

# 繰り返し走行荷重による鋼製はりのダイナミック・ シェイクダウンについて

## DYNAMIC SHAKEDOWN TESTS OF STEEL BEAMS SUBJECTED TO TRAVELING LOADS

吉田 博\*・梶川康男\*\*・長谷川 宏\*\*\*

By Hiroshi YOSHIDA, Yasuo KAJIKAWA and Hiroshi HASEGAWA

Dynamic shakedown tests have been done using rectangular steel beams under traveling loads. Test beams are simply supported at one end and cramped at another. The moving load with a constant horizontal speed is applied to the test beams. The tests have been made and compared for a static ultimate strength test, a fixed point static shakedown test, and four series dynamic shakedown tests with different traveling speeds.

Also, the test results for two series with different speeds are compared with the numerical analysis using a lumped mass and flexibility model. From these results the dynamic shakedown is confirmed. It is found that the converged deflection becomes larger but the dynamic shakedown load smaller as increase of the traveling speed of moving load and the dynamic shakedown load analytically obtained is in good agreement with the experimental results.

### 1. ま え が き

塑性設計法が提唱されて以来、構造物の弾塑性域での挙動の解明が数多く行われてきた。塑性設計法を橋梁構造物に適用するにあたっては、弾性限度を越える高速移動荷重が繰り返して作用する場合の弾塑性域における動的挙動も検討する必要がある。

弾性限度を越える荷重が繰り返して構造物に作用すると、ある大きさの荷重までは、載荷回数とともに、変形が一定値に収束し、その後の載荷に対しては、構造部材の一部が降伏しているにもかかわらず、弾性的に挙動する。この現象は、シェイクダウン(Shakedown, 変形硬化, または、たわみ安定性)として知られている。一方、載荷回数とともに、構造物の変形が累積し、発散するとき、構造物は漸増塑性崩壊するという。

繰り返し静的移動荷重によるシェイクダウンに関する研究として、福本・吉田<sup>1),2)</sup>は、2径間連続桁橋と3径間連続桁橋を対象に、L荷重が繰り返して通過する場

合について、設計を意識した研究を行っている。また、福本・小堀・吉田<sup>3)</sup>は、一端固定他端単純支持はりに繰り返し静的移動荷重を作用させた場合について、実験的研究を行い、シェイクダウン荷重の実験値は、単純塑性理論から得られる理論値によく一致すると報告している。同様な研究をD.G. EyreとT.V. Galambos<sup>4),5)</sup>が行っている。Galambosらは、2径間連続桁橋のモデルに、死荷重と活荷重を作用させたシェイクダウン荷重の実験値は、単純塑性理論の理論値よりも大きな値になったと述べ、降伏域の広がりとはずれ硬化の影響を考慮した理論は、実験とよく一致すると報告している。石川・林・鯉淵の研究<sup>6)</sup>は、シェイクダウン荷重解析に線形計画法を応用したものであり、解析結果を既往の研究結果と比較検討した結果、提案した解析方法が実際の橋梁構造物にも適用できると述べている。

以上の研究では、静的な移動荷重を対象としており、慣性力や減衰力は、考慮されていない。これらを考慮した動的なシェイクダウンに関する研究は、G. Ceradiniによるシェイクダウン定理を体系的にまとめた理論的研究<sup>7)</sup>のみである。

そこで、本研究は、矩形断面を有する一端固定他端単純支持の鋼製はりにおいて、走行速度をもつ動的な移動荷重が繰り返して作用する場合について、弾塑性域での実

\* 正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木工学科  
(〒920 金沢市小立野 2-40-20)

\*\* 正会員 工博 金沢大学助教授 工学部土木工学科  
(同上)

\*\*\* 正会員 工修 (株)大林組東京本社土木本部設計部  
(〒101 千代田区内神田 2-12-5)

験を行うとともに、数値解析を行い、ダイナミック・シェイクダウンが生じることを確かめ、移動荷重の走行速度がダイナミック・シェイクダウンに及ぼす影響を検討する。

## 2. シェイクダウン実験

### (1) 鋼製試験はりおよび移動荷重実験装置

試験はりの材料は材質 SS 41 の鋼材であり、同一の鋼板から、計 30 本の一端固定他端単純支持の試験はりを切削加工により製作した。鋼製試験はりの形状と構造諸元を Fig. 1 に示す。

移動荷重実験装置は、Photo 1 に示すとおりである。

まず、両端の助走路①の間にスパン長 1 m の一端固定他端単純支持の試験はり②を固定し、荷重は荷重載荷レバー③により、先端にローラーを有する走行装置④を取り付けたロードセル⑤を介して試験はりに作用させた。また、プレーキモーターおよび減速機から成る駆動装置により移動台車⑥を移動台車レール⑦上を走行させることにより、荷重の移動を行った。静的に載荷する場合には、2.5~5.0 の比をもつ載荷レバーの先端に重錘を取り付けて、荷重を作用させた。動的な荷重の場合には、ロードセルを設置した位置で、載荷レバーの上部に重錘を取り付け、重錘に作用する加速度と荷重作用点の

