

ひびわれ発生以前のたわみ、ひずみ、 EI 、曲率と荷重の関係は、全断面有効とした弾性理論で十分説明できる。

ひびわれ発生後は、コンクリートの引張強度無視及び平面保持の仮定を用いて理論的には算定できる。しかし、この方法では、PCパイルが円環断面をしていることもあり、計算が非常に煩雑となる。そのため、簡略な計算法としては、PCを鋼材の緊張力による中立軸まわりの負のモーメントを受けるRCとして考えるというプレストレストコンクリート標準示方書（案）による略算法もあり、この算定精度も併せて検討する。

(d) ひびわれ幅と荷重の関係

RC部材では、ひびわれ幅と荷重の関係について多くの研究と提案式がある。これらの式は、各々形式は異なるが、一般には、部材形状による因子と、鉄筋応力による因子の2つによって構成されている。すなわち、鉄筋応力と荷重とを関係づけることによって、最終的にひびわれ幅と荷重の関係が求まる。しかしながら、ひびわれ幅のバラツキは非常に多いので、各提案式は安全側となるよう考慮されている。

一方、PC部材は伝統的にI種すなわちひびわれを生じさせない設計法が採用されていたため、ひびわれ幅に関する式は少なく、実用的なものとしては、CEB-FIPの式がある程度である。また、RC部材のひびわれ幅に関する式をPC部材に適用している基準（C P-110：英国）もある。PCパイルのひびわれ幅の研究は非常に少なく、それゆえ、ひびわれ幅と荷重の関係を検討する必要がある。

(2) 耐用年数内での諸性質の変化

PC部材の疲労寿命については多くの研究があり、一般には鋼材の疲労寿命より求めることができるとされている。しかし、疲労破壊は本質的に確率的な要素が強くなり、鋼材自体の疲労寿命もバラツキ、さらにPC部材中の鋼材応力の計算精度もそれほどよくないといった理由により、いかなる計算値も目安を与えるに過ぎないという性質をもつ。また、疲労破壊はそういう性格のものであることを考慮して設計すべきであり、本研究では、疲労破壊について概略の傾向及びその適用性について検討する。

PCパイルの耐用年数内での主な荷重履歴を2.2.1に示したが、そのうち打設による諸特性の変化については文献(2)に記載されている。しかし、繰り返し荷重を受けた後の諸特性の変化の一般的な傾向については文献(4)に示されているものの、破壊荷重、破壊性状、曲げ剛性の変化、および、両振り荷重に対しての変化が全く検討されていない。

これらを整理して検討すべき事項を挙げると次のようになる。

(a)打設時の軸力による諸特性の変化

打設時の軸力は、一般に $10^2 \sim 10^3$ 回程度の衝撃繰り返し荷重であり、種々の影響をPCパイルに与えると考えられる。それらの影響を順次説明する。

引張応力発生荷重には、ほとんど影響を与えないとされているが、過大な応力によりひびわれが発生する場合も多いようである。

また、たわみ、ひずみ、 EI 、曲率、ひびわれ幅と荷重の関係及び破壊荷重にも、ほとんど影響を考えないと

されている。

これらの事項については多くの研究があり、本研究では特に検討しない。しかし、打設時過大応力によるひびわれ発生を考え、PCパイルにひびわれを発生させた後に各種試験を行った。

(b)繰り返し荷重による諸特性の変化

PC海洋構造物は繰り返し荷重に対して一般にⅠ種(フルプレストレッシング)で設計することが考えられる。

この範囲での繰り返し荷重であれば、諸特性はほとんど変化しないと報告されている。しかし、この場合でも両振りに対する検討はなく、本研究ではこの検討も含めて、諸特性変化の確認を行う。

さらに、前述したように、波力を考えた場合には、ひびわれが発生した状態での繰り返し荷重の影響を考える必要がある。また、この場合には、鋼材応力の変化も大きく諸特性変化が顕著となることも考えられる。たとえば、引張応力発生荷重が低下し、全体としてたわみ、ひずみが大きくなり、それに伴って曲げ剛性、曲率も変化し、さらにひびわれ幅も大きくなることが考えられる。

このような変化が起こると、構造物の使用限界状態を満たすことができなくなるおそれもあるので、本研究では、これらの変化の実態を調べ、その許容できる範囲を検討する。

また、ひびわれが発生した状態での繰り返し荷重では疲労破壊の可能性もあるので、本研究では鋼材の疲労特性をもとにPCパイルの疲労破壊を検討するとともに、疲労寿命と諸特性の変化の関係についても検討を行う。

(c)事後的な荷重による破壊

いかなる構造物も予測しがたい外力によって破壊に至る危険がある。海洋構造物においても同様で、外力がその性質上不明確なこともあり、破壊に至る可能性がある。その場合に備えるに当たって重要なことは、突発的な破壊とならずにできるだけ延性に富んだ破壊とすることである。そのため、耐用年数内に構造部材の破壊荷重及び破壊性状がどのように変化するかを検討することが必要となる。

本研究では、繰り返し荷重を受けた後に、破壊性状がどのように変化するかを、破壊荷重及び破壊時の曲率を測定することによって検討を試みた。

2.3.2 接合法について

既往の文献(5)に種々のPCパイル接合法が紹介されている。これらの接合法の大部分は、圧縮力に対しては本体同等以上であるが、曲げに対しては、種々の問題が残っている。これらの中から力学的性質のみで選定するとすれば、溶接接合とロック機構接合が良好であると考え

られる。しかしながら、ロック機構接合は施工が困難であり、また、「遠心力大径プレストレストコンクリート杭設計施工指針案(土木学会)」においても溶接接合のみが取り上げられていることを考え併せると、現状では溶接接合が唯一のPCパイル接合法であると思われる。

この溶接接合を有したPCパイルについては、2.2.2で述べた事項に関する検討が必要であるが、本研究では施工性に関するものは除外し、力学的性質に関し、単一部材とはほぼ同一の事項を検討した。

なお、溶接接合を有するPCパイルで特に検討すべき点は、接合部鋼板とコンクリートとの一体性であり、既往の文献(6)によれば、この一体性が低下すると曲げ剛性も低下するとされている。この曲げ剛性の低下の有無に関しても本研究で検討を行う。

3. 単一部材の検討

3.1 従来の研究の経緯および整理

本節では、従来の研究を、「繰り返し荷重を受けない部材の曲げ特性に関するもの」「および繰り返し載荷を受ける部材の曲げ特性に関するもの」の2つに分けて述べる。

3.1.1 繰り返し荷重を受けない部材の曲げ特性

繰り返し荷重を受けない部材の曲げ特性は、理論的に十分説明される。ここでは、これらの理論を述べ、更に、PCパイル特有の問題を含めて整理したものを記述する。

3.1.1.1 引張応力発生荷重及びひびわれ発生荷重

(1)引張応力発生荷重

引張応力発生荷重は、弾性理論で計算される。引張応力発生曲げモーメント M は、 $M = \sigma_{cc} \cdot I_c / y_c$ で表わされ、これより引張応力発生荷重を計算できる。

ここで、 σ_{cc} = 有効プレストレス、 M = 曲げモーメント、 y_c = 換算断面の図心から、部材断面の引張縁までの距離、 I_c = 換算断面の断面二次モーメント、である。

(2)ひびわれ発生荷重

ひびわれ発生荷重を求めるには、弾性理論と塑性理論があるが、2.3.1で述べた理由よりここでは弾性理論のみを紹介する。弾性理論では、ひびわれ発生曲げモーメント M_{cr} は、 $M_{cr} = I_c \cdot (\sigma_{cc} + \sigma_{tn}) / y_c$ として求まり、これより、ひびわれ発生荷重を求めることができる。ここで、 σ_{tn} はコンクリートの曲げ引張強度である。

(3)有効プレストレス σ_{cc}

有効プレストレスは、引張応力発生荷重及びひびわれ発生荷重計算にも必要となる重要なものであるが、この一般的な計算法を付録-2に示す。現在、我が国で製作されるPCパイルには、高強度コンクリート(圧縮強度

$\sigma_{cu} > 500 \text{ kg/cm}^2$) を用いることが多く、そのために、高温高圧でオートクレーブ発生することが多い。

オートクレーブ発生の場合、発生期間中の鋼材のレタクセーション、コンクリートのクリープ等について十分は握されていない点もあり、理論的に有効プレストレスを求めることは難しく、実情では、メーカーが行った製品品質管理試験の実績より有効プレストレスの目安を求めている。

本研究では、以上の事情を考慮して有効プレストレスの計算値と試験値との比較、検討を行う。

3. 1. 1. 2 破壊荷重および破壊時の曲率

破壊曲げモーメントを求める際、一般には、次の3つの仮定が必要である^{(7),(8),(9)}。

①コンクリートの引張強度を無視し、雑ひずみは断面中立軸からの距離に比例するものとする。

②部材破壊時におけるコンクリートの応力分布および最大圧縮ひずみを仮定する。

③附着のある場合には、PC鋼材のひずみはコンクリートのそれに等しく、PC鋼材応力度は、その応力ひずみ関係より求められる。

この3つの仮定のうち、②の応力分布の形状については、種々の設計基準または研究者によって異なった提案がなされているが、単純曲げの場合は矩形としているものが多い。

また、③の応力ひずみ関係については、試験値を用いるのが望ましいが、近似的に bi-linear, tri-linear を用いている基準もある⁽¹⁰⁾。

コンクリートの応力分布として矩形を用いたものの理

論は以下のとおりである。なお、この場合、破壊形式として、PC鋼材が塑性域に達し、その後コンクリートの圧壊で最終的に破壊するものと考えている。

この計算手順および仮定は以下のようである。

(i)中立軸位置の算出(圧縮縁から中立軸までの距離 x の算出): x を仮定し、任意の部材断面のひずみを、コンクリートの最大圧縮ひずみ ϵ_{cu} と x の関数で表わす。更に、これらのひずみより、コンクリートの圧縮力、PC鋼材の合力(引張力の他に圧縮力も考えられる)を求め、これらの力が釣り合うような x を求める。

(ii)破壊曲げモーメントの算出: (i)の x によって、部材断面の応力分布が定まり、破壊曲げモーメントを算出できる。(iii)応力分布の仮定: 応力分布を矩形とするものでは、その矩形の特性を $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 、というパラメーターで表わすことができ、その概要を図-2に示す。すなわち、 $\lambda_1 \cdot \lambda_3 \cdot x \cdot \sigma_{cu}$ で単位幅あたりの応力の和を表わし、 $\lambda_2 \cdot x$ でその作用位置を表わす。

この $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ の与え方には、種々のものがあり、本研究では、次の4つについて検討を行う。

①プレストレストコンクリート標準示方書案(土木学会): $\lambda_1=0.85, \lambda_2=0.4, \lambda_3=0.8, \epsilon_{cu}=0.0035$

②プレストレストコンクリート設計施工指針(土木学会): $\lambda_1=1.0, \lambda_2=0.5, \lambda_3=1.0, \epsilon_{cu}=0.0025$

③ACI-318-71: $\lambda_1=0.85, \lambda_2=\lambda_3/2$

$$\lambda_3 = \begin{cases} 0.85 & \sigma_{cu} \leq 280 \text{ kg/cm}^2 \\ 0.85 - (\sigma_{cu} - 280) \times 0.05/70 & \sigma_{cu} > 280 \text{ kg/cm}^2 \end{cases}$$

$\epsilon_{cu} = 0.003$

④Hognestad:

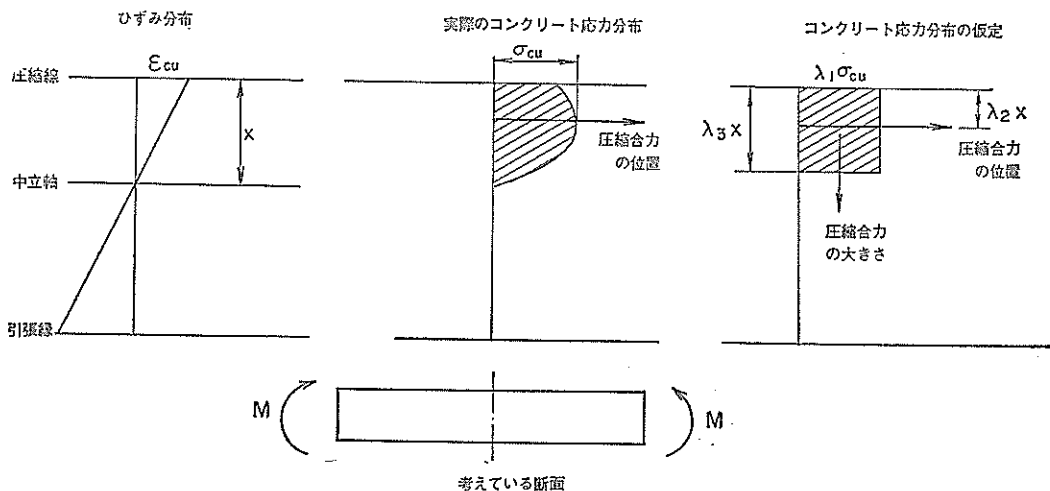


図-2 コンクリートの応力分布

曲げを受けるPCパイルの力学的性質

$$\lambda_1 \cdot \lambda_2 = (27 + 0.35 \cdot 0.0098 \alpha \sigma_{cu}) / (22 + 0.0098 \cdot \sigma_{cu})$$

$$\lambda_2 = 0.5 - 0.0098 \sigma_{cu} / 550$$

$$\epsilon_{cu} = (4 - 0.0098 \sigma_{cu} / 45) / 1000$$

以上の理論をPCパイルに適用するが、円環断面かつプレストレスが導入されているため、煩雑である。付録-3に本研究で用いた方法を示すが、方法Aは圧縮側の鋼材を考慮し、コンクリート断面積を正確に算出したものであり、方法Bは圧線側の鋼材を無視し、コンクリート断面積を略算で求めたものである。

なお、破壊時の曲率は、 $1/\rho = \epsilon_{cu}/x$ として計算した。

3.1.1.3 たわみ、ひずみ、EI、曲率と荷重の関係

ひびわれ発生前のPC部材の、たわみ、ひずみ、EI、曲率と荷重の関係は、全断面有効とした弾性理論で容易に求まる。

ひびわれ発生後の、たわみ、ひずみ、EI、曲率と荷重の関係は、平面保持および引張側コンクリートを無視できると仮定し、更に、PC鋼材のヤング率、コンクリートのヤング率および有効プレストレスが既知であれば、弾性理論より厳密に求めることができる。しかし、この厳密解を求めるのは煩雑であるので、簡略法として、断面をRCと考え、それにプレストレスによる鋼材引張力が中立軸に関しての逆曲げモーメントとして働くと考えられる方法がある。

この簡略法および厳密解を付録-4においてそれぞれ方法Iおよび方法IIとして示す。

3.1.1.4 ひびわれ幅と荷重の関係

PC部材を対象としたひびわれ幅と荷重の関係を表わす式としてCEB-FIPの式がある。本研究では、CEB-FIPの式の適合性を主として検討し、さらに、RC部材のひびわれ幅-荷重の関係式をPC部材へ適用することを試

みた。

(1)CEB-FIPの式

w_{max} をひびわれ幅の最大値、 $\Delta\sigma_s$ をひびわれ断面での鋼材位置コンクリート応力が0となる状態からの鋼材応力増加量とすると、

(a)繰り返しのない荷重に対して

$$w_{max} = (\Delta\sigma_s - 400) \times 10^{-5} \text{ (単位 kg, cm)}$$

(b)繰り返しのある荷重に対して

$$w_{max} = \Delta\sigma_s \times 10^{-5} \text{ と算出される。}$$

(2)C P-110の式

(3)港湾構造物設計基準

(4)角田式

(5)ACI-318-71

これらについては、付録-5に示す。

(2)~(5)については、鉄筋のひずみ、応力を因子として含むが、これをPC部材に適用するため、(1)に準じてPC鋼材位置コンクリートのひずみ及び応力が0となる状態からの増加量としてPC材のひずみ、応力を考える。

また、応力、ひずみと荷重の関係については、方法Iおよび方法IIより各々算出したものを用いる。

3.1.2 繰り返し荷重の影響について

繰り返し荷重の影響についての理論は、金属材料については種々のものがあるが、コンクリートについてはほとんどない。これらの複合材料であるRC、PC部材に関しても理論はほとんどなく、試験的な事実が先行している。本節では、これらの理論及び試験結果を整理する。

3.1.2.1 鋼材における繰り返し荷重の影響

繰り返し荷重によって金属材料は疲労を起こす。疲労現象は、確率的な要素が非常に多く、定量的な把握は困難であるが、定性的な傾向は文献⁽¹¹⁾によれば次のよう

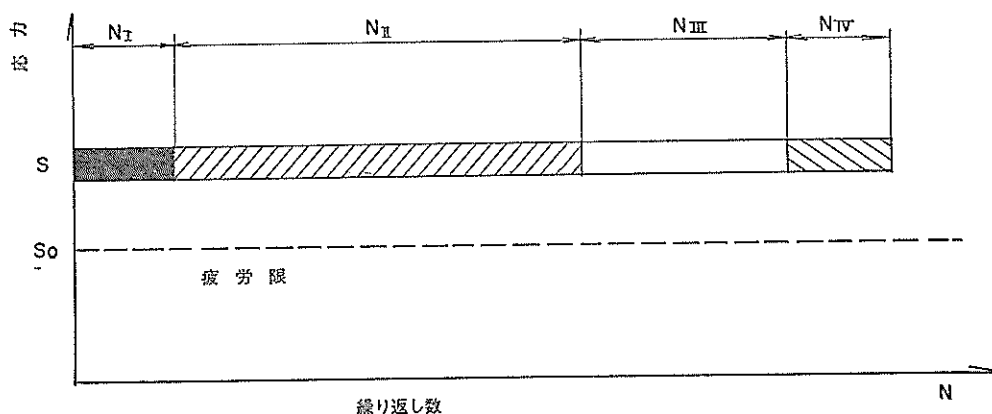


図-3 疲労過程における各段階

に説明される。

疲労破壊までの寿命を命は図-3のような4段階に分けることができる。

第1段階：負荷開始後加工硬化が完了（飽和）するまでの期間（平均期間= N_1 ）。

第2段階：加工硬化完了後、超微視的クラックの発生までの期間（平均期間= N_2 ）。

第3段階：この超微視的クラックが認知検出（顕微鏡的ないし磁気的方法などによって）可能な大きさのクラックに達するまでの期間（平均期間= N_3 ）。

第4段階：この認知検出可能なクラックが結晶粒を横ぎって、最後の破壊に至る期間（平均期間= N_4 ）。

このうち、第1、第4段階は全寿命のうちのきわめてわずかな部分を占めるものである。

以上の事から、次のように考えられる。すなわち、繰り返し荷重をうける鋼材は、第2段階までは加工硬化したままであり、加工硬化の特性として、弾性限、降伏点、引張強さ、疲労限などは増加し、伸び、しぼりなどは減少すると考えられる。

更に第3、第4段階、特に、第4段階になると、クラックは徐々に進行し、残部の断面積は減ってゆくが、残りの部分に働く応力がその時点での静的破壊強度に等しくなると、瞬間的に破壊するのである。

また、疲労破壊に至るまでの寿命、若しくは、繰り返し回数を含んだ疲労の理論としては、確率論的な過程が考慮されていないという欠点はあるものの、Orowanの理論が分かり易い⁽¹²⁾。

疲労寿命（繰り返し回数）については、設計上は Goodman図によって考慮する方法⁽¹³⁾もあるが、これは疲労寿命（繰り返し回数）を直接算定するには不向きである。このため、本研究では、PC鋼材の疲労寿命を Hilms & Eksbergの方法⁽¹⁴⁾によって算定し、これを1つの目安として用いる。この算定式を示すと以下のとおりである。

鋼材の破壊までの繰り返し回数を N 、鋼材の引張り強さを f_m 、繰り返し荷重による鋼材の最大応力を f_{max} 、最小応力を f_{min} とすれば、

$$40,000 \leq N \leq 400,000 \text{ に対して,}$$

$$N = \{ (16.4 f_m - 11.5 f_{min}) / (f_{max} - f_{min}) \}^{3.125}$$

$$400,000 \leq N \leq 4,000,000 \text{ 対して,}$$

$$N = \{ (1.115 f_m - 0.78 f_{min}) / (f_{max} - f_{min}) \}^{8.67}$$

として求めるものである。

さらに、文献(14)では、Miner 仮説を用い、それによる累計回数比の和によって変動荷重に対する疲労寿命をも算定し、比較的試験値と良い一致をみている。なお、Miner 仮説については、付録-6に述べる。

ここで注意すべき事は、疲労現象自体が確率的な象であることおよび鋼材の成分、製法が異なれば疲労性状も異なるので、Hilms & Eksberg の式あるいは類似の式もあくまで1つの目安に過ぎないということである。

3.1.2.2 コンクリートにおける繰り返し荷重の影響

繰り返し荷重（ここでは圧縮荷重を考える）によってコンクリートの物性は影響を受けるが、それらは理論的に体系づけられていない。ここでは、繰り返し荷重によってヤング率、破壊荷重、破壊時最大ひずみがいかに変化するかを既往の文献より紹介する。

ヤング率については、文献(15)に種々の研究をまとめてあるが、疲労破壊に近くなるとヤング率は、低減していくことは各研究で共通している。しかし、疲労の初期段階では、若干大きくなって後低減するという試験結果と、初期段階より低減するという2つの試験結果があり定説はない。

繰り返し荷重を受けた後の、破壊強度の変化について文献(16)の試験結果を図-4に示す。この図で縦軸は、静的圧縮強度に対する繰り返し荷重後の圧縮強度の比を、横軸は累計回数比を示す。この図によれば、累計回数比が0.5程度までは、最大5%程度強度が増加しているようであり、また、疲労寿命近くでは、最大10%程度強度が減少している。

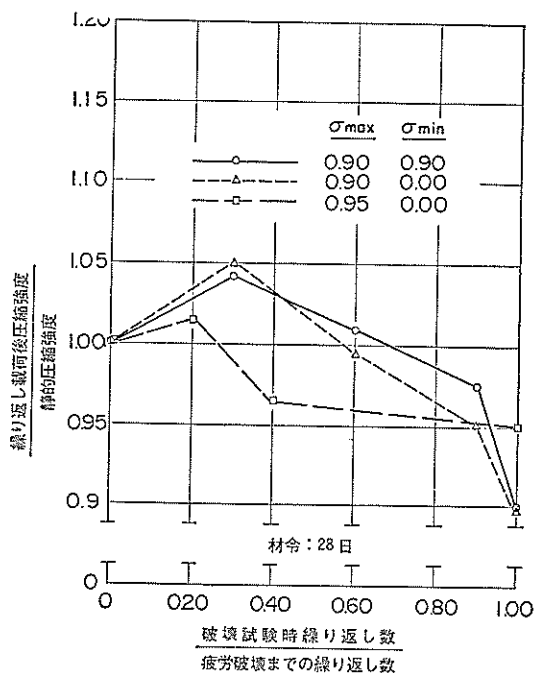


図-4 繰り返し荷重による圧縮強度の変化

繰り返し曲げを受けるPCパイルの力学的性質

また、繰り返し荷重を受けた後のひずみ能力については、文献(17)によれば、荷重履歴によらず一定であるとされている。

疲労破壊に至る繰り返し回数と応力の関係については、設計上は鋼材と同じく Goodman 図を用いるものもあるが、応力条件と繰り返し回数を結びつける式としては、例えば文献(18)によれば

$$L=1-p=10^{-0.0957R3.32}(\log N)^{3.17}$$

といったものがある。ここで L は生存確率、 P は破壊確率、 R は応力振幅を表わす。

なお、コンクリートと鋼材の疲労現象で最も異なる点は、鋼材は $10^6 \sim 10^7$ 回の繰り返しで疲労限度が存在するがコンクリートでは 2×10^7 回の繰り返しにおいても疲労限度の存在を示すことができない点であろう。

3.1.2.3 PC部材における繰り返し荷重の影響

鋼材およびコンクリートに及ぼす繰り返し荷重の影響を参考として、PC部材での繰り返し荷重の影響を整理する。

(1)引張応力発生荷重に及ぼす影響

繰り返し荷重によって、鋼材が第2段階以前の荷重履歴にある場合、一般にPC部材も under reinforcement であるので、コンクリートも疲労破壊にほど近い荷重履歴段階である。この段階においては鋼材、コンクリートの物性が若干変化し、引張応力発生荷重に多少の変化が生ずると考えられる。しかし、この段階での引張応力発生荷重の低下は小さいと考えられる。

鋼材の荷重履歴が第3、第4段階になると、鋼材断面積が減り、残留ひずみが多くなるため、引張応力発生荷

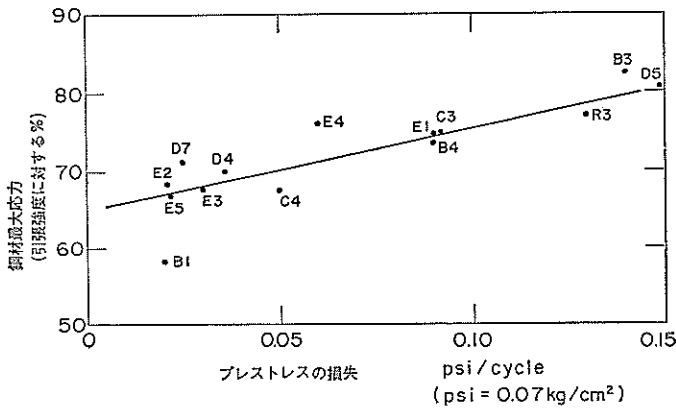


図-5 鋼線最大応力とプレストレスの損失

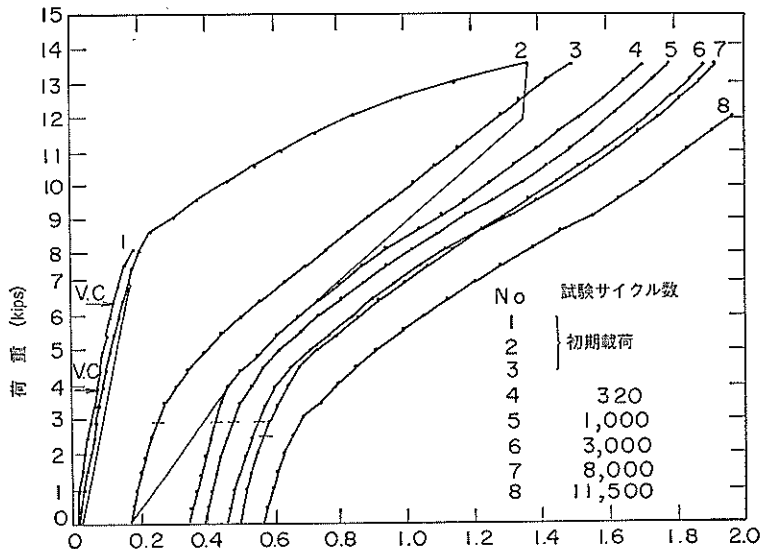


図-6 繰り返し荷重による荷重—変位関係、変化の1例

重は減少すると考えられる。文献(9)に有効プレストレス(PCパイルでは、有効プレストレスと引張応力発生荷重は比例関係である)の減少量についての試験結果があり、図-5に示す。この図は、縦軸に鋼材に働く最大応力を、横軸に1サイクル当りの応力減少度を示すものであり、有効プレストレスの減少が明確に示されている。

なお、以上の事は、鋼材とコンクリートとの付着及び定着部が十分という条件のもとでの事であり、十分でない場合には、引張応力発生荷重は更に低下する。

(2)破壊荷重および破壊時の曲率

一般に、PC部材はRC部材と同様に、鋼材の降伏の後にコンクリートの圧壊によって最終的な破壊に至るといふ設計がなされる。それゆえ、破壊荷重に関しては、鋼材の諸特性の変化、特に降伏点の変化の影響が大きいと考えられる。

PC部材においては、鋼材の荷重履歴が第2段階以前であれば、降伏点、引張強度などは加工硬化によって増加しているので、PC部材の破壊荷重はむしろ増加することが考えられる。

しかし、鋼材の荷重履歴が第4段階になると、降伏点、強度は低下するので、PC部材破壊荷重も低下することが考えられる。

破壊時の曲率については、鋼材、コンクリートの荷重ひずみ関係(これには、残留ひずみの影響も含むが)の変化が影響を与えると考えられる。これらの性質、特に破壊近くにおける荷重—ひずみ関係については、理論的にも試験的にも十分明確ではなく、PC部材についての試験も少ない。

(3)たわみ、ひずみ、EI、曲率と荷重の関係

鋼材の荷重履歴が第2段階までであれば、鋼材のヤング率の変化はほとんどなく、また、コンクリートのヤング率の変化もほとんどないと考えられる。しかし、PC部材自体が残留たわみ、ひずみを有した場合には、1種の塑性硬化をおこすと考えられ、見かけ上のEIが増加するようである。これらの変化の1例として図-6(19)に、繰り返し回数と荷重—たわみ曲線変化の関係を示す。

(4)ひびわれ幅と荷重の関係

これも、鋼材の荷重履歴が第2段階までであれば、それほど変化はないものと考えられる。しかし、鋼材の荷重履歴が第4段階となると急激にひびわれ幅が増加するとされる。その1例を図-7に示す(19)。

以上(1)、(2)、(3)、(4)に示すような変化がPC部材において考えられるが、既往の研究の大部分がPCはりの片振り繰り返し荷重に対するもので、PCパイルについての試験は稀であり、さらに、PCパイルの両振り繰り返し荷重試験は皆無である。

本研究では、PCパイルの片振りおよび両振り繰り返し荷重による力学的性質の変化を上記理論と試験結果を対比することによって検討する。

3.2 単一部材の曲げ試験

3.2.1 試験の概要

2.3.1に述べた事項に対応してPCパイル単一部材の曲げ試験を実施する。すなわち、

- (1)繰り返し荷重を受けないPCパイルの曲げ特性については、①引張応力発生荷重およびひびわれ発生荷重、②破壊荷重および破壊時の曲率、③たわみ、ひずみ、EI、曲率と荷重の関係、④ひびわれ幅と荷重の関係の4項目について静的に測定した。

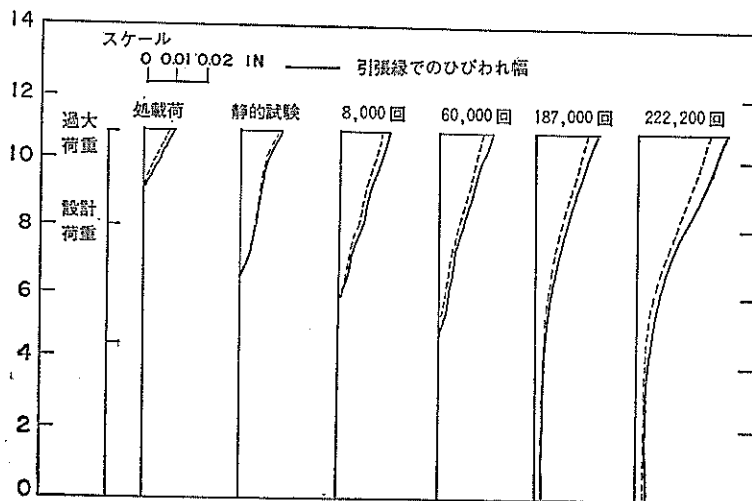
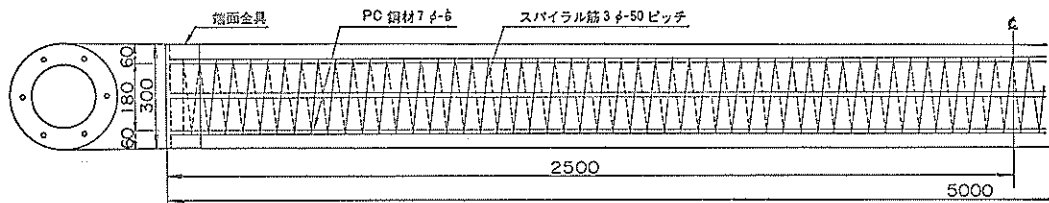


図-7 繰り返し荷重によるひびわれ幅—荷重関係の変化

繰り返し曲げを受けるPCパイルの力学的性質

X型 (JIS A種相当)



Y型 (JIS C種相当)

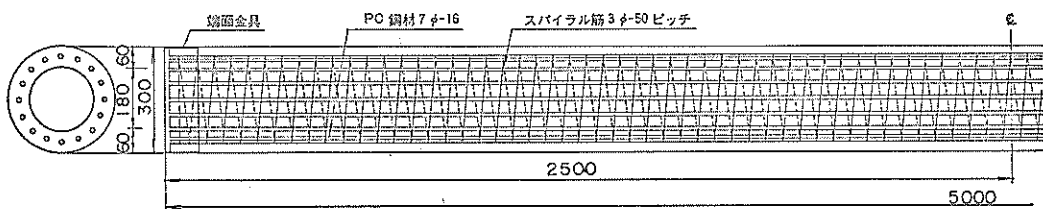


図-8 PCパイル概要図

表-1 セメントの性質

比重	粉末度		凝結			安定性	フロー値	曲げ強さ (kg/cm ²)			圧縮強さ (kg/cm ²)		
	比表面積 (cm ² /g)	88μ残分 (%)	水量 (%)	始発 (時一分)	終結 (時一分)			3日	7日	28日	3日	7日	28日
3.17	3190	1.5	27.0	2-28	3-27	良	251	33.8	48.7	70.1	136	228	417

化学成分 (%)

強熱減量	不溶残分	二酸化けい素	酸化アルミニウム	酸化第二鉄	酸化カルシウム	酸化マグネシウム	三酸化いおう	合計
0.6	0.1	22.2	5.2	3.2	65.0	1.3	1.7	99.3

表-2 細骨材試験成績表

細骨材	比重	単位容積重量 (kg/m ³)	フルイを通過するものの重量百分率 (%)						粗粒率
			5mm	2.5mm	1.2mm	0.6mm	0.3mm	0.15mm	
	2.58	1,695	100	92	76	51	19	4	2.58

表-3 粗骨材試験成績表

粗骨材	比重	単位容積重量 (kg/m ³)	フルイを通過するものの重量百分率 (%)						粗粒率
			25mm	20mm	15mm	10mm	5mm	2.5mm	
	2.63	1,576	100	97	72	27	1	0	6.25

