

軽量コンクリートを用いたPC桁の疲労試験

沢野邦彦*・小林峰夫**
成岡昌夫***

1. まえがき

PC橋のスパンが長大化するにしたがって、全荷重に対する自重の占める割合が大きくなって来る。このような場合に、軽量コンクリートを用いて死荷重の軽減をはかることは、桁材料の節約、下部構造の簡素化など、有利な面が非常に多い。わが国でも、すでに数種の人工軽量骨材が市販されているが、構造物の軽量化の見地から次第に多く利用されるようになってきた。

阪神高速道路公団の委託により、オリエンタルコンクリート(株)において、軽量コンクリートを用いたプレテンション方式によるPC桁の静的曲げ破壊試験が行なわれたが¹⁾、静的試験のみでは桁の力学的挙動を十分究明したことはならず、このためには桁の疲労性状をもあわせ検討する必要がある。そこで、日本セメント(株)、大阪セメント(株)、三井金属鉱業(株)各社のご協力をえて、プレテンション方式による軽量PC桁の疲労試験を行なった。以下、試験の概要ならびに結果について報告する。実験は、昭和42年7、8月に行なった。

2. 試験桁および試験方法

(1) 試験桁

試験桁に使用したコンクリートは、普通骨材コンクリート、および人工軽量骨材コンクリートで、軽量骨材としては、アサノライト、ライオナイト、およびメサライトの3種類を選んだ。試験桁は合計8本で、使用した骨材別に表-1に示すように分類した。

試験桁の形状、寸法を図-1に示す。

(2) 試験桁に用いた材料の性質

a) 鋼線

* 名大工修(株)福山コンサルタント
** オリエンタルコンクリート(株)大阪営業所設計課長
*** 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科

表-1 試験桁の分類

| 桁の符号 | 使用骨材 | 載荷行程※ |
|------|--------|-------|
| N1 | 普通 | I |
| N2 | 普通 | II |
| A1 | アサノライト | I |
| A2 | アサノライト | II |
| L1 | ライオナイト | I |
| L2 | ライオナイト | II |
| M1 | メサライト | I |
| M2 | メサライト | II |

注：※載荷行程IおよびIIについては図-2参照

図-1 試験桁の断面および載荷方法

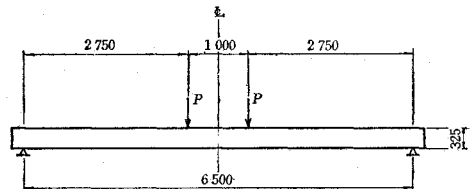
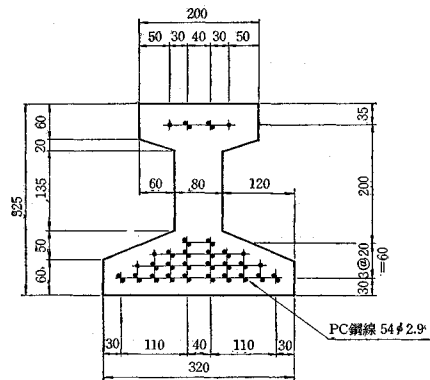


表-2 鋼線の性質

| 直径 (mm) | 引張強度 (kg/mm ²) | 降伏点応力度 (kg/mm ²) | 破断時伸び | 弾性係数 (kg/cm ²) |
|---------|----------------------------|------------------------------|-------|----------------------------|
| 2.9 | 207 | 201 | 6.0 % | 2.07×10 ⁶ |

PC鋼線にはφ2.9 mm 2本より線を使用した。その性質を表-2に示す。

b) コンクリート

表-3 コンクリートの配合

| 区分 | 単位セメント量 (kg) | 単位水量 (kg) | 水セメント比 (%) | 細骨材率 (%) | 単位細骨材量 (kg) | 単位粗骨材量 (kg) | ボゾリス No. 8 (kg) |
|----------|--------------|-----------|------------|----------|-------------|-------------|-----------------|
| 普通コンクリート | 450 | 153 | 34 | 33 | 577 | 1208 | 1125 |
| アサノライト | 450 | 166 | 36.9 | 33 | 391 | 682 | 1125 |
| ライオナイト | 450 | 153 | 34 | 33 | 436 | 633 | 1125 |
| メサライト | 450 | 158 | 35.1 | 33 | 413 | 547 | 1125 |

