

繰り返し荷重を受けるI断面鋼桁の曲げ疲労について

室蘭工業大学工学部 正員 中村作太郎

室蘭工業大学工学部 正員 ○志村 政雄

1. 緒言

I断面鋼桁の曲げ疲労に関する研究は、世界各国において種々行なわれるようになり、我が国においてもこれに関する研究論文が最近見られるようになって来た。しかし、それらの研究には、特定の断片的なものが多く、片振れ、両振れを含む一般的なものは少いようであり、まだまだ、未知・未開発の研究問題が沢山残っている。

著者等は、自動車荷重・鉄道車輛荷重のほか、風荷重・地震荷重などの単位サイクル数の異なる動的荷重が載荷された場合をも想定し、両振れ型の構造物疲労試験機を利用し、4本のI断面鋼桁に片振りおよび両振りの繰り返し荷重を載せ、その曲げ疲労現象について試験的研究を試みた結果、各種の興味ある基礎的特性を見出すことが出来た。また、他の1本のI断面鋼桁については、静荷重試験を行ない、上述の動荷重試験結果との比較吟味より、弾性限度以内より破壊に至るまでの過程とそれに及ぼす繰り返し荷重による疲労の影響などについて考察を試みた。

2. 桁の曲げと疲労に関する基本的概念

(1) 桁の弾性曲げ解式

桁の弾性曲げ解析法における Bernoulli-Navier の仮説、Hooke の法則に関する仮定のほか、従来用いられている諸仮定をそのまま用い、次式を採用する。

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon/y = 1/\rho = \phi, \quad M = \int_A \sigma y dA = EI\phi, \quad \sigma = E\varepsilon = Ey\phi \\ M_y = EI\phi_y = \sigma_y S, \quad 0 < \phi < \phi_y \end{aligned} \right\} \text{----- (1)}$$

ここに、 ρ : 曲率半径、 ε : ひずみ、中立軸からの垂直距離、 E : 弾性係数、 A : 断面積、 I : 断面2次モーメント、 M : 弾性限度以内における曲げモーメント、 M_y : 降伏モーメント、 σ : 弾性限度以内における曲げ応力、 σ_y : 降伏曲げ応力、 S : 断面係数、 ϕ : 弾性限度以内における曲率、 ϕ_y : 降伏モーメント時の曲率。

(2) 桁の塑性曲げ解式

荷重が段々増加し、弾性領域を超過すると最大繊維応力が降伏応力(σ_y)に到達するようになり、その後は他の外縁においても降伏応力となる。その後は、荷重の増大につれて、降伏部分が次第に部材内部へ広がって行き、最後に全断面降伏状態となる。すなわち、断面はこれ以上の曲げモーメントの増加には抵抗出来なくなり、変形のみが進行する。この状態を塑性ヒンジの状態といい、その時の曲げモーメントを全塑性モーメント(M_p)という。この場合、 M_p は断面形状により一定値を示し、全塑性モーメント M_p は次の形で表わされる。

$$M_p = \sigma_y Z, \quad f = M_p/M_y = Z/S_y, \quad fS_y = Z \text{----- (2)}$$

ここに、 Z : 塑性断面係数、 S_y : 普通の弾性断面係数 $= I/y$, f : 形状係数(断面形状により一定値)、 M_y : 降伏モーメント、 σ_y : 降伏曲げ応力。

(3) 疲労の基本的概念

構造物は時間的に大きさの変化する応力を受けることが多い。このような繰り返し応力を受ける場合、静荷重試験による静的極限強さよりも低い場合でも、繰り返し数を増加すると遂に破壊するに至る。

このように、大きさの変化する繰り返し応力を受けて、抵抗力の低下する現象を疲労といっているが、大きさの変化する応力として、最も基本的なものは、大きさが時間とともに正弦波的に変化する場合である。この種の応力変化を表わすには、最大応力度(σ_{max})、最小応力度(σ_{min})を用いるか、あるいは、平均応力度(σ_m)、応力振幅(σ_a)を用いればよいことになっている。すなわち、次の表示方法がある。