(2)繰り返し載荷を受けるPCパイルの曲げ特性については、10°回ごとに(1)①~④のを静的に測定した。

3.2.2 供試体の概要

本試験で用いるPCパイル供試体は、JISA 5335「プレテンション方式遠心カプレストレストコンクリートくい」におけるA種、C種に対応する直径30cm、厚さ6cm、長さ5mのもの2種類とした(日本コンクリート社製)。本研究では、A種に対応するものをX型、C種に対応するものをY型と称し、その概要を図-8に示す。本節では、X型及びY型PCパイル供試体の使用材料、製造方法および特徴について述べる。

(1)使用材料

(a)セメント

JISR 5210「ポルトランドセメント」による普通ポルトランドセメントを用いた。試験成績を表-1に示す。

(b)細骨材

鬼怒川産川砂を用いた。試験成績を表-2に示す。

(c)粗骨材

岩瀬山(茨城県)砕石(最大寸法20mm)を用いた。試験成績を表-3および図-9に示す。

(d)混和剤

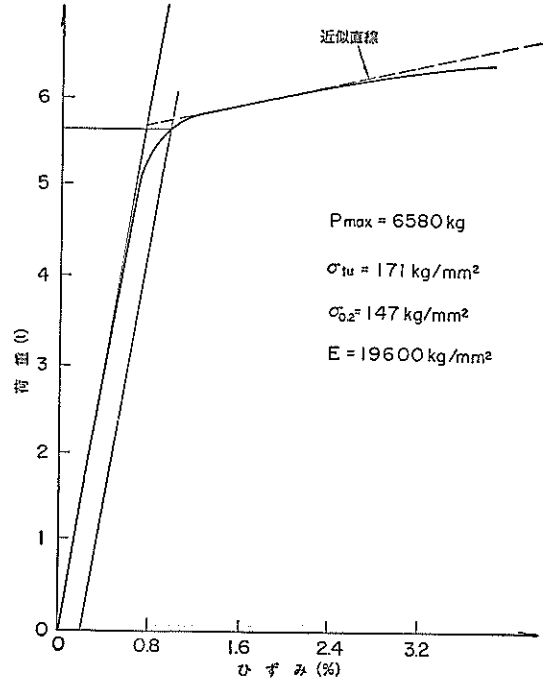


図-10 PC鋼線荷重—ひずみ曲線

マイティ 150(花王石鹼社製)を用いた。

(e)PC鋼材

JISG 3536「PC鋼線およびPC鋼より線」によるSWPD 1-7φを用いた。この引張試験結果を図-10に示す。図中、本研究の計算で用いるbi-linearの近似直線を点線で示した。

(f)スパイラル筋

JISG 3506「軟鋼線材」によるSWRM 6-3φを用いた。

(2)コンクリートの配合及び強度

(a)配合条件

オートクレープ養生後圧縮強度：800 kg/cm² 以上

スランブ：15±2 cm

空気量：2±0.5%

(b)示方配合

表-4に示す。

(c)強度

圧縮強度、曲げ強度、ヤング率、ポアソン比を表-5に

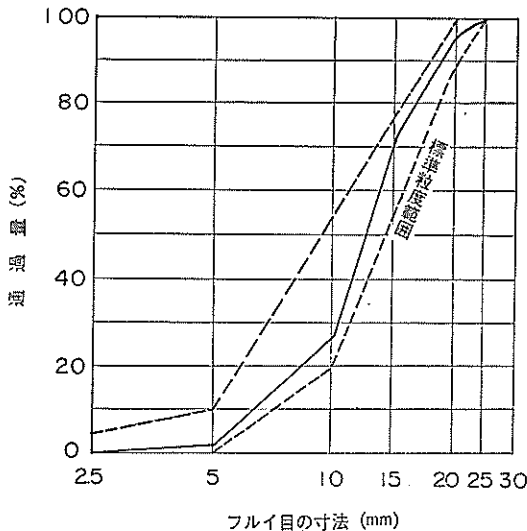


図-9 粗骨材粒度曲線

表-4 コンクリートの示方配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	単位セメント量 (kg/m ³)	単位水量 (kg/m ³)	単位細骨材量 (kg/m ³)	単位粗骨材量 (kg/m ³)	単位混和剤量 (kg/m ³)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)
20(砕石)	15±2	2±0.5	420	134	727	1134	4.2	32.0	39.5

繰り返し曲げを受けるPCパイルの力学的性質

表-5 コンクリート試験結果

圧縮強度 (kg/cm ²)			曲げ強度 (kg/cm ²)	ヤング率 (×10 ⁴ kg/cm ²)	ポアソン比
脱型時*	7日**	試験時	試験時	試験時	試験時
400	848	710	71.2	35.6	0.17

* 蒸気養生後型わくをはずした直後

** オートクレーブ養生後

示す。

(3) PCパイルの製作

PCパイルの製作は以下の手順による。

(a)鉄筋籠編組

PC鋼線7φ (SWPD 1 : 径7mm) を出来上り製品長5mとなるように切断し、端面金具の端板に鋼線鉤頭で固定し、スパイラル筋3φ (SWRM6 : 径3mm) を50m間隔で巻く。

(b)整型

編組された鉄筋籠を鋼製型わくにそう入し、緊張用端板に固定した後、型わくを組立てる。図-11に示すように、型わく的一端にジャッキを取り付け、PC鋼線を緊張する。PC鋼線はプレストレスを導入するときまで固定しておく。

(c)練り混ぜおよび打込み

各材料を重量計量し、強制練りミキサーに投入、練り混ぜる。練り混ぜは、細骨材、粗骨材およびセメントを投入後、空練り30秒、その後、練り混ぜ水 (混和剤混入) を入れ60秒練り混ぜる。練り混ぜたコンクリートのスランプおよび空気量を測定した後、型わくに投入する。

(d)遠心力締め固め

型わくに投入したコンクリートを遠心機を使用して締め固める。

(e)養生

(i)蒸気養生 : 遠心力締め固めの終了した型わくを蒸気養生室内に入れ、前置き2時間後、12時間の蒸気養生を行う。

(ii)オートクレーブ養生 : 蒸気養生後、脱わくをして、高圧釜の中に高温高圧養生を15時間行う。その際の最高温度は180°Cである。

(4)オートクレーブ養生について

本試験でのコンクリートは、水セメント比が低く、しかもオートクレーブ養生としたため、強度が高く種々の特徴を有している。これらの特徴は、主としてオートクレーブ養生によってセメント中に強固なトベルモライトのゲル又は準結晶を形成することにより生ずる。トベルモライトによって骨材とセメントペースト間の付着が良好となる。この結果、コンクリートは水密性ならびに耐衝撃性にすぐれているとされるが、その反面、凍結融解作用に対し抵抗力が小さいとも言われている。

(5)有効プレストレス

PCパイル供試体に用いたPC鋼線はSWPD-1の径7mmであり、初期引張力 P_i として、プレストレスコンクリート設計施工指針より、

$$P_i = \min \{0.7\sigma_{pm}, 0.8\sigma_{ps}\} = \min \{0.7 \times 5950, 0.8 \times 5200\} = 4160 \text{kg}$$

を与えた。

この初期引張力より、付録-2に示した方法により有効プレストレス σ_{ee} をA種およびC種につき、それぞれ計算すると、

$$A \text{種 } \sigma_{ee} \doteq 43.8 \text{kg/cm}^2, \quad C \text{種 } \sigma_{ee} \doteq 101.2 \text{kg/cm}^2 \text{ である。}$$

3.2.3 測定項目および測定法

(1)供試体の設置

PCパイル供試体曲げ試験の概要を図-12に示す。

載荷試験には、動的に50t、静的に75tの能力を有する大型電気油圧式振動疲労試験機 (島津製作所製) を用いた。

供試体の載荷状況は、図-12に示す通りで、アクチュエーターのピストンの先端に鋼製の載荷桁を取り付けて載荷した。

また、支承は、一方を回転可能、移動不可とし、他方を回転可能、移動可能なものとした。支承の構造は、供試体の上下を、供試体面に沿うよう作製した鋼材 (供試体との接触幅4cm) ではさみ、支承部上下の同じ大きさの鋼板をボルト締めすることにより固定した。

(2)使用した計測機器

(a)アクチュエーターロードセル : これによって荷重を目視または電磁オシロに接続し記録する。

(b)変位計 : 図-12に示する3点に変位計を設置し、電磁オシロに接続することにより、たわみを記録する。

(c)ダイヤルゲージ (最小目盛 1/100mm) : 図-12に示す3点に設置し、0.2tおきなたわみを記録する。

(d)ワイヤストレインゲージ (測長 60mm) : 図-12に示す

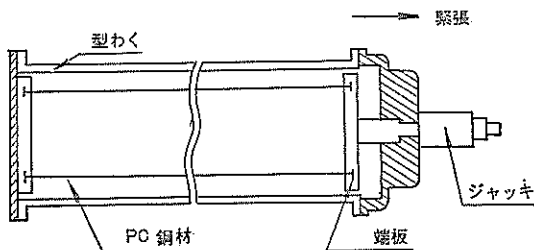


図-11 PC鋼線緊張手順

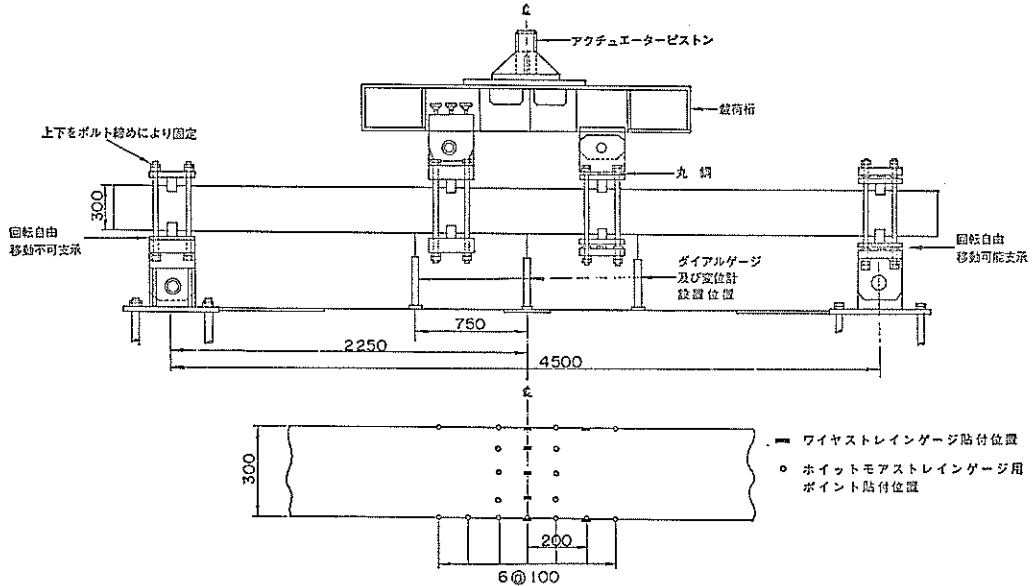


図-12 PCパイル載荷状況概略図

位置に貼付し、0.2 t 毎にコンクリート表面ひずみを静ひずみ測定器により計測する。

(e)ホイットモアストレインゲージ (測点距離 200mm) : 図-12に示す位置に標点に貼付し、1 t 毎に標点間の長さ変位を計測する。

(f)接眼顕微鏡 (最小目盛 1/100mm) : ひびわれ発生後 1 t 毎に供試体引張線のひびわれ幅を計測する。

(3)載荷手順

(a)繰り返し載荷を行なう場合の載荷手順

この場合の載荷手順は、第1回目の載荷で破壊荷重の約6割まで載荷し、ひびわれを発生させる。さらに、一

部の供試体では、ひびわれを発生させたのちに、逆方向より載荷し、圧縮側にもひびわれを発生させる。最終段階では、第1回目の載荷と同じ方向で載荷し、破壊させる。

表-6 に載荷手順を示す。

(b)繰り返し載荷を行う場合の載荷手順

繰り返し載荷試験を行う前に、(a)の繰り返しを行なう場合と同様にひびわれを引張縁に、若しくは、引張縁圧縮縁共に発生させる (初期載荷)。その後、繰り返し載荷を行うが、上限荷重は引張応力発生荷重および破壊荷重に基いて定め、下限荷重は片振り繰り返しでは0、両振り繰り返しでは、上限荷重と絶対値が等しい逆方向荷重とした。

また、10° 毎に、繰り返し載荷を停止し、0 t より上限荷重まで静的載荷を行い、(2)の計測を行った。

以上の繰り返し載荷手順を表-7に示す。なお、繰り返し荷重は、表-8に示す周波数を有する正弦波である。

(4)ひびわれ発生荷重および引張応力発生荷重の測定法

ひびわれ発生荷重は、ひびわれの工学的な定義が不明確であるため、観測方法によって差が生ずる。ひびわれ荷重観測法には、種々のものがあり、文献20より付録-7に示すが、本研究では、たわみの変化によって推定する方法によった。また、引張応力発生荷重は、一度ひびわれを発生させたPCパイル供試体が再びひびわれを発生する荷重と考えた。

表-6 静的試験載荷手順

パイルの種類	載荷手順		
	第1回載荷	第2回載荷	第3回載荷
XS-A	0 ~ 5 t	0 ~ 破壊	—
XS-B	0 ~ 4.5 t	0 ~ -1.2t	0 ~ 破壊
YS-A	0 ~ 7.5 t	0 ~ 破壊	—
YS-B	0 ~ 7.5 t	0 ~ 破壊	—
YS-C	0 ~ 7.5 t	0 ~ -3 t	0 ~ 破壊
YS-D	0 ~ 7.5 t	0 ~ -7.5t	0 ~ 破壊
YS-E	0 ~ 7.5 t	0 ~ 破壊	—

繰り返し曲げを受けるPCパイルの力学的性質

表-7 繰り返し試験载荷手順

パイルの種類	載 荷 手 順			
	初 期 載 荷			繰り返し载荷
	第1回载荷	第2回载荷	第3回载荷	
XF-A	0~4	—	—	0~3
XF-B	0~4	0~-4.4	—	-1.2~1.2
XF-C	0~4	0~-4	—	0~3
YF-A	0~7.5	0~3	—	0~3
YF-B	0~7.5	0~5	—	0~5
YF-C	0~7.5	0~-3	0~5	-3~3
YF-D	0~7.5	0~-7.5	0~5	-3~3
YF-E	0~7.5	0~-3	0~5	-5~5
YF-F	0~7.5	0~-7.5	0~5	-5~5

(単位:t)

表-8 繰り返し载荷時载荷速度

繰り返し回数(回)	载荷速度 (Hz)	試 験 項 目
2~10	0.2	荷重記録 全波計測
11		静的試験 { X型 0~3 t Y型 0~5 t
12~100	0.5	荷重記録 開始時10波, 終了時10波記録
101		静的試験 { X型 0~3 t Y型 0~5 t
102~1,000	1.0	荷重記録 開始時10波, 中間時10波, 終了時10波記録
1,001		静的試験 { X型 0~3 t Y型 0~5 t
1,002~10,000	2.0	荷重記録 開始時10波, 中間時10波, 終了時10波記録
10,001		静的試験 { X型 0~3 t Y型 0~5 t
10,002~100,000	3.0	荷重記録 開始時10波, 中間時10波, 終了時10波記録
100,001		静的試験 { X型 0~3 t Y型 0~5 t
100,002~1,000,000	3.0	荷重記録 開始時10波, 中間時10波, 終了時10波記録
1,000,001		静的試験 0~破壊

(5)破壊荷重および破壊時の曲率の測定法

図-12 に示す荷重方法により、荷重を増してゆくと、荷重は最大値を示し、その後、荷重は減少してゆく、この最大荷重を破壊荷重とする。また、この時の曲率を、破壊時の曲率とする。なお、曲率の算定法は(6)に示す。

(6)たわみ、ひずみ、EI、曲率と荷重の関係の測定法、

たわみは、変位計によって連続的に、また、ダイヤルゲージによって 0.2 t 毎に計測する。ひずみもストレインゲージによって 0.2 t 毎にコンクリート表面ひずみを計測する。さらに、引張側の鋼材ひずみ、EI、曲率は、付録-8のようにして求める。

(7)ひびわれ幅の測定法

ひびわれ幅は、ひびわれ発生後 1 t 毎に接眼顕微鏡によって計測した。また、ひびわれの進展状況は、ひびわれの発生跡をマジックインキで 0.5 t 毎に供試体に直接記入し、試験終了後これをスケッチした。

3.2.4 試験結果

3.2.4.1 繰り返し荷重を受けない部材の曲げ試験

(1)引張応力発生荷重およびひびわれ発生荷重

表-9に、繰り返し荷重を受けない曲げ試験における引

表-9 ひびわれ発生荷重および引張応力発生荷重

P C 部材の種類	ひびわれ発生荷重		再びびわれ荷重 (引張応力発生荷重)	
	試験値	計算値	試験値	計算値
XS-A	3.0	3.05	1.2	1.15
XS-B	2.7		1.1	
YS-A	4.4	4.60	2.8	2.70
YS-B	4.2		3.0	
YS-C	4.2		2.9	
YS-D	4.2		2.9	
YS-E	4.3		3.0	

(単位：t)

注：コンクリートの曲げ強度 $\sigma_b = 70 \text{ kg/cm}^2$ としてひびわれ荷重を計算した。

張応力発生荷重およびひびわれ発生荷重の試験結果および計算値を示す。なお、ひびわれ発生荷重の計算において、コンクリートの曲げ引張強度 σ_b を 70 kg/cm^2 とし

表-10 破壊荷重および破壊時曲率

部材の種類	破壊荷重 (t)			破壊時曲率 (10^{-4} cm^{-1})			
	試験値	計算値		試験値	計算値		
		方法 A	方法 B		方法 A	方法 B	
XS-A	6.4	a 5.01	a 4.54	—	a 9.84	a 36.6	
XS-B		b 4.56	b 5.01		7.67	b 8.70	b 50.5
		c 4.87	c 3.91			c 6.83	c 17.5
	d 4.75	d 4.11	d 6.23	d 20.2			
YS-A	12.7			4.12			
YS-B	11.0			—			
YS-C	12.9	a 11.5	a 9.11	—	a 5.74	a 11.7	
		b 11.7	b 9.50		b 5.07	b 10.4	
YS-D	12.4	c 10.6	c 9.04	—	c 3.79	c 10.0	
		d 10.7	d 8.96		d 3.52	d 8.2	
YS-E	12.6			4.02			

注 a：プレストレストコンクリート標準示方書(案)の仮定
 b： ” ” 設計施工指針の仮定 ”
 c：ACI-318-71 ” ”
 d：Hognestad ” ”
 をそれぞれ用いて計算したもの

た。

この表より、引張応力発生荷重は、試験値と計算値とが比較的良く一致しているが、ひびわれ発生荷重は、試験値が計算値を1~2割下回っている。これは、PCパイルのコンクリートと曲げ管理供試体との曲げ引張強度が必ずしも一致しないことが大きな原因であると考えられる。

(2)破壊荷重および破壊時曲率

表-10に、曲げ試験における、破壊荷重および破壊時曲率の試験結果及び計算値を示す。なお、計算値を求めるに際してコンクリートの圧縮強度は710kg/cm²とした。

破壊荷重については、X型、Y型ともに試験値の方が計算値を上回るようである。この原因としては、スパイラル筋の強度及びそれによるコンクリートの拘束効果を考慮していないことが考えられる。これは、スパイラル筋による破壊荷重の増加は、X型、Y型に関係なく一定であると考えられ、また、表-10でX型、Y型の試験値と計算値との差も1~2tではほぼ同程度であることより、

有力な考えである。また、付録-3の方法Aおよび方法Bによる計算値を比較すると、方法Aが精度が良い。

次に、破壊時曲率については、計算値相互のバラツキがあるが方法Aの計算値でおよその目安がつくようである。安全側に算定する場合には、方法Aのc、dによればよいと考えられる。

(3)たわみ、ひずみ、EI、曲率と荷重の関係

図-13および図-14に、X型およびY型パイルのたわみと荷重の関係を示す。なお、ここでのたわみは、中央たわみ δ_c と中央より75cm離れた点でのたわみ δ_{75} の差 δ_{75} を考えた。これは、出来るだけ曲げ剛性および曲げモーメントが一定の区間でたわみを測定するためである。

いずれも、初回載荷時のたわみが2回目載荷時のたわみよりも小さく、これは、ひびわれが当初より発生しているか、そうでないかの影響であると考えられる。ただし、YS-Dは逆向きに載荷したため、残留たわみが負となり若干傾向が異なる。また計算値は、引張側コンクリートを無視して計算しており、2回目以降の載荷に相当す

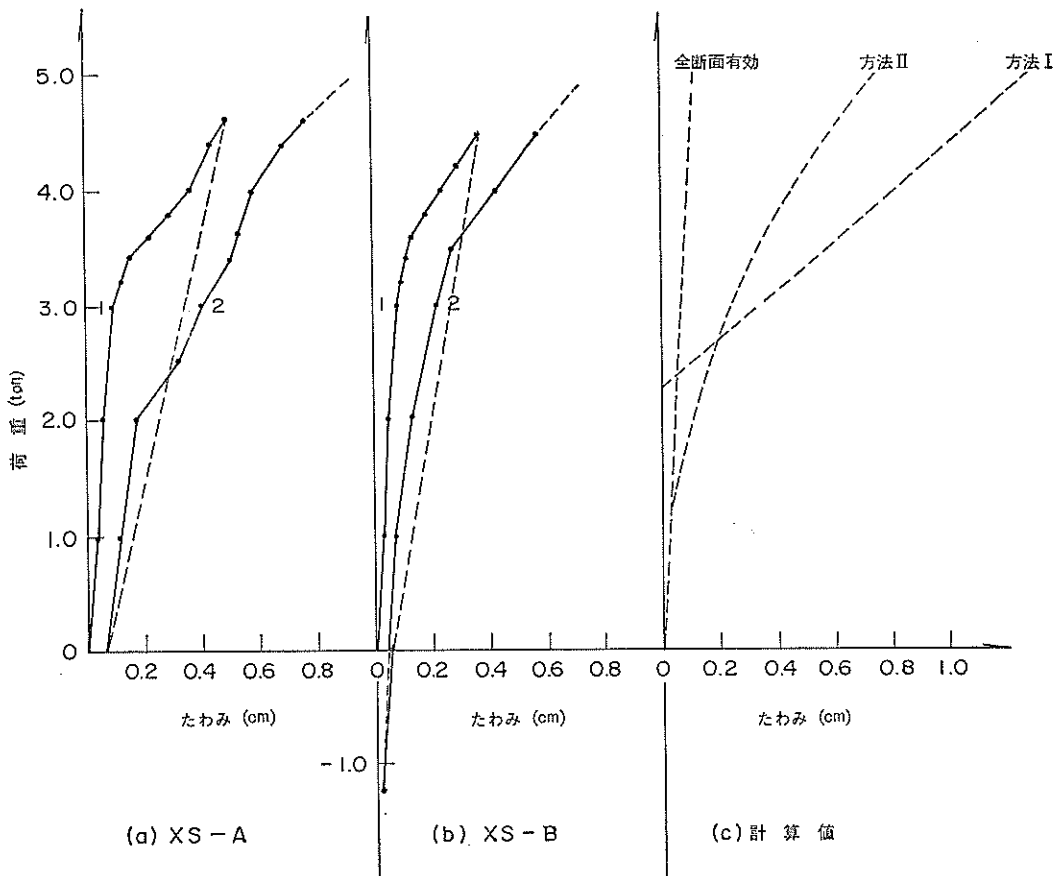


図-13 X型パイルたわみ-荷重曲線

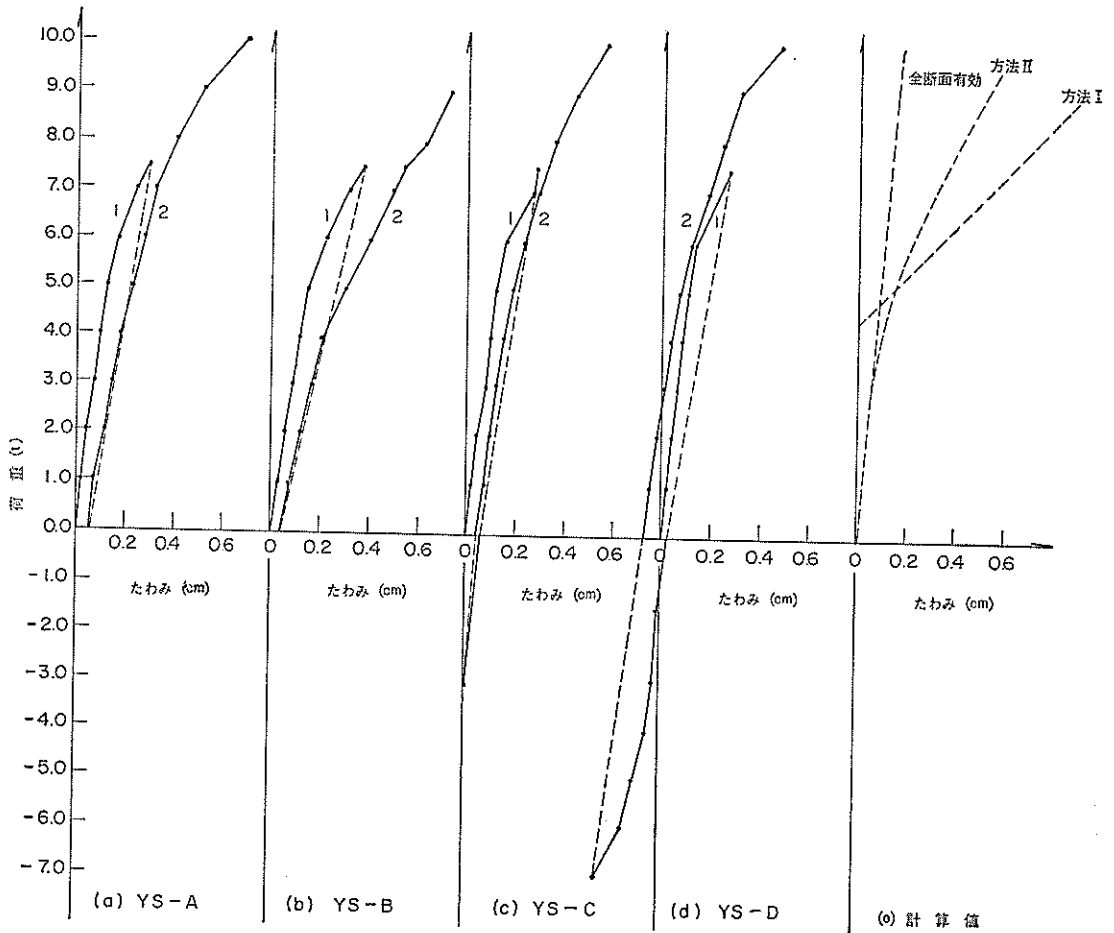


図-14 Y型パイルたわみ—荷重曲線

る為、方法Ⅱと比較的良く一致するが、方法Ⅰでは、やや過大に見積っている。

図-15および図-16にX型およびY型パイルの圧縮緑コンクリートのひずみと荷重の関係を示す。これも、たわみと同様に2回目載荷時のひずみが大きい。また、計算値は、たわみと異なり方法Ⅰによる方が方法Ⅱによるものよりやや精度がよいが、その差は僅かである。

図-17および図-18にX型およびY型パイルの鋼材ひずみ増分と荷重の関係を示す。ここで、鋼材ひずみ増分と言うのは、PCパイル無載荷時の鋼材ひずみと載荷時の鋼材ひずみの差を言い、試験値としては、付録-8に示すように、たわみとコンクリートのひずみとより計算した関接測定値を用いた。これも、たわみ、コンクリートのひずみと同様に初回載荷時より2回目載荷時の方がより大きくなる。また、計算値としては、付録-4の方法Ⅰお

よび方法Ⅱを用いた。試験値と計算値を比較すると、引張応力発生荷重をやや上回る荷重までは、全断面有効としてもほぼ予測でき、有効プレストレスによる差もほとんど影響しないため、良い一致を示す。しかし、それ以降は、計算上の仮定、簡略化の影響が大きくなり、方法Ⅰによる計算値は、試験値を大きく上回る。また、試験値は、付録-8に示すように、PCパイルのたわみおよびコンクリートのひずみより計算するのであるが、たわみおよびコンクリートのひずみの測定誤差が数乗されるため、PCパイル毎に相当バラツクようである。

図-19および図-20にX型およびY型パイルのEIと荷重の関係を示す。たわみと荷重の関係より推定されるように、初回載荷時のEIより2回目載荷時のEIが小さくなる。また、ひびわれ発生以前は、全断面有効としたEIとほぼ等しく、序々にRCとしてのEIに近くなる。こ