表-4 コンクリートの強度

| 区分 | 圧縮強度 (kg/cm ²) (φ10×20 cm) | | | 弾性係数 (kg/cm ²) (φ10×20 cm) | | 引張強度 (kg/cm ²) (φ10×20 cm) | | 曲げ強度 (kg/cm ²) (10×10×40 cm) | |
|----------|---|-----------------|-----------------|---|-----------------|---|-------------------|---|-------------------|
| | σ _s | σ ₂₈ | σ ₅₅ | E ₂₈ | E ₅₅ | σ _{t 28} | σ _{t 55} | σ _{B 28} | σ _{B 55} |
| 普通コンクリート | 523 | 712 | 660 | 400 000 | 393 000 | 39.1 | 32.9 | 70.1 | 54.7 |
| アサノライト | 612 | 685 | 612 | 211 000 | 215 000 | 36.0 | 25.4 | 52.8 | 42.3 |
| ライオナイト | 491 | 501 | 512 | 229 000 | 227 000 | 36.8 | 27.2 | 53.4 | 38.8 |
| メサライト | 451 | 503 | 449 | 203 000 | 202 000 | 28.1 | 21.2 | 45.9 | 32.5 |

コンクリートの配合を表-3に、強度試験結果を表-4に示す。

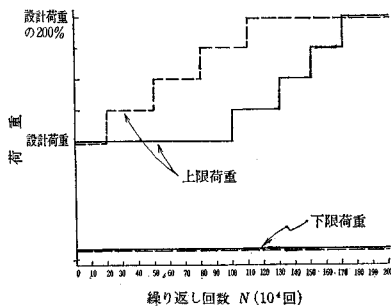
(3) 試験桁の製作

桁はすべてプレテンション方式によって製造されたものである。

(4) 試験方法

荷重は名大工学部土木工学教室のローゼンハウゼン型疲労試験機により、図-2に示す各行程にしたがって載荷した。繰り返し荷重の載荷速度は 300 rpm である。各段階における荷重を表-5に示す。

図-2 繰り返し荷重載荷行程



— 載荷行程 I (N1, A1, L1, M1桁)
 - - - 載荷行程 II (N2, M2, L2, A2桁)
 下限荷重：桁自重以外の死荷重、すなわち、中埋コンクリートおよび舗装の重量に相当する荷重
 設計荷重：下縁合成応力度が0となるべき荷重

表-5 繰り返し荷重の大きさ (kg)

| 区分 | 普通コンクリート桁 | 軽量コンクリート桁 |
|------|-----------|-----------|
| 下限荷重 | 373 | 309 |
| 上限荷重 | 設計荷重の100% | 1862 |
| | 設計荷重の125% | 2234 |
| | 設計荷重の150% | 2607 |
| | 設計荷重の175% | 2980 |
| | 設計荷重の200% | 3351 |
| | | 1775 |
| | | 2141 |
| | | 2507 |
| | | 2874 |
| | | 3240 |

また、10万回ごとに繰り返し荷重を停止し、静荷重試験を行なった。静荷重試験は0から0.5tきざみで上限荷重まで載荷し、各荷重段階で次に示す項目について測定を行なった。

① ひずみ：電気抵抗線ひずみ計 (Gage Length 60 mm) および Huggenberger Deformeter を用いた。

② たわみ：ダイヤルゲージ (1/100 mm) を用いた。また、スパン中央において橋軸直角方向に針を貼り着け、固定したスケールに対する動きを読んだ。

③ 支点沈下状況：ダイヤルゲージ (1/100 mm) を用いた。

④ ひびわれ幅：Huggenberger Deformeter によって平均ひびわれ幅を測定するほかに、N 2, M 2, L 2, および A 2 の各桁については、ルーベを用いてひびわれ幅の測定を行なった。比較的大きいひびわれを適当に 8~10 本選び、そのおのおのにつき、下縁から 3 cm ごとにひびわれ幅を測定した。

測定点の位置を図-3に示す。

3. 試験結果および考察

(1) 桁のたわみ

支間中央のたわみ、および荷重載荷点 (支間中央より 50 cm の点) のたわみ測定結果の数列を、図-4~6に示す。図中、破線は全断面有効として計算したたわみの計算値である。設計荷重を越える付近からたわみ曲線の傾きが変わり、たわみの増加が著しくなるが、これはひびわれによって桁の有効断面が減少したためと考えられる。また、このような大きな荷重のもとでのたわみの変化率は、繰り返し回数とともに増加する傾向にある。しかし、設計荷重付近までの荷重でのたわみは、繰り返し回数が増加してもほとんど変化しない。

P=1.5t における各桁のたわみ、および同荷重にお

ける計算値に対する実測たわみの比を表-6に示す。繰り返し回数の増加とともに、たわみは増加し、剛性が低下していく傾向が認められるが、その程度はきわめてわずかである。

(2) 桁のひずみ

支間中央において、上下縁よりそれぞれ3cmの位置のひずみの一例を図-7に示す。図中、破線は計算値を、実線は実測値を示す。ひずみ曲線はたわみの場合と同様に、設計荷重付近までは、繰り返し回数によってあまり変化しないが、荷重がそれ以上になると、ひずみの変化率は次第に大きくなる傾向を示している。