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} &= \sigma_m + \sigma_a, \quad \sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a \\ \sigma_m &= (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2, \quad \sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2 \end{aligned} \quad (3)$$

繰り返し応力の範囲には、図-1の通り、7種類のものがあり、狭義では、(2)、(6)を片振り応力 ($\sigma_{\min} = 0$)、(4)を面振り応力 ($\sigma_m = 0$) というが、広義では、(1)、(2)、(6)、(7)を片振り応力、(3)~(5)を面振り応力ということが出来る。

(2)、(6)に示す片振り応力は、基本強さとも称され、(4)の面振り応力とともに疲れ強さの基本となるものである。

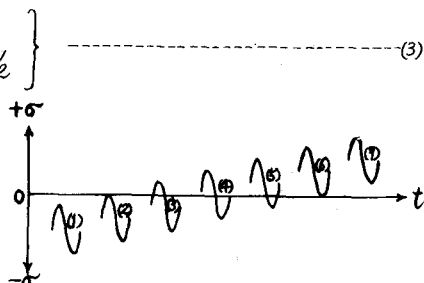


図-1、繰り返し応力の種類

3. 模型

鋼桁模型は、No.1, 2, 3, 4, 5の5本であるが、その断面は、図-2に示す通り、いずれもI形で同一寸法とする。また、鋼材の種類には最も普通に用いられるSS 41を用い、ストレインゲージの貼付位置は、図-3に示す通りとする。

なお、模型No.1は静荷重試験、模型No.2, No.5は片振り繰り返し荷重試験、模型No.3, No.4は面振り繰り返し荷重試験に用いるよう配慮した。

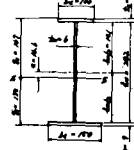
4. 試験装置・測定機器および記録装置

実験に用いた試験装置・測定機器および記録装置を挙げれば、次に示す通りである。

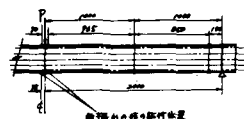
島津製作所製サーボパルサーEHF 30型の構造物疲労試験機(面振り型、動荷重最大能力30t、静荷重最大能力40t)、SM-6 K型抵抗線静歪測定器、DPM-E型抵抗線動的歪測定器、ダイヤルゲージ(精度: 1/100 mm)、ビジュグラフFR-301型、ラビコダーRMV-33型電磁オシログラフ。



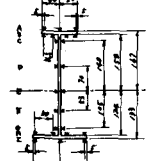
(a) 側面図



(b) 横断面図



(a) 側面図



(b) 横断面図

図-2 模型の寸法

図-3 ゲージの位置

5. 実験方法

上記の島津製作所製面振り型構造物疲労試験機を使用し、I断面鋼桁模型No.1~No.5とも1本ずつ、支間4.0mに設定した曲げ試験支持台の上に載せ、図-3に示した位置にストレインゲージを貼付完了後、上に挙げた測定機器・記録装置を駆使し、中央1点集中線荷重載荷により、次に示す各種の試験を行なった。

(1) 模型No.1の試験

他の4本の模型による繰り返し荷重試験の結果と比較吟味する目的で、両端単純支持、中央1点集中線荷重載荷による静荷重試験を行なった。すなわち、荷重は模型桁が破壊するまで2tずつ増加し、その都度、歪測定器・ダイヤルゲージの測定可能な限り、ひずみ・たわみを測定し、更にそれ以後の荷重増加に対しても変形過程・破壊現象について観測・追求した(破壊荷重: 14t)。

(2) 模型No.2の試験

両端固定ヒンジ挟持(上下より取付枠で締め付ける固定方法の支持)の状態では、中央1点集中線荷重載荷により、表-1の通り上限荷重およびサイクル数を種々変えて片振り繰り返し表-1 片振り載荷試験表荷重試験を行なった(10t~0.8Hz; 84,000回にて亀裂進行のため中止)。なお、荷重・周期を変え3度に6tまでの静荷重載荷試験を行ない、疲労の影響について吟味を加えた。