繰り返し曲げを受けるPCパイルの力学的性質

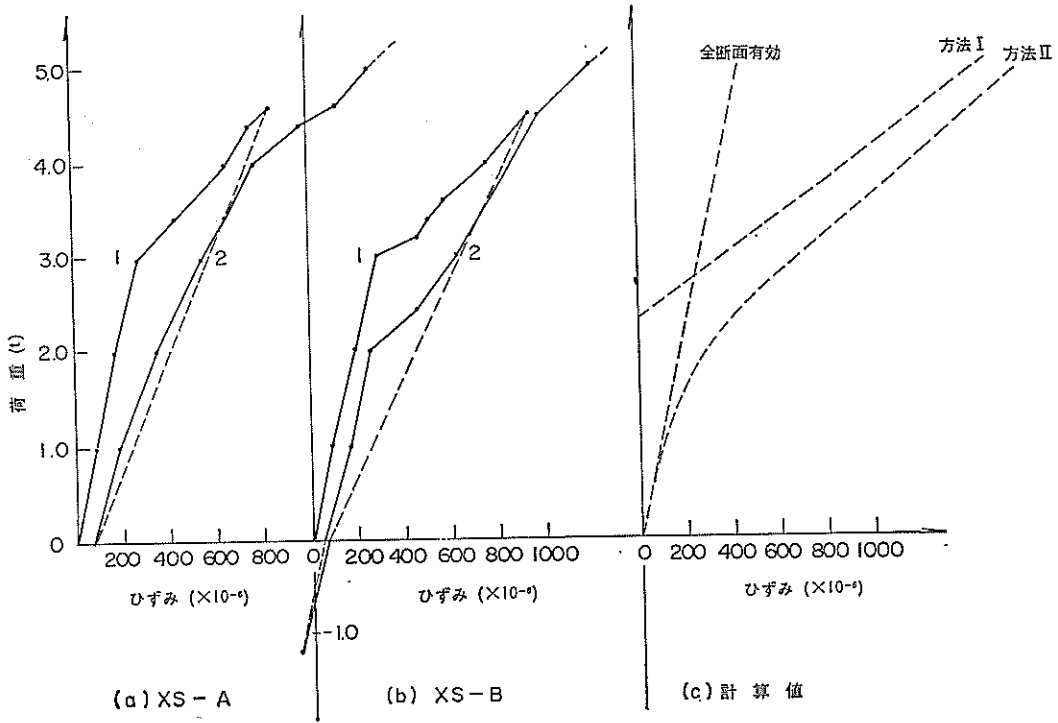


図-15 X型パイルコンクリートひずみ-荷重曲線

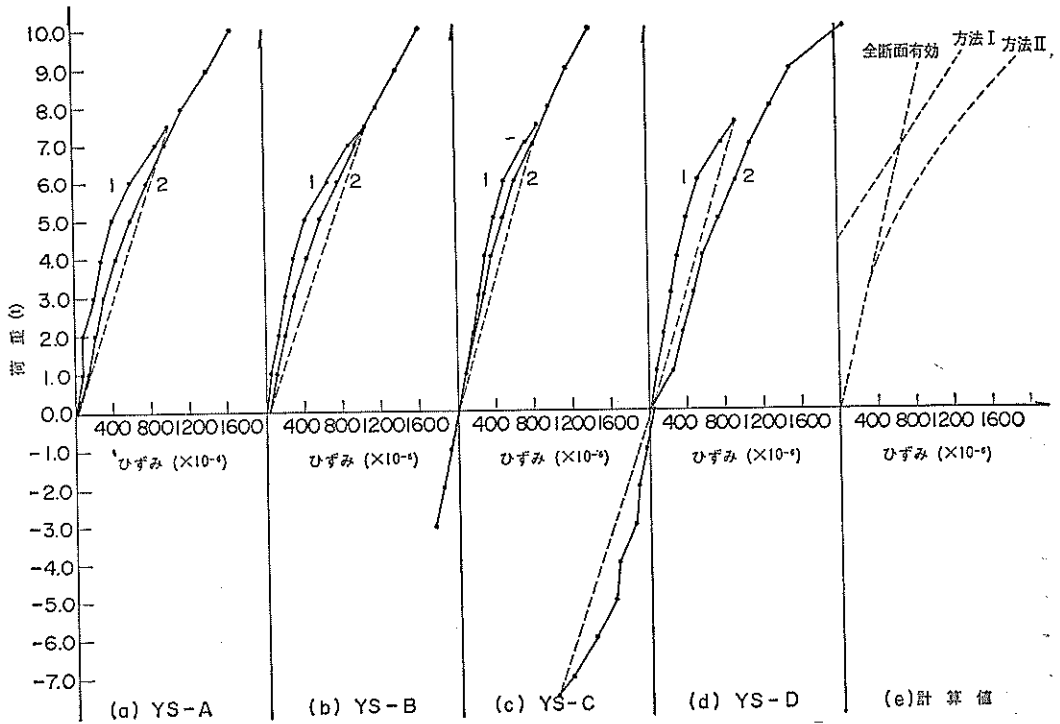


図-16 Y型パイルコンクリートひずみ-荷重曲線

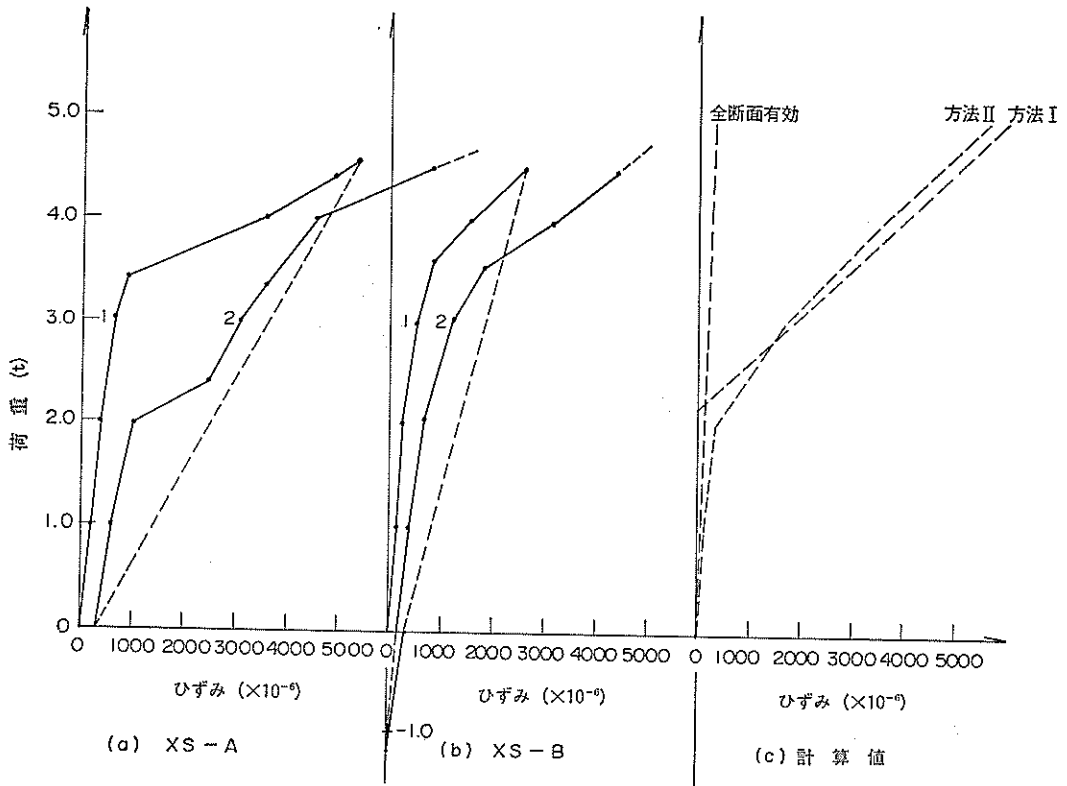


図-17 X型パイル鋼線ひずみ増分—荷重曲線

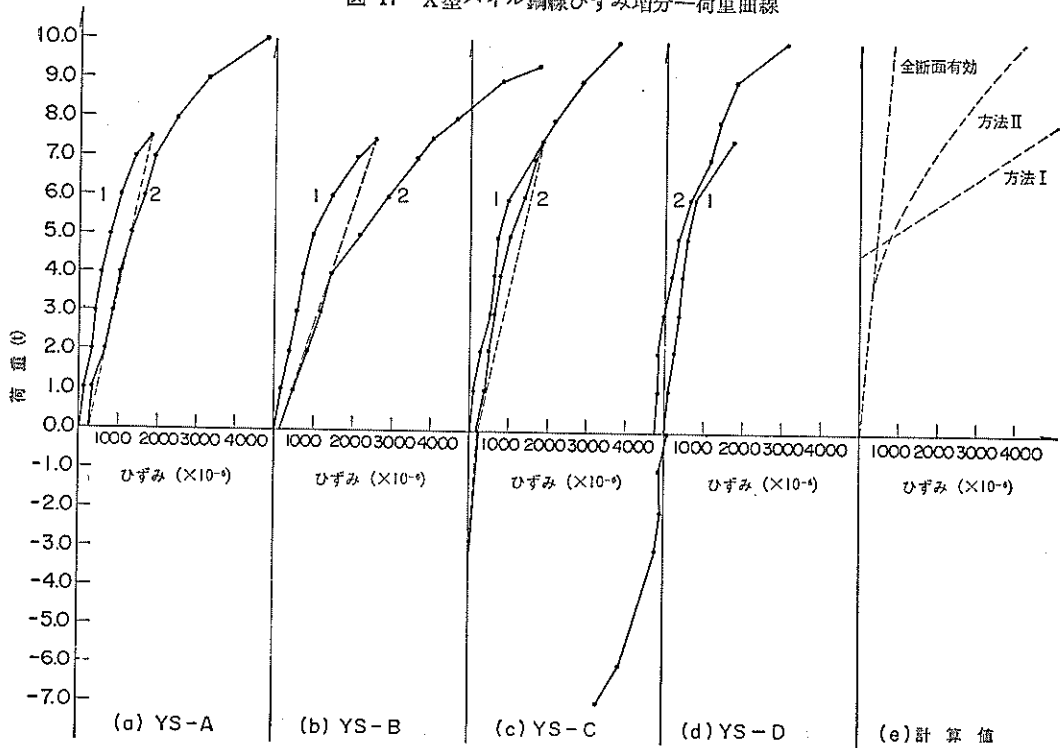


図-18 Y型パイル鋼線ひずみ増分—荷重曲線

繰返し曲げを受けるPCパイルの力学的性質

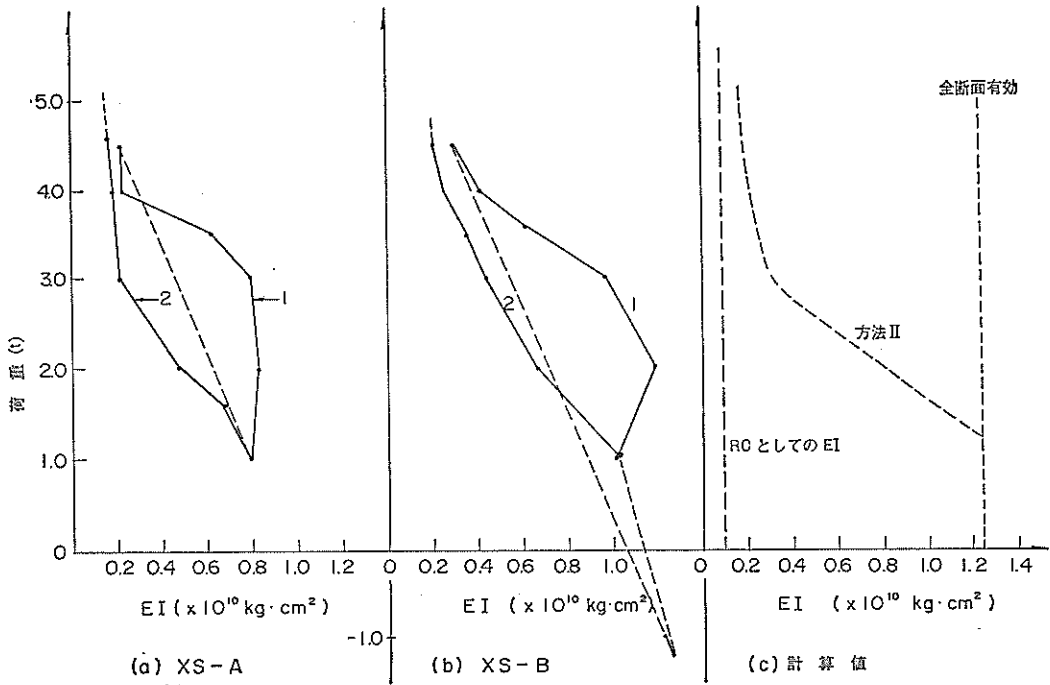


図-19 X型パイルEI-荷重曲線

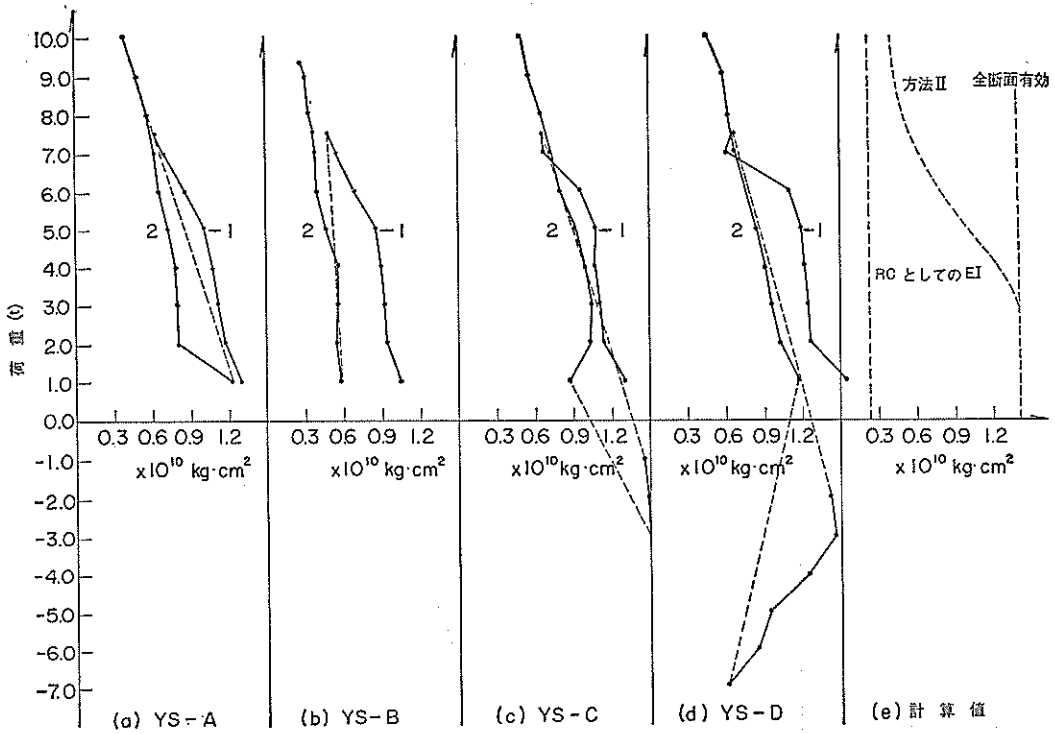


図-20 Y型パイルEI-荷重曲線

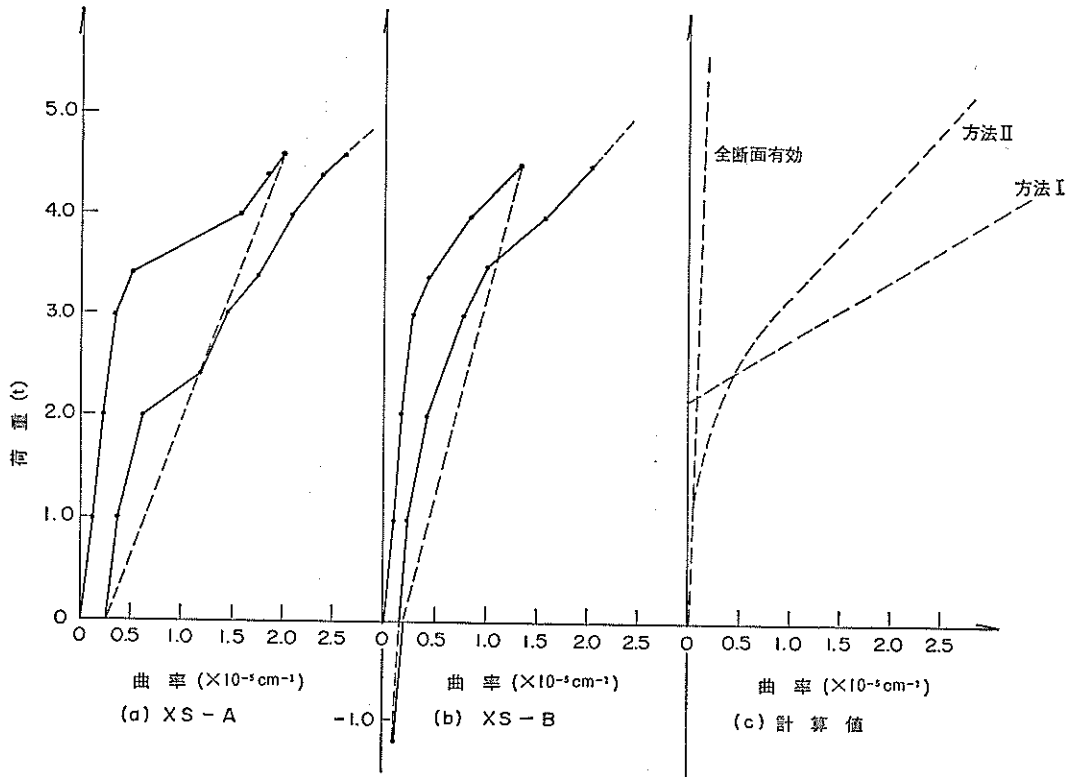


図-21 X型パイル曲率—荷重曲線

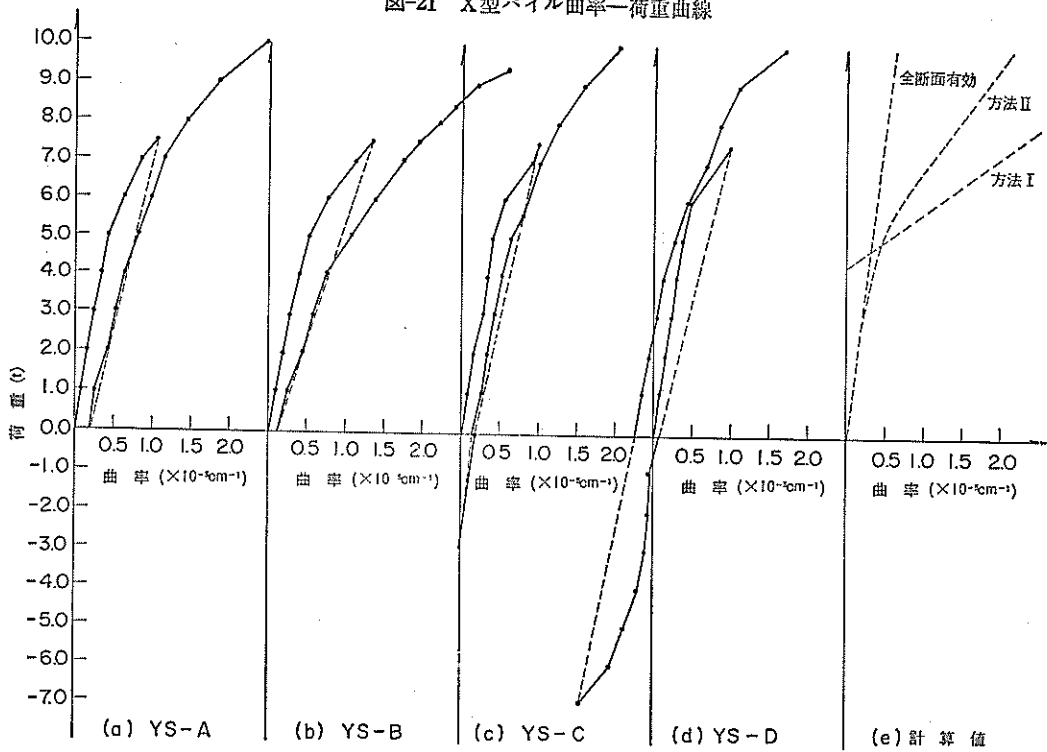


図-22 Y型パイル曲率—荷重曲線

の傾方法Ⅱの計算値によって表わすことができる。

図-21および図-22にX型およびY型パイルの曲率と荷重の関係を示す。これについても、たわみと荷重の関係と同一のことが言え、試験値は、方法Ⅱによる計算値でおよそ推定できる。

以上をまとめると、バラツキはあるものの、たわみ、ひずみ、 EI 、曲率と荷重の関係は、方法Ⅱによって概略予測される。

(4)ひびわれ幅と荷重の関係

図-23および図-24にX型およびY型パイルのひびわれ幅と荷重の関係を示す。初回載荷でひびわれを発生させた後の2回目載荷時のひびわれ幅と荷重の関係について、試験値と種々の式による計算値とを比較すると、いずれの計算値によってもある程度の予測は可能と考えられるが、ひびわれ幅自体がバラついているので、絶対的判断はし難い。しかし、本試験の範囲では、港湾構造物設計基準による方法の精度が最もよく、また、安全側という点では、CEB-FIPの方法Ⅱによるのがよいと考えられる。

港湾構造物設計基準による場合には、付録-5に示すように係数 $C \cdot \phi$ にRC部材として用いるものを用いており、PC部材として用いる場合さらに検討が必要であり、また、設計上からはひびわれ幅が0.1mm程度の場合、危険側となる。CEB-FIPによる場合には、この式はPCに対するひびわれ算定式として、試験の裏付けおよび実績もあり、現状ではこれを用いるのが良いと考えられる。

なお、ひびわれ性状について、図-25、図-26に、X型、Y型おのおのに関し、静的載荷試験のみのPCパイルと、繰り返し荷重を受けた後に静的破壊試験を行ったPCパイルそれぞれについて、載荷中における等曲げモーメント区間に発生したひびわれの進行状況を示す。これより、繰り返し荷重の有無によらず、Y型の方がひびわれ分散がよいことが判る。また、繰り返し荷重を受けない場合には、破壊近くになり突然発生するひびわれが散見され、繰り返し荷重を受けたものは、枝分れたひびわれが発生するものが多い。

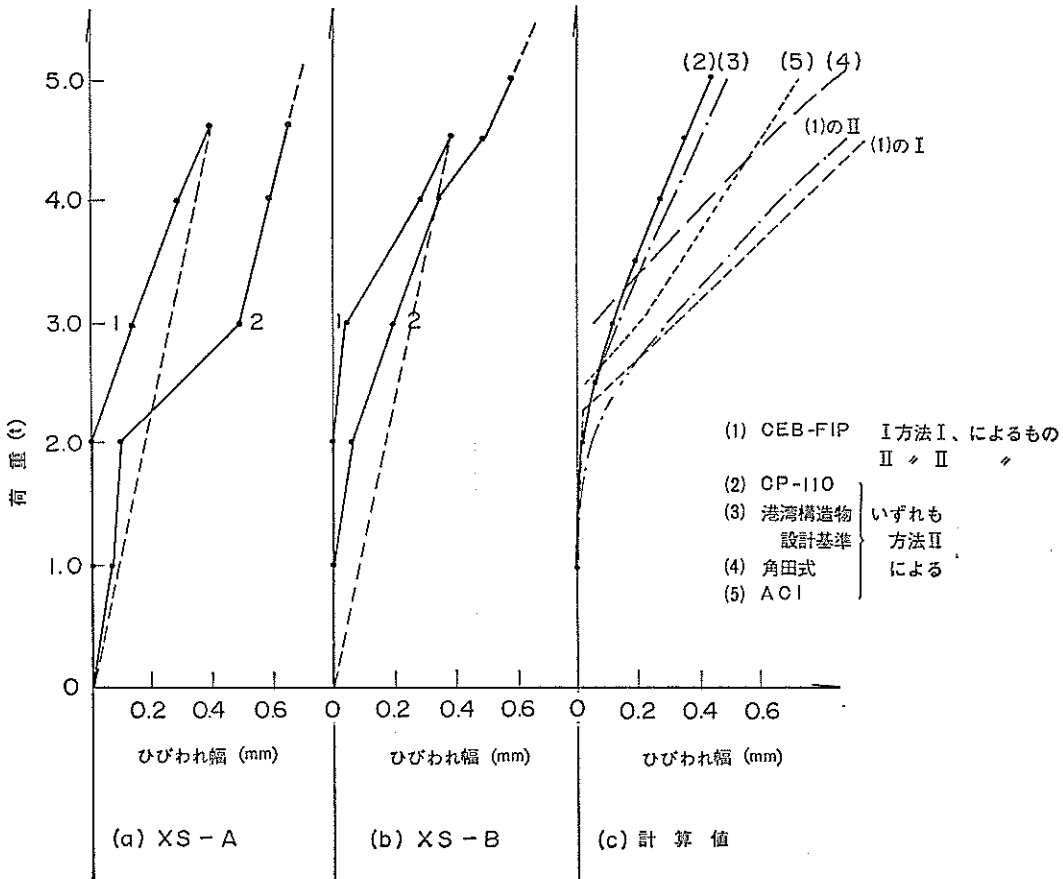


図-23 X型パイルひびわれ幅—荷重の関係

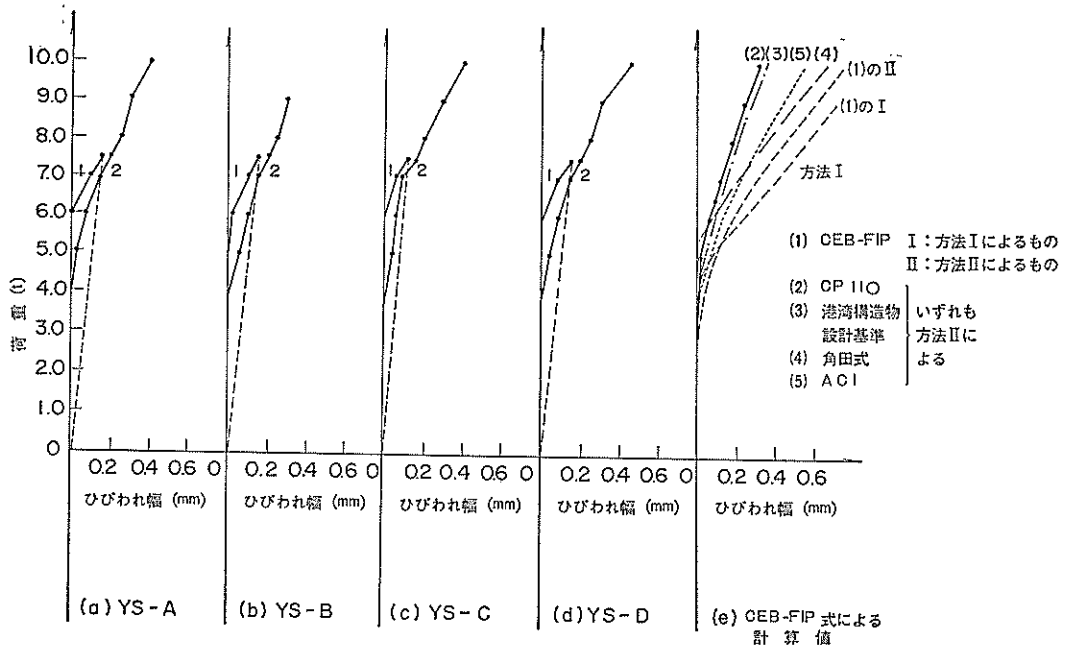


図-24 Y型パイルひびわれ幅—荷重の関係

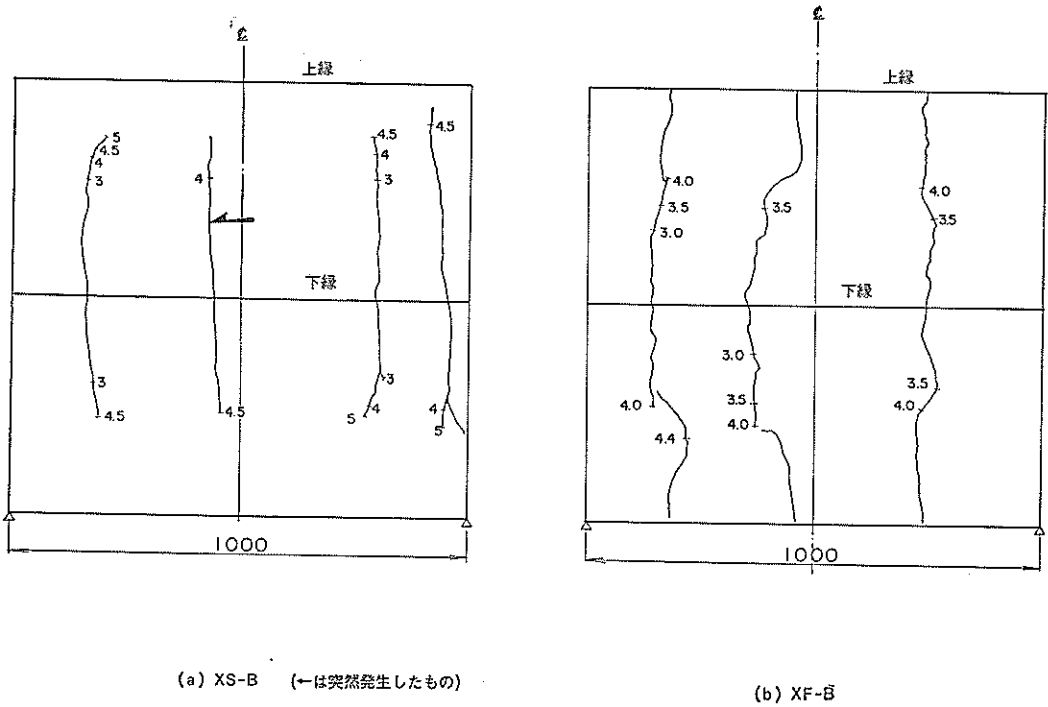


図-25 X型パイルひびわれ展開図

繰り返し曲げを受けるPCパイルの力学的性質

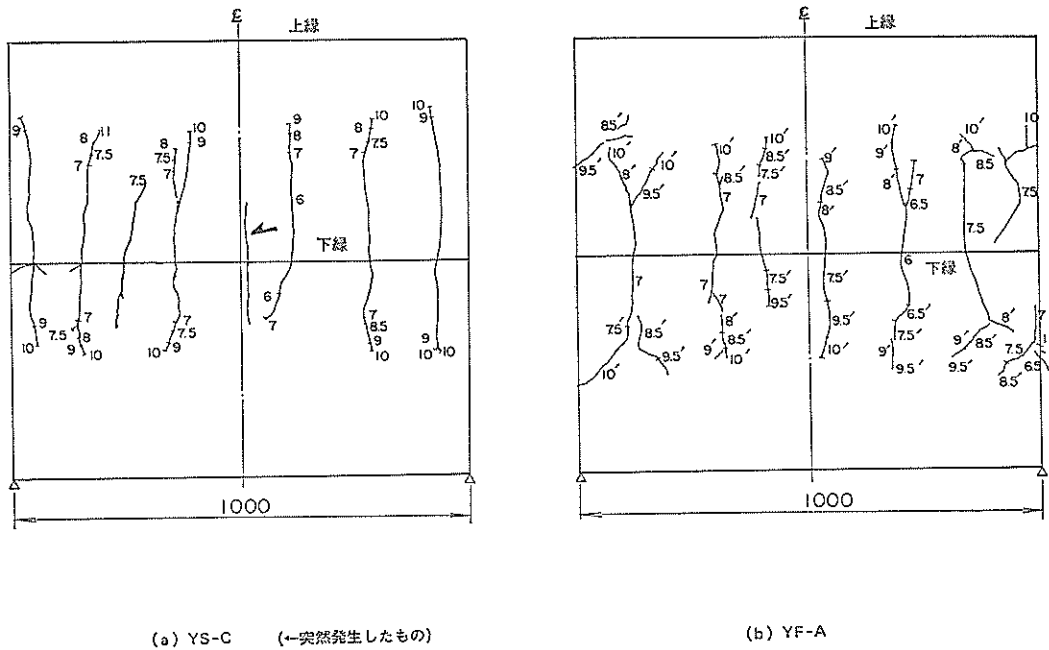


図-26 Y型パイルひびわれ展開図

3.2.4.2 繰り返し荷重の影響について
(1)引張応力発生荷重 (再ひびわれ荷重)

表-11に、繰り返し回数 10^6 回毎に測定した引張応力発生荷重の変化を示した。これより、すべてのパイルにおいて多かれ少なかれ引張応力発生荷重は低下している

ことが認められる。特に、XF-A、XF-C、YF-B、YF-Fにおける低下が著しい。

なお、3.2.4.1においては、ひずみ、 EI 、曲率の計算値を算出する際には、 $E_c=350,000\text{kg/cm}^2$ 、有効プレストレス σ_{pe} としてX型では 43.8kg/cm^2 、Y型では 101.2kg

表-11 引張応力発生荷重の変化

パイルの種類	繰 り 返 し 回 数							静的試験平均値
	1	10	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	
XF-A	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	—	1.15
XF-B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
XF-C	1.1	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	
YF-A	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.92
YF-B	2.7	2.7	2.4	2.4	2.4	2.3	2.3	
YF-C	2.9	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	
YF-D	2.9	2.9	2.9	2.9	2.8	2.8	2.8	
YF-E	2.9	2.9	2.9	2.8	2.8	2.8	2.8	
YF-F	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.6	

(単位：t)

表-12 繰り返し荷重を受けた後の破壊荷重および破壊時曲率

パイルの 種 類	片 振 り 両 振 り	破壊荷重 (t)	静的での 破壊荷重 との比	破 壊 時 曲 (10^{-4}cm^{-1})	静的での 破壊時曲 率との比
XF-B	両 振 り	7.5	1.15	6.37	0.83
XF-C	片 振 り	7.6	1.17	2.53	0.33
YF-A	片 振 り	13.9	1.13	2.48	0.60
YF-B	片 振 り	13.6	1.10	2.77	0.67
YF-C	両 振 り	14.1	1.14	3.33	0.81
YF-D	両 振 り	13.2	1.07	3.21	0.78
YF-E	両 振 り	14.0	1.14	3.31	0.81
YF-F	両 振 り	13.3	1.08	2.32	0.56

$/\text{cm}^2$ として設計値を出したのであるが、設計する場合には、有効プレストレスのパラッキおよび繰り返し荷重による減少を考慮しなければならない。本節では、① $E_c=350,000\text{kg}/\text{cm}^2$ 、X型 $\sigma_{cc}=43.8\text{kg}/\text{cm}^2$ 、Y型 $\sigma_{cc}=101.2\text{kg}/\text{cm}^2$ によるものと、 E_c および σ_{cc} のパラッキおよび低下を考へて、② $E_c=300,000\text{kg}/\text{cm}^2$ および σ_{cc} として①の8割としたものを用いて計算した。この②の値は、設計する場合を考へたものである。

(2)破壊荷重および破壊時曲率

表-12に、 10^6 回繰り返し荷重を受けた後の静的試験における破壊荷重および破壊時曲率を示し、繰り返し載荷を行なわないものとの比率を併せて示す。

破壊荷重については、X型、Y型パイルともに、繰り返し荷重を受けたものの方が、1割程度大きくなっている。この増加割合は、両振り、片振りの別、繰り返し荷重の大きさに、無関係と判断される。このような現象は、鋼材の加工硬化現象とほぼ同様で興味深い。

次に、破壊時曲率については、繰り返し載荷を行ったものの方が2~7割程度低下していることが認められる。また、この低下量は、両振り、片振りの別で影響を受け、片振り載荷したものの方が低下が著しい。更に、載荷荷重の大きさによっても影響を受け、比較的荷重の大きなXF-C、YF-Fの低下が大きい。

(3)たわみ、ひずみ、 EI 、曲率と荷重の関係

表-13にX型パイル中央たわみの 10^6 回毎の変化を、残留たわみ、0~1tでのたわみ、0~3tでのたわみ、0~4tでのたわみについて示した。これによると、残留たわみの最大値はXF-Bの1.28mmで、これはこの場合の最大荷重4tでのたわみ9.37mmの約14%であり、

逆に言えば、回復したたわみ量は約86%である。また、0~1t、0~3tにおけるたわみの増減は、大部分が $N=1$ tのたわみと比較して、繰り返しを受けた後では、ほぼ同一がやや低下の傾向が認められるが、XF-Bの $N=10^4$ 、 10^5 、 10^6 において大きくなることが認められ、このことより、両振りのものの方が、繰り返し回数が大きくなるとややたわみが大きくなるようである。

表-14にY型パイル中央たわみの 10^6 回毎の変化を、残留たわみ、0~3tでのたわみ、0~5tでのたわみ、0~7.5tでのたわみについて示した。これによると、残留たわみの最大値はYF-Bの2.59mmで、これはこの載荷段階の場合の7.5tでのたわみ15.93mmの約16%であり、回復したたわみ量は約84%である。また0~3tおよび0~5tにおける繰り返し後のたわみの増減は、片振り載荷のものは $N=1$ と比較してやや減少傾向が認められるが、両振り載荷のYF-E、YF-Fでの増減は不規則であり、YF-Fでは $N=10^6$ で大きく増加している。更に、0~7.5tでの $N=10^6$ におけるたわみは、 $N=1$ のたわみに比べてYF-F以外は全て減少であるが、YF-Fのみ増加している。

表-15にX型パイル圧縮緑コンクリートひずみの 10^6 回毎の変化を示す。これによると、残留ひずみの最大値はXF-Cの 52μ で、これはこの載荷段階の場合の最大荷重4tでのひずみ 453μ の約11%であり、回復したひずみは約89%である。また、0~1t、0~3tでのひずみの変化は、片振り載荷のXF-A、XF-Cがやや減少傾向であるのに対し、両振り載荷のXF-Bはやや増加傾向である。また、0~4tでのひずみもXF-Bの方がXF-Cに比べて増加が大きい。

表-16にY型パイル圧縮緑コンクリートひずみの 10^4 回毎の変化を示す。段留ひずみの最大値はYF-Bの97 μ で初期載荷時最大荷重7.5t時のひずみ961 μ に対して約10%である。また、0~3t、0~5tでのひずみの変化は、片振り載荷のYF-A、YF-Bおよび比較的低い荷重による両振り載荷のYF-C、YF-Dが減少傾向であるのに対し、比較的高い荷重による両振り載荷のYF-E、YF-Fは、横ばいもしくは一時減少の後増加傾向が認められる。また、0~7.5tでのひずみ変化はYF-Fのみ増加している。

表-17にX型パイルPC鋼材ひずみ増分の変化を示す。ここに示すひずみ増分の値は、パイルのたわみおよびコンクリートのひずみからの間接測定値で、誤差が3乗で増幅され、定量的な判断は無理と思われるが、定性的な傾向は把握できると考えられ、次のことが言える。0~1tでのひずみの変化は、片振りのXF-A、XF-Cが横ばいかやや減少傾向にあるのに対し、両振りのXF-Bはやや増加傾向である。0~3tでのひずみ変化は、70万回で疲労破壊したXF-Aのひずみがやや増加傾向を示すのに対し、疲労破壊しないXF-B、Cのひずみは横ばいかやや減少傾向である。

表-18にY型パイルPC鋼材ひずみ増分の変化を示す。すべてのひずみ変化に対して、片振り載荷のYF-A、YF-Bおよび比較的低い荷重による両振り載荷のYF-C、YF-Dのひずみが減少傾向であるのに対し、YF-Fは 10^6 回で著しくひずみ増分が増加しているのが認められる。

表-19にX型パイルEI変化を示す。このEIは、付録-8に示すように δ_{ms} を用いて求めたものである。XF-AのEIは、0~1tにおいては、横ばい、0~3tにおいては、減少している、特に 10^4 から 10^5 回にかけて減少しているのが注目される。また、XF-B、XF-CのEIは、やや増加傾向である。