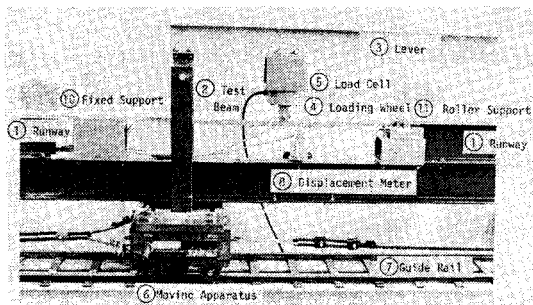
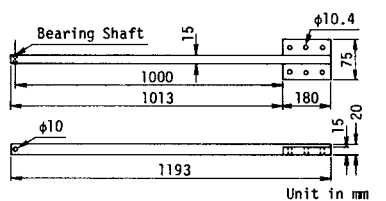


Photo 1 Test Set-up.



Cross Section	Span Length	100.0 cm
	Width	1.5 cm
	Height	2.0 cm
	Cross Sectional Area	3.0 cm <sup>2</sup>
	Moment of Inertia	1.0 cm <sup>4</sup>
	Shape Factor	1.5

Fig. 1 Test Specimen and Dimensions.

はりの加速度が一致するように、荷重を作用させた。

荷重を静的に移動させる場合には、台車を手動で、動的な影響を与えないように、静かに移動させた。動的移動荷重の場合は、駆動装置で台車を移動させ、走行速度が定常になるように、助走路を使用した。

### (2) 実験方法および測定方法

静的なシェイクダウン実験は、福本・小堀・吉田の研究<sup>3)</sup>に従って行った。

一方、ダイナミック・シェイクダウン実験では、荷重を、Fig. 2 に示すように、単純支持端 A から固定端 B に向かって、移動させた。

単純支持端 A から 37.2 cm の点 C (静的な移動荷重による漸増塑性崩壊時の塑性ヒンジ発生点<sup>3)</sup>) のたわみが、同じ大きさの荷重の載荷サイクル数にかかわりなく、一定値に収束すれば、さらに少し大きな荷重を作用させて、収束するまで何回も繰り返した。一方、荷重がある大きさに達すると、たわみが一定値に収束しないで、発散するようになる。すなわち、漸増塑性崩壊を確認したら、その試験はりに対する実験を終了した。本実験では、移動荷重の走行速度による影響を調べるために、4 通りの走行速度について行った。

たわみの測定点は、単純支持端 A から 37.2 cm の点 C である。ひずみは、点 C および固定端 B の、それぞれ、断面下縁と上縁から 0.5 cm の側面の 2 点、計 4 点で測定した。ひずみおよびたわみの測定点は、Fig. 2 に示されている。

動的移動荷重による実験での測定は、次のように行った。

ひずみゲージ (東京測器研究所製, PL-5)、変位計 (同研究所製, SDP-50 BS) およびロードセル (同研究所製, TCLM-1 A) を動ひずみ測定器 (同研究所製, DA-1 F) に接続し、その出力をマイクロコンピュータ (TEAC 社製, PS-85) で A/D 変換し、カセットテープに記録した。移動荷重の走行速度は、試験はりを設置した桁の下フランジの単純支持端 A と固定端 B に取り付けたマイクロ・スイッチの電気信号から、マイクロコンピュータで計算した。

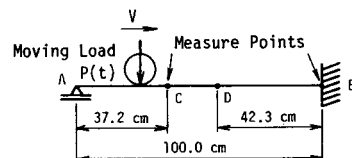


Fig. 2 Reference points of Strain and Deflection.

### 3. 実験結果および考察

#### (1) 引張試験および静的曲げ試験

引張試験の結果から、鋼材の降伏応力は、 $\sigma_y=2440$  kgf/cm<sup>2</sup> (239 MPa)、引張強度は、 $\sigma_u=4333$  kgf/cm<sup>2</sup> (425 MPa) (引張試験片3本の平均値)であることがわかった。また、ヤング係数の平均値は、 $2.1 \times 10^5$  kgf/cm<sup>2</sup> ( $2.06 \times 10^5$  MPa)であった。

静的曲げ試験は、単純支持端Aから41.4 cmの点F (一端固定他端単純支持はりの崩壊時の塑性ヒンジ発生点)に荷重して行った。

Fig. 3は、静的曲げ試験から得られた荷重-たわみ曲線である。崩壊荷重は、引張試験結果を用い、単純塑性理論より213 kgf (2.09 kN)と計算されるが、実験は、これよりもやや大きな値となっており、鋼材のひずみ硬化の影響を受けていると考えられる。