(3) 模型No.3の試験

両端固定ヒンジ挟持の状態では、中央1点集中線荷重載荷により、1 Hz

順序	Repeated load Max(t)	Min(t)	H _z (N/Sec)	Number of Cycle (N)	Total N. of Cycle (ΣN)
①	1	0.5	4	7 × 10 ⁴	7 × 10 ⁴
②	4	0.5	2	25 × 10 ⁴	32 × 10 ⁴
③	6	0.5	1.5	25 × 10 ⁴	57 × 10 ⁴
④	8	0.5	1	25 × 10 ⁴	82 × 10 ⁴
⑤	10	0.5	0.8	8.4 × 10 ⁴	90.4 × 10 ⁴

±6t(一定)にて両振り繰り返し荷重試験を行なった(破壊回数:163,000回)。

(4) 模型 No.4 の試験

両端固定ヒンジ挟持の状態で、中央1点集中線荷重載荷により、 $1H_2 \pm 4t$ (一定)にて両振り繰り返し荷重試験を行なったが、200万回の繰り返しによっても破壊しなかつたので、模型 No.1 と比較し、疲労の影響を吟味するため、両端単純支持・中央1点集中線荷重載荷による静荷重試験をも行なった(静的破壊荷重:13t)。

(5) 模型 No.5 の試験

両端固定ヒンジ挟持の状態で、中央1点集中線荷重載荷により、 $1H_2 - 8t$ にて片振り繰り返し荷重試験を行なったが、110万回の繰り返しによっても破壊しなかつたので、模型 No.1 と比較し、疲労の影響を吟味するため、両端単純支持・中央1点集中線荷重載荷による静荷重試験をも行なった(静的破壊荷重:14t)。

なお、模型 No.3, No.4, No.5 についても、模型 No.2 で行なったと同様に、繰り返し試験の途中における動的ひずみを測定したほか、繰り返し試験途中において、時々6tまでの静荷重試験をも試み、疲労の影響を吟味した。

6. 実験成果

実験成果の一部を掲載すれば、図-4~図-18の通りとなる。

図-4, 5は模型 No.1 に関するもの、図-6, 7, 8, 9は模型 No.2 に関するもの、図-10, 11は模型 No.3 に関するもの、図-12, 13, 14は模型 No.4 に関するもの、図-15, 16は模型 No.5 に関するもの、図-17, 18は模型 No.1, No.4, No.5 の比較に関するものを示している。

7. 結 言

実験成果より考察した結果、次のような結論が得られた。(図-4~図-18参照)

(1) 静荷重破壊試験の耐荷力は、塑性理論による最終荷重よりも幾分大きくなる傾向にあった。

(2) 弾性限度以下の静荷重試験では、断面応力度分布・たわみ共は理論値と一致するが、載荷点付近の断面応力度分布では、応力集中の影響がみられた。

(3) 繰り返し荷重(片振り、両振り共)の載荷後における静荷重試験では、弾性限度超過後のたわみ増加・降伏強度低下などをみたが、弾性限度以内での変化は余りみられなかつた。

(4) 繰り返し荷重試験(片振り、両振り共)