表-20にY型パイルEIの変化を示す。YF-F EIが 10^5 、 10^6 回で減少する傾向が認められるが、他はすべて増加傾向である。

さらに、表-21、表-22にそれぞれX型、Y型パイルの曲率の変化を示すが、当然ながら、EIと同様の傾向を示す。

以上をまとめると、たわみ、ひずみ、EI、曲率について次のことが言えよう。残留たわみ、ひずみは、 10^6 回まででは、最大で15%程度のものを考えればよい。また、たわみ、ひずみ、曲率は、大部分がやや減少傾向であるが、繰り返し荷重の大きなXF-A、CおよびYF-Fにおいて $N=10^4$ 、 10^5 、 10^6 で増加が認められた。これらの増減は最大 $\pm 30\%$ にもなり、無視できない。更に、EIは、たわみから予測されるように、横ばいから

やや増加のものが大部分であるが、XF-A、YF-Fなどに減少傾向が認められる。

(4)ひびわれ幅と荷重の関係

表-23および表-24にそれぞれX型、Y型パイルの 10^4 回毎のひびわれ幅の変化を示す。

X型においては、おおむねひびわれ幅は繰り返し荷重によって変化しないが、XF-Cが $N=10^6$ で増加していることが認められる。

Y型においても、おおむねひびわれ幅は繰り返し荷重によって変化しないが、YF-Fが $N=10^6$ で増加していることが認められる。

また、試験値と計算値を比較すると、付録-4の方法IIを用いて鋼材応力を算出しCEB-FIPの式より求めたひびわれ幅と試験値とでは、Y型では良く一致するがX型では計算値がやや大きく算出される。

3.3 考察

3.3.1 繰り返し荷重を受けない部材の曲げ試験について

(1)引張応力発生荷重およびひびわれ発生荷重

引張応力発生荷重計算値は、付録-2に示す有効プレストレスの計算より求めたもので、この計算値は、表-9に示すように、試験値と比較的良く一致する。すなわち、引張応力発生荷重は、「プレストレストコンクリート杭設計施工指針案(土木学会)」によるPC鋼材のレラクセーション、コンクリートの乾燥収縮、クリープの値を用いることにより計算できる。しかし、本試験の範囲でも、XS-Bの試験値は計算値の95.6%、YS-Bは111.1%であり、バラツキがある。また、コンクリートの乾燥収縮、クリープは、パイルの置かれる環境条件によっても異なり、これも計算値と試験値が一致しない一因である。

ひびわれ発生荷重については、試験値が計算値を1~2割下回る傾向があり、これは主として管理供試体による曲げ強度によって、直接にひびわれ荷重を算定したことの原因があると考えられる。すなわち、管理供試体曲げ強度が70kg/cm²であるからといって、形状・寸法の異なるパイル本体のコンクリート曲げ強度を70kg/cm²と仮定したことに無理があると考えられる。本試験の場合、曲げ強度を40kg/cm²と仮定すれば、ひびわれ発生荷重は安全側に算定される。

引張応力発生荷重を安全側に算定するには、オートクレーブ養生によるPC鋼線のレラクセーション、コンクリートの乾燥収縮、クリープに対する広汎な試験より、設計に用いる値を検討する必要がある。さらに、後述するように、繰り返し荷重の影響を考える必要もある。

(2)破壊荷重および破壊時曲率

表-13 X型バイル中央たわみの繰り返し荷重による変化

バイルの種類	0 tでのたわみ (残留たわみ)			0 ~ 1 tでのたわみ			0 ~ 3 tでのたわみ			0 ~ 4 tでのたわみ	
	1 10 ¹	10 ²	10 ³ 10 ⁴ 10 ⁵ 10 ⁶	初期 載荷	1 10 ¹	10 ² 10 ³ 10 ⁴ 10 ⁵ 10 ⁶	初期 載荷	1 10 ¹	10 ² 10 ³ 10 ⁴ 10 ⁵ 10 ⁶	初期 載荷	10 ⁶
XF-A	98	90	73 84 74 73	—	105	116 113 114 112 113 113	—	363	595 582 594 557 567 562	—	956
XF-B	128	31	-46 48 -39 26 -32		99	146 127 129 130 164 156 129		382	685 653 733 671	—	785
XF-C	117	122 119	124 125 111 126		99	126 104 107 105 106 109 118		316	569 524 514 515 508 519 548		849 838

(単位：1/100mm)

表-14 Y型バイル中央たわみの繰り返し荷重による変化

バイルの種類	0 tでのたわみ (残留たわみ)			0 ~ 3 tでのたわみ			0 ~ 5 tでのたわみ			0 ~ 7.5 tでのたわみ	
	1 10	10 ² 10 ³ 10 ⁴ 10 ⁵ 10 ⁶	初期 載荷	1 10	10 ² 10 ³ 10 ⁴ 10 ⁵ 10 ⁶	初期 載荷	1 10	10 ² 10 ³ 10 ⁴ 10 ⁵ 10 ⁶	初期 載荷	10 ⁶	初期 載荷
YF-A	79	82 81 86 87 83 87	87	294	321 323 319 320 304 311 299	528	618 620 630 617 588 592 568	846	1110 1131 1140 1135 1124 1046 902	1911	1593
YF-B	69	134 141 137 143 194 259		311	456 482 483 499 493 480 426			536	714 714 715 708 688 665 623	1266	1152
YF-C	48	51 45 44 29 16 -6		296	352 356 352 349 342 337 329			532	732 663 664 664 650 644 619	1163	1170
YF-D	-55	-4 -3 -4 3 2 -10		288	348 346 345 347 339 328 323			506	697 715 693 705 729 651 641	1250	1163
YF-E	45	25 28 3 -4 3 -2		282	349 347 344 354 378 347 347			506	749 724 698 671 647 629 884	1308	1625
YF-F	35	0 28 33 6 3 19		270	374 345 337 332 324 316 400						

(単位：1/100mm)

表-15 X型パイル圧縮線コンクリートひずみの繰り返し荷重による変化

パイルの種類	0tでのひずみ (残留ひずみ)				0~1tでのひずみ				0~3tでのひずみ				0~4tでのひずみ												
	1	10 ¹	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	初期 破荷	1	10 ¹	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	初期 破荷									
XF-A	35	16	12	17	15	11	—	76	94	89	86	87	88	88	83	251	390	392	399	374	384	367	—	584	—
XF-B	10	15	9	-21	-22	-19	-4	71	110	101	91	91	100	102	118	277	415	384	390	413	465	454	461	529	682
XF-C	7	20	15	14	15	14	52	61	83	—	75	79	76	79	82	216	330	308	307	305	307	306	313	453	493
計算値	①	108																						626	1101
	②	126																						863	1373

(単位: ×10⁻⁶)

注 ① $E_c=350,000 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_{ce}=43.8 \text{ kg/cm}^2$ として計算したもの
 ② $E_c=300,000 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_{ce}=35.0 \text{ kg/cm}^2$ として計算したもの

表-16 Y型パイル圧縮線コンクリートひずみの繰り返し荷重による変化

パイルの種類	0tでのひずみ (段階ひずみ)				0~3tでのひずみ				0~5tでのひずみ				0~7.5tでのひずみ												
	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	初期 破荷	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	初期 破荷									
YF-A	42	38	33	31	21	22	28	220	237	244	237	242	225	229	227	383	437	436	441	445	423	421	764	712	
YF-B	82	80	97	78	82	80	56	233	330	336	316	340	336	339	299	570	645	655	639	652	649	622	552	961	898
YF-C	79	74	87	78	72	74	63	219	241	248	247	242	227	220	230	378	486	485	493	484	465	445	443	855	784
YF-D	13	12	-11	12	-8	-8	10	234	276	249	286	273	224	251	-224	413	512	473	552	552	-463	460	423	817	762
YF-E	29	29	33	33	—	—	—	252	244	247	242	246	—	—	—	417	471	481	467	467	—	—	—	848	—
YF-F	50	53	50	46	51	39	48	246	274	255	249	249	236	233	276	445	539	513	500	492	462	454	571	873	956
計算値	①	325																						608	1253
	②	379																						816	1557

(単位: ×10⁻⁶)

注: ① $E_c=350,000 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_{ce}=101.2 \text{ kg/cm}^2$ として計算したもの
 ② $E_c=300,000 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_{ce}=81.0 \text{ kg/cm}^2$ として計算したもの

表-17 X型パイプ P C 鋼材ひずみ増分の繰り返し荷重による変化

パイプの 種 類	0 ~ 1 t での ϵ_s						0 ~ 3 t での ϵ_s						0 ~ 4 t での ϵ_s			
	初期 載荷	1	10 ¹	10 ²	10 ³	10 ⁶	初期 載荷	1	10 ¹	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	初期 載荷	10 ⁶
XF-A	87	89	103	87	86	—	485	931	924	1,246	—	1,186	—	2,008	—	—
XF-B	102	107	110	121	100	—	832	1,072	1,105	960	1,258	1,209	1,306	1,024	1,768	1,560
XF-C	71	109	132	68	60	67	456	1,034	845	768	683	846	655	859	1,005	1,013
計算値	①	87														
	②	101														

(単位: $\times 10^{-6}$)

注 ① $E_c=350,000 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_{cc}=43.8 \text{ kg/cm}^2$ として計算したもの
 ② $E_c=300,000 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_{cc}=35.0 \text{ kg/cm}^2$ として計算したもの

表-18 Y型パイプ P C 鋼材ひずみ増分繰り返し荷重による変化

パイプの 種 類	0 ~ 3 t での ϵ_s						0 ~ 5 t での ϵ_s						0 ~ 7.5 t での ϵ_s			
	初期 載荷	1	10 ¹	10 ²	10 ³	10 ⁶	初期 載荷	1	10 ¹	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	初期 載荷	10 ⁶
YF-A	240	228	226	228	240	211	406	518	544	620	562	479	532	472	1,212	1,076
YF-B	199	393	420	440	443	403	915	1,326	1,370	1,332	1,326	1,295	1,160	987	2,360	1,883
YF-C	294	353	373	374	379	283	567	783	783	798	758	723	743	556	2,329	1,805
YF-D	198	345	398	281	321	263	425	678	608	528	554	537	540	522	1,071	1,483
YF-F	153	230	247	241	268	—	390	472	479	467	468	—	—	—	818	—
YF-F	196	239	258	237	237	373	374	676	675	634	628	537	537	995	1,363	1,906
計算値	①	260														
	②	303														

(単位: $\times 10^{-6}$)

注 ① $E_c=350,000 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_{cc}=101.2 \text{ kg/cm}^2$ として計算したもの
 ② $E_c=300,000 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_{cc}=81.0 \text{ kg/cm}^2$ として計算したもの

表-19 X型パイル EI の繰り返し荷重による変化

パイルの 種類	0~1t での EI					0~3t での EI					0~4t での EI									
	初期 載荷	1	10 ¹	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	初期 載荷	1	10 ¹	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	初期 載荷	10 ⁶		
XF-A	1.44	1.29	1.22	1.36	1.36	1.53	1.29	—	0.97	0.61	0.54	0.53	0.43	0.61	0.45	—	0.36	—		
XF-B	1.36	1.06	1.11	1.17	1.17	1.39	0.98	1.36	0.94	0.47	0.48	0.52	0.42	0.42	0.40	0.47	0.41	0.42		
XF-C	1.75	1.22	1.17	1.63	1.75	1.63	1.63	1.29	1.05	0.52	0.61	0.67	0.7	0.61	0.73	0.60	0.64	0.64		
計算値	①	1.21																	0.37	0.22'
	②	1.04																	0.23	0.17

(単位: $\times 10^{10} \text{kg}\cdot\text{cm}^2$)

注 ① $E_c=350,000\text{kg}/\text{cm}^2$, $\sigma_{cc}=43.8\text{kg}/\text{cm}^2$ として計算したもの
 ② $E_c=300,000\text{kg}/\text{cm}^2$, $\sigma_{cc}=35.0\text{kg}/\text{cm}^2$ として計算したもの

表-20 Y型パイル EI の繰り返し荷重による変化

パイルの 種類	0~3t での EI					0~5t での EI					0~7.5t での EI									
	初期 載荷	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	初期 載荷	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	初期 載荷	10 ⁶		
YF-A	1.53	1.50	1.47	1.50	1.41	1.60	1.44	1.60	1.47	1.21	1.19	1.09	1.15	1.29	1.21	1.32	0.89	0.98		
YF-B	1.67	0.95	0.94	0.92	0.87	0.85	0.88	1.02	0.78	0.60	0.58	0.59	0.60	0.60	0.65	0.76	0.53	0.63		
YF-C	1.36	1.18	1.13	1.15	1.13	1.27	1.17	1.34	1.26	0.93	0.93	0.91	0.94	0.99	0.98	1.19	0.56	0.89		
YF-D	1.60	1.11	1.10	1.24	1.20	1.34	1.60	1.47	1.41	1.00	1.08	1.08	1.06	1.17	1.18	1.25	0.93	0.77		
YF-E	1.83	1.36	1.56	1.47	1.34	1.18	1.47	1.41	1.77	1.12	1.06	1.14	1.10	1.02	1.24	1.21	0.70	0.56		
YF-F	1.67	1.39	1.39	1.47	1.41	1.56	0.74	1.09	1.53	0.96	0.98	1.06	1.08	1.18	1.18	0.76	0.79	0.62		
計算値	①	1.21																	0.94	0.52
	②	1.04																	0.62	0.39

(単位: $10^{10} \text{kg}\cdot\text{cm}^2$)

注 ① $E_c=350,000\text{kg}/\text{cm}^2$, $\sigma_{cc}=101.2\text{kg}/\text{cm}^2$ として計算したもの
 ② $E_c=300,000\text{kg}/\text{cm}^2$, $\sigma_{cc}=81.0\text{kg}/\text{cm}^2$ として計算したもの

表-21 X型パイル曲率の繰り返し荷重による変化

パイルの 種 類	0t での曲率 (残留曲率)				0～1t での曲率				0～3t での曲率				0～4t での 曲率												
	1	10 ¹	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	初期 載荷	1	10 ¹	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	初期 載荷	10 ⁶								
XF-A	1.3	0.7	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.7	—	2.7	4.3	4.9	4.9	6.0	4.3	5.8	—	9.6	—
XF-B	0.9	0.0	0.3	2.1	0.5	1.2	0.3	0.6	0.8	0.8	0.7	0.7	1.2	0.9	0.6	4.1	5.5	5.5	5.0	6.2	6.2	6.5	5.1	8.5	8.3
XF-C	0.7	0.8	0.9	1.2	1.3	1.3	1.1	0.5	0.9	0.8	0.5	0.5	0.5	0.5	0.7	2.5	5.1	4.3	3.9	3.7	4.3	3.6	4.3	5.4	—
計算値	①																0.72				7.2			15.6	
	②																0.84				11.3			20.7	

(単位: $\times 10^{-6} \text{cm}^{-1}$)

注: ① $E_c=350,000 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_{cc}=43.8 \text{ kg/cm}^2$ として計算したもの
 ② $E_c=300,000 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_{cc}=35.0 \text{ kg/cm}^2$ として計算したもの

表-22 Y型パイル曲率の繰り返し荷重による変化

パイルの 種 類	0t での曲率 (残留曲率)				0～3t での曲率				0～5t での曲率				0～7.5t での曲率												
	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	初期 載荷	1	100	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	初期 載荷	10 ⁶								
YF-A	0.6	0.6	0.6	0.9	1.0	1.2	0.9	1.7	1.7	1.8	1.7	1.7	1.8	1.7	3.0	3.6	3.7	4.0	3.8	3.4	3.6	3.3	7.3	6.6	
YF-B	0.5	0.6	0.6	0.6	0.4	0.3	0.6	1.6	2.7	2.8	2.8	2.9	3.1	2.9	2.6	5.5	7.3	7.5	2.3	7.3	7.3	6.6	5.7	12.3	10.3
YF-C	0.5	0.6	0.6	0.6	0.4	0.2	0.5	1.9	2.2	2.3	2.3	2.3	2.1	2.2	1.9	3.5	4.7	4.7	4.8	4.6	4.4	4.4	3.7	11.7	10.9
YF-D	0.4	0.0	-0.1	0.0	0.2	0.2	0.0	1.6	2.3	2.4	2.1	2.2	2.0	1.6	1.8	3.1	4.4	4.0	4.0	4.1	3.7	3.7	3.5	7.0	9.33
YF-E	0.5	0.2	0.3	0.0	0.0	0.7	0.3	1.4	1.9	1.7	1.8	1.9	2.2	1.8	1.8	2.5	3.9	4.1	3.8	3.9	4.2	3.5	3.6	6.2	7.8
YF-F	0.4	0.0	0.3	0.4	0.1	0.0	0.2	1.5	1.9	1.9	1.8	1.8	1.7	1.7	2.4	2.8	4.5	4.4	4.2	4.0	3.7	3.7	5.8	8.3	10.6
計算値	①																2.2				4.6			12.5	
	②																2.5				7.1			16.7	

(単位: $\times 10^{-6} \text{cm}^{-1}$)

注 ① $E_c=350,000 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_{cc}=101.2 \text{ kg/cm}^2$ として計算したもの
 ② $E_c=300,000 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_{cc}=81.0 \text{ kg/cm}^2$ として計算したもの

表-23 X型パイルひびわれ幅の繰り返し荷重による変化

パイルの 種類	片振り or 両振り	2tでのひびわれ幅						3tでのひびわれ幅						4tでのひびわれ幅							
		初期 載荷	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	初期 載荷	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	初期 載荷	10 ⁶		
			0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	—		0.04	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08		0.08	—	0.15
XF-A	片振り	—	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	—	0.04	0.08 <td>0.08</td> <td>0.08</td> <td>0.08</td> <td>0.08</td> <td>0.08</td> <td>0.08</td> <td>—</td> <td>0.15</td> <td>—</td>	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	—	0.15	—		
XF-B	両振り	—	0.04	0.06	0.04	0.04	0.08	0.04	0.06	0.08	0.08	0.10	0.10	0.12	0.10	0.08	0.20	0.20	0.20		
XF-C	片振り	—	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	—	0.06	0.04	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.15	0.30	0.25	0.25		
計算値	方法I	0.01																		0.33	0.74
	方法II	0.05																		0.25	0.60

(単位: mm)

表-24 Y型パイルひびわれ幅の繰り返し荷重による変化

パイルの 種類	片振り or 両振り	4tでのひびわれ幅						5tでのひびわれ幅						7.5tでのひびわれ幅							
		初期 載荷	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	初期 載荷	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	初期 載荷	10 ⁶		
			0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04		0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05		0.04	0.04	0.18
YF-A	片振り	—	0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.04</td> <td>0.04</td> <td>0.05</td> <td>0.05</td> <td>0.05</td> <td>0.05</td> <td>0.05</td> <td>0.05</td> <td>0.04</td> <td>0.18</td> <td>0.10</td> <td>0.10</td> </td></td></td></td>	0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.04</td> <td>0.04</td> <td>0.05</td> <td>0.05</td> <td>0.05</td> <td>0.05</td> <td>0.05</td> <td>0.05</td> <td>0.04</td> <td>0.18</td> <td>0.10</td> <td>0.10</td> </td></td></td>	0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.04</td> <td>0.04</td> <td>0.05</td> <td>0.05</td> <td>0.05</td> <td>0.05</td> <td>0.05</td> <td>0.05</td> <td>0.04</td> <td>0.18</td> <td>0.10</td> <td>0.10</td> </td></td>	0.05 <td>0.05 <td>0.04</td> <td>0.04</td> <td>0.05</td> <td>0.05</td> <td>0.05</td> <td>0.05</td> <td>0.05</td> <td>0.05</td> <td>0.04</td> <td>0.18</td> <td>0.10</td> <td>0.10</td> </td>	0.05 <td>0.04</td> <td>0.04</td> <td>0.05</td> <td>0.05</td> <td>0.05</td> <td>0.05</td> <td>0.05</td> <td>0.05</td> <td>0.04</td> <td>0.18</td> <td>0.10</td> <td>0.10</td>	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.18	0.10	0.10		
YF-B	片振り	—	0.05 <td>0.08 <td>0.08 <td>0.08 <td>0.10 <td>0.08</td> <td>0.08</td> <td>0.10</td> <td>0.20</td> <td>0.20</td> <td>0.20</td> <td>0.20</td> <td>0.20</td> <td>0.20</td> <td>0.30</td> <td>0.30</td> <td>0.30</td> </td></td></td></td>	0.08 <td>0.08 <td>0.08 <td>0.10 <td>0.08</td> <td>0.08</td> <td>0.10</td> <td>0.20</td> <td>0.20</td> <td>0.20</td> <td>0.20</td> <td>0.20</td> <td>0.20</td> <td>0.30</td> <td>0.30</td> <td>0.30</td> </td></td></td>	0.08 <td>0.08 <td>0.10 <td>0.08</td> <td>0.08</td> <td>0.10</td> <td>0.20</td> <td>0.20</td> <td>0.20</td> <td>0.20</td> <td>0.20</td> <td>0.20</td> <td>0.30</td> <td>0.30</td> <td>0.30</td> </td></td>	0.08 <td>0.10 <td>0.08</td> <td>0.08</td> <td>0.10</td> <td>0.20</td> <td>0.20</td> <td>0.20</td> <td>0.20</td> <td>0.20</td> <td>0.20</td> <td>0.30</td> <td>0.30</td> <td>0.30</td> </td>	0.10 <td>0.08</td> <td>0.08</td> <td>0.10</td> <td>0.20</td> <td>0.20</td> <td>0.20</td> <td>0.20</td> <td>0.20</td> <td>0.20</td> <td>0.30</td> <td>0.30</td> <td>0.30</td>	0.08	0.08	0.10	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.30	0.30	0.30		
YF-C	両振り	—	0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05</td> <td>0.05</td> <td>0.05</td> <td>0.10</td> <td>0.10</td> <td>0.10</td> <td>0.12</td> <td>0.10</td> <td>0.05</td> <td>0.23</td> <td>0.15</td> <td>0.15</td> </td></td></td></td>	0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05</td> <td>0.05</td> <td>0.05</td> <td>0.10</td> <td>0.10</td> <td>0.10</td> <td>0.12</td> <td>0.10</td> <td>0.05</td> <td>0.23</td> <td>0.15</td> <td>0.15</td> </td></td></td>	0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05</td> <td>0.05</td> <td>0.05</td> <td>0.10</td> <td>0.10</td> <td>0.10</td> <td>0.12</td> <td>0.10</td> <td>0.05</td> <td>0.23</td> <td>0.15</td> <td>0.15</td> </td></td>	0.05 <td>0.05 <td>0.05</td> <td>0.05</td> <td>0.05</td> <td>0.10</td> <td>0.10</td> <td>0.10</td> <td>0.12</td> <td>0.10</td> <td>0.05</td> <td>0.23</td> <td>0.15</td> <td>0.15</td> </td>	0.05 <td>0.05</td> <td>0.05</td> <td>0.05</td> <td>0.10</td> <td>0.10</td> <td>0.10</td> <td>0.12</td> <td>0.10</td> <td>0.05</td> <td>0.23</td> <td>0.15</td> <td>0.15</td>	0.05	0.05	0.05	0.10	0.10	0.10	0.12	0.10	0.05	0.23	0.15	0.15		
YF-D	両振り	—	0.04 <td>0.03 <td>0.04 <td>0.03 <td>0.03 <td>0.04</td> <td>0.04</td> <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05</td> <td>0.15</td> <td>0.20</td> <td>0.20</td> </td></td></td></td></td></td></td></td></td></td>	0.03 <td>0.04 <td>0.03 <td>0.03 <td>0.04</td> <td>0.04</td> <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05</td> <td>0.15</td> <td>0.20</td> <td>0.20</td> </td></td></td></td></td></td></td></td></td>	0.04 <td>0.03 <td>0.03 <td>0.04</td> <td>0.04</td> <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05</td> <td>0.15</td> <td>0.20</td> <td>0.20</td> </td></td></td></td></td></td></td></td>	0.03 <td>0.03 <td>0.04</td> <td>0.04</td> <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05</td> <td>0.15</td> <td>0.20</td> <td>0.20</td> </td></td></td></td></td></td></td>	0.03 <td>0.04</td> <td>0.04</td> <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05</td> <td>0.15</td> <td>0.20</td> <td>0.20</td> </td></td></td></td></td></td>	0.04	0.04	0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05</td> <td>0.15</td> <td>0.20</td> <td>0.20</td> </td></td></td></td></td>	0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05</td> <td>0.15</td> <td>0.20</td> <td>0.20</td> </td></td></td></td>	0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05</td> <td>0.15</td> <td>0.20</td> <td>0.20</td> </td></td></td>	0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05</td> <td>0.15</td> <td>0.20</td> <td>0.20</td> </td></td>	0.05 <td>0.05 <td>0.05</td> <td>0.15</td> <td>0.20</td> <td>0.20</td> </td>	0.05 <td>0.05</td> <td>0.15</td> <td>0.20</td> <td>0.20</td>	0.05	0.15	0.20	0.20		
YF-E	両振り	—	0.03 <td>0.03 <td>0.03 <td>0.03 <td>0.03 <td>0.03</td> <td>0.03</td> <td>0.03 <td>0.08 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05</td> <td>0.20</td> <td>0.18</td> <td>0.18</td> </td></td></td></td></td></td></td></td></td></td>	0.03 <td>0.03 <td>0.03 <td>0.03 <td>0.03</td> <td>0.03</td> <td>0.03 <td>0.08 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05</td> <td>0.20</td> <td>0.18</td> <td>0.18</td> </td></td></td></td></td></td></td></td></td>	0.03 <td>0.03 <td>0.03 <td>0.03</td> <td>0.03</td> <td>0.03 <td>0.08 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05</td> <td>0.20</td> <td>0.18</td> <td>0.18</td> </td></td></td></td></td></td></td></td>	0.03 <td>0.03 <td>0.03</td> <td>0.03</td> <td>0.03 <td>0.08 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05</td> <td>0.20</td> <td>0.18</td> <td>0.18</td> </td></td></td></td></td></td></td>	0.03 <td>0.03</td> <td>0.03</td> <td>0.03 <td>0.08 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05</td> <td>0.20</td> <td>0.18</td> <td>0.18</td> </td></td></td></td></td></td>	0.03	0.03	0.03 <td>0.08 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05</td> <td>0.20</td> <td>0.18</td> <td>0.18</td> </td></td></td></td></td>	0.08 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05</td> <td>0.20</td> <td>0.18</td> <td>0.18</td> </td></td></td></td>	0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05</td> <td>0.20</td> <td>0.18</td> <td>0.18</td> </td></td></td>	0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05</td> <td>0.20</td> <td>0.18</td> <td>0.18</td> </td></td>	0.05 <td>0.05 <td>0.05</td> <td>0.20</td> <td>0.18</td> <td>0.18</td> </td>	0.05 <td>0.05</td> <td>0.20</td> <td>0.18</td> <td>0.18</td>	0.05	0.20	0.18	0.18		
YF-F	両振り	—	0.04 <td>0.03 <td>0.03 <td>0.02 <td>0.02 <td>0.03</td> <td>0.05</td> <td>0.02 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.04</td> <td>0.10</td> <td>0.18</td> <td>0.23</td> <td>0.23</td> </td></td></td></td></td></td></td></td></td>	0.03 <td>0.03 <td>0.02 <td>0.02 <td>0.03</td> <td>0.05</td> <td>0.02 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.04</td> <td>0.10</td> <td>0.18</td> <td>0.23</td> <td>0.23</td> </td></td></td></td></td></td></td></td>	0.03 <td>0.02 <td>0.02 <td>0.03</td> <td>0.05</td> <td>0.02 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.04</td> <td>0.10</td> <td>0.18</td> <td>0.23</td> <td>0.23</td> </td></td></td></td></td></td></td>	0.02 <td>0.02 <td>0.03</td> <td>0.05</td> <td>0.02 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.04</td> <td>0.10</td> <td>0.18</td> <td>0.23</td> <td>0.23</td> </td></td></td></td></td></td>	0.02 <td>0.03</td> <td>0.05</td> <td>0.02 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.04</td> <td>0.10</td> <td>0.18</td> <td>0.23</td> <td>0.23</td> </td></td></td></td></td>	0.03	0.05	0.02 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.04</td> <td>0.10</td> <td>0.18</td> <td>0.23</td> <td>0.23</td> </td></td></td></td>	0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.04</td> <td>0.10</td> <td>0.18</td> <td>0.23</td> <td>0.23</td> </td></td></td>	0.05 <td>0.05 <td>0.05 <td>0.04</td> <td>0.10</td> <td>0.18</td> <td>0.23</td> <td>0.23</td> </td></td>	0.05 <td>0.05 <td>0.04</td> <td>0.10</td> <td>0.18</td> <td>0.23</td> <td>0.23</td> </td>	0.05 <td>0.04</td> <td>0.10</td> <td>0.18</td> <td>0.23</td> <td>0.23</td>	0.04	0.10	0.18	0.23	0.23		
計算値	方法I	0.015																		0.057	0.470
	方法II	0.024																		0.082	0.369

(単位: mm)

3.2.4.1に示すように、破壊荷重は方法Aのa,b,c,dいずれによっても安全側に、また、破壊時曲率は方法Aのc,dによって安全側に、算定されることが分った。

ここでは、方法Aによって、コンクリートと圧縮強度、PC鋼材本数および有効プレストレス量が、破壊荷重及び破壊時曲率に及ぼす影響について考察する。

図-27に、コンクリート圧縮強度とPCパイル破壊荷重との関係を示す。これは、形状、寸法、PC鋼材量、有効プレストレス量はY型パイルと同一とし、横軸に、コンクリートの圧縮強度を、縦軸に、破壊荷重を示したものである。これによれば、圧縮強度300kg/cm²から600kg/cm²程度までは、圧縮強度によってパイル破壊強度は大きく変化するが、600kg/cm²~1000kg/cm²にかけてはa,b,dでは10%程度、cではほとんど増加しないということが認められる。さらに、X型を対象としたものでは、400kg/cm²以上では、破壊荷重はほとんど圧縮強度の影響を受けないようである。また、PC鋼材量を多くすれば（現行のJISC種以上のものを新たに作る場合）、600kg/cm²以上についても、コンクリート圧縮強度の影響が強く出ると計算される。しかし、現行のJISの範囲では、現在のコンクリート技術では、600kg/cm²以上の強度を確保することは容易であるので、破壊強度はおおむね保

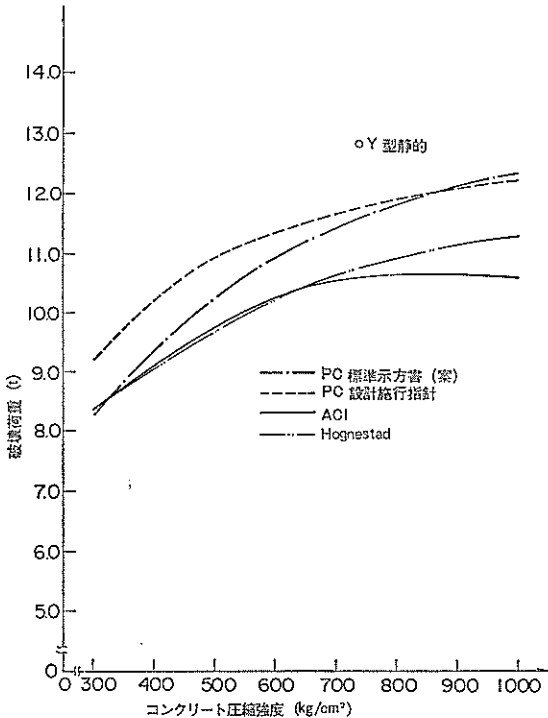


図-27 PCパイル破壊荷重に及ぼすコンクリート圧縮強度の影響

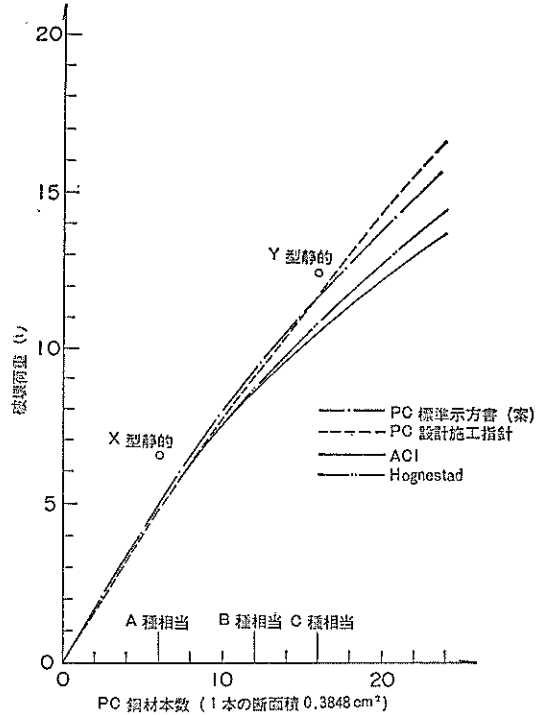


図-28 PCパイル破壊荷重に及ぼすPC鋼線量の影響

証される。

図-28に、PC鋼材量と破壊荷重との関係を示す。これは、形状、寸法およびPC鋼線1本当りの有効プレストレス量をX型、Y型と同一とし、横軸にPC鋼線本数を、縦軸に、破壊荷重を示したものである。これによれば、JISA,B,C種の範囲では、鋼線本数と破壊荷重は、ほぼ直線関係にある。これは、PCパイル破壊荷重に対する最大の要因は、鋼材量であることを示している。

図-29に、有効プレストレス量と破壊荷重との関係を示す。これは、形状、寸法、PC鋼材量をY型と同一として、横軸にPC鋼材有効プレストレス量を、縦軸に破壊荷重をとったものである。これによれば、有効プレストレス量による破壊荷重の変化は小さく、有効プレストレス量0、すなわち、RCとJIS種を比較しても、その比は約1.1程度であり、破壊荷重に及ぼす有効プレストレス量の影響は小さい。