(3) 曲げ剛性

曲げ剛性は、スパン中央部の曲げモーメント一定区間で測定したHuggenberger Deformeterによるひずみから、次式を用いて求めた。

$$\rho = \frac{|\epsilon_c| + |\epsilon_t|}{h} = \frac{M}{K}$$

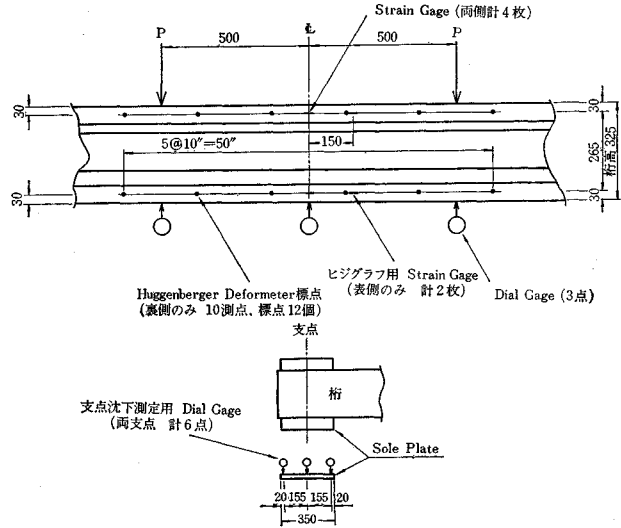
これより

$$K = \frac{h \cdot M}{|\epsilon_c| + |\epsilon_t|}$$

ここで、 K : 曲げ剛性、 ρ : 断面の回転角、 ϵ_c : 圧縮ひずみ、 ϵ_t : 引張ひずみ、 h : ϵ_c および ϵ_t を測定した測点間の距離、 M : スパン中央部の曲げモーメント

各PC桁の曲げ剛性と繰り返し回数との関係を図-8~10に示す。これらの図において、曲げ剛性の測定値は所定回数の繰り返し載荷後に行なった静的載荷時のひずみから計算で求めたもので、考察の便のため、桁種類別および載荷荷重別にそれぞれ1本ずつの想定線を描いた。これらより、ひびわれ発生前の載荷 $P=1.0t$ あるいは $P=2.0t$ における曲げ剛性はコンクリートの弾性係数にほぼ比例して大きく現れており、普通骨材桁は軽量骨材桁の約1.6~2.0倍の剛性を示している。また、いずれの桁においても、設計荷重以下の荷重の繰り返しに対しては曲げ剛性はほとんど変化しないが、ひびわれ荷重以上の荷重における曲げ剛性、あるいはひびわれ発生後の曲げ剛性は、繰り返し回数とともに減少する傾向がみられる。さらにまた、曲げ剛性が荷重の増加とともに、あるいはひびわれ発生後繰り返し回数とともに低下していく状態は、普通骨材桁の方が軽量骨材桁よりもはるかに著しい。これは、ひびわれ発生前におけるたわみは、弾性係数の小さい後の方が前者よりも大きい、ひびわれ発生後のたわみの増加は普通骨材桁の方が大きく、破壊荷重に近づくにたがって両者の差が次第に小さくなることを示している。この原因としては、後述す

図-3 各種測点位置



るように普通骨材桁の方がひびわれ幅が大きく、したがって、はり断面の縮小とそれに伴うIの減少が軽量桁よりも著しいことに起因するものと考えられる。

(4) 中立軸の位置

桁のひずみ分布の一例を図-11に、中立軸の位置の変化を図-12に示す。これはHuggenberger Deformeterによる測定値より計算したものである。これも、小さな荷重のもとではあまり変化しないが、荷重が大きくなると繰り返し回数 N とともに中立軸が上昇する傾向が認められた。

(5) ひびわれ荷重

ひびわれ発生状況の一例を写真-1に示す。表-7はひびわれ荷重を示したものである。N2桁では、繰り返し回数を80万回載荷した後に行なった静的試験の際、2980tまで荷重をかけたが、このときにはひびわれは発見できず、さらに上限2980tの繰り返し荷重を10万回載荷した後の静的試験において $P=2.5t$ のとき、ひ

写真-1 ひびわれ発生状況

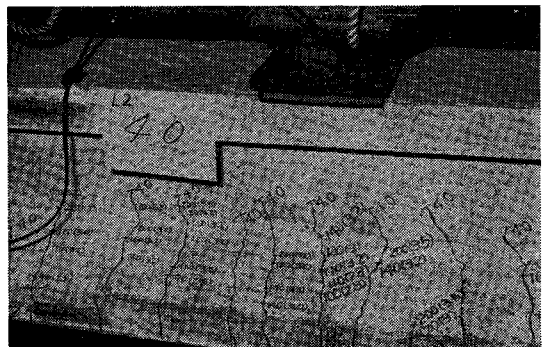


図-4 荷重-たわみ曲線 (L1桁)