による変形・破壊の現象は、静荷重試験の場合よりも、拔れや横倒れに対し

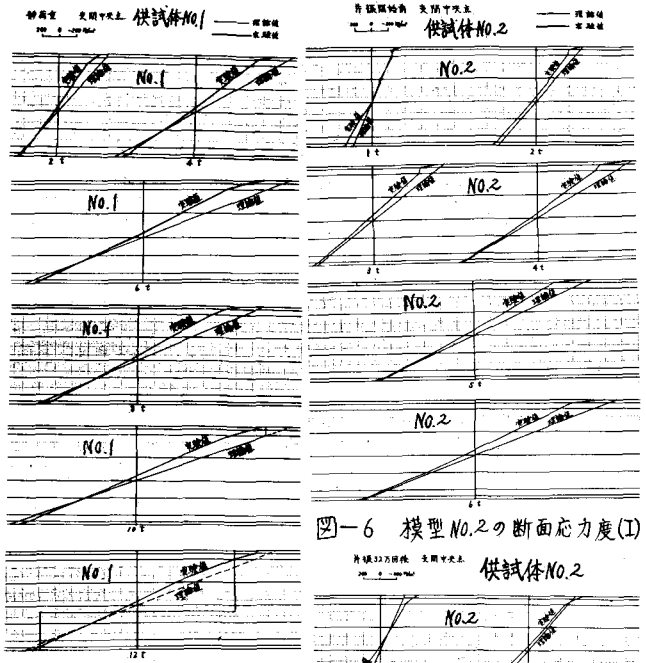


図-4 模型 No.1 の断面応力度

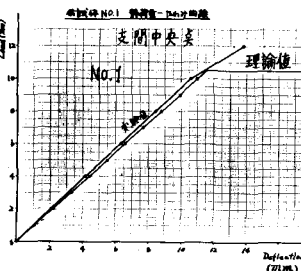


図-5 模型 No.1 の静荷重によるたわみ

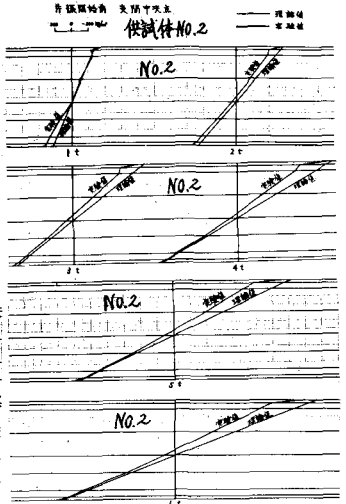


図-6 模型 No.2 の断面応力度(I)

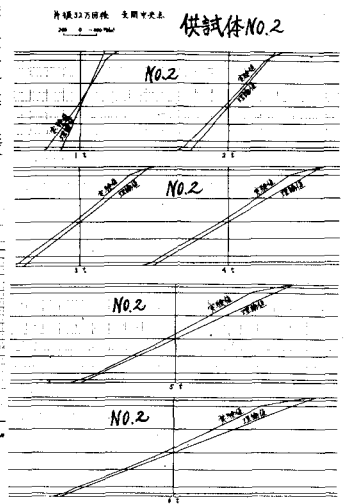


図-7 模型 No.2 の断面応力度(II)

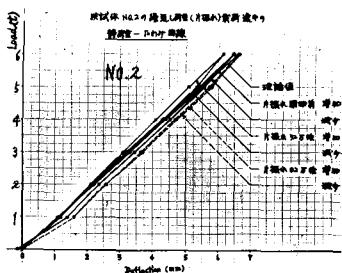


図-8 模型No.2の静荷重たわみ

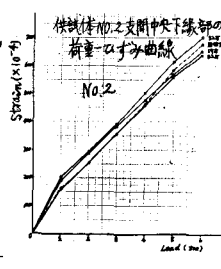
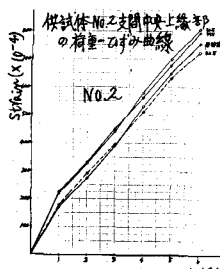


図-9 模型No.2の上・下縁部ひずみ曲線

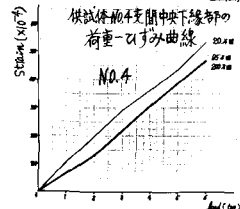
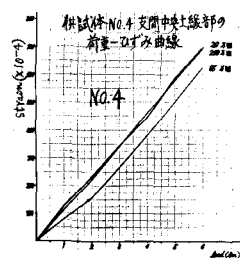