破壊時曲率とコンクリート圧縮強度、PC鋼線本数および有効プレストレス量との関係も、破壊荷重とはほぼ同様のことが言える。

図-30に、コンクリート圧縮強度とPCパイル破壊時曲率との関係を示す。ここで、a,bとc,dによる計算値の傾向が異なるが、理論的には、c,dの方が妥当であり、

繰返し曲げを受けるPCパイルの力学的性質

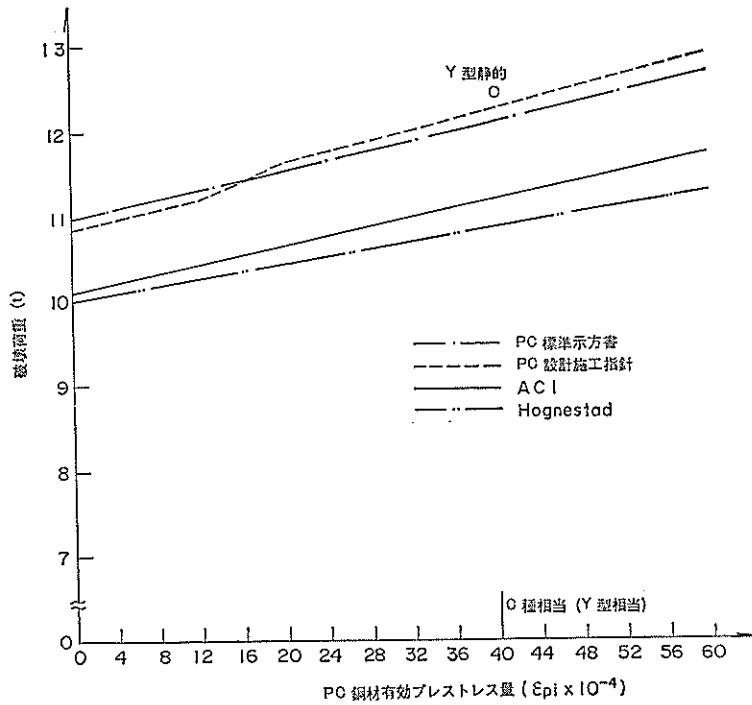


図-29 PCパイル破壊荷重に及ぼす有効プレストレス量の影響

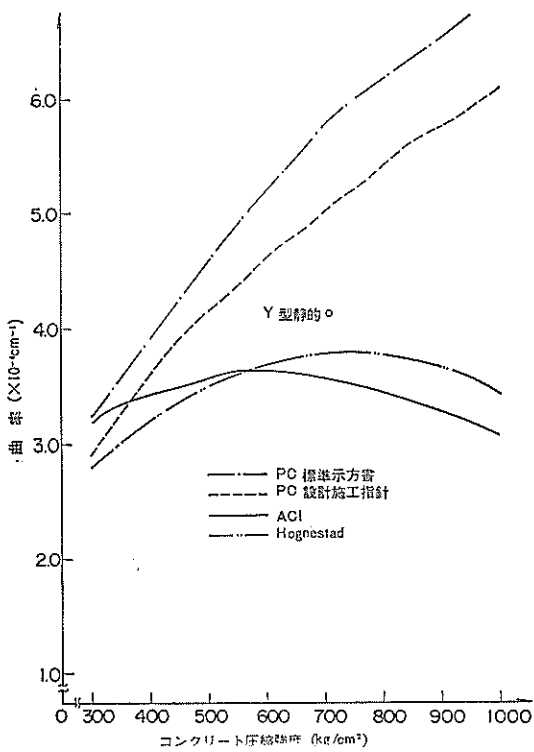


図-30 PCパイル破壊時曲率に及ぼすコンクリート圧縮強度の影響

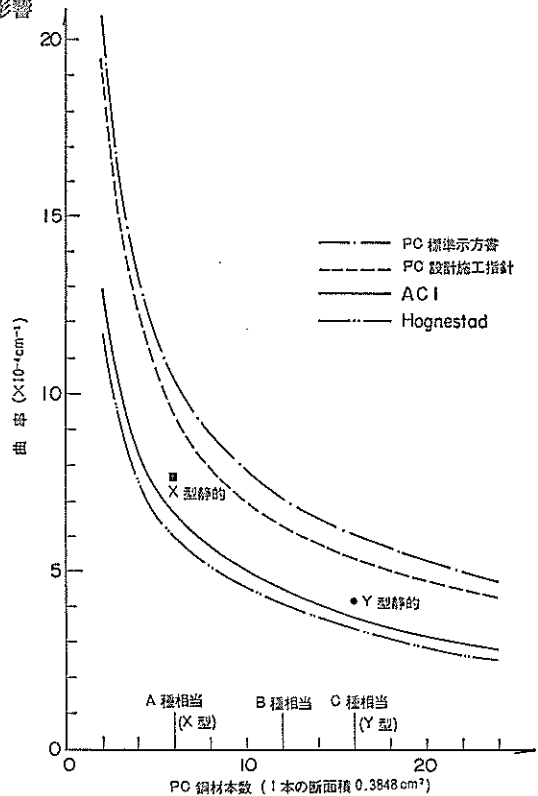


図-31 PCパイル破壊時曲率に及ぼすPC鋼線量の影響

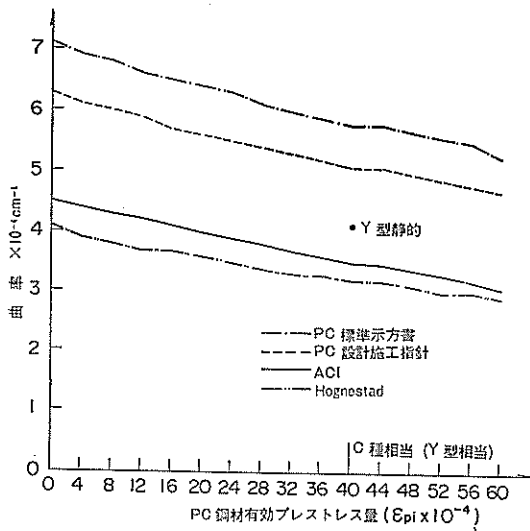


図-32 PCパイル破壊時曲率に及ぼす有効プレストレス量の影響

a, b の仮定は破壊荷重を求めるための1つの便法であるため、c, dによる計算値を参考にすると、破壊時曲率はコンクリート圧縮強度の影響をほとんど受けないことがわかる。

図-31に、PC鋼材量と破壊時曲率との関係を示す。これは、形状、寸法及びPC鋼線1本当りの有効プレストレス量をX型、Y型と同一として、横軸にPC鋼線本数を、縦軸に、破壊時曲率を示したものである。これによれば、JISの範囲で、鋼材本数と破壊時曲率は反比例の関係にあり、PCパイル破壊時曲率に対する最大の要因は、鋼材量であることを示している。

図-32に、有効プレストレス量と破壊時曲率との関係を示す。これによれば、有効プレストレス量0、すなわち、RCの場合と、JISC種の場合との差は、1割程度であり、破壊時曲率に及ぼす有効プレストレス量の影響は小さい。

以上をまとめると、PCパイルの破壊荷重及び破壊時曲率は、ほぼPC鋼材量によって一義的に定まると考えよう。

なお、以上の計算は、径30cm、厚さ6cmのPCパイルに対して、平面保持およびコンクリート引張強度無視の仮定を基に行ったのであるが、径、厚さが異っても、同様の考えに基づき、鋼材、コンクリートの品質および鋼材の比率を同じとして計算すれば、同様の結論が導かれる。

(3)たわみ、ひずみ、EI、曲率と荷重の関係

3.2.4.1に示したように、これらの特性は、ひびわれ発生以前では、全断面有効として、またひびわれ発生以後は、方法Ⅱで概略算定できる。しかしながら、精度としては5割程度も計算値と試験値が異なるものもあり、実用上、どう処理するかが問題である。

PCの場合、ひびわれ前のたわみ、ひずみ、EI、曲率は、あまり問題とならないので、ひびわれ発生後について考察を加える。

方法Ⅱによる計算値と、試験値が異なる最大の理由は、実際に導入されている有効プレストレスと計算上仮定した有効プレストレスが異なることである。これは、表-17に示した様に、X型で20%プレストレスが異なると鋼材ひずみが3tで68%、4tで35%異なるといったものであり、また、有効プレストレス自体が、鋼材のレラクセーション、コンクリートのクリープ、繰り返し荷重によって変化する為、設計上は相応な安全係数を考慮せねばならず、本試験の範囲では、0.80ではほぼ安全である。

また、有効プレストレスを精度よく求めて計算したとしても、コンクリートの引張強度を無視している為に、試験値と計算値が一致することはない。

次に、本試験でもX型、Y型において、鋼材量を変え有効プレストレスを変えて、諸特性を検討したが、鋼材量による諸特性の違いを検討すると以上の様である。

図-33に、PC鋼材量の違いによるたわみ—荷重の関係を示し、併せてコンクリート(ϵ_c)及び鋼材ひずみ(ϵ_s)一定の曲線を示した。これによると、当然ながら、鋼材量が増加するにつれて、たわみ—荷重曲線の傾きは大きくなるが、その増加率は、PC鋼材本数nがn=6から10とn=16から20を比較すると、PC鋼材本数の差がいずれも4本であるにもかかわらず、後者の方が前者に比較して差が小さくなり、ある程度以上では鋼材量の影響が鈍化すると考えられる。また、同一たわみにおいて、 ϵ_s は鋼材量にかかわらずほぼ一定であるのに対し、 ϵ_c は増加している傾向が認められ、鋼材量が多くなると、同一たわみでのコンクリートのひずみ、応力が増加することが分る。

(4)ひびわれ幅と荷重の関係

ひびわれ幅と荷重の関係は、バラツキの多いものではあるが、3.2.4.1に示したように、付録-4の方法ⅡによりPC鋼材ひずみ増分をCEB-FIPの式に用いることにより、やや安全側にひびわれ幅を算定できる。

また、CEB-FIPの式は、PC鋼材応力増加とひびわれ幅が比例するという式であるが、その妥当性を検討する。図-34は、ひびわれ幅の試験値と方法ⅡによるPC鋼材応力増加の計算値との関係を示したものであるが、本試

繰返し曲げを受けるPCパイルの力学的性質

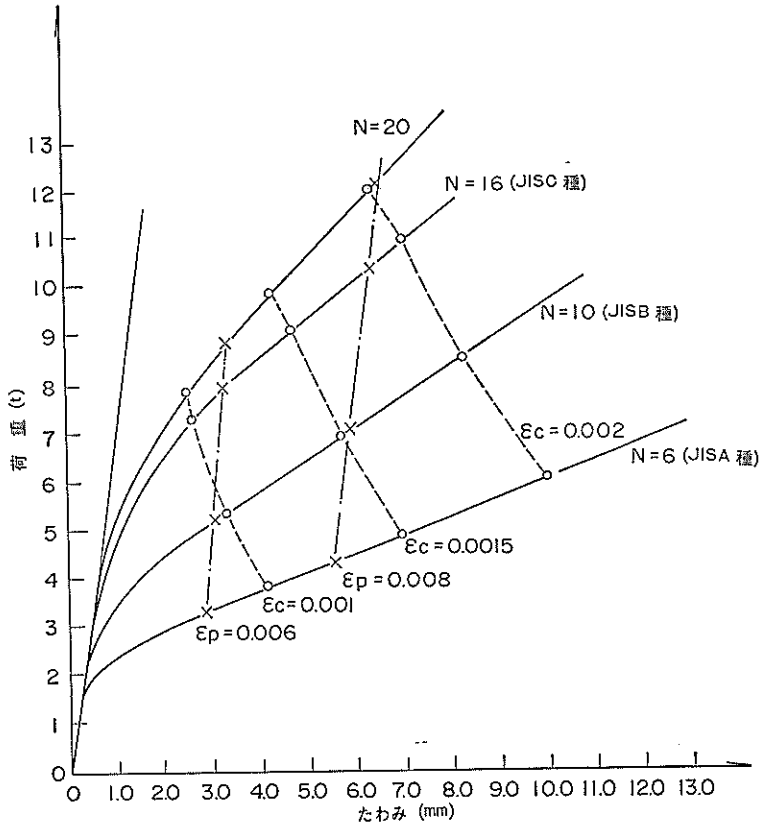


図-33 たわみ-荷重曲線に及ぼすPC鋼線量の影響

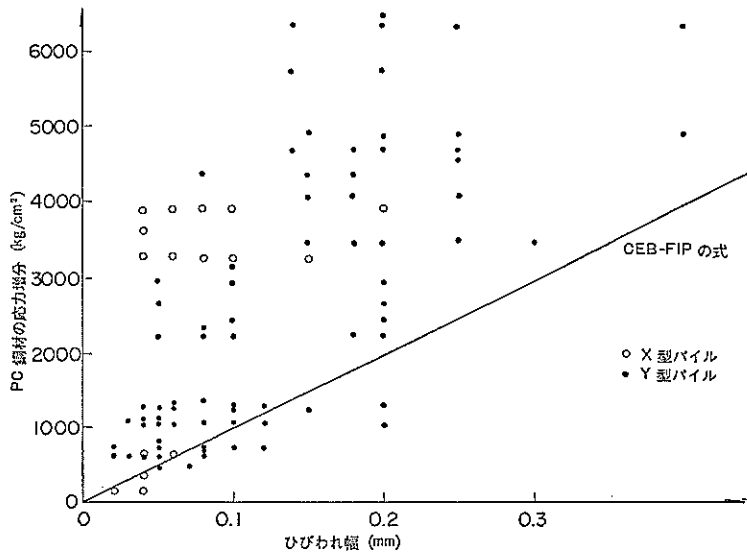


図-34 ひびわれ幅とPC鋼線応力増分(計算値)の関係

験の範囲では、CEB-FIPの式は概略その下限を示すようである。これらの図からは、CEB-FIPの式が妥当であるかどうかは必ずしも確認できないが、設計式として用いることはできると判断される。

3.3.2 繰り返し荷重の影響について

(1)引張応力発生荷重(再びひわれ荷重)

3.2.4.2で示したように、繰り返し荷重により、引張応力発生荷重は大部分のPCパイプで減少する。

傾向としては、ひびわれのほとんど発生しない繰り返し荷重による低下は、XF-B, YF-Aで、0, YF-C, YF-Dで0.1tであり、低下率としては、3.4%となり、実用上無視しうる程度のものである。また、これらではPC鋼線の変動応力は非常に小さく、3.1.2.3でいう第2段階以前の状態にあると考えられる。

また、ひびわれ発生状態での繰り返し荷重を受けるXF-C, YF-B, YF-Fの引張応力発生荷重は、20%程度減少するものもあり、有効プレストレスも減少していると考えられる。

(2)破壊荷重および破壊時曲率

3.2.4.2に示すように、繰り返し荷重を受けるPCパイプの破壊荷重は、繰り返し荷重を受けないものの破壊荷重に比較して7~17%増加しており、この増加量は荷重履歴によらないと思われる。このことは、PCパイプの破壊荷重が、PC鋼材量及びその降伏点、強度等に大きく依存していることを考えれば、PC鋼材が加工硬化したためと考えられ、加工硬化は、疲労の第3段階までは、荷重履歴によらず、ほぼ一定と考えられるため、PCパイプ破壊荷重は、荷重履歴によらず、ほぼ一定量増加していることが説明される。

破壊時曲率については、繰り返し荷重を受けるPCパイプの破壊時曲率は、繰り返し荷重を受けないものに比較して20~70%低下しているのが認められる。この原因としては、PC鋼材の加工硬化、PC鋼材とコンクリートとの付着の劣化、残留ひずみ、コンクリートの圧縮最大ひずみの変化もしくは応力-ひずみ関係の変化などが考えられるが定量的な説明は困難である。

これらの原因のうち影響の大きなものはPC鋼材の物性変化と考えられるが、その他の因子の影響の程度について考察すると次のようである。

残留ひずみについては、残留ひずみによって有効な圧縮ひずみ能力が減少するために、破壊時曲率が減少すると考えられるのであるが、残留ひずみはたかだか100 μ であるのに対し、最大圧縮ひずみは2000~3000 μ であるのでその影響の程度は数%であると考えられる。

また、付着性状の劣化が主要因であれば、破壊荷重も

低下するはずであるが、破壊荷重は低下していないため、主要因ではないと考えられる。

さらに、コンクリートの物性変化が主要因であれば、両振り荷重の場合、静的破壊試験時の圧縮側コンクリートにも、両振り荷重時に引張側となり、ひびわれが発生して物性変化が激しいことが予想され、片振りのものより両振りの場合のほうが破壊時曲率が低下することが考えられるのであるが、試験では、片振りと同振りの低下の差はなく、主要因とは考えにくい。

最後のPC鋼材の物性変化(加工硬化を含む)については、他の要因が主要因とは考えにくいことおよび破壊時曲率の低下の著しいXF-C, YF-FのPC鋼材の荷重履歴は後述するように400万回疲労限度を越えているということより、主要因と考えられる。

(4)たわみ、ひずみ、 EI 、曲率の関係

繰り返し荷重が比較的小さいもの、もしくは、繰り返し荷重が大きくとも、繰り返し回数の小さい場合には、バラツキはあるものの、たわみ、ひずみ、曲率は徐々に減少し、 EI は徐々に増加するようである。この主な理由は、PC鋼材の加工硬化であるが、片振りの場合は残留ひずみの影響による加工硬化、引張応力発生以前では3.1.2.2で述べたコンクリートヤング率の増加ということも考えられる。

また、繰り返し荷重が大きく繰り返し回数も大きな場合には、たわみ、ひずみ、曲率は増加し、 EI は減少するが、この原因は、PC鋼材が疲労の第4段階にはいるためと考えられる。

(5)ひびわれ幅と荷重の関係

ひびわれ幅と荷重の関係に対しても(4)と同様のことが言える。すなわち、繰り返し荷重の小さな範囲では、ひびわれ幅は、同じかやや減少の傾向を示し、後述する400万回疲労限以上の荷重では、 $N=10^5$ または 10^6 で増加の傾向を示す。

(6)疲労寿命との関係

今まで述べたように、繰り返し荷重を受けるPCパイプの諸性状の変化は、主としてPC鋼材の疲労の程度と関連づけられる。

PC鋼材のひずみ、応力をひびわれ発生後も正確に求めることは、計算にしろ実測にしろ、ひびわれ近傍の応力集中を考えると、ある程度の精度以上は困難である。また、疲労現象は、本質的に確率的なものであるため、疲労寿命の予測も、ある程度の精度以上は困難である。

しかしながら、本試験結果と付録-4の方法IIにより鋼材応力を求めHilms & Eksbergの式によって計算した疲労寿命を比較すると疲労性状をある程度予測すること

繰り返し曲げを受けるPCパイルの力学的性質

表-25 PCパイル疲労寿命の算定

パイルの種類	繰り返し荷重 (t)	鋼線の応力 (kg/cm ²)			疲労寿命及び累計回数比		
		間接測定値	計算値①	計算値②	間接測定値に対するもの	計算値①に対するもの	計算値②に対するもの
XF-A	0~3	8575~10775	8575~11140	6860~11173	3.19×10^6 (0.31)	8.45×10^5 (1.18)	2.28×10^4 (45.45)
XF-B	-1.2~1.2	7136~7716	8370~8780	6622~7098	7.10×10^{11} (<0.25)	1.91×10^{12} (<0.25)	5.07×10^{12} (<0.25)
XF-C	0~3	7426~9019	8575~11140	6860~11173	9.95×10^7 (<0.25)	8.45×10^5 (1.18)	2.28×10^4 (45.45)
YF-A	0~3	7800~8251	7230~7674	5786~6383	4.47×10^{12} (<0.25)	6.88×10^{12} (<0.25)	1.06×10^{12} (<0.25)
YF-B	0~5	6843~9300	7230~8496	5786~7927	3.01×10^6 (0.33)	7.80×10^8 (<0.25)	1.65×10^7 (<0.25)
YF-C	-3~3	7107~8493	6786~7674	5189~6383	3.72×10^8 (<0.25)	2.11×10^{10} (<0.25)	3.42×10^9 (<0.25)
YF-D	-3~3	7312~8562	6786~7674	5189~6383	8.33×10^8 (<0.25)	2.11×10^{10} (<0.25)	3.42×10^9 (<0.25)
YF-E	-5~5	7013~8861	5964~8496	3645~7927	3.26×10^7 (<0.25)	3.55×10^6 (0.28)	1.02×10^5 (9.80)
YF-F	-5~5	6395~9045	5964~8496	3645~7927	1.95×10^6 (0.51)	3.55×10^6 (0.28)	1.02×10^5 (9.80)

注：()内は100万回に対する累計回数比

ができる。

表-25 に本試験におけるPCパイルの繰り返し荷重およびその時のPC鋼材応力の計算値および間接測定値を示し、さらに、Hilms & Eksberg の式を用いて計算した疲労寿命、併せて Miner 仮説による累計回数比も示した。

なお、PC鋼材応力計算において、① $E_c=350000\text{kg/cm}^2$ および有効プレストレスとしてX型 43.8kg/cm^2 Y型 101.2kg/cm^2 および② $E_c=300,000\text{kg/cm}^2$ および有効プレストレスとしてX型 $43.8 \times 0.8=35.04\text{kg/cm}^2$ 、Y型 $101.2 \times 0.8=81.0\text{kg/cm}^2$ として計算し、表-25に併せて示した。今まで検討してきた内容とこの表より、PC鋼材応力として間接測定値を用いて計算した疲労寿命が400万回以下のもは、繰り返し回数 $N=10^6$ (累計回数比0.25以上) までに、疲労破壊(XF-A)したり引張応力発生荷重、 EI が低下し、たわみ、ひびわれ幅が増加(YF-B, YF-F)したり、何らかの劣化現象が認められた。また、PC鋼材応力計算値としては、YF-Bを除いて、PC鋼材応力間接測定値は、計算値①でほぼ安全側に計算されるが、YF-Bも含めて安全側とするためには、計算値②を用いねばならない。

以上のことより、バラッキという問題はあがるが、PC

鋼材応力を計算し、PCパイルの疲労寿命、累計回数比を求めて、PCパイルの繰り返し荷重による諸特性の変化を一応予測することができるようである。

4. 溶接接合部を有する部材の検討

2章で、接合部を有する部材に要求される性質および現状では溶接接合がその要求に最も近いものであることを述べた。本章では、溶接接合を有するPCパイルについて、本体同様の検討を加える。

4.1 従来の研究の経緯および整理

本節では、溶接接合を有するPCパイルの研究の経緯および整理を、「繰り返し荷重を受けない部材曲げ特性に関するもの」および「繰り返し荷重の影響に関するもの」の2つに分けて述べる。

4.1.1 繰り返し荷重を受けない部材の曲げ特性

理論的には、3.1.1で述べた単一部材とはほぼ同様である。

(1)引張応力発生荷重およびひびわれ発生荷重

いずれも、単一部材と同様に弾性理論で計算することが出来る。ただし、鋼板とコンクリートとの境界面でのひびわれ発生については、この境界での曲げ強度が弱い

と考えられるため、この面におけるひびわれ発生荷重は、単一部材でのひびわれ荷重より小さなことが考えられる。なお、境界面でひびわれが発生しても、鋼板があるため目視は困難であり、本試験では、ずれ量としてホイットモアストレインゲージで測定したものをを用いた。

(2)破壊荷重および破壊時の曲率

溶接接合の場合、溶接部の強度が十分であれば、破壊荷重は、単一部材同等以上であるとされている。また、破壊時の曲率は、接合部の補強の程度によって異なるが、補強が十分であれば、曲げ剛性も大きくなり、したがって、破壊時の曲率は小さくなることが考えられる。

(3)たわみ、ひずみ、 EI 、曲率と荷重の関係

本研究で用いる溶接接合は、強度および一体性を十分確保するため4.2.2で述べる様に、接合部近傍を鋼板で補強してある。このため、剛性が単一部材よりも大きくなり、それに伴い、たわみ、曲率は減少することが予想される。

(4)ひびわれ幅と荷重の関係

接合部とPCパイルの一体性が完全であれば、単一部材と全く同じと考えてよい。ただし、鋼板とコンクリート境界面での付着強度あるいは曲げ引張強度はそれほど期待することはできず、この部分でのひびわれ幅あるいはずれ量に注意する必要がある。

4.1.2 繰り返し荷重の影響について

繰り返し荷重の影響に関しても、3.1.2で述べた単一部材とほぼ同様のことが言える。

相違点としては、溶接部及びコンクリートと鋼板境界部に関する影響があらう。溶接部については、単一部材の破壊モーメントと同一モーメントが溶接部に作用した場合に、ほぼ溶接鋼材が降伏する様なものとしたため、繰

り返し荷重による溶接部応力は、疲労限以下であると考えられる。このため、溶接部強度が低下することはなく、また、剛性も低下しないと考えられる。

コンクリートと鋼板境界部に関しては、適切な理論及び実験はほとんどない現状であり、本研究では試験結果を中心に検討する。

4.2 溶接接合部を有する部材の曲げ試験

4.2.1 試験の概要

2.3.2で述べた事項に対応して、溶接接合部を有するPCパイルの曲げ試験を、単一部材とほぼ同様に実施する。すなわち

(1)繰り返し荷重を受けないものについては、①ひびわれ荷重及び引張応力発生荷重、②破壊荷重および破壊時の曲率、③たわみ、ひずみ、 EI 、曲率と荷重の関係、④ひびわれ幅と荷重の関係の4つについては、単一部材と同様な測定を行い、さらに、⑤溶接部及び補強鋼板のひずみ等についても測定を行う。

(2)繰り返し載荷の影響については、(1)の①～⑤について測定を行う。特に、⑤に関連して、接合部近傍の一体性について注意を払う必要がある。

4.2.2 供試体の概要

本研究で用いる溶接接合部を有するPCパイルの概要を図-35に示す。これは、3.2.2で述べたY型パイロと断面および有効プレストレス量が等しく長さが半分のパイロを溶接により接合したものであり、接合部の概要も図-35に併わせて示す。

パイロ自体の使用材料および養生は、3.2.2と全く同じであり、接合部の使用材料、溶接方法、特徴について以下に述べる。

(1)使用材料

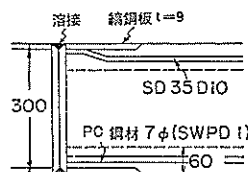
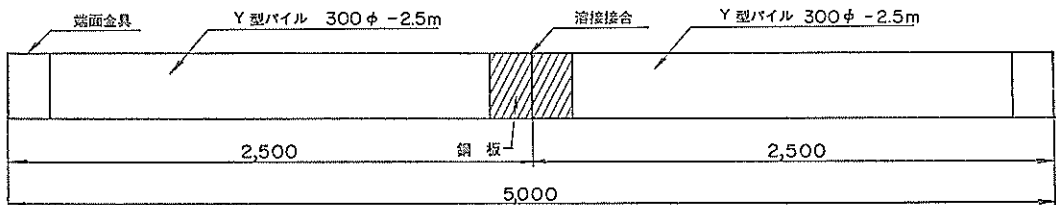


図-35 Z型パイロ概要図

端面金具 S S 55

縞鋼板 S S 41

(2)溶接方法

アーク手溶接で余盛を十分に取り、後に、縞鋼板に沿って滑らかな面に仕上げる。

(3)本接合法の特徴(文献④より)

従来慣用していたPCパイルの溶接接合は、接合部曲げ剛性EIが、単一部材と比べて小さくなる傾向があった。この理由は、図-36に示されるように、パイル本体引張側の引張合力作用位置と、これを伝達する溶接部との不一致による耐圧板の曲げ変形である。耐圧板は、パイルコンクリート端面にPC鋼材によって圧着されているが、耐圧板外周位置でこれを引張れば、引張力による曲げが作用し簡単にひきはがされることは当然であり、その結果同図に示すように引張側で耐圧板とコンクリー

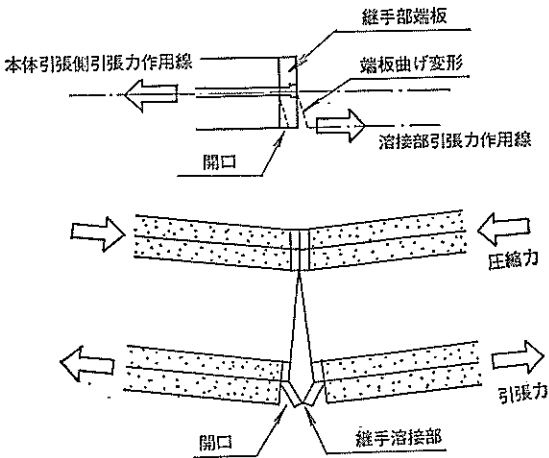


図-36 既往の溶接接合曲げ剛性が著しく低下する理由

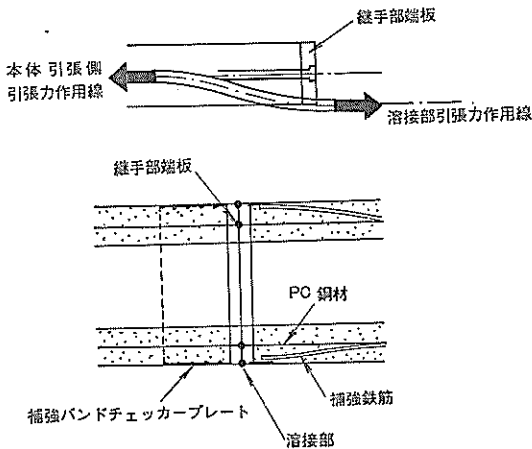


図-37 溶接接合曲げ剛性改良の原理と方策

ト端部とが肌ばなれをおこしてこの部分が大きく開口して曲げ剛性が著しく小さくなる。少なくとも曲げひびわれ発生以前の弾性範囲において、接合部が単一部材と同等の曲げ剛性を示すように改良するには、図-37に示すように引張合力作用線がパイル本体部から溶接部に平滑に移行するようにすることである。その方策としては耐圧板が曲げ変形をおこさないように耐圧板曲げ変形をとめることである。同図にはその一例として端部補強鋼板としてチェッカープレートなどのコンクリートとの付着が十分であるものを用い、コンクリート表面に完全定着する方法、および、補強鉄筋を溶接部近傍に取り付けて補強する方法を示してある。この接合法によれば、静的試験では本体以上の剛性を有するとされている。

本研究では、端部補強鋼板として縞鋼板(チェッカープレート:S S 41)を用い、かつ、補強鉄筋としてS D 35 : D 10を用いた十分に補強された溶接接合部を用いて曲げ特性を検討する。

4.2.3 測定項目および測定法

(1)供試体の設置

3.2.3 に示す単一部材の設置と同じである。

(2)使用した計測機器

3.2.3 に示すものと同じ機器であるが、図-38に示すように、ワイヤストレインゲージおよびオイトモアストレインゲージ測定位置が異なる。これは、接合部に関して、溶接部ひずみ、鋼板部ひずみおよび鋼板とコンクリートのずれ量を測定するためである。

(3)載荷手順

3.2.3 に示すものと同様であるが、繰り返し荷重を受けないものの載荷手順を表-26 に、繰り返し荷重を行うものの載荷手順を表-27 に示す。

(4)ひびわれ荷重および引張応力発生荷重の測定法

3.2.3 に示すものと同様であるが、接合部鋼板とコンクリート境界部のひびわれ若しくはずれによって、たわみ変化がやや急になる点が、パイル本体のひびわれによるたわみ変化が急になる点よりも前に表われるが、

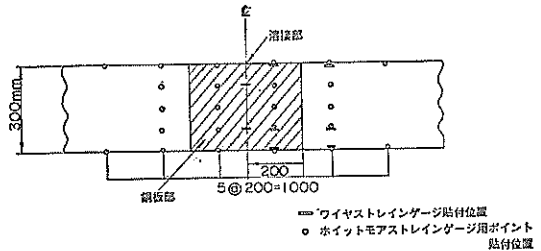


図-38 Z型パイルワイヤストレインゲージ及びオイトモアストレインゲージ用ポイント貼付位置

表-26 Z型パイル静的試験載荷手順

パイルの 種 類	載 荷 手 順		
	第1回載荷	第2回載荷	第3回載荷
Z S-A	0~7.5	0~破壊	—
Z S-B	0~7.5	0~破壊	—
Z S-C	0~7.5	0~-3	0~破壊

(単位：t)

表-27 Z型パイル繰り返し試験載荷手順

パイルの 種 類	載 荷 手 順			
	初 期 載 荷			繰り返し 載 荷
	第1回載荷	第2回載荷	第3回載荷	
Z F-A	0~7.5	0~5	—	0~3
Z F-B	0~7.5	0~5	—	0~5
Z F-C	0~7.5	0~-7.5	0~5	-3t~3
Z F-D	0~7.5	0~7.5	0~5	-5t~5

(単位：t)

本研究では、これをもってひびわれ発生荷重と考える。

(5)破壊荷重および破壊時の曲率の測定法

3.2.3 に示すと同様にして測定する。破壊時の曲率については、接合部とパイル本体部を区別していないため両者の平均値的な曲率が測定される。

(6)たわみ、ひずみ、EI、曲率の測定法

たわみ、ひずみは、3.2.3 と同様にして測定する。EI、曲率については、等曲げモーメント区間での平均値として、3.2.3 と同様の方法で求める。さらに、接合部について、溶接部及び鋼板部の EI を付録-9に示す方法で求める。

(7)ひびわれ幅の測定法

3.2.3 法と同様にして測定する。

4.2.4 試験結果

4.2.4.1 繰り返し荷重を受けない部材の曲げ試験

(1)引張応力発生荷重およびひびわれ発生荷重

表-28 に、繰り返し荷重を受けない部材の曲げ試験での、引張応力発生荷重およびひびわれ発生荷重の試験結果をY型の試験結果と比較して示す。

この表より、引張応力発生荷重は、Y型とほぼ同一であるが、ひびわれ発生荷重はY型より低く、引張応力発生荷重を若干上回る程度である。これは、コンクリートと鋼板境界面の付着力が弱く、ここがずれたりあるいはひびわれを生ずることにより、たわみ-荷重曲線に急変点ができるものと思われる。

表-28 Z型パイルひびわれ発生荷重および引張応力発生荷重

パイルの 種 類	ひびわれ発生荷重		再びひびわれ荷重 (引張応力発生荷重)	
	試験値	Y型平均値	試験値	Y型平均値
Z S-A	3.4	4.26	2.9	2.92
Z S-B	3.2		2.8	
Z S-C	3.5		2.8	

(単位：t)

表-29 Z型パイルの破壊荷重および破壊時曲率

パイルの 種 類	破壊荷重(t)		破壊時曲率(10 ⁻⁴ cm ⁻¹)	
	試験値	Y型平均値	試験値	Y型平均値
Z S-A	13.7	12.32	2.61	4.11
Z S-B	10.2		—	
Z S-C	13.0		2.64	