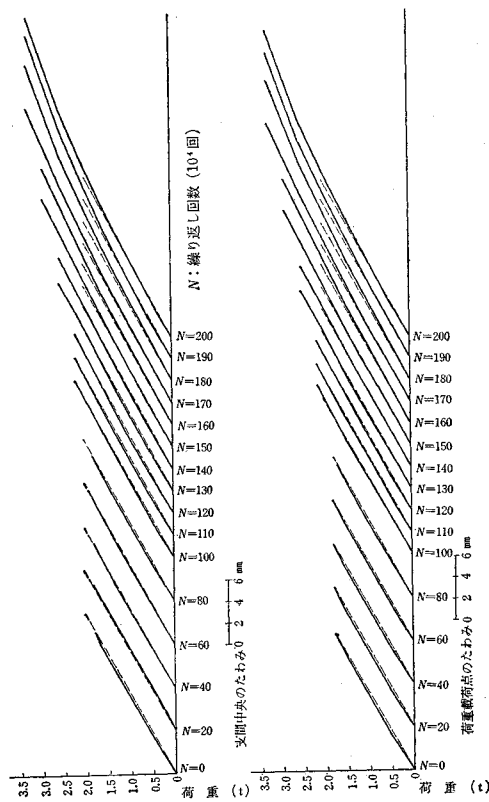


図-5 荷重-たわみ曲線 (N2桁)

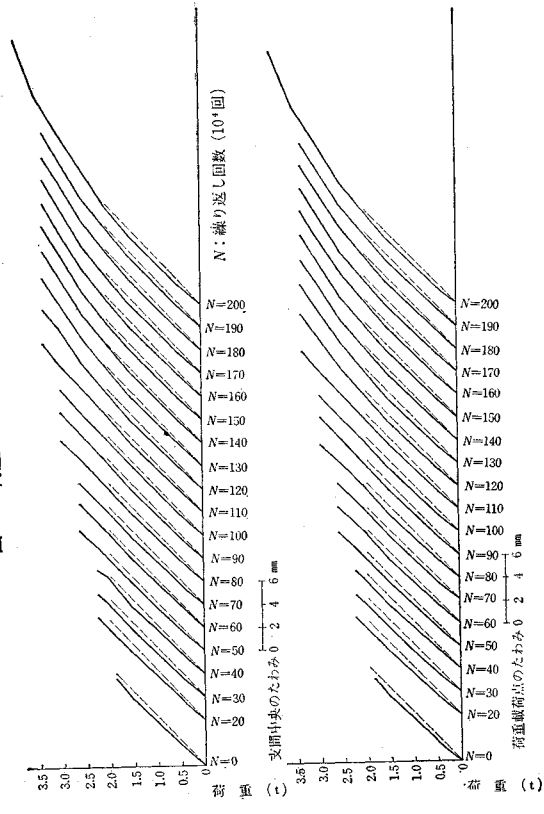


図-6 荷重-たわみ曲線 (L2桁)

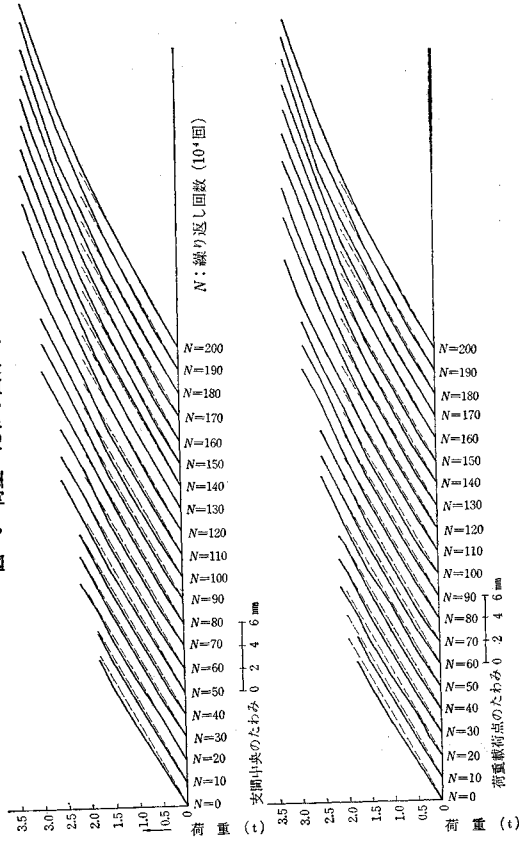


図-7 荷重-たわみ曲線 (M1桁)

