

金沢大学工学部 正員 喜内 敏
 金沢大学工学部 正員 小堀為雄
 大阪市役所 正員 松田 誠
 金沢大学大学院 学生員 ○梅沢宣雄

1. まえがき

最近設計の合理化を目的として、塑性設計法が取り入れられ始めたが、この場合作用する荷重は、静的荷重あるいは静止荷重であるが、一般の土木構造物とくに橋梁の場合には、周期力を伴う移動荷重が作用することが多い。

このことからわれわれはけたの弾塑性領域におけるけたの応答を調べるために、解析法はいかなる方法が適当であるかを検討し、その応答を調べた。また先きに製作した移動荷重載荷装置を用いて、移動周期力によるけたの動的応答を測定し、数値解析の結果と比較した。

2. 実験装置と実験結果

移動荷重載荷装置は写真-1のとおりである。ここで①は試験けた (Span 100 cm, 矩形断面 1.5×2.0 cm, SM50, 固有周期 0.0215 sec) である。②③が単純支承で、③がローラーになっている。④が荷重載荷のためのレバーで、載荷点はこの位置につけられることができる。⑤が載荷点に取りつけたロードセルである。⑥は周期力を与えるための

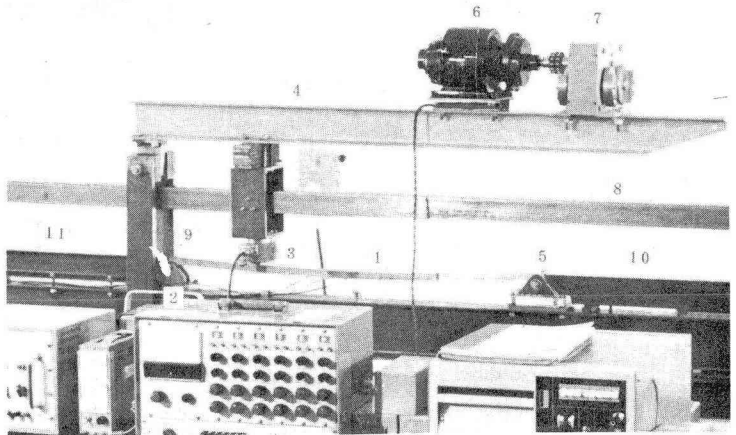


写真-1

の起振機で、⑦がこれをまわすモーターである。⑧は走行載荷時に横振れを防止し、荷重が走行路線よりはずれないようにするためのガイドレールである。荷重が直接これに加わらないように工夫されている。⑨は荷重レバーのピンをうける支柱で、この下の台に接続されている。この台は2本のシャフトで支られ、真中に1本のスクリーシャフトがかみあわされており、スクリーシャフトをモーターでまわすことにより、この支柱が移動する。これによってもて載荷レバーが移動し、ロードセルがけたの上を移動する。⑩⑪は補助走行路でこの上から荷重が出発し、定速度になった後、試験けたの上を移動する。けたを通過後、補助走行路上で停止するようになっている。

われわれは上記の実験装置で、走行荷重の重さ、周期力の大きさ、および振動周期、荷重の走行速度を変えていくつかの実験を行った。この場合荷重の大きさによっては試験けたは塑性域に入るのでその都度けたを取り替えた。また試験けたの製作にあたっては、材料にばらつきがないよう、同

一鋼板から切り取り、加工歪みできるだけ小さくなる様に注意しながら製作した。なお同一鋼板より引張試験片を取り出して母材の引張試験を行って Stress-Strain 曲線をえがいた。この時の記録の一例を図-1 にあげる。

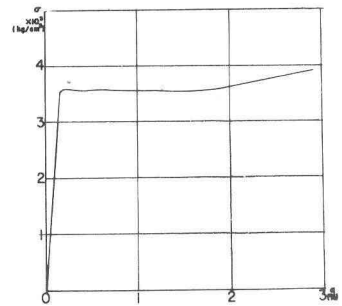


図-1

ゆれゆれが行った実験結果をすべてあげることはできないが、その代表的な結果を以下にあげる。

図-2 は弾性範囲内の荷重 ($P = 1.8 \text{ My/L}$, M_y : 降伏モーメント, L : 試験はりのスパン長) が走行した場合の一例である。この図から歪みが直線的に変化する様子がよくわかる。その他の実験で得られた速度範囲 ($V = 0.1 \sim 0.24 \text{ L/sec}$) では速度の影響

はなかった。つぎに周期荷重 $P_d y = P_0 (1 + \beta \sin \omega t)$ が速行した場合の一例を図-3 に示す。この時の荷重 $P_0 = 3.1 \text{ My/L}$ で、 $\beta = 0.05$, $\omega/\omega_0 = 1.15$, $V = 0.24 \text{ L/sec}$ である。ここで ω_0 ははりのスパン中央点に荷重 P_0 が載荷した場合のなりの固有振動数である。