(2)破壊荷重および破壊時曲率

表-29 に、繰り返し荷重を受けない部材の曲げ試験での、破壊荷重および破壊時曲率の試験結果をY型と比較して示す。

この表より、破壊荷重はY型同等以上であり、また、破壊時曲率は、接合部の剛性が高いので、Y型より低いことが認められる。

(3)たわみ、ひずみ、EI、曲率と荷重の関係

図-39 に、たわみと荷重の関係を示す。この図より計算値は、試験値よりもやや大きいことが分る。

図-40 に圧縮側コンクリートのひずみと荷重の関係を示す。この図より計算値と試験値はよい一致を示す。

図-41 に、EI と荷重の関係を示す。この図よりX型、Y型パイルとはほぼ同傾向で、ひびわれ発生前は、全断面有効として計算した EI にほぼ等しく、荷重が増加するとRCとしてのEIに近づくことが分る。

図-42 に、曲率と荷重の関係を示す。この図よりたわみと同様に計算値は、試験値よりもやや大きいことが分る。

次に、接合部に関連した試験結果について述べる。

図-43 に、溶接部ひずみと荷重の関係を示すが、溶接部を円環として弾性理論で算出した計算値と試験値は非常に良い一致を示す。

次に、圧縮側鋼材ひずみと荷重との関係を図-44 に示す。この図から、圧縮側鋼材ひずみは、鋼材とコンクリ

繰返し曲げを受けるPCパイルの力学的性質

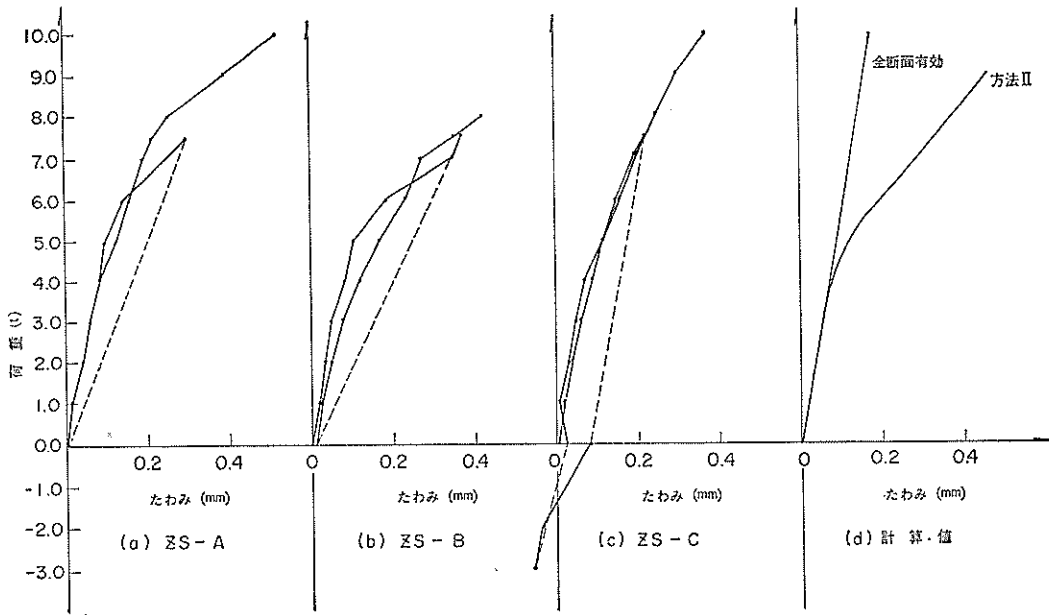


図-39 Z型パイルたわみ-荷重曲線

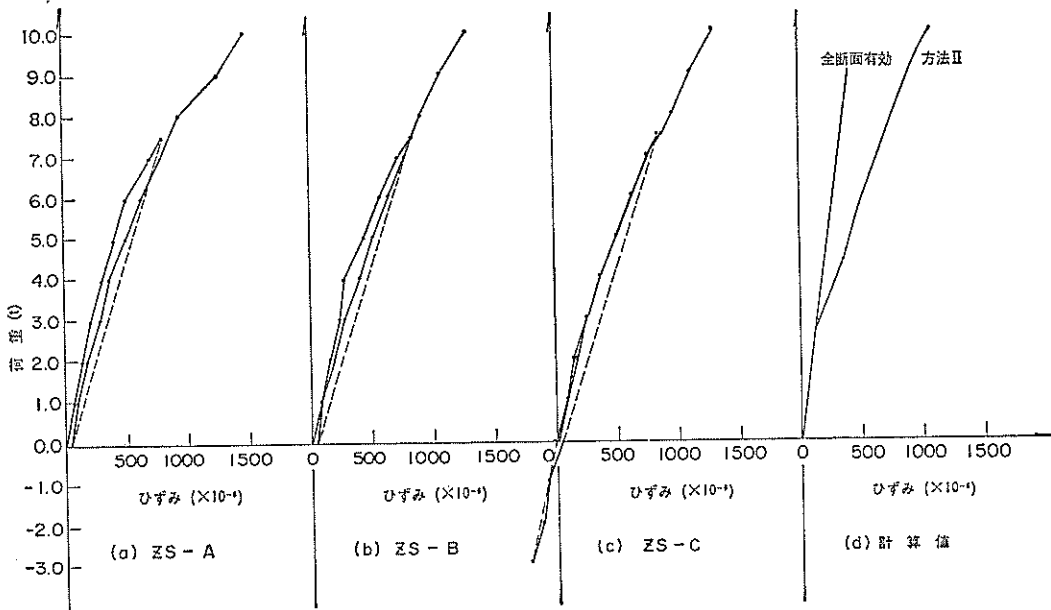


図-40 Z型パイルコンクリートひずみ-荷重曲線

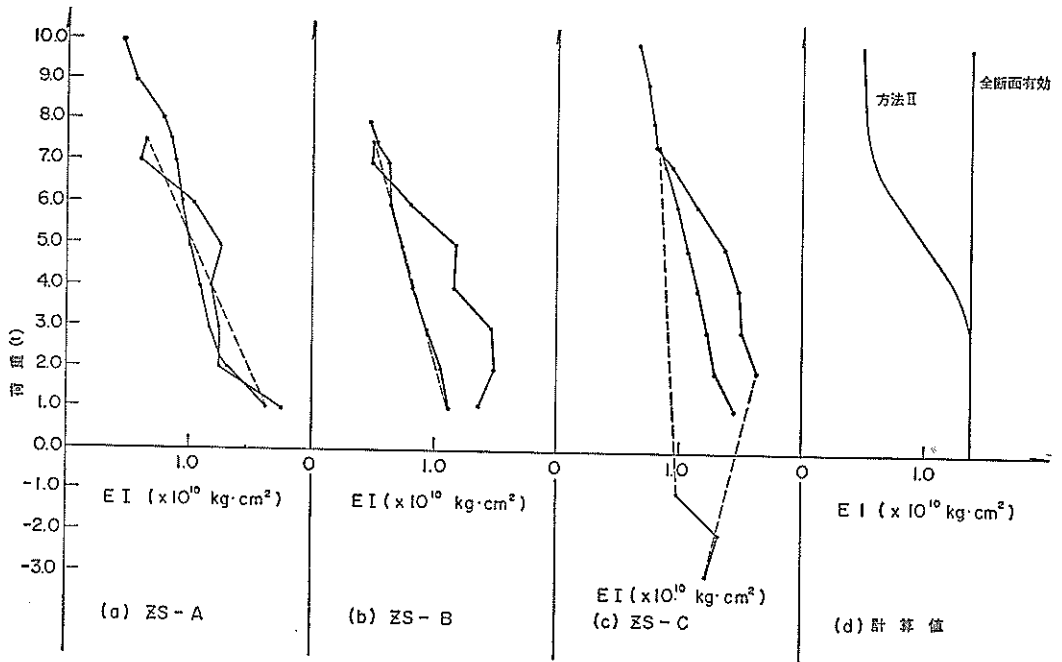


図-41 Z型パイル EI—荷重曲線

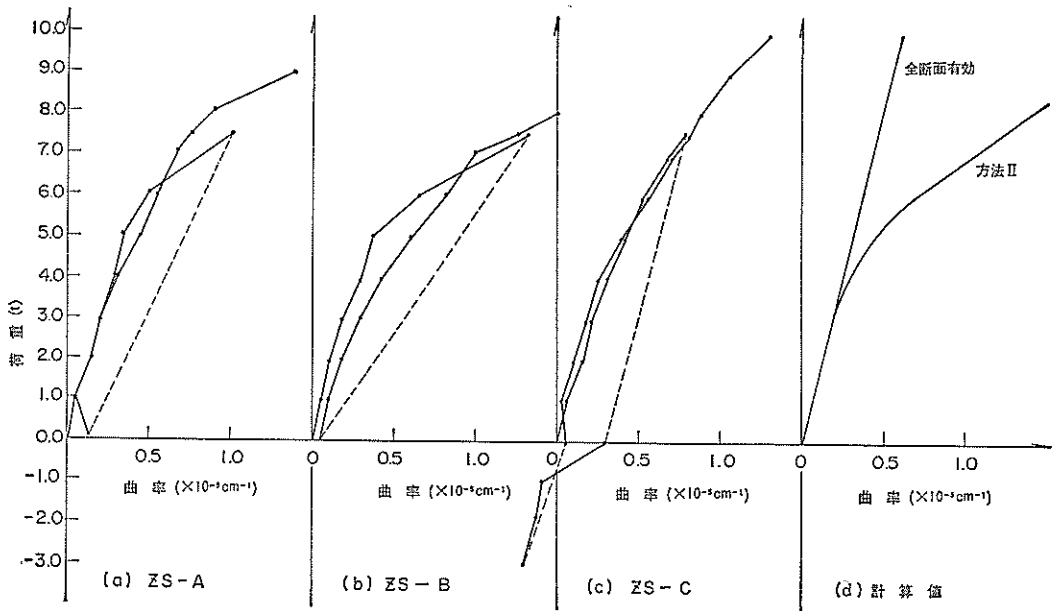


図-42 Z型パイル曲率—荷重曲線

繰返し曲げを受けるPCパイルの力学的性質

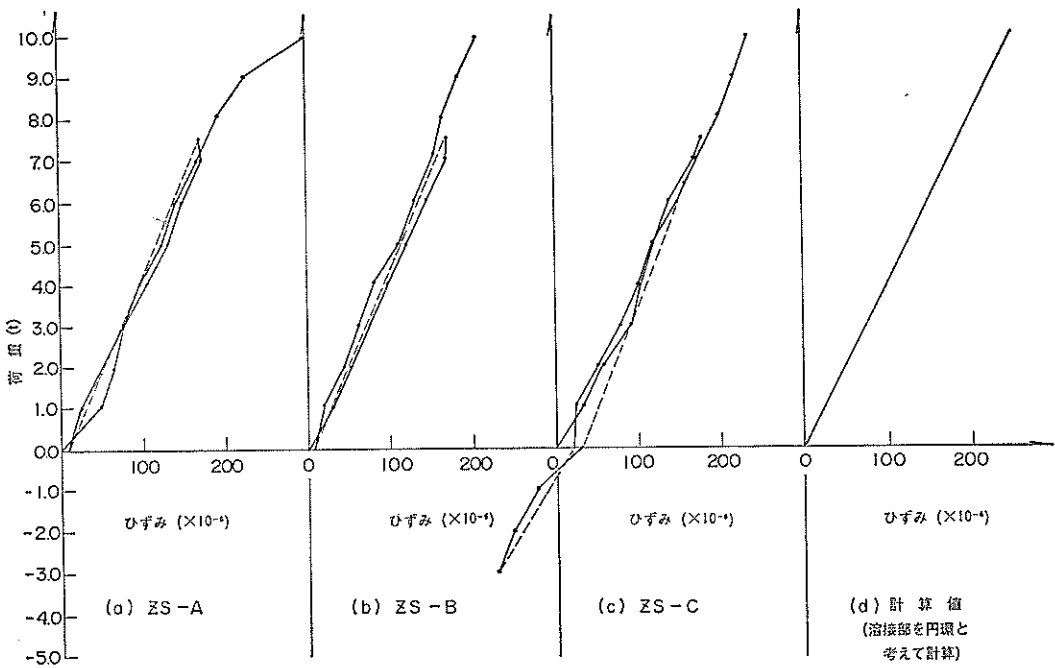


図-43 Z型パイル溶接部ひずみと荷重の関係

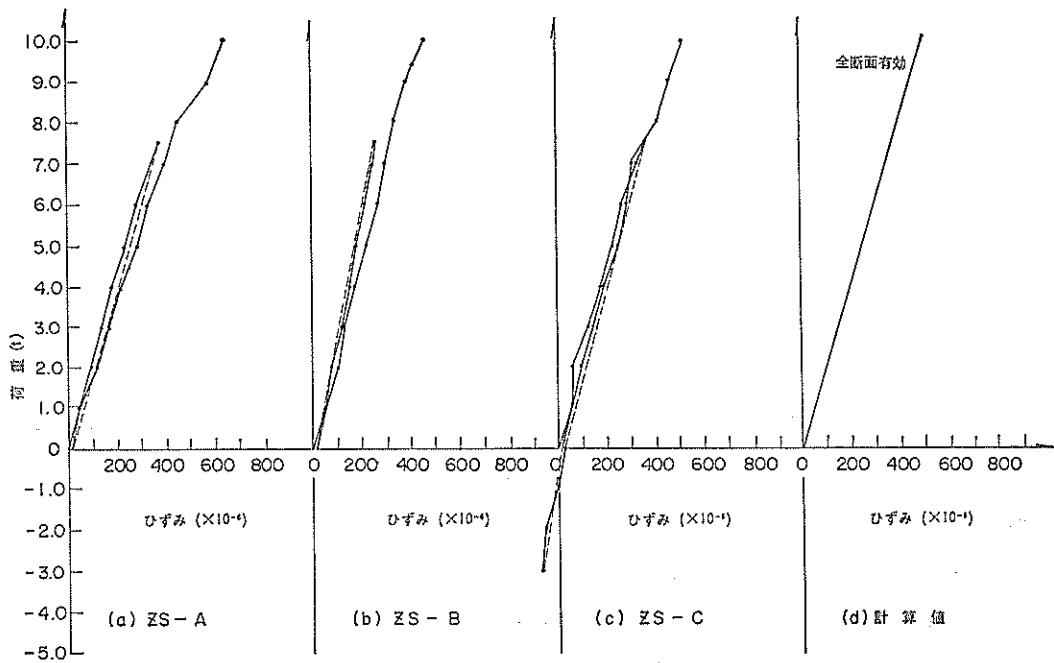


図-44 Z型パイル圧縮側鋼板部ひずみと荷重の関係

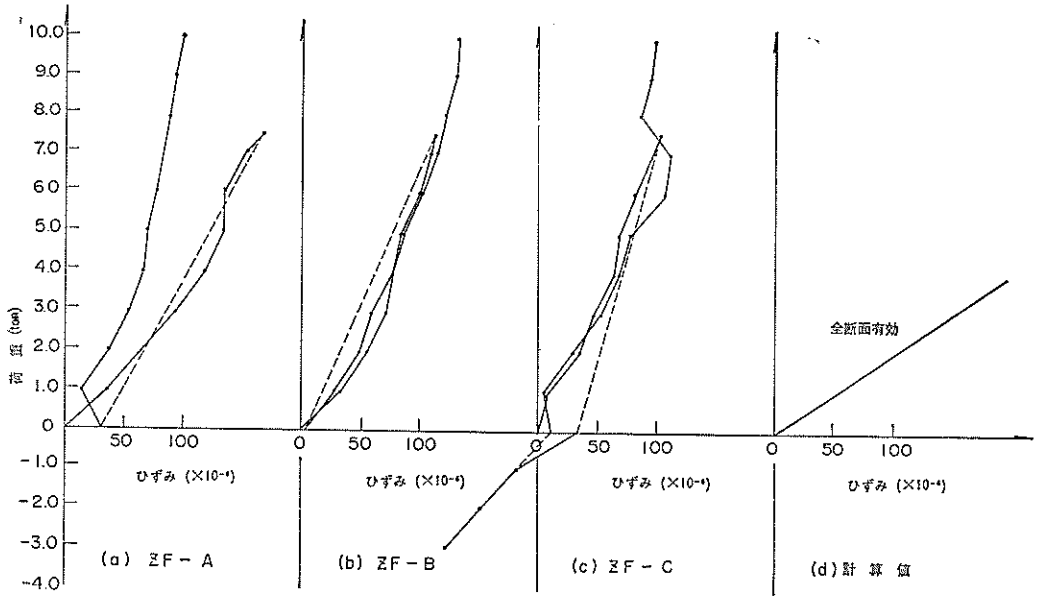


図-45 Z型パイル引張側鋼板部ひずみと荷重の関係

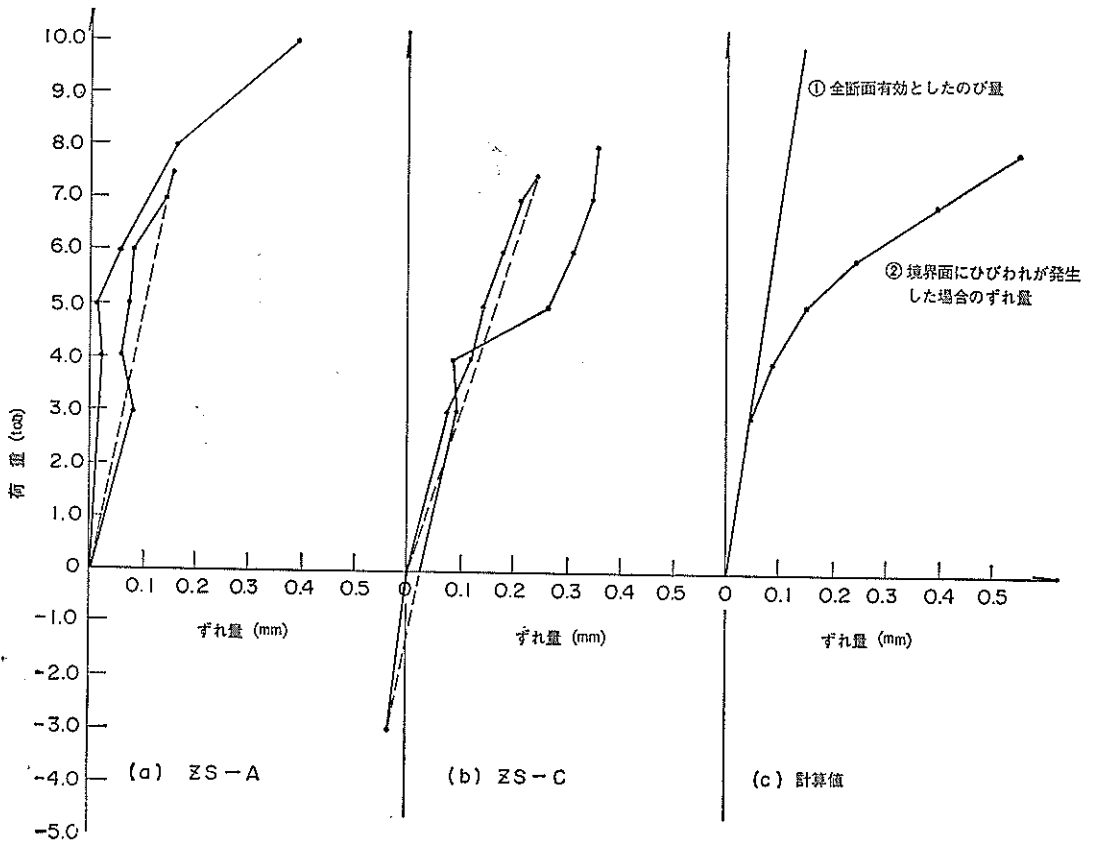


図-46 引張側コンクリート鋼板境界面ずれ量と荷重の関係 (ホイットモアストレインゲージによる)

繰り返り曲げを受けるPCパイルの力学的性質

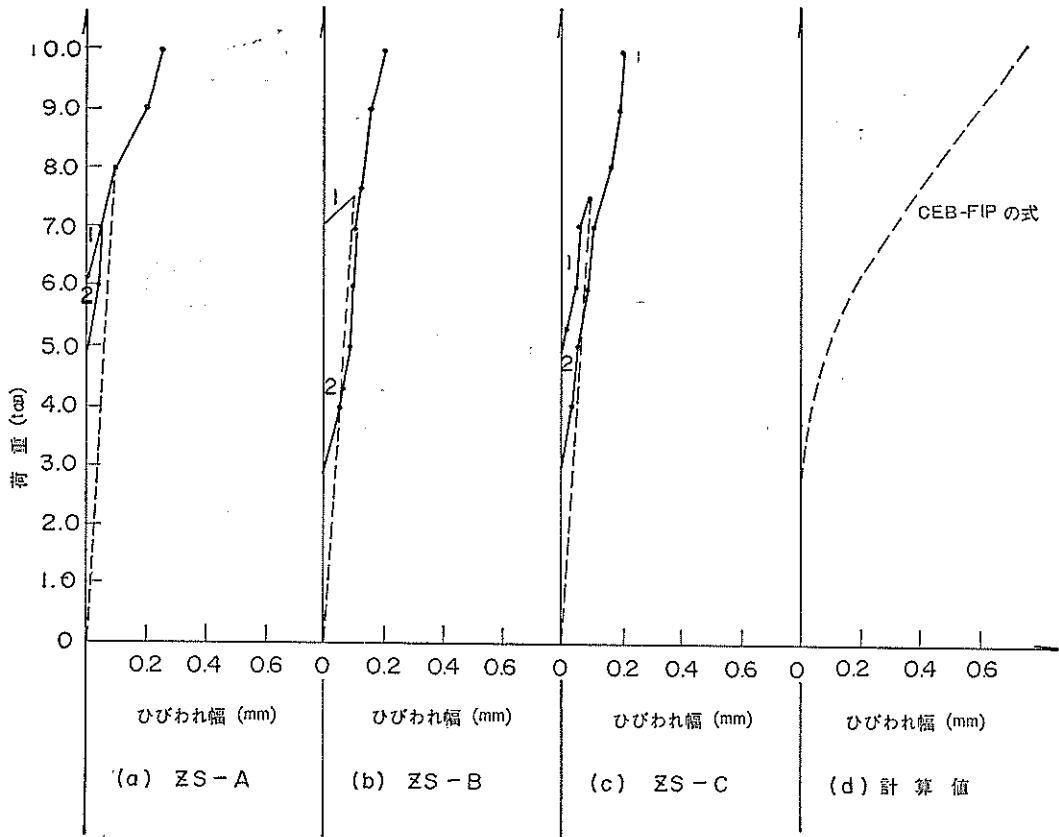


図-47 Z型パイルひびわれ幅—荷重の関係

Z型PCパイル曲げひびわれ展開図

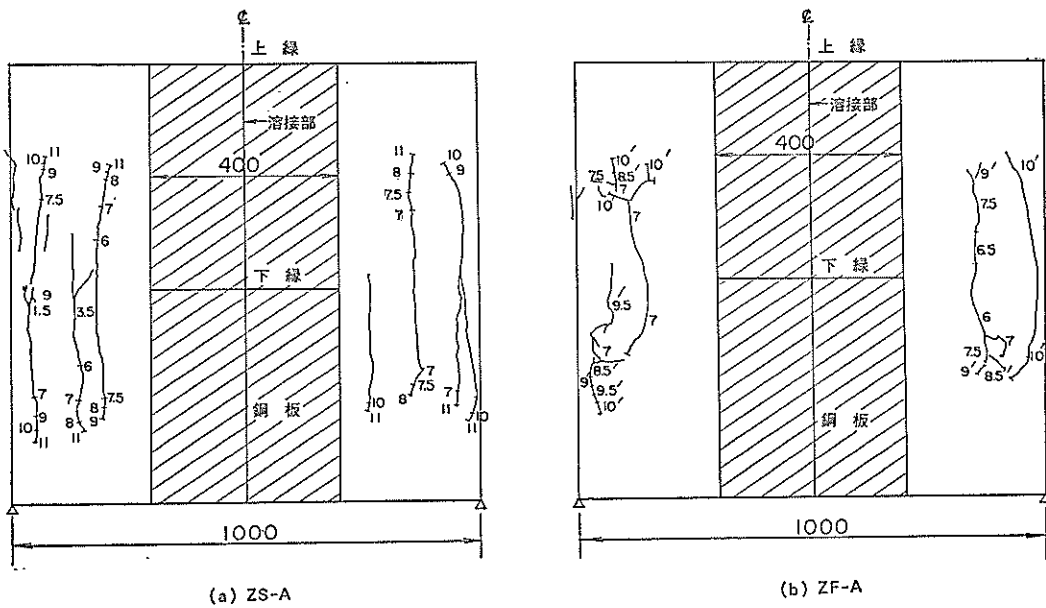


図-48 Z型パイルひびわれ展開図

表-30 引張応力発生荷重の変化

パイルの 種 類	繰 り 返 し 回 数							繰り返しを行なわないものの平均値
	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	
ZF-A	2.9	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.83
ZF-B	2.8	2.8	—	—	2.8	2.8	2.8	
ZF-C	2.8	2.8	2.9	2.8	2.9	2.8	2.8	
ZF-D	3.0	2.8	2.8	2.8	—	2.9	2.8	

(単位：t)

表-31 繰り返し荷重を受けた後の型パイルの破壊荷重および破壊時曲率

パイルの 種 類	片 振 り or 両 振 り	破 壊 荷 重(t)		破 壊 時 曲 率 (×10 ⁻⁴ cm ⁻¹)	
		試 験 値	繰り返しを行ないものの平均値	試 験 値	繰り返しを行ないものの平均値
ZF-A	片 振 り	11.8	12.3	1.21	2.63
ZF-B	片 振 り	13.3		1.57	
ZF-C	両 振 り	13.4		1.54	
ZF-D	両 振 り	15.1		2.24	

ートの付着が完全だとして算出した計算値とよい一致を示す。しかしながら、図-45 に引張側鋼板ひずみと荷重との関係を示すが、このひずみは、付着が完全だとして算出した計算値をかなり下回る。

さらに、図-46 に、ホイットモアストレインゲージにより測定した引張側コンクリートと鋼材境界面のずれ量と荷重の関係を示す。また、計算値として境界面に全くひびわれが発生せず、全断面有効としたものを計算値①、境界面にひびわれが発生したとして、ひびわれ幅と①とを加えたものを計算値②として計算したものを示す。これによれば、測定値は、①と②との間にあり、ずれがあったとしても、このずれ量は単一部材のひびわれ幅以下であると判断される。

(4)ひびわれ幅と荷重の関係

図-47 に Z 型パイルのひびわれ幅と荷重の関係を示す。Z 型パイルのひびわれ幅を Y 型のもの比較すると、若干小さめの値である。

ひびわれ性状について、図-48 に繰り返し荷重を受けないものおよび繰り返し荷重を受け静的破壊試験を行ったパイルの試験時等曲げモーメント区間でのひびわれ性状図を示すが、繰り返し荷重を受けるものは、小さな枝分れしたひびわれが多数発生した。

4.2.4.2 繰り返し荷重の影響について

(1)引張応力発生荷重 (再びひわれ荷重)

表-30 に、引張応力発生荷重の変化を示す。X 型、Y 型と同様に、繰り返し回数とともにやや引張応力発生荷重は低下する。特に、繰り返し荷重が大きく両振りの ZF-D の低下が大きい。

(2)破壊荷重および破壊時曲率

表-31に、10⁶回繰り返し荷重を受けた後の静的試験における破壊荷重および破壊時曲率を示す。

この表より、バラツキはあるものの、破壊荷重は、繰り返し荷重を受けないパイルの破壊荷重と同等以上である。また、破壊時曲率は、X 型、Y 型と同様に、繰り返し荷重を受けることによって低下し、片振りのものが著しく低下する。しかし、繰り返し荷重の大きさによる影響は、明確ではない。

(3)たわみ、ひずみ、EI、曲率と荷重の関係

表-32 に z 型パイル中央たわみの繰り返し荷重による変化を示す。残留たわみは、ZF-A におけるものが最大で 0.90mm、この場合の最大荷重 7.5 t でのたわみが 10.91mm で、これの約 8 % であり、回復したたわみは約 92 % で、単一部材である Y 型同等以上の回復を示す。また、0 ~ 3 t、0 ~ 5 t、のたわみともに、すべてのパイルで減少傾向を示し、この傾向は Y 型で増加するものがあつたのに対しよい傾向である。

表-33 に Z 型パイル圧縮側コンクリートひずみの変化を示す。残留たわみを含めてすべてのひずみは、Y 型パイルのひずみの約半分である。また、バラツキはあるものの、ひずみはすべて減少傾向を示す。

表-34 に、Z 型パイル EI の変化を示す。繰り返し回数が増えるにつれて、 EI は横ばいもしくはやや増加傾向を示す。

表-35 に Z 型パイル曲率の変化を示す。 EI の変化から当然考えられるように、曲率は横ばいからやや減少といった傾向を示す。

次に、接合部に関連したひずみについて述べる。

表-36 に、溶接部ひずみの変化を示す。これによると、溶接部のひずみは、バラツキはあるものの、ほとんど変化しないことが認められる。

表-37 に、圧縮側鋼板ひずみの変化を示す。これも、バラツキはあるものの、一定かやや減少するようである。

さらに、引張側鋼板ひずみ、引張側コンクリート鋼材境界面ずれ量の繰り返し荷重による変化をそれぞれ表-38 および表-39 に示す。これらも、バラツキはあるものの全体としては、一定かやや減少するようである。

(4) ひびわれ幅と荷重の関係

表-40 に、Z 型パイルひびわれ幅の繰り返し荷重による変化を示す。これより、Z 型パイルひびわれ幅は、繰り返し荷重によって、一定あるいは減少の傾向にあることが分る。

4.3 考察

4.3.1 繰り返し荷重を受けない部材の曲げ試験について

(1) 引張応力発生荷重およびひびわれ発生荷重

引張応力発生荷重は、Y 型パイルでのものおよび計算値とはほぼ一致し、単一部材とはほとんど同じである。

ひびわれ発生荷重については、Y 型パイルでのものを大きく下回っている。本試験におけるひびわれ荷重の定義は、たわみ-荷重曲線の曲率変化より、ひびわれ発生を予測するもので、Z 型パイルでは、コンクリートと接合部鋼板との付着がきれ、ずれまたはひびわれが発生する現象に相当する。したがって、Z 型パイルでは、コンクリートと接合部鋼板との付着は、ほとんど期待できないことが考えられる。

しかしながら、前述したように、プレレストコンクリート海洋構造物の場合、ひびわれは発生していると考えた方が実際のであり、また、後述するように、Ⅱ種を考えないので、設計上は問題とならない。

(2) 破壊荷重および破壊時曲率

Z 型パイルの破壊荷重は、Y 型パイル破壊荷重と同等

以上で本接合法が全強であることを示す。

また、破壊時曲率は、Y 型パイルのそれよりも低下し、これは、溶接接合部の剛性が高く、パイル破壊時においても弾性域であり剛性が高く、このため、破壊時曲率は低くなる。

(3) たわみ、ひずみ、 EI 、曲率と荷重の関係

単一部材である Y 型と比較して、一般に、たわみ、曲率は低下し、 EI は増加するが、これは、接合部剛性が高いためである。接合部に関連するひずみについては、溶接部ひずみは、溶接部を円環断面として計算したものにほぼ等しく、溶接は満足すべきものと考えられる。また、圧縮側鋼板ひずみは、全断面有効とした計算値と概略一致するが、引張側鋼板ひずみは、計算値の 1/3 程度である。この原因は、圧縮側では、コンクリートと鋼板の付着は十分であるが、引張側では、ずれがあるためと考えられる。さらに、ホイットモアストレインゲージを用いたずれの測定によるとずれのあることが明らかとなる。しかし、このずれは Y 型パイルのひびわれ幅と同等以下でもあり、単一部材とは異なった設計上の配慮をする心配はないと考えられる。

(4) ひびわれ幅と荷重の関係

Z 型パイルと比較して、ひびわれ幅は、やや小さく、CEB-FIP の式で安全側に算定される。このため特に、接合部があるからといって配慮する必要はない。

4.3.2 繰り返し荷重の影響について

単一部材である Y 型とほぼ同じ考察がされるが、本試験の範囲では、Y 型よりも良好な性質を示す。すなわち同一荷重履歴を受ける YF-B ZF-B、と YF-F と ZF-D を比較した場合、YF-B、YF-F はたわみ、ひずみ、ひびわれ幅が増加の傾向を示すが、ZF-B、ZF-D はそのような傾向は認められない。これは、繰り返し荷重を受けない場合と同様に繰り返し荷重を受ける場合にも、接合部を有するパイルを単一部材同等と考えてよいことを示す。ただ、破壊時曲率のみは低下するので注意を要する。また、接合部に関連するひずみ、ずれとも繰り返し荷重によって大きな変化を示さず、設計上特に考慮する必要はない。

5. 設計法についての 2.3 の考察

前章までに述べた PC パイルの試験結果および考察に基き、本章では、海洋環境下における構造部材としての PC パイルの設計に関しての基本的な事項について、2, 3 の考察を行う。この考察の適用範囲は JISA 5335 に適合している PC パイルになるが、多くの部分は PC パイル以外の PC 部材にも十分適用できるものであると思う。

表-32 Z型パイプ中央たわみの繰り返し荷重による変化

パイプの 種 類	片振り または 両振り	0 tでのたわみ (残留たわみ)					0~3t でのたわみ					0~5t でのたわみ					0~7.5t でのたわみ									
		1	10 ¹	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	初期 載荷	1	10 ¹	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	初期 載荷	1	10 ¹	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	初期 載荷	10 ⁶
ZF-A	片振り	90	86	88	74	73	79	75	267	300	296	285	296	291	291	299	495	582	576	579	578	568	562	563	1091	1002
ZF-B	片振り	84	68	64	63	41	—	48	288	315	324	327	316	325	331	326	496	593	610	605	605	604	606	579	1066	974
ZF-C	両振り	90	53	51	64	58	56	54	280	368	344	339	340	313	312	314	534	703	669	659	657	602	582	474	1045	1041
ZF-D	両振り	58	19	16	21	—	15	23	285	370	353	351	357	334	346	344	527	674	651	650	656	583	593	582	1057	1134