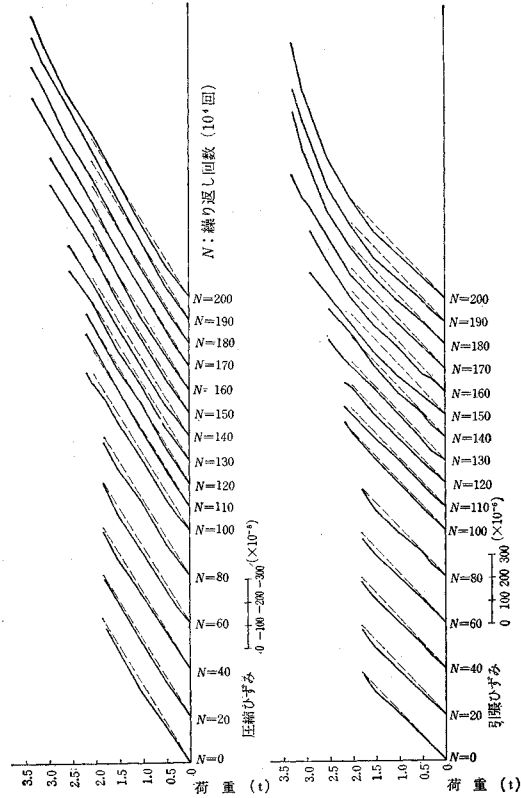


表-6 上欄; $P=1.5t$ における支間中央のたわみ (mm), (下欄); 計算値に対する比(%)

| 繰り返し数 | 計算値 | 0回 | 20万回 | 40万回 | 60万回 | 80万回 | 100万回 | 120万回 | 140万回 | 160万回 | 180万回 | 200万回 |
|-------|-------|---------------|----------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| N 1 | 6.50 | 5.86 90.2 | 6.31 97.1 | 6.23 95.8 | 6.26 96.3 | 6.23 95.8 | 6.28 96.6 | 6.28 96.6 | 6.15 94.6 | 6.36 97.8 | 6.35 97.7 | 6.47 99.5 |
| N 2 | 6.50 | 5.86 90.2 | 5.82 89.5 | 5.81 89.4 | 5.89 90.6 | 5.88 90.5 | 5.90 90.8 | 5.88 90.5 | 5.92 91.1 | 5.94 91.4 | 5.98 92.0 | 5.88 90.5 |
| A 1 | 11.99 | 11.26 93.9 | 11.33 94.5 | 11.43 95.3 | 11.36 94.7 | 11.51 96.0 | 11.37 94.8 | 11.43 95.3 | 11.39 95.0 | 11.57 96.7 | 11.64 97.1 | 11.66 97.2 |
| A 2 | 11.99 | 11.19 93.3 | 11.43 95.3 | 11.52 96.1 | 11.55 96.3 | 11.50 95.9 | 11.79 98.3 | 11.66 97.2 | 11.67 97.3 | 11.59 96.5 | 11.59 96.5 | 11.60 96.7 |
| L 1 | 11.21 | 10.67 95.2 | 10.91 97.3 | 10.80 96.3 | 10.92 97.4 | 10.90 97.2 | 10.86 96.9 | 10.90 97.2 | 11.17 99.6 | 11.23 100.2 | 11.61 103.6 | 11.40 101.7 |
| L 2 | 11.21 | 10.41 92.9 | 10.64 94.9 | 10.74 95.8 | 10.72 95.6 | 10.99 98.0 | 10.71 95.5 | 11.19 99.8 | 11.21 100.0 | 11.30 100.8 | 11.14 99.4 | 11.28 100.6 |
| M 1 | 12.56 | 11.92 94.9 | 12.00 95.5 | 12.14 96.7 | 12.08 96.2 | 12.13 96.6 | 12.16 96.8 | 12.35 98.3 | 12.18 97.0 | 12.32 98.1 | 12.35 98.3 | 12.23 97.4 |
| M 2 | 12.56 | 12.28 97.8 | 12.58 100.2 | 12.50 99.5 | 12.60 100.3 | 12.71 101.2 | 12.69 101.0 | 12.82 102.1 | 12.87 102.5 | 12.77 101.7 | 12.49 99.4 | 12.69 101.0 |