#### (2) 自由振動実験

自由振動実験から得られた固有振動数(一次)は、76.9 Hzであった。はりの曲げ振動理論から計算される固有振動数は72.5 Hzであり、両者はほぼ一致している。

また、自由振動実験から減衰定数も求めた。鋼材が降伏していない試験はりから得られた減衰定数の平均値は $h=0.041$ であり、鋼材の一部が降伏した試験はりでは、 $h=0.218$ であった。

#### (3) 静的シェイクダウン実験

繰り返し固定点荷重と繰り返し静的移動荷重によるシェイクダウン実験を行った。

Fig. 4は、荷重サイクル数と点Cのたわみの関係を示すものである。固定点荷重、静的移動荷重のいずれの場合も、降伏荷重をわずかに越える荷重 $P=140$  kgf (1.37 kN)までは、荷重サイクル数が5回以下で、たわみが一定値に収束している。しかし、これより大きな荷重では、各荷重段階での荷重サイクル数が増加しており、静的移動荷重の場合は、固定点荷重の場合よりも、荷重サイクル数がかなり多くなっている。

固定端Bの降伏の進行に着目してみると、固定点載

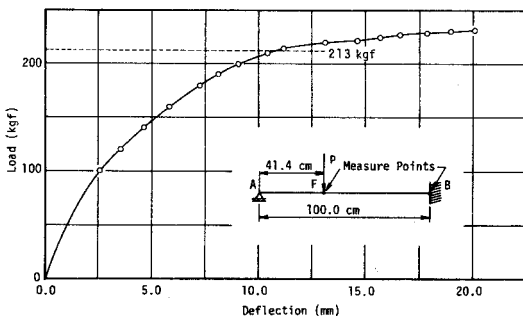


Fig. 3 Load-Deflection Curve Under Static Loading Test.

荷の場合は、固定端Bで最大曲げモーメントの得られる点Dに荷重を行っているため、各荷重段階での荷重の1サイクル目で、すでに、たわみが収束したときの降伏域近くまで、降伏が進行している。これに対し、静的移動荷重は、点Dを通過するだけであり、降伏の進行は固定点荷重の場合に比べて遅い。したがって、各荷重段階での荷重サイクル数が、静的移動荷重の場合に増加したと考えられる。

Fig. 5は、荷重-たわみ曲線である。図中の細い実線は、単純塑性理論から計算される荷重と点Cの収束たわみの関係を示したものである。

荷重の大きさが $P=140$  kgf (1.37 kN)までは、固定点荷重の収束たわみと静的移動荷重の収束たわみは、ほぼ一致しているが、 $P=160$  kgf (1.57 kN)以上の荷重では、静的移動荷重の場合の方が固定点荷重よりも収束たわみは大きくなっている。

固定点荷重の場合、降伏域は点Cと固定端Bに集中するが、静的移動荷重の場合は、荷重点が単純支持端Aから固定端Bまで連続しているため、特に、点Cを中心として、広い範囲で降伏していると考えられる。このため固定点荷重より、静的移動荷重の場合の収束たわみが大きくなったものと考えられる。

図中の $P_y$ は、固定端Bが降伏する荷重127 kgf

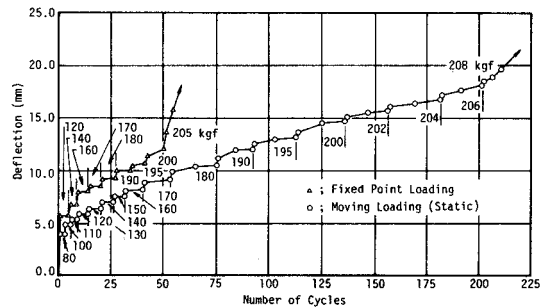


Fig. 4 Relationship Between Deflection and Number of Cycles Under Fixed Point and Static Moving Loadings.

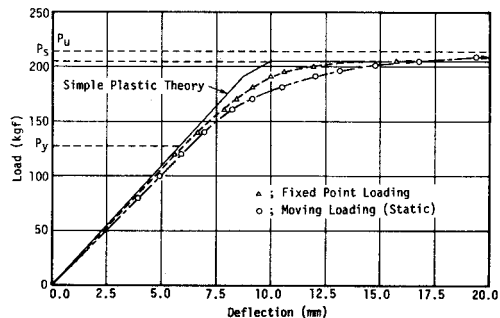


Fig. 5 Load-Deflection Curves Under Fixed Point and Static Moving Loadings.