図-13 模型No.4のひずみ曲線

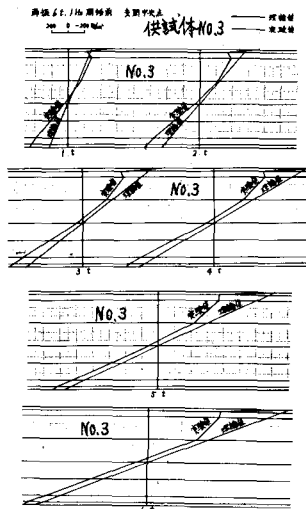


図-10 模型No.3の断面応力度

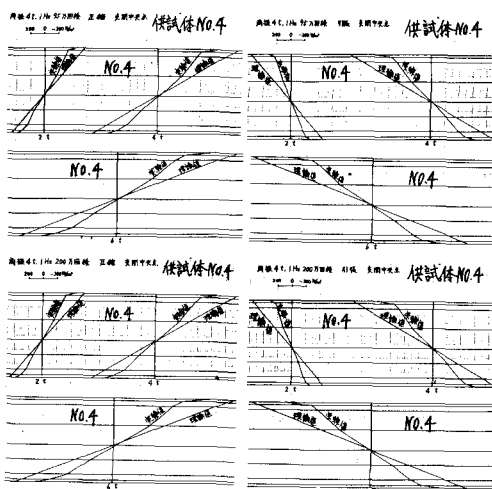


図-12 模型No.4の両振り動荷重後の断面応力度

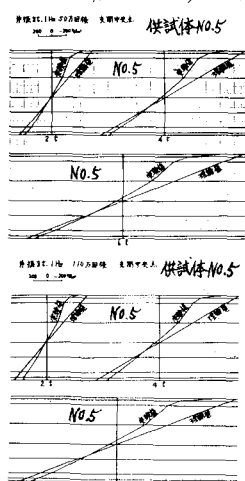


図-15 模型No.5の断面応力度

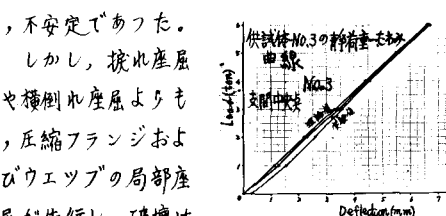


図-11 模型No.3のたわみ

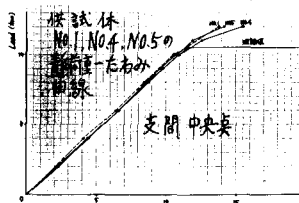


図-17 模型No.1, 4, 5のたわみ

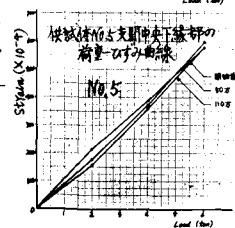
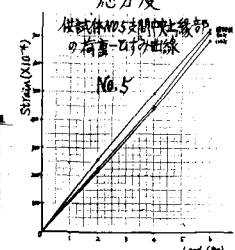


図-16 模型No.5のひずみ曲線

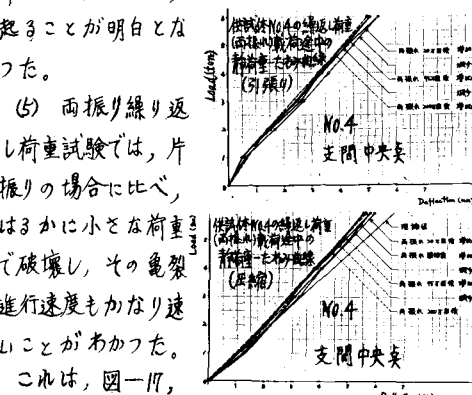


図-14 模型No.4の静荷重たわみ

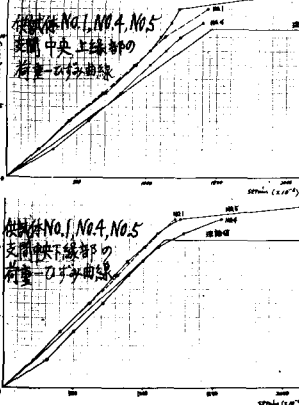


図-18 模型No.1, 4, 5のひずみ曲線

, 不安定であつた。
しかし、接水座層
や横側座層よりも、
圧縮フランジおよ
びウエツブの局部
座層が先行し、破
壊は常に上フラン
ジより起ることが
明白となつた。
(5) 両振り繰り返
し荷重試験では、
片振りの場合に比
べ、はるかに小さ
な荷重で破壊し、
その亀裂進行速
度もかなり速い
ことがあつた。
これは、図-17、

18にもみられる。