表-7 ひびわれ荷重(kg), およびひびわれモーメント(kgm)

| 区分 | P_0 | P_B | P_t | P | N (万回) | $M/M_B(\%)$ | $M/M_t(\%)$ |
|-----|-------|-------|-------|-----------|-----------|-------------|-------------|
| | M_0 | M_B | M_t | M | | | |
| N 1 | 1911 | 2988 | 2532 | 2980~3350 | 170 | 99.7~112.1 | 117.7~132.3 |
| | 5256 | 8217 | 6964 | 8195~9213 | | | |
| N 2 | 1911 | 2988 | 2532 | 2000~2500 | 90 | --- | --- |
| | 5256 | 8217 | 6964 | 5500~6875 | | | |
| A 1 | 1861 | 2700 | 2393 | 2500~2874 | 150 | 92.6~106.4 | 104.5~120.1 |
| | 5117 | 7424 | 6581 | 6875~7904 | | | |
| A 2 | 1861 | 2700 | 2393 | 2500~2874 | 80 | 92.6~106.4 | 104.5~120.1 |
| | 5117 | 7424 | 6581 | 6875~7904 | | | |
| L 1 | 1865 | 2666 | 2418 | 2500~2874 | 150 | 93.8~107.8 | 103.4~118.9 |
| | 5104 | 7332 | 6650 | 6875~7904 | | | |
| L 2 | 1865 | 2666 | 2418 | 2500~2874 | 80 | 93.8~107.8 | 103.4~118.9 |
| | 5104 | 7332 | 6650 | 6875~7904 | | | |
| M 1 | 1865 | 2557 | 2300 | 2000~2507 | 140 | 78.2~98.0 | 87.0~109.0 |
| | 5129 | 7033 | 6324 | 5500~6894 | | | |
| M 2 | 1865 | 2557 | 2300 | 2000~2507 | 50 | 78.2~98.0 | 87.0~109.0 |
| | 5129 | 7033 | 6324 | 5500~6894 | | | |

注:

- ① $P_0(M_0)$: 下縁合成応力度が0になる荷重 (曲げモーメント)
- ② $P_B(M_B)$: 下縁合成応力度が実測曲げ強度 σ_B に等しくなる荷重 (曲げモーメント)
- ③ $P_t(M_t)$: 下縁合成応力度が実測引張強度 σ_t に等しくなる荷重 (曲げモーメント)
- ④ $P(M)$: ひびわれが生じたときの荷重 (曲げモーメント)
- ⑤ N : ひびわれが生じたときの繰り返し回数

表-8 下縁より 3 cm の位置における最大ひびわれ幅(mm)

| 桁の種類 | 荷重 (kg) | | | |
|------|---------|-----------------|------|-----------------|
| | 2507 | 2874 (2980)※ | 3000 | 3240 (3351)※ |
| N 2 | — | 0.05 | 0.10 | 0.15 |
| M 2 | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.08 |
| L 2 | — | 0.06 | 0.08 | 0.10 |
| A 2 | — | 0.08 | 0.09 | 0.11 |

注: ※ () 内は N 2 桁の荷重を示す。

ひびわれを発見したが、これは明らかに再びひびわれであると考えられる。A, L および M 桁は、それぞれ桁 1 本目

図-8 繰り返し回数と曲げ剛性 (N1, N2 桁)

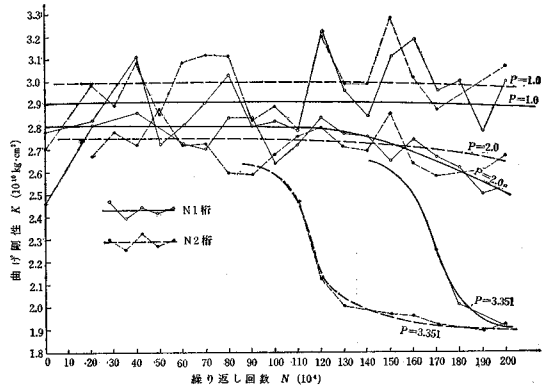


図-9 繰り返し回数と曲げ剛性 (A1, L1, M1 桁)

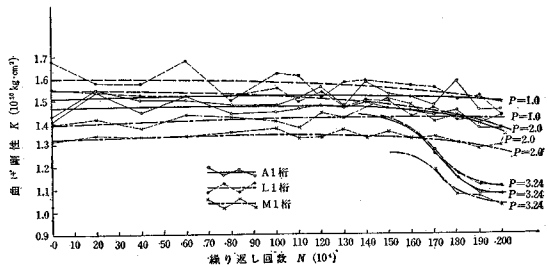


図-10 繰り返し回数と曲げ剛性 (A2, L2, M2 桁)

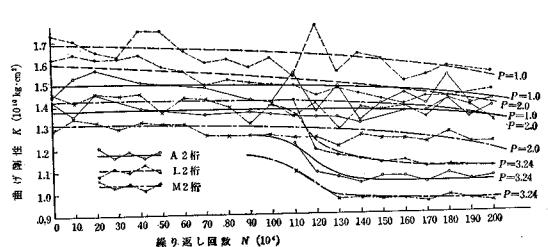


図-11 ひずみ分布 (A1桁) (N の単位: 万)