(1.25 kN) であり、 $P_s$  および  $P_u$  は、引張試験結果と単純塑性理論を用いて計算されるシェイクダウン荷重と崩壊荷重であり、その値は、それぞれ、204 kgf (2.00 kN), 213 kgf (2.09 kN) である。固定点載荷、静的移動荷重のいずれの場合も、シェイクダウン荷重をわずかに越える荷重で漸増塑性崩壊に至っている。しかし、漸増塑性崩壊する直前の荷重における収束たわみは、単純塑性理論の値 0.996 cm よりも大きな値になっている。

(4) ダイナミック・シェイクダウン実験

繰り返しの動的移動荷重によるシェイクダウン実験は、速度パラメーターを考慮して、4通りの走行速度に対して行った。これら4通りを以後、超低速 (4 cm/s)、低速 (126 cm/s)、中速 (181 cm/s) および高速 (229 cm/s) とよぶことにした。

Fig. 6 (a) および (b) は、それぞれ、低速、高速の場合の載荷サイクル数とたわみの関係である。図中、荷重の値は、移動荷重が静止しているときの値であり、たわみは、点Cにおける載荷の1サイクル中の最大のたわみである。いずれの速度においても、 $P = 100$  kgf (0.98 kN) の荷重では、各測定点のひずみは降伏ひずみ以下であり、また、載荷サイクルの数も5回以下で収束しており、弾性的に挙動している。その後の荷重に対しては、鋼材の降伏が進むにつれて、各荷重段階での載荷サイクル数が増加している。これは、荷重の増加と

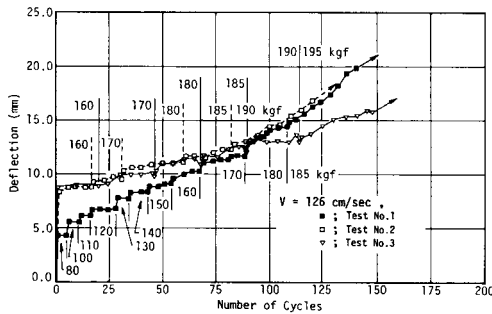
もに、降伏が進行し、動的な崩壊メカニズムに近い状態では、たわみの収束性が極端に悪くなることを示している。

Fig. 7 (a) および (b) に、それぞれ、低速と高速の実験から得られた荷重-たわみ曲線を示す。また、Fig. 8 は、一連のシェイクダウン実験から得られた荷重-たわみ曲線を示したものである。

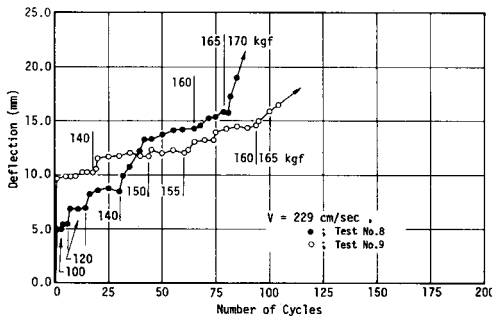
固定点載荷および静的移動荷重の場合、降伏荷重までは、単純塑性理論の収束たわみにほぼ一致しているが、それ以上の荷重では、理論値よりもわずかに大きくなっている。これは、単純塑性理論の理想化した鋼材の挙動と鋼材が降伏した後の実際の挙動との相違が現われたものと考えられる。また、 $P = 160$  kgf (1.57 kN) 以上の荷重になると、静的移動荷重の収束たわみの方が、固定点載荷よりもやや大きくなっている。

超低速の場合の荷重-たわみ曲線は、静的移動荷重の荷重-たわみ曲線によく一致しており、動的な影響を受けていない。

$P = 170$  kgf (1.67 kN) 以上の荷重で、超低速の場合の収束たわみが、静的移動荷重の場合よりも小さくなったのは、静的移動荷重の実験では、点Cで荷重をいったん停止させているのに対して、超低速の場合には、荷重をそのまま通過させているため、点Cでの降伏域の進展が静的な場合よりも遅れたものと考えられる。

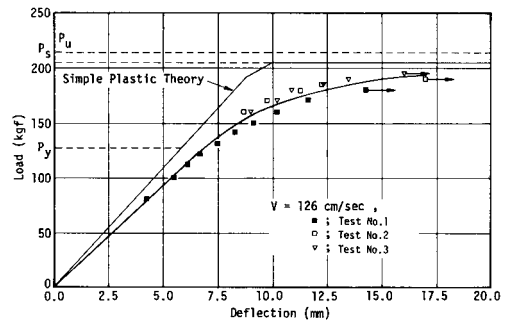


(a)  $V = 126$  cm/s

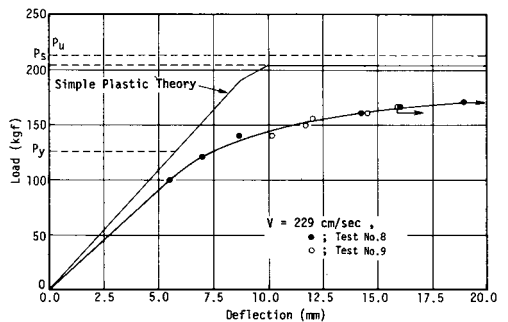


(b)  $V = 229$  cm/s

Fig. 6 Relationship Between Deflection and Number of Cycles.



(a)  $V = 126$  cm/s



(b)  $V = 229$  cm/s

Fig. 7 Load-Deflection Curves Under Shakedown Tests.