(単位: 1/100mm)

表-33 Z型パイプ圧縮線コンクリートひずみの繰り返し荷重による変化

パイプの 種 類	片振り または 両振り	0 tでのひずみ (残留ひずみ)					0~3t でのひずみ					0~5t でのひずみ					0~7.5t でのひずみ									
		1	10 ¹	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	初期 載荷	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	初期 載荷	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	初期 載荷	10 ⁶
ZF-A	片振り	17	17	10	6	5	5	6	111	145	163	162	152	146	153	149	216	219	225	221	219	216	211	210	459	345
ZF-B	片振り	38	36	38	36	37	38	39	164	163	165	174	151	149	139	144	285	292	305	305	288	277	265	259	466	426
ZF-C	両振り	50	47	49	36	48	49	53	128	139	130	128	134	118	121	121	250	267	269	264	264	234	228	227	464	397
ZF-D	両振り	8	8	10	6	7	7	10	128	140	138	136	130	121	130	130	239	250	250	244	244	224	213	223	471	399

(単位: ×10⁻⁶)

表-34 Z型パイルEIの繰り返し荷重による変化

パイルの種類	0~3tでのEI				0~5tでのEI				0~7.5tでのEI						
	初期 荷重	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	初期 荷重	10 ⁶					
ZF-A	1.93	1.70	1.70	1.70	1.79	1.70	1.70	1.70	1.68	1.40	1.40	1.40	1.40	1.08	1.17
ZF-B	1.75	—	1.53	1.53	1.93	1.53	1.88	1.53	1.68	1.42	1.36	1.41	1.55	1.33	1.44
ZF-C	1.75	1.56	1.67	1.79	1.67	1.75	1.67	1.53	1.75	1.30	1.39	1.42	1.32	1.42	1.42
ZF-D	1.84	1.41	1.47	1.50	1.44	1.53	1.84	1.75	1.65	1.51	1.37	1.35	1.32	1.47	1.57
方法Ⅱによる計算値	1.34				1.05				1.05				0.55		

注：計算値は $E_c=350000\text{kg/cm}^2$, $\sigma_{ce}=101.2\text{kg/cm}^2$ としたものの

(単位： $\times 10^{10}\text{kg}\cdot\text{cm}^2$)

表-35 Z型パイル荷重の繰り返し荷重による変化

パイルの種類	0~3tでの曲率				0~5tでの曲率				0~7.5tでの曲率									
	初期 荷重	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	初期 荷重	10 ⁶								
ZF-A	1.4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.6	2.6	3.1	2.9	3.1	3.0	4.8	3.2	6.0	5.4	
ZF-B	1.5	1.5	1.7	1.7	1.4	1.7	1.4	1.7	2.6	3.1	3.2	3.1	2.8	3.2	3.3	3.0	—	5.1
ZF-C	1.1	1.7	1.6	1.7	1.6	1.5	1.6	1.7	2.5	3.3	3.1	3.1	3.3	3.1	3.1	—	—	5.5
ZF-D	1.4	1.8	1.8	1.7	1.8	1.7	1.4	—	2.6	2.9	3.2	3.2	3.3	2.6	2.8	2.6	5.2	5.4
方法Ⅱによる計算値	1.9				4.3				4.3				11.9					

(単位： $\times 10^{-6}\text{cm}^{-1}$)

注：計算値は $E_c=350,000\text{kg/cm}^2$, $\sigma_{ce}=101.2\text{kg/cm}^2$

表-36 Z型パイル溶接部ひずみの繰り返し荷重による変化

パイルの種類	0tでのひずみ(残留ひずみ)				3tでのひずみ				5tでのε _s				7.5tでのひずみ													
	片振り または 両振り	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	初期 載荷	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	初期 載荷									
ZF-A	片振り	10	4	4	7	1	4	2	62	61	65	64	62	51	53	62	104	106	104	103	104	97	96	99	143	152
ZF-B	片振り	16	20	13	14	16	19	20	56	62	62	63	60	58	55	52	95	98	100	95	92	94	96	90	133	132
ZF-C	両振り	7	3	5	8	3	7	6	63	73	74	66	73	64	70	68	124	116	121	114	117	111	109	106	181	160
ZF-D	両振り	9	8	11	6	10	9	9	73	68	62	63	58	63	65	60	111	100	102	102	96	101	101	105	153	161
全断面有効とした計算値		_____							76	_____							122	_____			191					

(単位: ×10⁻⁶)

表-37 Z型パイル圧縮側鋼板ひずみの繰り返し荷重による変化

パイルの種類	0tでのひずみ(残留ひずみ)				0~3tでのひずみ				0~5tでのひずみ				7.5tでのひずみ													
	片振り または 両振り	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	初期 載荷	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	初期 載荷									
ZF-A	片振り	18	11	4	7	5	2	5	112	116	123	110	110	116	125	115	182	194	205	188	191	198	196	196	285	297
ZF-B	片振り	19	13	22	2	18	18	21	121	122	124	129	109	117	108	108	193	194	207	212	200	193	180	176	289	278
ZF-C	両振り	1	3	2	4	4	1	2	109	104	98	98	95	79	82	83	199	191	201	194	195	168	172	168	329	285
ZF-D	両振り	9	8	11	5	5	5	11	87	83	72	83	88	81	77	75	144	143	155	145	151	142	139	140	222	262
全断面有効とした計算値		_____							144	_____							240	_____			324					

(単位: ×10⁻⁶)

表-38 Z型パイル引張制鋼板むすみの繰り返し荷重による変化

パイルの種類	0 t での ϵ_s (残留)					3 t での ϵ_s					5 t での ϵ_s					7.5 t での ϵ_s									
	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	初期 載荷	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	初期 載荷	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	初期 載荷	10 ⁶
ZF-A	10	6	7	6	4	1	1	66	65	42	47	58	38	43	53	92	91	66	72	84	65	68	69	117	108
ZF-B	8	16	3	12	6	5	5	53	56	40	41	55	38	51	31	75	83	68	65	71	67	77	54	102	82
ZF-C	10	13	11	8	9	10	11	65	37	42	37	35	36	33	32	79	66	68	57	65	60	58	58	102	86
ZF-D	3	1	1	3	6	1	4	70	33	27	28	28	36	51	45	88	75	56	53	56	59	79	73	108	118
全断面有効とした計算値	_____							144	_____							240	374								

(単位: $\times 10^{-6}$)

繰り返し載荷を受けけるPCパイルの力学性質

表-39 Z型パイル引張側コンクリート-鋼材境界面ずれ量の繰り返し荷重による変化

(ホイトモアストレインゲージによる)

パイルの種類	0 t での ϵ_s (残留)					3 t での ϵ_s					5 t での ϵ_s					7.5 t での ϵ_s									
	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	初期 載荷	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	初期 載荷	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	初期 載荷	10 ⁶
ZF-A	12	27	61	53	11	—	8	52	53	78	33	19	70	64	52	90	119	105	110	114	145	—	137	195	164
ZF-B	21	50	55	45	50	23	28	60	59	70	75	75	60	85	94	110	129	130	100	135	120	148	136	205	211
ZF-C	13	13	18	13	15	16	24	28	60	60	71	47	48	58	50	89	144	149	135	130	105	106	110	228	261
ZF-D	3	7	4	6	6	13	33	57	109	85	97	95	83	36	58	93	183	176	145	152	138	121	110	280	210
①	_____							45	_____							75	113								
②	_____							45	_____							140	480								

(単位: 1/100mm)

- ① 全断面有効とした計算値
- ② ①にひびわれ幅を加えたもの

表-40 Z型パイルひびわれ幅の繰り返し荷重による変化

パイルの種類	4tでのひびわれ幅						5tでのひびわれ幅						7.5tでのひびわれ幅					
	初期 載荷	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	初期 載荷	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	初期 載荷	10 ⁶
ZF-A	—	0.03	0.02	0.04	0.04	0.03	0.02	0.02	—	0.05	0.08	0.08	0.09	0.08	0.04	0.05	0.12	0.15
ZF-B	—	0.03	0.04	0.03	0.03	0.04	0.03	0.05	—	0.04	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04	0.06	0.20	0.15
ZF-C	—	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	—	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.06	0.06
ZF-D	—	—	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	—	—	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.18	0.15

(単位：mm)

表-41 各基準類による海洋構造物に作用する荷重

基準類 荷重	FIP 国際プレストレスト コンクリート学会	FIP 国際プレストレスト コンクリート学会	ACI アメリカ コンクリート学会	土 木 学 会
荷重の分類	<ul style="list-style-type: none"> 死荷重 活荷重 変形荷重 自然条件荷重 事故荷重 	<ul style="list-style-type: none"> 死荷重 活荷重 変形荷重 自然条件荷重 	<ul style="list-style-type: none"> 死荷重 活荷重 変形荷重 自然条件荷重 事故荷重 	<ul style="list-style-type: none"> 自重 衝撃荷重 風荷重 波力 流れによる流体力 海水圧及び浮力 浮遊物航時の動荷重 地震荷重
死 荷 重	<ul style="list-style-type: none"> 自重, バラスト, 静水圧 	<ul style="list-style-type: none"> 自重, 移動させない装置, 静水圧, バラスト 	<ul style="list-style-type: none"> 自重, 移動させない装置, 静水圧 	<ul style="list-style-type: none"> 自重節水正浮力
活 荷 重	<ul style="list-style-type: none"> 貯蔵物, 装置及び流体圧など クレーン, ヘリコプター, 船舶 	<ul style="list-style-type: none"> 移動可能な装置の荷重 群衆荷重, 船舶荷重 航空機, ヘリコプター 	<ul style="list-style-type: none"> ヘリコプター, 装置の移動 貯蔵される液体 けい留力 	<ul style="list-style-type: none"> 衝撃荷重 浮遊物航時荷重
変 形 荷 重	<ul style="list-style-type: none"> プレストレス, 温度, クリープ収縮, 不均沈下 	<ul style="list-style-type: none"> プレストレス, 収縮, 膨張, クリープ, 温度変化 	<ul style="list-style-type: none"> 温度変化不均沈下, 不陸, クリープ, 収縮 	
自然条件荷重	<ul style="list-style-type: none"> 波, 潮流, 風, 氷, 地震 	<ul style="list-style-type: none"> 波, 潮流, 風, 氷, 地震 	<ul style="list-style-type: none"> 波, 潮流, 風, 氷, 地震 	<ul style="list-style-type: none"> 波, 潮流, 風, 氷, 地震
事 故 荷 重	<ul style="list-style-type: none"> 衝突荷重 爆発及び火災 落下物 安全限界圧力以下の圧力低下 想定し得ない大地震 			
荷重の組合せ	<ul style="list-style-type: none"> 常時 異常時 	<ul style="list-style-type: none"> 常時, 最大活荷重 異常時, 最大活荷重 異常時, 最小活荷重 	<ul style="list-style-type: none"> 常時, 最大活荷重 異常時, 最大活荷重 異常時, 最小活荷重 	<ul style="list-style-type: none"> 他荷重と組合せた場合の許容応力度は別途与える

表-42 海洋構造物に作用する荷重の再現期間による整理

荷重の 再現期間(日)	常に作用する											
	秒	分	日	月	年	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	100年	50年	1000年
PC海洋構造物 の耐用年数	30年 —— 100年程度											
耐用年数を 50年とした場合 の荷重発生回数 の期待値	∞	10 ^{1.7}	10 ^{1.5}	10 ^{1.4}	10 ^{1.2}	10 ^{1.3}	10 ^{1.2}	10 ^{1.1}	10 ^{1.0}	10 ^{1.0}	10 ^{1.0}	10 ^{1.0}
死荷重	←————→											
活荷重	←————→ 貯蔵物置											
変形荷重	←————→ 船舶 ヘリコプター											
自然条件 荷重	←————→ 波											
事故荷重	←————→ 浮遊氷砕時											
荷重の 区分	←————→ ひんばんに起こる荷重 A荷重											
	←————→ まれに起こる荷重 B荷重 < C荷重 < D荷重											
←————→ 事故荷重												

A 荷重：ひんばんに起こる荷重，B 荷重：耐用年数内に1～2回起こるもの
C 荷重：耐用年数内の発生回数期待値が数分の1，数10分の1以下のもの， D 荷重：事故荷重

表-43 P C海洋構造物設計の考え方

設計の 考え方	A荷重に 対する部 材の状態	B荷重に 対する部 材の状態	C荷重に 対する部 材の状態	D荷重に 対する部 材の状態	備 考
①	a	a	a	十分な 延生	C荷重の予測が困難なため十分な安全性を確保するには非常に不経済となる。
②	a	a	c(b)	"	①と同じ理由で、ひびわれをうまく制御することは困難であるが、①よりは経済的となる。
③	a	b	c	"	C荷重が一度発生すると、b→cとなり、④に含めて考えたいほうがよい。
④	a	c	c	"	大断造物になるとすべての部材で②という構造とすることは困難となるため、Bに関しても、Cとする考 えである。
⑤	c(b)	c	c	"	経済性を重視した考えで、AでもCを許容する。この場合は鋼材が応力腐食する危険が大きい。

注：A荷重：波力を対象とした多数回繰り返す荷重

B荷重：50～100年の再現周期を基とした荷重（いわゆる設計荷重）

C荷重：100年以上の再現周期を有する波力又は地震力等（ある程度予測可能）

D荷重：事故および不可知の自然力による破壊

状態 a：引張応力が発生しない状態

状態 b：ひびわれが発生しない状態

状態 c：ひびわれを許容するがひびわれ幅を制限する。

表-44 ひびわれ幅に関する各国規定

DNV ノルウェー船級協会	ACI アメリカコンクリート学会	FIP 国際プレストレスト コンクリート学会	土 木 学 会
最小鉄筋量と鋼材応力の制限 とでひびわれ幅を制限する。 それで計算したひびわれ幅は およそ 0.1～0.15mm までを許容する。 (荷重B相当)	最小鉄筋量と鋼材応力の制限 とでひびわれ幅を制限する。 それで計算したひびわれ幅は およそ 0.1～0.15mm までを許容する。 (荷重B相当)	常時の荷重（荷重Bに相当） について0.2mm まで許容 異常時の荷重（荷重Cに相当） について0.3mm まで許容	コンクリートおよびP C鋼材の許容応力度で制限 荷重B相当の荷重に対して I種ではひびわれを許容せず： III種では、ひびわれを許容するが ひびわれ幅の許容値はやや不明確である。 荷重Cに相当する荷重に対しては許容応力の割増 しを考慮する。この場合ひびわれ幅は不明確

まず、前章までの結論をまとめると次の通りである。

①繰り返し荷重を受けない静的試験におけるPCパイルの特性は、既往の弾性理論および終局強度理論を用いて算定される。

②繰り返し荷重によるPCパイル諸特性の変化は、金属材料のそれと類似しており、PC鋼材の疲労寿命および累計回数比を用いて概略予測される。

③本研究で用いた鋼板および鉄筋で補強した溶接接合部は、繰り返し荷重の有無にかかわらず、単一部材同等以上の性能を有している。

これらをふまえ、本章では曲げは対象とした海洋環境下における構造部材としてのPCパイル設計法について考察を行う。

5.1 PC 海洋構造物設計の概念

前述したように、PC海洋構造物を設計する場合に既往のPC陸上構造物と全く同じ設計法を機械的にそのまま用いることは、作用する荷重の性格が異なるため問題である。

そのため、諸外国ならびに我が国においても特別に海洋構造物に関する基準類が作成されている。これらの基準類を参考にして、海洋構造物に作用する荷重、使用限界状態、特にひびわれに関するもの、さらに、終局限界状態に関する考え方を整理して以下に示す²⁹⁾。

まず、上記各基準類より海洋構造物に作用する荷重に関する事項をまとめると表-41の通りである。さらに、これらの荷重を再現期間という観点から整理すると表-42の通りである。

また、上記基準類を通読すると、PC海洋構造物に作用するこれらの荷重に対して次のような考えで設計を行うことが支配的であるといえる。すなわち、

(i)ひんばんに起こる荷重に対しては、できる限りひびわれが発生しないようにする。

(ii)耐用期間内に起こる可能性は小さくまれではあるが、その発生を想定しなければならぬ荷重、たとえば大波浪または場合によっては大地震などの場合には、ひびわれ発生を許容するが、その大きさを制限し、その後も使用できるようにする。

(iii)予想しがたい事故的な荷重に対しては、せめて被災後直ちに構造物が崩壊などをせぬように、その破壊安全度および破壊性状を十分考慮して構造物の設計を行う。

波の性質を考えると、ひんばんに起こる荷重とまれに起こる荷重を画一的に決めることは困難であるが、一応3段階にわけてみて、かつまた部材状態として引張応力発生、ひびわれ発生を設計対象状態とみなすと、その組合せにより表-43に示すような5組の設計法が考えられ

る。

この表でA荷重としたのは、波力を主に考え、構造物耐用年数内に多数回繰り返し荷重である。また、B荷重は、PC海洋構造物の耐用年数とはほぼ同程度の再現期間を有するような波力または地震力で、その再現期間が現行の港湾構造物設計荷重のそれにはほぼ相当すると考えられるものである。C荷重は、構造物の耐用年数の数倍もしくは数十倍の再現期間を有する荷重で、たとえば再現期間200年の波力、巨大地震、波力と地震力の組合せなどを考えるものである。D荷重は、事故荷重で、爆発不可知の自然力などの予測しがたいものである。

さらに、この表に示す設計の考え方を順に示すと次の通りである。①の考えは、考えられるすべての荷重に対して引張応力を発生させないというもので、十分な安全性を有すると考えられるが、不経済となる。②の考えは、構造物の耐用年数と同程度の再現期間を有する荷重に対しては、ひびわれ発生を許さないが、それ以上の再現期間を有する荷重に対しては、ひびわれ発生を許すものである。③の考えは、ひんばんに繰り返し荷重に対しては、ひびわれを許さないが、再現期間が構造物の耐用年数と同程度の荷重に対しては、ひびわれを許容するものである。また、③の考えは、一旦ひびわれが発生すると、その後は引張応力発生と同時に元のひびわれが再び開き始めるというコンクリートの性質と、繰り返し荷重であるという波力の性質を考えると、④と同等なものとなる。さらに、⑤の考えは、ひんばんに繰り返し荷重に対しても、ひびわれを許容するもので、ひびわれに関してはRC海洋構造物とはほぼ同じ挙動を示すものとなる。

以上、基本的には4通りの設計に対する取組み方があるが、いずれがよいかに関しては、構造物の重要度および構造物に対してどの程度のひびわれを許容してよいかによってそれぞれの設計法が評価されるのである。

5.2 ひびわれ幅制限に関する考え方

前述した各国基準類におけるひびわれに関する記述をまとめると表-44の通りである。この表より、各国基準類のひびわれ幅許容値は、我が国と比較するとかなり大きいと思われる、我が国土木学会のものが最も厳しい値となっているようである。これを先に示した表-43の設計法と比較すると、これらの基準では、④の考え方を採用しているようである。しかしながら、我が国では、PC陸上構造物においてすら設計荷重時に、ひびわれを許さないものが大部分であるという大勢からみて、より腐食環境の厳しい海洋環境下において、設計荷重時(荷重Bに相当)にひびわれを許容することは、十分な検討を重ねた後でなければ実現しないと思われる。しかし、FIP規

準によって建設された海中貯油タンクが既に稼働している実績もあり、当然、我が国でもこれらの事実をふまえた設計法がいずれ導入されてくるであろう。

一方、非常に重要または非常に危険な構造物もしくは構造物の発注者が極度の安全性を望む場合には、①の考え方、②の考え方によって設計することもあるし、その措置は妥当なものといえよう。ここで、①の考えに基づいて設計された構造物は、PCパイルに関する本研究により、事後的な荷重に対する破壊安全率は4倍程度以上あるし、また、疲労、ひびわれ発生に関しても全く問題がないので、①の考えに基づく設計法をあらためて吟味する必要はない。したがって、②の考えに基づくものを設計法Ⅰ、④の考えに基づくものを設計法Ⅱとして、次節以下で検討する

5.3 設計法Ⅰについて

この設計法は、主として橋梁などの陸上構造物を対象とした土木学会のPC設計施工指針のフルプレストレッシングによる設計法に対応する。しかし、前述したように海洋構造物は陸上構造物と異なり、再現期間が構造物の耐用年数と同程度の設計荷重(B荷重)を用いたとしても、なかなか荷重の実態と一致しないために、設計荷重以上の荷重が発生する可能性もあり、このような状況に対処して設計する必要がある。しかし、設計荷重と実際の荷重が必ずしも対応しないとはいえ、設計荷重以上の波浪荷重あるいは地震荷重(この場合荷重に相当)が作用する可能性は小さく、構造物の耐用年数内に1~2回発生するものと考えておけば十分である。

設計波をかなり上回る波浪を発生させるケースは超大型台風の接近以外になく、この場合にはピーク状態の継続はせいぜい2~3時間であり、その間の波数は1,000波程度と思われる。当然これらの波は不規則波であり、最大波級はそのごく一部分に過ぎない。

一方、今回の実験では、設計荷重として1種(引張応力を生じさせない設計)を用いたとして、設計荷重の2倍の荷重が100万回作用しても疲労破壊を起さず、載荷時におけるひびわれ幅が特に増大することがないこと(無載荷時にはひびわれは閉じている)が確認されている。したがって、設計波の2倍の波に襲われても、安定性、耐久性ともに問題がないと言える。

また、地震荷重に関しても、同じく設計荷重の2倍程度の地震荷重が発生しても、安定性および耐久性について全く問題ないことは波浪荷重の場合と同様である。

以上の事項に基づいて、PCパイルを設計法Ⅰで設計する場合に必要な事項を列記する。

(1)引張応力発生荷重の算定

設計法Ⅰでは、設計荷重(B荷重)によって引張応力がPCパイルに発生しないことが条件となるため、引張応力発生荷重の算定は特に重要である。引張応力発生荷重は、付録-2に示す方法によって算定しうるが、PC鋼材のレラクセーション、コンクリートのクリープ、さらに繰り返し荷重などによって引張応力発生荷重はバラツクので、設計上の配慮が必要となる。たとえば、引張応力発生荷重の算定に付録-2の方法を用いるには、安全のために、たとえば、減少係数として0.80を用いる、ということが考えられる。

なお、大量にPCパイルを使用する場合には、試験によって引張応力発生荷重を確認するのがよい。

(2)破壊荷重の検討

JISで規定されるPCパイルの場合、破壊荷重は引張応力発生荷重の4倍以上あるので、設計法1で設計した場合、破壊安全度は高く、破壊荷重が設計の支配要因となることはまずない。

破壊荷重を計算するだけであれば、プレストレストコンクリート設計施工指針(土木学会)、プレストレストコンクリート標準示方書案(土木学会)、ACI、Hognestadのいずれかの仮定を用いて付録-3の方法Bによって算定することができるが、これらのうち一番簡便なプレストレストコンクリート設計施工指針の仮定を用いれば十分である。また、疲労による破壊荷重の低下も考慮する必要はない。

(3)たわみ、ひずみ、 EI 、曲率の検討

構造物の設計では、たわみ、ひずみがある許容範囲、換言すれば使用限界状態内にあることを確認する必要がある。設計法Ⅰの場合、使用限界状態内ではひびわれが発生するはずがないので、たわみ、ひずみ、 EI 、曲率を計算するには、全断面有効として計算すればよい。

また、大波浪や大地震に対応するC荷重による振動解析あるいは不静定構造物の応力解析においてたわみ、ひずみを計算するには、部材にひびわれが発生している時の、あるいは発生した後の EI を求める必要がある。この場合、コンクリートのヤング率 E は材令によってもまたPCパイル各個体毎にも若干異なるし、さらに、 EI は繰り返し荷重によっても変化するので、 EI を1つの数値あるいは式で表わすのは困難である。しかし、PCパイルの EI 値の分布の上限および下限はそれぞれ全断面有効として計算した EI と、付録-3の方法Ⅱによるコンクリートの引張強度を無視するという仮定と平面保持の仮定に基づいて計算した EI とによって算定できるので、設計上は構造物のひずみ、応力が計算されるよう、いずれかの方法による EI 計算値を用いればよい。

繰返し曲げを受けるPCパイルの力学的性質

また、前述したように、設計法Ⅰでは、設計荷重の2倍の荷重が100万回繰返し発生したとしても、PCパイルの安定性は損われないので、考慮すべきC荷重が2倍程度であれば、たわみ、ひずみ等を検討する必要はない。

しかし、C荷重として設計荷重の3倍以上も考える必要がある場合には、C荷重によって発生するたわみ、ひずみを求め、PCパイルの物性、たとえば有効プレストレスが低下しないかどうかを別途検討する必要がある。

この場合、PCパイルのたわみ、PC鋼材ひずみなどは、付録-3の方法Ⅱによって求めることができる。さらに、C荷重として繰返し荷重を考える場合には、疲労による劣化も考慮しなければならない。この場合、1つの目安として Hilms & Eksberg の式を用いることは有益であろう。

(4)ひびわれ幅の検討

設計法Ⅰでは、設計荷重時(B荷重)にひびわれが発生することはない。しかし、正確な議論は不明なのであるが、C荷重に対してもひびわれ幅を制限している基準(FIPの0.3mm)もあり、この場合には、CEB-FIPの

式を用いて設計すればよい。

(5)接合部に関する検討

本試験で用いた接合法で十分であり、特に検討することはない。ただし、溶接の管理を十分に行う必要がある。

5.4 設計法Ⅱについて

この設計法は、およそ陸上構造物における土木学会のPC設計施工指針のパーシャルプレストレスリングによる設計法に対応する。比較的腐食環境の激しくない陸上構造物においてすら、設計荷重時にひびわれを許容するパーシャルプレストレスリングを嫌う傾向があるのに、あえて腐食環境の激しい海洋構造物に設計法Ⅱを提案したのは、2つの理由がある。

1つは、前述したように、各国基準類ではこぞって設計荷重が作用した時にもひびわれを許容している事実およびもう1つは経済性である。表-45に、鋼材量、ひびわれ幅および荷重の関係、そして同時に鋼材量、ひびわれ幅および載荷時における載荷荷重を鋼材断面積で除した値(鋼材発生力とは異なる)を示した。この表より、載荷荷重を鋼材断面積で除した値は、引張応力発生荷重

表-45 鋼材量によるひびわれ幅と荷重の関係

p=A _p /A(%)		引張応力の発生する荷重		ひびわれ荷重		ひびわれ限界状態(ひびわれ幅)						破壊荷重	
						0.1mm		0.2mm		0.3mm			
		試験値	計算値	試験値	計算値	試験値	計算値	試験値	計算値	試験値	計算値	試験値	計算値
0.51 (X型相当)	①	1.2	1.2	2.8	3.0	2.5	2.4 (2.3)	3.0	2.8 (2.7)	3.5	3.1 (3.0)	6.4	5.0
	②	0.19	0.24	0.44	0.46	0.39	0.48	0.47	0.56	0.55	0.62	—	—
	③	476	476	1212	1300	1082	1039	1299	1212	1515	1342	2771	2180
0.85	①	—	1.8	—	3.7	—	3.8 (3.5)	—	4.4 (4.2)	—	4.9 (4.7)	—	8.0
	②	—	0.23	—	0.46	—	0.48	—	0.55	—	0.61	—	—
	③	—	468	—	961	—	987	—	1143	—	1272	—	2078
1.36 (Y型相当)	①	2.8	2.8	4.3	4.8	6.5	5.3 (4.8)	7.5	6.5 (6.0)	9.0	7.2 (6.8)	13.1	11.9
	②	0.21	0.24	0.33	0.40	0.50	0.46	0.57	0.54	0.69	0.61	—	—
	③	471	471	698	779	1055	893	1218	1055	1461	1170	2159	1932
1.70	①	—	3.65	—	5.6	—	6.6 (5.6)	—	7.8 (7.0)	—	8.5 (8.0)	—	14.3
	②	—	0.62	—	0.39	—	0.46	—	0.55	—	0.59	—	—
	③	—	474	—	727	—	857	—	1012	—	1103	—	1857

注：計算値は E_s=350,000 かつ有効プレストレスとして付録-2によるものを用いた。

① 荷重 (t)

② 破壊荷重に対する比

(試験値は試験値, 計算値は計算値)

③ 鋼材 1cm² に対する荷重 (kg/cm²) ひびわれ荷重の計算値 σ_s=70 kg/cm² とした

④ () は逆モーメントによる場合の値

において約 475kg/cm²、ひびわれ幅 0.1mm のに対応する荷重において 2900~1000kg/cm²、ひびわれ幅 0.3mm に対応する荷重において 1200~1300 kg/cm² となること分る。引張応力発生荷重を許容限界として設計する場合と比較して、ひびわれを許容すると PC 鋼材を 1/2 ~ 1/3 節約できる。

勿論、その分だけ、使用性および破壊に対する安全度が低下するので、それらが許容の範囲内にあることを別途確かめる必要がある。

以下、本試験結果を考慮して設計法Ⅱにおいて検討すべき事項を列記する。

(1) 荷重の吟味

設計法Ⅱで設計する場合、設計法Ⅰとは異なり、設計荷重 (B 荷重) 作用時にひびわれを許容するわけであるから、構造物の耐用年数内にどれほどの時間ひびわれが発生し、その間にコンクリート内部に浸透した海水が鋼材およびコンクリートの品質にどのような影響を与えるのか、換言すれば耐久性にいかなる影響を与えるかを検討する必要がある。

また、ひびわれが発生した場合には、PC 鋼材の応力増加は大きく、設計荷重 (B 荷重) 作用時の応力が疲労限界を越えることもありうるため、疲労寿命および繰り返し荷重累計回数比等を計算し、疲労特性に問題がないことを吟味する必要がある。

(2) 引張応力発生荷重および破壊荷重の検討

引張応力発生荷重および破壊荷重は、設計法Ⅰの場合と同様の方法を用いて検討すればよい。

(3) たわみ、ひずみ、 EI 、曲率の検討

たわみ、ひずみ、曲率は、設計荷重 (B 荷重) 作用時および荷重作用時ともにひびわれが発生しているため、付録-3の方法Ⅱを用いて計算する必要がある。また、 EI を構造計算に用いる必要がある場合には、設計法Ⅰの場合と同様に、上限値および下限値を求め、たわみ、ひずみ、応力が安全側となるような EI を用いるべきである。

また、ここで計算した、ひずみ、応力および荷重履歴を用いて、PC 鋼材などの疲労寿命および累計回数比などを計算し、疲労特性に問題がないことを確かめる必要がある。

(4) ひびわれ幅の検討

ひびわれ幅については、B 荷重、C 荷重のそれぞれについて、PC 鋼材の応力を付録-3の方法Ⅱによって求め、これを CEB-FIP の式に代入することによってひびわれ幅を計算し各々が B 荷重 C 荷重に対応するひびわれ幅の許容値内にあることを確かめる。

(5) 接合部に関する検討

本試験で用いた接合法で十分であり、特に検討する必要はない。ただし、溶接の管理を十分に行う必要がある。

6. あとがき

本研究を通じて、海洋環境下における構造部材として用いる PC パイルの曲げに対する力学的性質をある程度は握し、設計法の提案を行うことができた。

しかしながら、設計法としては具体的な内容に欠けた面もあり、今後、さらに研究、調査、試設計を通じてより良い実用設計法を磨き上げてゆくことを目指すものである。特に、ひびわれ幅と内部鋼材の腐食の関係などの化学的物性の変化については、今のところ十分な検討が行われているわけではなく、今後、調査および試験をさらに推進する必要がある。

現状の知識で設計する場合、設計法Ⅰで設計しておけば、経済性からみると問題なしとはいえないが、十分な安全な構造物が設計されると考えられる。

最後に、本研究の遂行に当って、貴重な助言ならびに協力をいただいた、北島構造部長、森材料施工研究室長、関前材料施工研究室長ならびに堀井材料施工研究室研究員に感謝の意を表します。

付 録

付録-1 プレストレストコンクリートの設計方針による分類

プレストレストコンクリートでは、プレストレス量によって、引張応力発生荷重、ひびわれ発生荷重、およびひびわれ幅を制御することができ、設計荷重がこの3つの状態に対してどういう関係にあるかによって、プレストレストコンクリートを分類することができる。

この代表例として CEB-FIP 指針における分類を述べるが、この指針においてはプレストレストコンクリートと鉄筋コンクリートを区別せずに、Ⅰ種、Ⅱ種、Ⅲ種およびⅣ種と分類している。これは、CEB-FIP 指針が限界状態設計法を基調とし、プレストレス量の大きさによってではなく、ひびわれ発生の有無を分類の目安としているためである。

この分類を簡単にまとめると次のようである。すなわち、Ⅰ種を「設計荷重が作用したときに、引張縁に引張応力が発生しないもの」、Ⅱ種を「設計荷重が作用したときに、引張縁に引張応力は発生するが、ひびわれは発生しないもの」、Ⅲ種を「設計荷重が作用したときに、引張縁にひびわれが発生することは許すが、ひびわれ幅を制限するもの」さらにⅣ種として「設計荷重が作用した

繰り返し曲げを受けるPCパイルの力学的性質

ときは勿論死荷重作用時にもひびわれを許容し、ひびわれ幅を許容するもの」と分類するものである。

ただし、厳密に言うところの説明では不十分であり、設計荷重が繰り返し荷重である場合の疲労現象、地震荷重等の衝撃荷重である場合については、特別の検討が必要である。

ここで、注意すべき点は、この分類は、設計荷重が明確となる場合でないといまいとなることである。

付録-2 有効プレストレスの計算

コンクリートの有効プレストレス σ_{ce} は、PC鋼線がコンクリート断面に均等に配置されている場合

$$\sigma_{ce} = P_e / A_c \text{ から求められる。}$$

ここで、PC鋼線に作用している有効引張力 P_e は、 $P_e = P_i - \Delta P$ から求められる。

ただし、 ΔP はPC鋼線のレラクセーション、コンクリートのクリープ及び乾燥収縮等による全PC鋼線の引張力の減少量で次の式から求められる。

$$P\Delta = (\Delta e + \Delta r + \Delta c + \Delta s) \cdot P_i$$

ここに

Δe : コンクリートの弾性変形によるPC鋼線引張応力度の減少率 $= n' A_p / (n' A_p + A_c)$

Δr : PC鋼線のレラクセーションによるPC鋼線引張応力度の減少率 $= 9\%*$

Δc : コンクリートのクリープによるPC鋼線引張応力度の減少率 $= n\sigma / \sigma_{pi} \cdot \phi$ ($\phi = 2.0$)