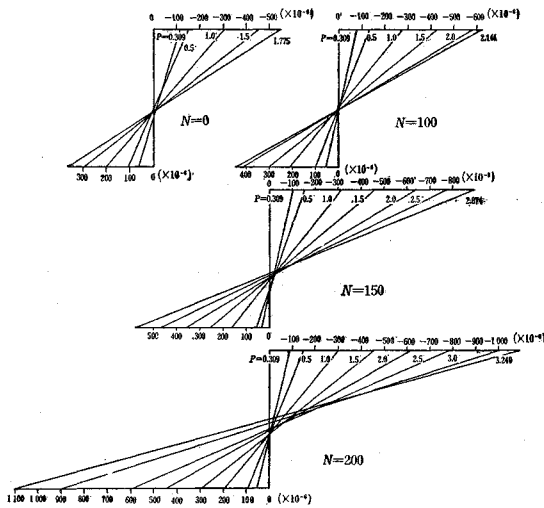
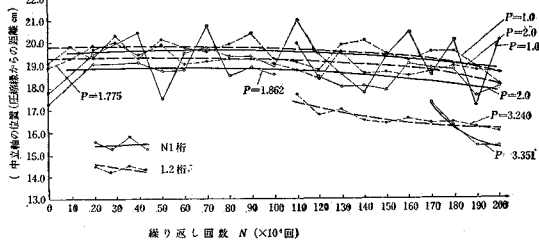


図-12 中立軸の位置の変化 (N1 および L2 桁)

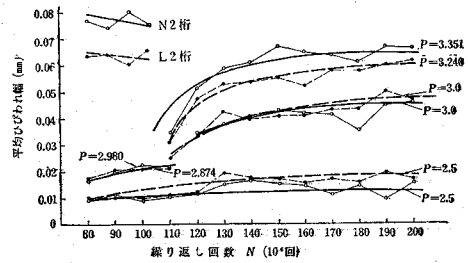


と2本目とで載荷過程が異なっているが、同じ大きさの荷重に達したときにひびわれを発見している。ひびわれの発見の遅れなどもあるが、ひびわれモーメントは、 M_i (ひびわれモーメントの計算値, 実測引張強度 (ϕ 10×20)) を考慮と M_B (ひびわれモーメントの計算値, 実測曲げ強度 ($10 \times 10 \times 40$ cm)) を考慮) の間にあるといえる。このことは、オリエンタル コンクリート (株) で行われた静的曲げ破壊試験における結果⁹⁾とも一致しており、ひびわれ発生荷重以下の荷重の繰返しによる影響はほとんど認められない。また、たわみ曲線および、ひずみ曲線の傾きの変化から再びひびわれ発生荷重を推定すると、普通コンクリートの場合約 2.0 t、軽量コンクリートの場合約 1.9 t となり、計算値と大体一致している。

(6) ひびわれ幅

Huggenberger Deformeter により測定した平均ひびわれ幅を 図-13 に示す。これはひびわれの発生している荷重のもとでのひずみ量と、ひびわれが再開し始める荷重におけるひずみ量との差が標点間の合計ひびわれ幅を与えるものであるとし、これを標点間のひびわれの本

図-13 平均ひびわれ幅 (N2 および L2 桁)



数で除したものである。

平均ひびわれ幅は繰返し回数 N とともに増加する傾向にあり、荷重が大きいほどこの傾向は顕著である。しかし、各桁とも荷重を除荷すればそれは完全に閉じ、2 t 付近までは開口しない。

また、ルーペにより測定した最大ひびわれ幅を表-8 に示す。

普通骨材コンクリート桁の方が軽量コンクリート桁よりも平均ひびわれ幅、最大ひびわれ幅ともに大きく、荷重の増加とともにこの傾向は著しくなる。しかし、ひびわれの本数は、軽量コンクリート桁の方が多い。すなわち、軽量コンクリート桁では細かいひびわれが多数発生するのに対し、普通骨材コンクリート桁ではひびわれの本数は少ないが、ひびわれ幅は前者にくらべてかなり大きい。

平均ひびわれ幅が 0.02 mm に達する荷重 (曲げモーメント) は繰返し回数とともに変化するが、およそ 2.8 t ~ 3.8 t (7.1 t·m ~ 7.7 t·m) で、これは設計荷重の 150 ~ 160% に相当する。