低速、中速および高速の場合は、 $P=100 \text{ kgf} (0.98 \text{ kN})$ までは、弾性的に挙動しているが、各荷重段階での収束たわみは、弾性静たわみよりも大きく、動的な影響が現われている。走行速度が速くなるにつれて、各荷重段階での収束たわみは単純塑性理論の値よりも大きくなっており、特に  $P_y$  を越える荷重では、この傾向は、より強く現われている。これは、鋼材の降伏の進行による剛性の低下と移動荷重の走行速度が、収束たわみに影響を及ぼすことを示している。

また、走行速度とともに、シェイクダウン荷重も低下しており、走行速度による影響が顕著に現われている。

試験はりに実際に作用している力、すなわち、相互作用力の時刻歴応答を Fig. 9 に示す。動的移動荷重の場合は、はりと移動荷重の相互作用により、実際にはりに作用している力は、荷重が静止しているときの値よりも大きくなっている。相互作用力の最大値が、スパン中央付近で現われており、降伏域の広がり、静的移動荷重よりもかなり広範囲であると考えられる。このため、収束たわみが大きくなり、シェイクダウン荷重が低下すると思われる。また、走行速度が速くなるにつれて、相互作用力は大きくなり、したがって、走行速度とともにシェイクダウン荷重が低下することが説明できる。

#### 4. ダイナミック・シェイクダウンの数値解析

##### (1) 数値解析方法

解析は、R. K. Wen の提案した方法<sup>8)~12)</sup>に改良を加

えて行った。

はりを任意長の剛体パネルに分割し、はりがもつ質量とたわみ性を隣接するパネル長の各  $1/2$  ずつ、分割点(格点)に集中させることにより、試験はりをモデル化した。

実際のはりと解析モデルを Fig. 10 に示す。本解析で、R. K. Wen の方法に改良を加えた点は、

- a) 任意長の剛体パネルを考慮したこと。
- b) 減衰を考慮したこと。
- c) 分布たわみ性を有するはりに作用している遠心加速度を導入したこと。

である。

数値解析に用いる関係式を、Fig. 11 に示す格点  $i$  に着目して説明する。

##### a) 初期条件

時刻  $t=0$  における格点  $i$  の変位、速度および加速度を、それぞれ、 $y_i(0)$ 、 $\dot{y}_i(0)$ 、 $\ddot{y}_i(0)$  とすると、初期条件は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} y_i(0) &= 0 \text{ または } y_i(0) = y_{ir} \\ \dot{y}_i(0) &= \dot{y}_i(0) = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $y_{ir}$  は、格点  $i$  の残留変位である。

##### b) 変位

時刻  $t_k = t_{k-1} + \Delta t$  における変位  $y_i(t_k)$  は、微小時間  $\Delta t$  前の時刻における変位、速度および加速度を用いて、

$$y_i(t_k) = y_i(t_{k-1}) + \dot{y}_i(t_{k-1})(\Delta t) + \frac{1}{2}\ddot{y}_i(t_{k-1})(\Delta t)^2 \dots\dots\dots (2)$$

と表わされる。

##### c) 相対回転角および曲率

相対回転角  $\theta_i(t_k)$  は

$$\theta_i(t_k) = \frac{y_i(t_k) - y_{i-1}(t_k)}{l_{i-1}} + \frac{y_i(t_k) - y_{i+1}(t_k)}{l_i} \dots\dots (3)$$

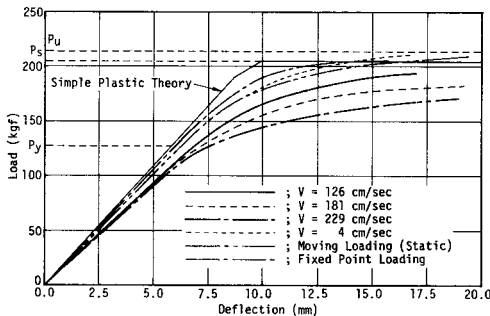


Fig. 8 Load-Deflection Curves Under Shakedown Tests with Various Traveling Speed.

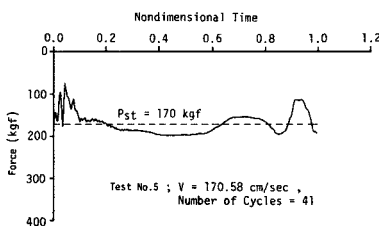


Fig. 9 Acting Force on Test Beam.

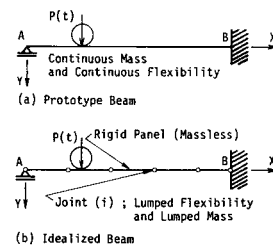


Fig. 10 Prototype and Idealized Beams.

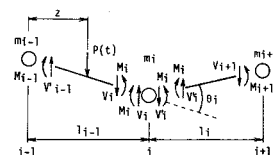


Fig. 11 Forces at Nodes in Analytical Model.