Δs : コンクリートの乾燥収縮によるPC鋼線引張応力度の減少率 $= 20 \times 10^{-5} * \cdot E_p / \sigma_{pi}$

$$n' = E_p / E_c'$$

E_c' : プレストレスを与えているときのコンクリートのヤング率

σ : コンクリートの応力

$$\sigma_{pi} = P_i / A_p$$

ϕ : コンクリートのクリープ係数 $2.0*$

注: *はすべて「遠心力大径プレレストコンクリート杭設計施工指針案 (土木学会)」に準じた値である。

付録-3 PCパイル破壊曲げモーメント計算法

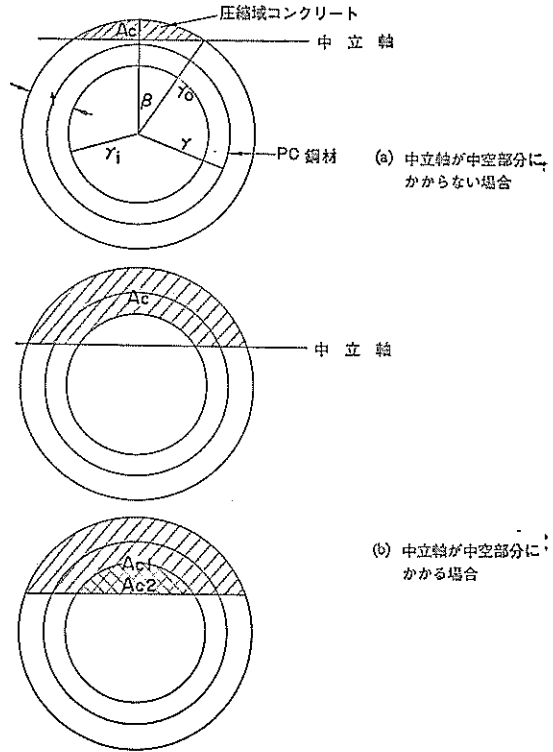
方法A, Bともに中立軸位置 x を仮定し、コンクリートとPC鋼線合力が均り合う x を繰り返し演算で求める。この x によって応力分布が定まり、破壊曲げモーメント及び破壊時の曲率を求める。

方法A

(1) 中立軸位置 x を仮定する。

(2) コンクリート及びPC鋼線合力の算出

(a) コンクリートの圧縮力



付図-1 中立軸位置と圧縮側コンクリート断面積との関係

付図-1に中立軸位置とコンクリート断面積との関係を示す。

これより、コンクリート圧縮域断面積 A_c は

$v < t$ のとき

$$A_c = r_0^2 \cdot \beta - r_0 \cdot \sin \beta \cdot (r_0 - x)$$

ここで、 $\beta = \cos^{-1} \{ (r_0 - x) / r_0 \}$

$x > t$ のとき

$$A_c = r_0^2 \beta - r_0 \cdot \sin \beta \cdot (r_0 - x)$$

ここで、 $\beta = \cos^{-1} \{ (r_0 - x) / r_0 \}$

$$A_{c2} = r_i^2 \cdot \gamma - r_i \cdot \sin \gamma \cdot (r_0 - x)$$

ここで $\gamma = \cos^{-1} \{ (r_0 - x) / r_i \}$

$$A_c = A_{c1} - A_{c2}$$

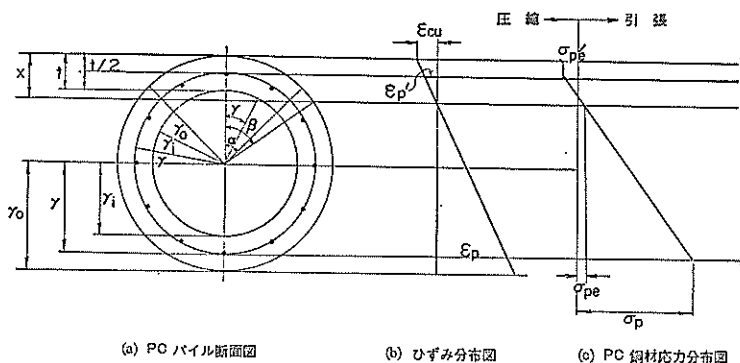
これを用いてコンクリートの圧縮力 C は、

$$C = \lambda_1 \cdot \lambda_3 \cdot A_c \cdot \sigma_c \text{ と表わすことが出来る。}$$

(b) PC鋼線による引張力

破壊時でのPC鋼線の応力分布を付図-2のように仮定する。

中立軸より同一距離にあるコンクリート、PC鋼線のひずみを各々 ϵ_c 、 ϵ_p とし、コンクリートの有効プレストレスによるひずみを ϵ_{ci} 、PC鋼線の有効引張力による



付図-2 PCパイル破壊曲げモーメント計算上のひずみ及び応力分布

ひずみを ϵ_{pi} とすれば、平面保持の仮定より

$$\epsilon_p - \epsilon_{pi} = \epsilon_c - \epsilon_{ci} \quad (\text{圧縮ひずみを正と考える})$$

また、下縁PC鋼線位置での仮想的な ϵ_c を考えると、
(ここで仮想的と記したのは、実際には、この位置のコンクリートはひびわれが発生しているからである)

$$\epsilon_c = \epsilon_{cu} \times (r + r_0 - x) / x$$

これより ϵ_p を求めると、

$$\epsilon_p = \epsilon_c + \epsilon_{pi} - \epsilon_{ci} = \epsilon_{cu} \cdot (r + (r_0 - x)) / x + \epsilon_{pi} - \epsilon_{ci}$$

PC鋼線引張応力度 σ_p 及び σ_{pe} は、PC鋼線の応力-ひずみ関係を表わす関数をFとすれば

$$\sigma_p = F(\epsilon_p), \sigma_{pe} = F(\epsilon_{pi}) \text{ と表わせる。これよりPC鋼線の}$$

引張力Tは、引張域で積分することにより、

$x > t/2$ のとき

$$T = A_p \cdot \sigma_{pe} \cdot (\pi - \alpha) / \omega + A_p \cdot (\sigma_p - \sigma_{pe}) \cdot (\sin \alpha + (\pi - \alpha) \cdot \cos \alpha) / (\pi \cdot r \cos \alpha)$$

$x \leq t/2$ のとき

$$T = A_p \cdot \sigma_{pe} + 0.5 \cdot A_p \cdot (\sigma_p - \sigma_{pe})$$

(c)圧縮域PC鋼線による力

この力は $x > t/2$ のときに発生し、 σ_{pe} の大きさによって圧縮力とも引張力ともなる。

上縁PC鋼線位置での ϵ_p は、(b)と同様に考えて

$$\epsilon_p = \epsilon_{cu} \cdot (r - (r_0 - x)) / x + \epsilon_{pi} - \epsilon_{ci} \text{ と表わせ、圧縮域PC}$$

鋼線の力 T' は

$$T' = A_p \cdot \sigma_{pe} \cdot \alpha / \pi - A_p \cdot (\sigma_p' - \sigma_{pe}) \cdot (\sin \alpha - \alpha \cdot \cos \alpha) / (\pi(1 - \cos \alpha))$$

(3)中立軸 x の決定

x を繰り返し計算により $|C + T + T'| / C$ が 0.1% 以下となるよう決定する。

(4)破壊曲げモーメントの算定

中立軸を基準として破壊曲げモーメントを算定する。

(a)コンクリート圧縮力によるモーメント M_c

$$M_c = C \cdot (1 - \lambda_2) \cdot x$$

(b)PC鋼線引張力によるモーメント M_{it}

$x \leq t/2$ のとき

$$M_{it} = A_p \cdot \sigma_{pe} \cdot r + 0.75 \cdot A_p \cdot (\sigma_p - \sigma_{pe}) \cdot r + T \cdot (t/2 - x)$$

$x > t/2$ のとき

$$M_{it} = A_p \cdot \sigma_{pe} \cdot r \cdot ((\pi - \alpha) \cdot \cos \alpha + \sin \alpha) / \pi +$$

$$A_p \cdot (\sigma_p - \sigma_{pe}) \cdot r \cdot (2 \cdot (\pi - \alpha) \cdot \cos \alpha + 1.5 \cdot \sin 2\alpha + (\pi - \alpha)) / (2\pi \cdot (1 + \cos \alpha))$$

(c)圧縮域PC鋼線によるモーメント M_{ic}

$x > t/2$ のときに生じるもので

$$M_{ic} = A_p \cdot \sigma_{pe} \cdot r (\sin \alpha - \alpha \cdot \cos \alpha) +$$

$$A_p \cdot (\sigma_p' - \sigma_{pe}) \cdot r \cdot (2\alpha \cdot \cos^2 \alpha - 1.5 \sin \alpha + \alpha) / (2\pi(1 - \cos \alpha))$$

以上より、破壊曲げモーメント M_{ult} は、

$$M_{ult} = M_c + M_{it} + M_{ic} \text{ として求めることが出来る。}$$

方法B

(1)中立軸位置 x を仮定する。

(2)コンクリートおよびPC鋼線合力の算出

(a)コンクリートの圧縮力

コンクリートの断面積を付図-2の角 α ではさまれた部分であるとする。すなわち、 $A_c = 2 \cdot r \cdot t \cdot \alpha$

これより、コンクリートの圧縮力 C は

$$C = \lambda_1 \cdot \lambda_3 \cdot 2rt \cdot \alpha$$

(b)PC鋼線による引張力

方法(a)での $x > t/2$ の式を用いる。すなわち、

$$T = A_p \cdot \sigma_{pe} \cdot (\pi - \alpha) / \pi + A_p \cdot (\sigma_p - \sigma_{pe}) \cdot (\sin \alpha + (\pi + \alpha) \cdot \cos \alpha) / (\pi \cdot (1 + \cos \alpha))$$

なお、圧縮域PC鋼線は無視する。

(3)中立軸 x の決定

x を繰り返し計算により $|C + T| / C$ が 0.1% 以下となるよう決定する。

(4)破壊曲げモーメントの算定

繰り返し曲げを受けるPCパイルの力学的性質

中立軸を基準として破壊曲げモーメントを計算する。

(a)コンクリート圧縮力によるモーメント M_c

$$M_c = 2r^2 \cdot t \cdot \sigma_{cu} \cdot (\sin\alpha - \alpha \cdot \cos\alpha)$$

(b) PC 鋼線による曲げモーメント M_{st}

$$M_{st} = A_p \cdot \sigma_{ps} \cdot r \cdot ((\pi - \alpha) \cos\alpha + \sin\alpha) +$$

$$A_p(\sigma_p - \sigma_{ps}) \cdot r \cdot (2(\pi - \alpha) \cos^2\alpha + 1.5 \sin 2\alpha + \pi - \alpha) / (2\pi(1 + \cos\alpha))$$

以上より、破壊曲げモーメント M_{ult} は、

$$M_{ult} = M_c + M_{st} \text{ として求めることができる。}$$

付録-4 ひびわれ発生後の EI, たわみ, ひずみ, 曲率と荷重の関係

方法 I

この方法は、PC 鋼線に作用している有効引張力 P_e を PC 鋼線図心位置に働く圧縮外力と考え、PC 部材をその圧縮外力の作用している RC 部材と考える方法である。

(1) RC 部材としての中立軸位置の x 算定

中立軸位置を x , 圧縮縁のコンクリートひずみを ε_0 とし、RC としての計算を行うと、コンクリートによる圧縮力、PC 鋼線による引張力は以下のような計算される。なお、このときのひずみ分布を付図-3に示す。

(a)コンクリートによる圧縮力 C

$$C = 2 \int_0^{2\pi} \varepsilon_c E_c z dx - 2 \int_0^{2\pi} \varepsilon_c E_c z dx$$

$$= [r_0^3 \{4 \sin^3 \alpha_0 - 3 \cos \alpha_0 (2\alpha_0 - \sin 2\alpha_0)\} - r_i^3 \{4 \sin^3 \alpha_i - 3 \cos \alpha_i (2\alpha_i - \sin 2\alpha_i)\}] \cdot E_c \varepsilon_0 / (6 \cdot x)$$

(b) PC 鋼線による引張力 T

$$T = 2 \int_0^\pi t_i r_i E_p \varepsilon_p d\theta = -(E_p/E_c) \cdot A_p r_i \cos \alpha_i (E_c \varepsilon_0 / x)$$

これより、 $|C+T|/T$ が 0.1% 以下となるように、 x を定める。

(2)断面二次モーメントの算定

中立軸位置 x が定まれば、断面二次モーメント I を求めることができる。

コンクリートの断面二次モーメント I_c は、

$$I_c = [r_0^4 \{3 \cdot (4\alpha_0 - \sin 4\alpha_0) - 64 \cos \alpha_0 \cdot \sin^2 \alpha_0 + 24 \cos^2 \alpha_0 \cdot$$

$$(2\alpha_0 - \sin 2\alpha_0)\} - r_i^4 \{3 \cdot (4\alpha_i - \sin 4\alpha_i) - 64 \cos \alpha_i \cdot \sin^2 \alpha_i + 24 \cos^2 \alpha_i (2\alpha_i - \sin 2\alpha_i)\}] / 48$$

$$I_i = (E_p/E_c) \cdot A_i [r_i^2/2 + (r_0 - x)^2]$$

$$I = I_c + I_i \text{ と計算される。}$$

(3) EI, たわみ, ひずみ, 曲率と荷重 P の関係

RC 部材として考えた部材に作用するモーメントは、荷重 P によるモーメントを $M(P)$ とすれば、 $M(P)$ より、送モーメント $P_e \cdot (r_0 - x)$ を差し引いたモーメント M_R が実際のモーメントとして作用していると考えられたい。

このモーメントにより、たわみ、ひずみ曲率を求めることができるが EI は次のようにして求める。すなわち、モーメント M_R に対する RC 部材としてのたわみ δ_R をモーメント $M(P)$ によっておこすような EI をこの PC 部材の EI と定義する。

方法 II

この方法は、平面保持及びコンクリート引張強度を無視するという仮定を用いて計算したもので、方法 I とは異なり、CR 部材としての計算を含まぬものである。

これによって中立軸を求め断面二次モーメント、コンクリート、鋼線のひずみ等を算出するわけであるが、2, 3の注意事項がある。まず、中立軸の定義が RC の場合とは、やや異なるのである。RC 部材の場合、部材の中立軸においては、コンクリート及びその位置の鋼材のひずみは 0 であり、明解なので、PC 部材の場合、部材としての中立軸と、コンクリートひずみが 0 である位置とが異なるのである。ここでは、部材としての中立軸を x , コンクリートのひずみが 0 である位置を x' とし、その関係を付図-4に示す。

(1) x' とコンクリート圧縮縁ひずみ ε_0 の関係

方法 I と異なる点は、荷重によって x' および x が変化することである。

(a)コンクリートによる圧縮力 C

方法 I と全く同じである。すなわち

$$C = [r_0^3 \cdot \{4 \sin^3 \alpha_0 - 3 \cos \alpha_0 (2\alpha_0 - \sin 2\alpha_0)\} - r_i^3 \{4 \sin^3 \alpha_i - 3 \cos \alpha_i (2\alpha_i - \sin 2\alpha_i)\}] \cdot E_c \varepsilon_{c0} / (6 \cdot x') = E_c \cdot G_c / x' \cdot \varepsilon_{c0}$$

(b) PC 鋼線による引張力 T

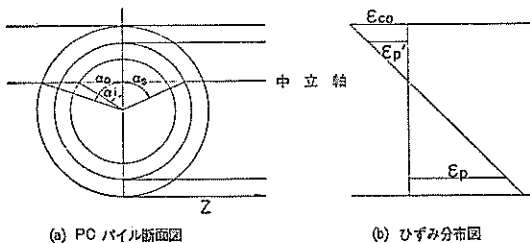
ε_p と ε_c の関係は $\varepsilon_p = \varepsilon_c + (\varepsilon_{pi} - \varepsilon_{ci})$ であるので、

$$T = 2 \int_0^\pi t_i \varepsilon_p E_p r_i \alpha d\theta = -(A_p E_p r_i \cos \alpha_i / x') \cdot \varepsilon_{c0} + A_p E_p (\varepsilon_{pi} - \varepsilon_{ci}) = (-E_p \cdot G_q / x') \varepsilon_{c0} + A_p E_p (\varepsilon_{pi} - \varepsilon_{ci} - \varepsilon_{ci})$$

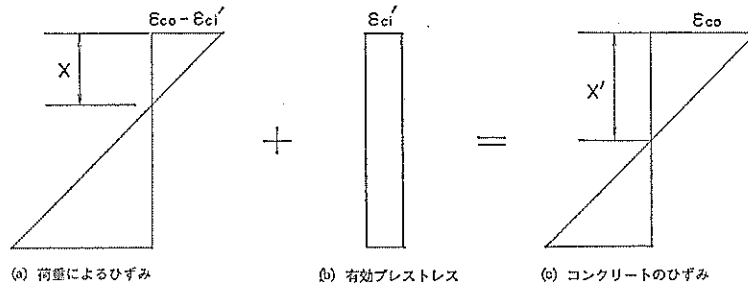
均り合い条件より $C+T=0$, ε_{c0} を x' の関数として表わすと、

$$\varepsilon_{c0} = -\{A_p \cdot E_p \cdot (\varepsilon_{pi} - \varepsilon_{ci}) / (E_c G_c - E_p \cdot G_p)\} \cdot x'$$

(2) x', ε_{c0} とモーメント M の関係



付図-3 PC パイロひずみ分布



付図-4 部材としての中立軸位置 x とコンクリートひずみが 0 となる位置 x' との関係

コンクリートのモーメント M_c は、 x' より考えると、

$$M_c = 2 \int_0^{\alpha_0} (\text{応力}) \times (\text{アーム}) \times (\text{面積}) \times d\theta$$

$$= 2 \int_0^{\alpha_0} \{E_c \varepsilon_{co} (r_0 \cos \theta - r_0 \cos \alpha_0) / x\} \cdot (r_0 \cos \theta + r_0 \cos \alpha_0) \cdot$$

$$r_0 \sin \theta \cdot r_0 \sin \theta \} d\theta - 2 \int_0^{\alpha_1} \{E_c \varepsilon_{co} (r_i \cos \theta - r_i \cos \alpha_i) / x\} (r_i$$

$$\cos \theta - r_i \cos \alpha_i) \{r_i \sin \theta\} d\theta = E_c I_c \varepsilon_{co} / x'$$
 ここで I_c は方法 I でのコンクリートの断面二次モーメントと同一式で表わせる。

PC 鋼線によるモーメント M_s は、

$$M_s = 2 \int_0^{\pi} (\text{応力}) \times (\text{アーム}) \times (\text{面積}) \times d\theta$$

$$= 2 \int_0^{\pi} E_p E_p f_s (r_i \cos \theta - r_i \cos \alpha_i) r_i d\theta$$

$$= (E_p / E_c) \cdot E_c I_p \varepsilon_{co} / x' - A_p E_p r_i \cos \alpha_i (\varepsilon_{pi} - \varepsilon_{ci})$$
 以上より

$$M = M_c + M_s = (E_c I_c + (E_p / E_c) \cdot E_c I_p) \cdot \varepsilon_{co} / x'$$

$$- A_p E_p r_i \cos \alpha_i (\varepsilon_{pi} - \varepsilon_{ci})$$

$$= E_c I_c \varepsilon_{co} / x' - A_p E_p r_i \cos \alpha_i (\varepsilon_{pi} - \varepsilon_{ci})$$

ここで、 I は方法 I におけるものと同一式である。したがって、この第一項は、 x' 位置までの引張側コンクリートを無視した場合の RC 部材として計算したモーメントと同一形式であり、第二項は有効引張力による付加モーメントであり、方法 II は方法 I を一般化したものと考えられる。

以上の関係により、 x' と M との関係を定めることが出来る。

(3) たわみ、ひずみ、 EI 、曲率と荷重の関係
 (2) より

$M_R = M + A_p E_p r_i \cos \alpha_i (\varepsilon_{pi} - \varepsilon_{ci})$ とおけば
 $M_R = E_c I_c \varepsilon_{co} / x'$ として、ひずみが算出され
 $d^2 y / dx'^2 = 1 / \rho = M_R / E_c I$ として、たわみ、曲率が算出され
 る。さらに、 (EI) は

$M_R / E_c I = M / (EI)$ より算出することが出来る。

付録-5 ひびわれ幅算定式

(1) CEB-FIP の式：本文参照
 (2) CP-110 の式

表面ひびわれ幅を w とすれば、

$$w = 3 \cdot a_{cr} \cdot \varepsilon_m / (1 + 2(a_{cr} - C_{min}) / (h - x))$$

$$\varepsilon_m = \varepsilon_1 - 12 b_s \cdot h \cdot (a' - x) \times 10^{-3} / (A_s \cdot (h - x) \cdot f_y)$$

ここで、

f_y = 鉄筋降伏点応力 (PC 鋼線では降伏点応力より有効引張応力を差引く)

h = 部材の全高

ε_1 = 引張部コンクリートを無視して求めたひびわれ幅を算定する位置でのひずみ

a_{cr} = 考える点から最も近い鉄筋までの距離

b_s = 引張り鉄筋重心における部材断面の径 (PC パイル断面は中空であり、PC 鋼線は全断面に均一に配置されているため、算出が困難ではあるが、ここでは、中立軸より最下縁の PC 鋼線までの距離の 2/3 でのパイル断面幅を用いる)

(3) 港湾構造物設計基準

$$w = 16 \cdot c \cdot \sigma_s \cdot \phi \cdot D / E_c$$

ここで、

c = コンクリートの付着強度に対する引張強の比、

ここでは、丸鋼と同じく 0.8 とする。

ϕ = ひびわれに関する部材面の係数 1.0

D = 鉄筋径

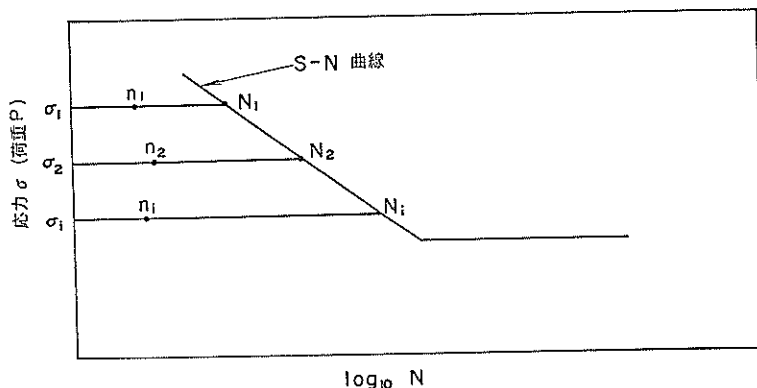
(4) 角田式

$$w_{max} = (\sigma_s / E_s - d \cdot \sigma_{ci} / (E_s \cdot P_e) - \varepsilon_\phi) \cdot l_{max}$$

ここで

$d = 1$ - 一時的な荷重に対して 0.4、繰返し荷重に対して 0.2

ε_ϕ = クリーブ及び収縮によるひずみの差であるが、ここでは無視出来る。



Miner の仮説

ある応力振幅 σ を N 回受けて破壊するとき、その応力振幅を 1 回受けると $1/N$ だけ寿命が失われ、したがって $N/N = 1$ に達したとき破壊が起るとする考え。

一般に $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m$ なる m 段の応力振幅があり、もしそれらが単独に加わるなら N_1, N_2, \dots, N_m 等の繰返し数で破壊するところを、実際にはそれらの応力を N_1, N_2, \dots, N_m 回加えた場合、破壊の起る条件は

$$\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} = 1 \text{ と表せる。}$$

付図-5 miner 仮説の説明

σ_c = コンクリート引張強度

p_c = 有効鉄筋比 A_s/A_c

l_{max} = 最大ひびわれ間隔 (ここでは 20cm と仮定する)

(5)ACI-318-71 の式

$$w = k \cdot \beta \cdot \sigma_s \cdot \sqrt[3]{d_c \cdot A} \cdot 10^{-3}$$

この式のみ、単位はインチ、ポンドである。

A = 鉄筋中心に対称に考えたコンクリート引張り有効面積を鉄筋本数で割ったもの

β = 部材底面から中立軸までの距離、鉄筋重心から中立軸までの距離に対する比

d_c = 引張縁から鉄筋中心までのかぶり

$k = 0.076$

σ_s = 鉄筋の応力 (kpsi)

付録-6 Miner 仮説について

Miner 仮説の概念を付図-5に示す。本試験の場合、応力振幅のみならず、片振り、両振りでは、最小応力も異なり一般には、最小応力、応力振幅を含んだ、SN 曲線を考えれば、付図-5と同様に扱うことが出来る。

また、 $\sum n_i/N_i$ を累計回数比とも言うが、本研究では、疲労現象の目安として累計回数比を用いた。

付録-7 ひびわれ発生荷重の推定

直接観測、ひずみの変化、たわみの変化およびその他

の方法がある。いずれの方法も満足できる方法でないから、いくつかの方法を用いて測定値を検査するのがよい。

(1)直接測定

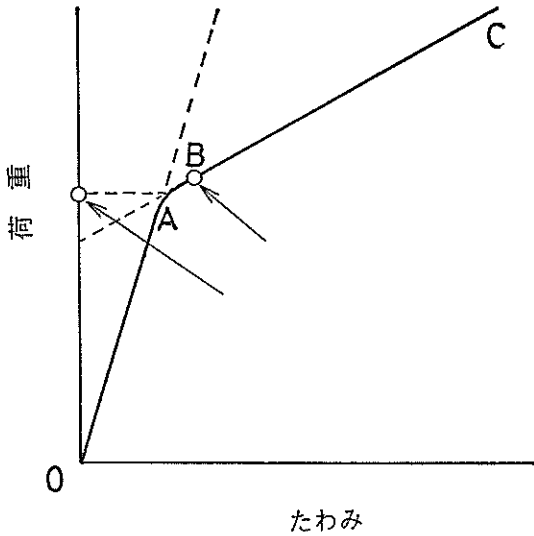
肉眼または拡大鏡などによってひびわれを発見する方法であるから、観測者の熟練の程度によって差がある。倍率の高い顕微鏡を用いてひびわれを見出すことは、コンクリートの表面が粗であること、視野が極めて小さいことなどの理由で困難である。

コンクリートの表面に塗料を塗布して観測する場合は、塗料の性質を良く調べてから用いるのが良い。コンクリートの脆性と同じ性質をもつ塗料は現在見当たらないし、ひずみ塗料もコンクリートの表面が粗で塗料膜が一樣にならないために使用が困難である。石灰やチャークの微粉末を塗布することがあるが、薄く塗布しないとひびわれの発生を誤認することがある。

コンクリートが乾燥している場合は、コンクリート面に水を吹きつけて濡らせば、ひびわれ部分の水の吸収が早いためにひびわれが黒い線になって現われる。この方法は何回も繰り返して実施することはできないが、プレキャスト製品のひびわれの有無の検査などに用いられる。

(2)ひずみ計による方法

最初にひびわれが発生すると思われる位置にひずみ計



付図-6 ひびわれによるたわみの変化

(ワイヤストレインゲージ等)を取りつけ、ひずみの異常な増加によって推定する。実際はひびわれ発生位置を予測することがむずかしく、多数のひずみ計を同時に使用しなければならない。

(3)たわみの変化によって推定する方法

ひびわれがでるとたわみが増大する性質を利用して、ひびわれ発生荷重を推定できる。ひびわれによって、たわみは付図-6のOABCのように変化するが、1個のひびわれがたわみの変化に与える影響は小さく、ひびわれが大きくなるB点までははっきりわからない。この方法によって推定した値は、ひずみの異常変化によって推定した値より僅かに大きい、比較的確実な方法である。PC鋼材とコンクリートとの間に付着がない場合は付図-5のAB間が長くなり推定がむずかしい。

(4)ひびわれが発生するときの音を聴取する方法

コンクリートにひびわれが発生するとき音がでる。外部から入る音をシャ断するように被覆してピックアップをコンクリート面にあて、増幅してイヤホンで聞けば、かなり明確にひびわれ発生音を聴くことができる。この方法による場合は、雑音が入らないようにマイク接点を被覆することが肝要である。

付録-8 鋼材ひずみ ϵ_p , EI , 曲率の測定値よりの計算荷重を T , 支点と載荷点の距離を l_1 , 中央のダイヤルゲージと載荷点の距離を l_2 およびそこでのたわみを δ_c , 支店と載荷点の間にあるダイヤルゲージと支店との距離を l_3 およびそこでのたわみを δ_G , さらに $\delta_{ia} = \delta_c - \delta_G$

とすれば、

$$\delta_c = T l_1 \cdot \{l_1^2/6 - (l_1 + l_2)^2/2\} / (2EI)$$

$$\delta_G = T l_3 \cdot \{l_3^2/6 - l_1 \cdot (l_1 + 2l_2)/2\} / (2EI)$$

$$\delta_{ia} = T \cdot Z / EI$$

$$(Z = [\{l_1^3/6 - l_1 \cdot (l_1 + l_2)^2/2\} - \{l_3^3/6 - l_1 \cdot (l_1 + 2l_2) \cdot l_3/2\}] / 2)$$

ここで、 δ_c, δ_G は実測値であり、また、 δ_{ia} を考えたのは l_3 区間の EI と中央の等曲げモーメント区間の EI とが異なることの影響を少なくするためである。

これより $EI = T \cdot Z / \delta_{ia}$ として求まる。

また、中央曲げ区間でのモーメントを M とすると、 $M = T/2 \cdot l_1$ 更に、圧縮縁でのコンクリート表面ひずみを ϵ_c (実測値)、圧縮縁より中央軸までの距離を x とすれば、 $\epsilon_c = M \cdot x / EI$

EI, ϵ_c, M は既知であるので、 x は

$x = EI \cdot \epsilon_c / M$ より求まる。これより曲率 $1/\rho$ は

$$1/\rho = \epsilon_c / x \text{ として求まる。}$$

更に、中立軸より引張側PC鋼材までの距離を x_p とすれば、 $x_p = r_o + r_i - x$, PC鋼材ひずみの増分を ϵ_p とすれば、 $\epsilon_p = M \cdot x_p / EI$ として求めることができる。

付録-9 Z型パイル接合部における溶解部及び鋼板部 EI の計算法

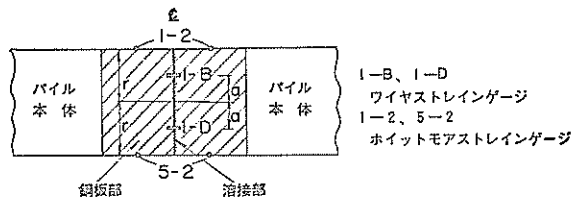
(1)溶解部 EI の計算法

付図-7に示す1-B, 1-D (ワイヤストレインゲージ)によって測定したひずみをそれぞれ (ϵ_B, ϵ_D とし、図心より1-B, 1-Dへの鉛直距離を a とすると、 $\epsilon_B = M/EI \cdot a$ $\epsilon_D = M/EI \cdot a$ が成立する。 ϵ_B と ϵ_D は必ずしも一致しないので、それらの平均値として ϵ を求め、

$$EI = M \cdot a / \epsilon \text{ として } EI \text{ を求める。}$$

(2)鋼板部 EI の計算法

付図-7に示す1-2, 5-2によって測定したポイント間のひずみをそれぞれ $\Delta l_{1-2}, \Delta l_{5-2}$ とすれば、この間のひずみは、ポイント間の距離を l として $\Delta l_{1-2}/l, \Delta l_{5-2}/l$ として表わせる。以下は、(1)と同様にして鋼板部 EI を算出する。



付図-7 Z型接合部ゲージ貼付図

参考文献

- 1) 小柳 治：鉄筋コンクリート設計法の最近の動向，土木学会，昭和50年11月，11pp.
- 2) 社プレストレストコンクリート技術協会：PCくい基礎の最近の進歩，昭和48年10月，pp. 115～132.
- 3) 岡田 清，神山 一：プレストレストコンクリートの設計，国民科学社，昭和49年10月，pp. 117～129.
- 4) 猪股 俊可：プレストレストコンクリートの設計及び施工，技報堂，1957年，pp. 586～593.
- 5) Robert N. Bruce, David C. Hebert: Splicing of Precast Prestressed Concrete Piles: Part I Review and Performance of Splices, PCI Journal 1974 Sept-Oct, pp. 70～97
- 6) 1)と同じ pp. 37～40
- 7) 土木学会：プレストレストコンクリート設計施工指針，昭和36年
- 8) 土木学会，昭和51年プレストレストコンクリート標準示方書（最終案）
- 9) ACI Committee 318: Building Code Requirements for Reinforced concrete (ACI 318-71), ACI, 1975, pp. 1～78
- 10) 例えば
FIP: Recommendations for The Design and Construction of Concrete Sea Structures, second edition, FIP, 1977, pp. 1～254
- 11) 横堀 武夫：材料強度学，技報堂，1958年，pp. 169～171
- 12) 川田 雄一：金属の疲労と設計，オーム社，S47年，pp. 191～219
- 13) John M. Hanson, Craig A. Ballinger: Considerations for Design of Concrete Structures Subjected to Fatigue Loading, ACI Committee 215, ACI Journal, March, 1974, pp. 97～119
- 14) P. W. Abeles: Fatigue Resistance of under Reinforced Prestressed Beams Subjected to Different Stress Ranges-Miner's Hypothesis, ACI, SP 41, 1974, pp. 237～277
- 15) G. M. Nordby: Fatigue of Concrete-A Review of Research, ACI Journal August, 1958, pp. 191～219
- 16) M. E. Award and H. K. Hilsdorf: Strength and Deformation characteristics of Plain Concrete Subjected to High Repeated and Sustained Loads, ACI, SP. 41, 1974, pp. 1～13
- 17) 畑野 正：コンクリートの如き脆性体のひずみに立脚した破壊論，土木学会論文集，第153号，昭和43年5月，pp. 31～39
- 18) John T. McCall: Probability of Fatigue Failure of Plain Concrete, ACI Journal, August, 1978, pp. 233～244
- 19) P. W. Abeles: Behavior of Under-Reinforced Prestressed Concrete Beams Subjected to Different Stress Ranges, ACI, SP. 41, pp. 279～300
- 20) 2)と同じ pp. 39～40
- 21) 10)と同じ pp. 268～269
- 22) 諸外国の海洋構造物技術基準に関する調査及び動向調査，運輸省港湾局，昭和53年3月