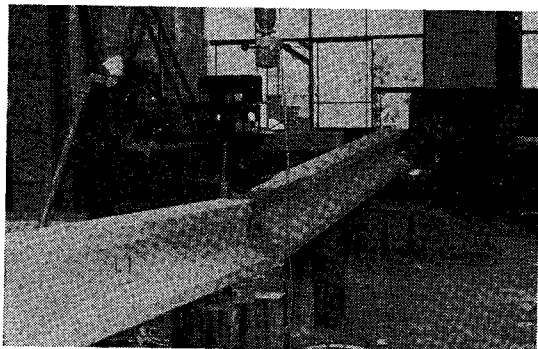
(7) 静的破壊試験

桁はすべて 200 万回の繰返し荷重のもとでは破壊に至らなかったため、図-2 の載荷行程を終了した後に、静的破壊試験を行なった。破壊状態を写真-2 に示す。

桁の破壊性状は 8 本ともほとんど同様であった。すなわち、荷重の増加とともに、曲げにより発生したひびわれがその幅を広げながら上昇し、斜引張によるひびわれに移行し、終局的には桁上縁のコンクリートが最大圧縮ひずみに達して圧潰し、同時に先のひびわれに沿って破壊する。Shear crack に移行するのは $P=4.5$ t 付近である。

破壊荷重の実測値および計算値を表-9 に示す。なお、計算値において、PC 鋼線の引張強度は 197 kg/mm² (JIS 規格値)、コンクリートの圧縮強度は実測値を用いた。オリエンタルコンクリート (株) における静的試験結果では、実測破壊荷重と計算破壊荷重との比は

写真-2 破壊状態



91~103% であり、本実験結果と同じような値を示している。すなわち、繰返し荷重を 200 万回載荷した後も、静的破壊強度の低下はほとんどないものと推察される。

表-9 破壊荷重 (t)

| 桁の種類 | 計算値(t) | 実測値(t) | 実測値 | 実測値 |
|------|--------|--------|-----|------|
| | | | (%) | (%) |
| | | | 計算値 | 設計荷重 |
| N 1 | 5.48 | 5.50 | 100 | 288 |
| N 2 | 5.48 | 5.67 | 103 | 297 |
| A 1 | 5.52 | 5.60 | 101 | 301 |
| A 2 | 5.52 | 5.43 | 98 | 292 |
| L 1 | 5.36 | 5.08 | 95 | 274 |
| L 2 | 5.36 | 5.03 | 94 | 271 |
| M 1 | 5.32 | 4.73 | 89 | 254 |
| M 2 | 5.32 | 4.87 | 92 | 261 |

また、各桁とも、1本目と2本目の載荷過程の相違による影響も認められない。

4. 結論

(1) 4種類の桁を2本ずつ、合計8本について疲労試験を行なった。設計荷重の2倍の荷重を各桁1本目では30万回、2本目では90万回繰返し載荷したが、桁はすべて疲労破壊は起こさなかった。これは、設計荷重の2倍程度までの過大荷重が繰返し作用した場合の桁の安全性を意味するものである。

(2) ひびわれが発生し、さらにそれが開口するような大きな荷重を、繰返し載荷した後も設計荷重付近までの荷重に対する桁のたわみ、ひずみなどは繰返し荷重載荷前とくらべて変化はなく、またひびわれも閉じている。

(3) 設計荷重以上の荷重におけるたわみ、ひずみなどは、繰返し回数とともに増加する傾向を示す。

(4) 繰返し荷重を200万回載荷した後も、静的破壊に対する安全率は低下しない。

(5) 軽量コンクリートを用いたプレテンションング方式によるPC桁は、従来の設計法にしたがうかぎり、疲労に対しては十分な安全性を持っているものと考えられる。

最後に、実験にあたり、多大なご尽力をいただいた日本セメント(株)、大阪セメント(株)および三井金属鉱業(株)の各社に謝意を表したい。また、鳥取大学教授西林新蔵博士には、実験の計画、測定、結果のとりまとめの全般にわたって、ご懇切な指導をいただいた。ここに特に記して、深甚の謝意を表したいと思う。

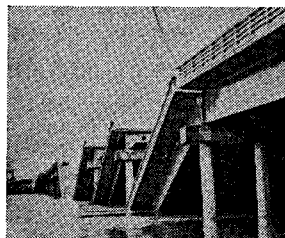
参考文献

- 1) 小林峰夫：軽量プレテン桁の載荷試験，材料，18.185 (1969.2)，pp. 91~97.

(1969. 3. 27・受付)

土木学会新潟震災調査委員会編

昭和39年 新潟地震震害調査報告



- 第1編 総論 第2編 地震 第3編 土質・地質
地盤変動 第4編 道路 第5編 鉄道 第6編
河川 第7編 道路橋 第8編 鉄道橋 第9編
港湾・漁港・空港 第10編 電力施設 第11編 衛生
施設 第12編 農林土木 第13編 建築 第14編
通信施設 第15編 工場災害

B5判・904ページ 上製箱入

頒価 10000円
送料 200円

会員特価 9000円

お申込みは土木学会または書店へ……書店経由の場合は会員であっても会員特価の取扱いはありません。