と表わされ、曲率  $\Phi_i(t_k)$  は、相対回転角  $\theta_i(t_k)$  を格点  $i$  の隣接パネル長  $l_{i-1}$ ,  $l_i$  で差分近似することにより得られる。

$$\Phi_i(t_k) = \frac{2\theta_i(t_k)}{l_{i-1} + l_i} \dots\dots\dots(4)$$

d) 曲げモーメント-曲率関係

鋼材の応力とひずみの関係を完全弾塑性体として理想化して考えると、矩形断面の垂直応力分布から曲げモーメント-曲率関係は、

$$\frac{M_i}{M_y} = \frac{\Phi_i}{\Phi_y} \quad \left( \left| \frac{\Phi_i}{\Phi_y} \right| \leq 1 \text{ のとき} \right) \dots\dots\dots(5)$$

$$\frac{M_i}{M_y} = \frac{3}{2} \left[ 1 - \frac{1}{3} \left( \frac{\Phi_i}{\Phi_y} \right)^2 \right] \quad \left( \left| \frac{\Phi_i}{\Phi_y} \right| > 1 \text{ のとき} \right) \dots\dots\dots(6)$$

の2式で表わされる。ここに、 $M_y$ ,  $\Phi_y$  は、それぞれ、降伏モーメントと降伏曲率である。Fig. 12 は、式 (5) および (6) で表わされる矩形断面の曲げモーメント-曲率関係を示したものである。格点  $i$  の曲率  $\Phi_i(t_k)$  を、式 (5) または式 (6) に代入すれば、時刻  $t = t_k$  における格点  $i$  の曲げモーメント  $M_i(t_k)$  が計算される。

除荷、負荷の判定基準は次のとおりである。

- ①  $\Phi_{i\min} \leq \Phi_i(t_k) \leq \Phi_{i\max}$  のとき、除荷および再負荷にかかわりなく、式 (5) を適用する。
- ②  $\Phi_i(t_k) < \Phi_{i\min}$  または  $\Phi_i(t_k) > \Phi_{i\max}$  のとき、負荷であり、式 (6) を適用する。

e) 加速度および速度

格点  $i-1$  および  $i+1$  のまわりのモーメントのつり合い式と、格点  $i$  の鉛直方向の力のつり合い式を連立させると、格点  $i$  の加速度  $\ddot{y}_i(t_k)$  は

$$\begin{aligned} \ddot{y}_i(t_k) = & \frac{1}{m_i l_{i-1}} \{M_{i-1}(t_k) - M_i(t_k) + P(t_k)z\} \\ & + \frac{1}{m_i l_i} \{M_{i+1}(t_k) - M_i(t_k)\} - 2\omega h_i \dot{y}_i(t_k) \end{aligned} \dots\dots\dots(7)$$

となる。ここに、 $\omega$  は、はりの固有円振動数、 $h_i$  は減衰定数であり、塑性領域内で定数として扱うことには少し問題があるが、ここでは自由振動実験から得られた減衰定数 0.218 を用いた。

相互作用力  $P(t_k)$  は、移動荷重の質量  $Q_u$  と荷重作用位置のはりの加速度を用いると、次式のようなになる。

$$P(t_k) = Q_u g - Q_u \ddot{y}_q(t_k) \dots\dots\dots(8)$$

ここに、 $g$  は重力加速度である。

荷重作用位置のはりの加速度は、以下のようにして求められる。幾何学的関係により、荷重作用位置の変位は次式で与えられる。

$$y_q(t_k) = y_{i-1}(t_k) + \frac{z}{l_{i-1}} \{y_i(t_k) - y_{i-1}(t_k)\} \dots\dots\dots(9)$$

式 (9) を時間で2回微分することにより、 $\ddot{y}_q(t_k)$

は次のようになる。

$$\begin{aligned} \ddot{y}_q(t_k) = & \ddot{y}_{i-1}(t_k) + \frac{2z}{l_{i-1}} \{\ddot{y}_i(t_k) - \ddot{y}_{i-1}(t_k)\} \\ & + \frac{z}{l_i} \{\ddot{y}_i(t_k) - \ddot{y}_{i-1}(t_k)\} \dots\dots\dots(10) \end{aligned}$$

また、格点  $i$  の速度  $\dot{y}_i(t_k)$  は、

$$\dot{y}_i(t_k) = \dot{y}_i(t_{k-1}) + \frac{\Delta t}{2} \{\dot{y}_i(t_{k-1}) + \dot{y}_i(t_k)\} \dots\dots\dots(11)$$

で表わされる。

式 (7), (8), (10) および (11) を連立して解くことにより、格点  $i$  の加速度  $\ddot{y}_i(t_k)$  が得られ、この結果から、速度  $\dot{y}_i(t_k)$  が求められる。

f) 境界条件の処理および遠心加速度の導入

境界条件は、Fig. 13 (a) および (b) に示すように、境界で仮要素を考慮することにより満足される。

実際のはりは、連続したたわみ性を有する系であり、荷重がはりと常に接触しながら移動する場合には、遠心力がはりに作用する。離散系モデルでは、このような遠心力が解析に入っていないので、次のようにして遠心加速度を導入した。

荷重作用位置の曲率  $\Phi_q$  は次式で表わされるものとする。

$$\Phi_q(t_k) = \Phi_{i-1}(t_k) + \frac{z}{l_{i-1}} \{\Phi_i(t_k) - \Phi_{i-1}(t_k)\} \dots\dots\dots(12)$$

各瞬間において、移動荷重の質量  $Q_u$  が等速円運動をしていると考えると、遠心加速度は、

$$\ddot{y}_{qa}(t_k) = \Phi_q(t_k) v^2 \dots\dots\dots(13)$$

となる。これを、荷重作用位置の加速度  $\ddot{y}_q(t_k)$  に加え

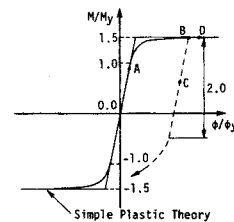


Fig. 12 Moment-Curvature Relationship.

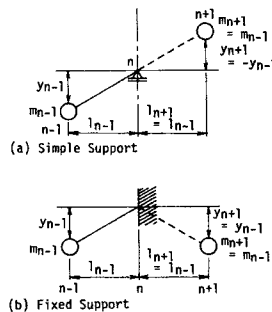


Fig. 13 Boundary Conditions.

ることにより、遠心加速度が導入される。

ダイナミック・シェイクダウンの数値解析の手順は、以下に述べるとおりである。

- ① 前述の a)~e) の順序に従って、弾塑性振動解析を行う。
- ② i) 着目点のたわみが一定値に収束していない場合は、残留たわみを初期条件として、同一荷重で①の解析を行う。
- ii) 着目点のたわみが一定値に収束した場合、残留たわみを初期条件として、荷重を漸増させ i) の解析を行う。

(2) 数値解析と実験結果との比較および考察

数値解析は、中速および高速の実験を対象に2つの例について行った。数値計算は、11 不等分割パネル (Fig.2 の AC 間を 4 等分, CB 間を 7 等分) を用い、数値積分時間間隔は  $0.75 \times 10^{-6}$  秒で行った。

Fig. 14 は中速における載荷サイクル数とたわみの関係を示している。140 kgf (1.37 kN) および 150 kgf (1.47 kN) の荷重段階の載荷サイクル数は解析と実験で一致しているが、それ以上の荷重段階では解析の載荷サイクル数が実験の載荷サイクル数と比較してかなり少ない。これは、解析では、載荷の1サイクル目で塑性域の広がり、たわみが安定したときの降伏域にかなり一致し、たわみの収束が早いのにに対し、実験では載荷サイクル数とともに降伏が進行し、たわみの収束が遅いことによっているものと思われる。

Fig. 15 および Fig. 16 は、それぞれ、相互作用力、すなわち、実際にはりに作用している力とたわみの時刻歴応答である。

相互作用力は、解析値より実験値の方が大きな値を示しており、このため、実験における収束たわみも、解析値よりも大きくなっているものと思われる。

Fig. 17 は荷重-たわみ曲線である。前述のように、解析での収束たわみは実験値よりも小さめの値となっている。また、シェイクダウン荷重の大きさからみると、中

速の場合、両者はほぼ一致しているが、高速の場合には、実験値の方が計算値より小さい値となっており、高速における実験では、支点付近のジョイント部、助走路の凹凸等の影響が大きく現われたものと思われる。

5. ま と め

本研究では、矩形断面を有する一端固定他端単純支持の鋼製試験はりに、繰り返し動的移動荷重が作用する場合のダイナミック・シェイクダウンについて、実験および数値解析を行った。

実験に関しては、まず、移動荷重実験装置を用いたダイナミック・シェイクダウンの実験方法について述べた。実験は移動荷重の走行速度を変化させて行い、走行速度による影響を検討した。また、静的なシェイクダウン実験も行い、ダイナミック・シェイクダウンとの比較検討を行った。

解析では、集中質量・集中たわみ性モデルを用いた従来の解析方法に改良を加え、ダイナミック・シェイクダウンの数値解析法を示した。数値解析は、ダイナミック・

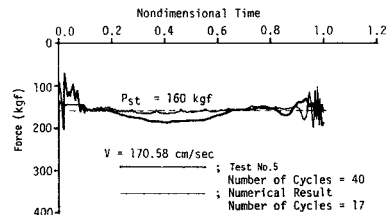


Fig. 15 Acting Force of Tests and Theory.

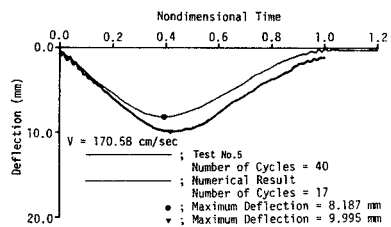


Fig. 16 Deflections of Test and Theory.

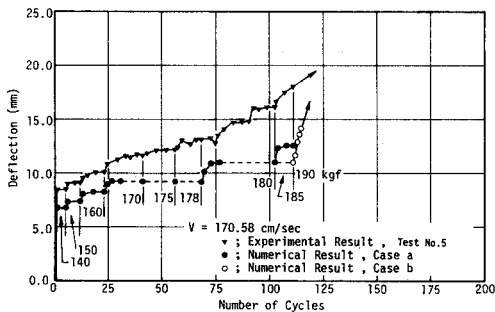


Fig. 14 Relationship Between Deflection and Number of Cycles Under Test and Theory.

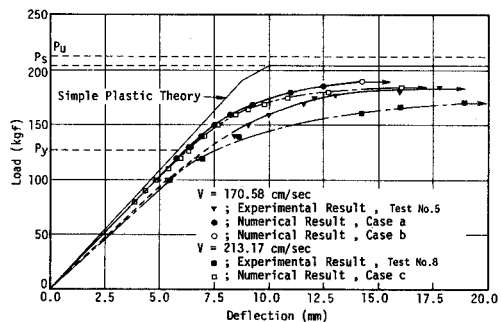


Fig. 17 Load-Deflection Curves for Test and Theory.

シェイクダウン実験の中速と高速の2例について行い、数値解析結果と実験結果を比較検討した。

本研究で得られた結論を以下に述べる。

(1) 矩形断面を有する一端固定他端単純支持の鋼製はりに繰り返し動的移動荷重が作用する場合、ダイナミック・シェイクダウンが生ずることを確かめた。

(2) 移動荷重の走行速度による影響は顕著に現われ、走行速度が速くなるにつれて、収束たわみは大きくなり、シェイクダウン荷重は低下する。

(3) ダイナミック・シェイクダウンにおけるシェイクダウン荷重は、中速荷重においては、実験値と解析値ではほぼ一致したが、高速荷重においては、実験値の方が小さい値を示し、実験装置の影響が現われたものと思われる。

本研究では、これまで、理論でしか述べられていなかったダイナミック・シェイクダウンを実験および数値解析によって確かめた。しかし、数値解析では、収束たわみの実験値を正確に予測できなかったため、今後、収束たわみを精度よく求められるように、ジョイント部および助走路の凹凸を考慮した数値解析法へと改良を加えていきたいと考えている。

なお、数値計算は、金沢大学電子計算機センター、FACOM M-170 F を使用して行った。

#### 参 考 文 献

- 1) 福本啓士・吉田 博：繰返し荷重による連続桁橋のたわみ安定性について、土木学会論文集，第120号，pp. 25～32，昭和40年8月。
- 2) 福本啓士・吉田 博：繰返し荷重による3径間連続桁橋のたわみ安定性について、土木学会論文報告集，第179号，pp. 13～22，昭和45年7月。
- 3) 福本啓士・小堀為雄・吉田 博：繰返し移動荷重による

たわみ安定性に関する理論と実験，土木学会論文集，第144号，pp. 1～10，昭和42年8月。

- 4) Eyre, D.G. and Galambos, T.V. : Shakedown Tests on Steel Bars and Beams, Proc. of ASCE, Vol. 96, No. ST 7, pp. 1287～1303, July, 1970.
- 5) Eyre, D.G. and Galambos, T.V. : Deflection Analysis for Shakedown, Proc. of ASCE, Vol. 96, No. ST 7, pp. 1359～1376, July, 1970.
- 6) 石川信隆・林 敏臣・鯉淵芳伸：移動荷重を受ける骨組構造物の変形硬化荷重解析と最適塑性設計，防衛大学校理工学研究報告，第20巻，第1号，pp. 93～108，昭和57年3月。
- 7) Ceradini, G. : Dynamic Shakedown in Elastic-Plastic Bodies, Proc. of ASCE, Vol. 106, No. EM 3, pp. 481～499, June, 1980.
- 8) Wen, R.K. and Toridis, T.G. : Discrete Dynamic Models for Elasto-Inelastic Beams, Proc. of ASCE, Vol. 90, No. EM 5, pp. 71～102, Oct., 1964.
- 9) Toridis, T.G. and Wen, R.K. : Inelastic Response of Beams to Moving Loads, Proc. of ASCE, Vol. 92, No. EM 6, pp. 43～62, Dec., 1966.
- 10) Wen, R.K. and Beylerin, N. : Elasto-Plastic Response of Timoshenko Beams, Proc. of ASCE, Vol. 93, No. ST 3, pp. 131～146, June, 1967.
- 11) 太田俊昭・今井富士夫・寺本恵一郎：平面骨組構造物の静的、動的塑性曲げに対する数値計算法，土木学会論文報告集，第239号，pp. 15～23，昭和50年7月。
- 12) 川井忠彦：物理モデルによる連続体力学諸問題の解析，第3回生研セミナーテキスト，pp. 1～35，259～301，昭和55年10月。

(1984. 5. 23・受付)