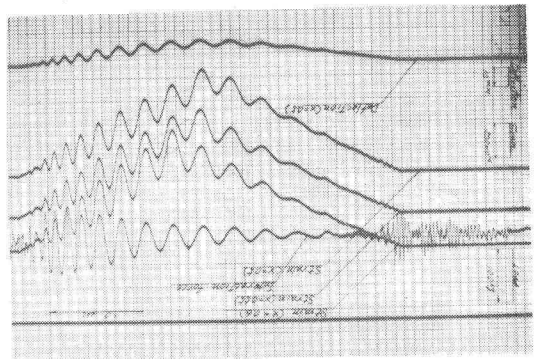


図-2

実験結果のうち、おもなものを列挙すると、つぎのようである。

(1). けたの一部が塑性域に入っても動的応答の振動周期は急激には変化しない。

(2). 速行速度が大きくなると最大たわみを生ずる時間は遅れる。

(3). けたの一部が弾塑性域に入ったような振動では、荷重がけたを通過後、永久歪み残り、この値を中心に振動する。

(4). 弾性範囲内の振動ではけたの軸方向歪の分布は、直線的である。

(5). けたの一部が塑性領域へ入るような大きな荷重を移動荷重として選ぶと、荷重の質量の影響

がけたの動的応答の振動周期に大きく影響し、その周期は荷重がけたの中央点へ移動すると共に大きくなり、これを過ぎると小さくなる。

(6). 持地力 (Internal force) は理論解析では荷重がけたの終端へ近づくと大きくなるが、実験では認められなかった。

3. 解析方法と解析結果

一般に弾塑性領域ではけたの曲げモーメントと曲率の関係は非線形となる。このような場合の振動の解析においては、けたを連続体として解くことは非常に困難であるので図-4 のような discrete

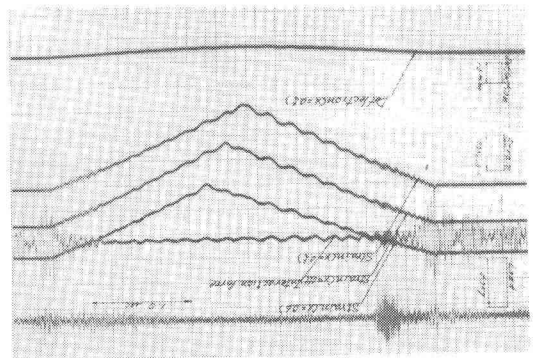


図-3

系すなわち集中 flexibility と集中荷重をもった不連続体として解析することが合理的であることが Toridis と Wen および山田・樫尾らによって報告されているので、われわれもこの方法をとることにした。

その解析方法を数値計算を行う順序に従って述べる。時間 t_i における i 点のたわみを $y_i(t_i)$ 、速度を $\dot{y}_i(t_i)$ 、加速度を $\ddot{y}_i(t_i)$ とする。けたのたわみは曲げモーメントのみで起るとすれば、 i 点におけるたわみとたわみ角 θ_i の関係は図-5 より

$$\theta_i(t_i) = (-\dot{y}_{i-1}(t_i) + 2\dot{y}_i(t_i) - \dot{y}_{i+1}(t_i))/h \quad (1)$$

であり、曲率 ϕ_i とたわみ角 θ_i の関係は

$$\phi_i(t_i) = \theta_i(t_i)/h \quad (2)$$

となる。つぎに曲げモーメントと曲率の関係より曲げモーメントを計算する。垂硬化の影響を無視すれば、断面が I 型の場合、断面の全高のウェブ高に対する比を RD 、全フランジ面積のウェブ面積に対する比を RA とすれば、曲げモーメントと曲率の関係は

i $\phi/\phi_y \leq 1$ のとき

$$M/M_y = \phi/\phi_y$$

ii $1 < \phi/\phi_y \leq RD$ のとき

$$M/M_y = \frac{6RA \cdot RD^3}{3RA(RD+1)^2 + 4(RD-1)} \left\{ 1 - \frac{1}{3} \left(\frac{\phi}{\phi_y} \right)^2 \right\} + \frac{\phi}{\phi_y} \left[1 - \frac{4RA \cdot RD^3}{3RA(RD+1)^2 + 4(RD-1)} \right]$$

iii $RD < \phi/\phi_y$ のとき

$$M/M_y = \frac{6\{(RD+1)RA+1\}RD}{3RA(RD+1)^2+4} - \frac{RD^3}{3RA(RD+1)^2+4} \left(\frac{\phi}{\phi_y} \right)^2$$

となる。矩形断面の場合には、 $RD=1.1$ 、 $RA=0.1$ とすれば、図-6 の曲げモーメントと曲率の関係が得られる。垂直力の釣合いは図-7(A)を参照して、

$$-m_i \ddot{y}_i(t_i) + V_i' - V_i + P_i = 0$$

ここで P_i は内力(接地力)。図-7(B)を参照して垂直力 V をモーメント M で表わせば、

$$m_i \ddot{y}_i(t_i) = (M_{i-1}(t_i) - 2M_i(t_i) + M_{i+1}(t_i))/h + P_i \quad (3)$$

これより時間 t_i における加速度 $\ddot{y}_i(t_i)$ が求まる。つぎに t_i の微小時間 Δt 後を t_2 とすれば、 t_2 におけるたわみは、

$$y_i(t_2) = y_i(t_1) + \Delta t \dot{y}_i(t_1) + \frac{1}{2} (\Delta t)^2 \ddot{y}_i(t_1) \quad (4)$$

となる。時間 t_2 のときの加速度を上記と同様に求めれば、このときの速度 $\dot{y}_i(t_2)$ は、

$$\dot{y}_i(t_2) = \dot{y}_i(t_1) + \frac{1}{2} \Delta t \{ \ddot{y}_i(t_1) + \ddot{y}_i(t_2) \} \quad (5)$$

より求まる。初期条件のたわみおよびその速度を手入れれば、上記の(1)~(5)式をくり返すことにより、



図-4

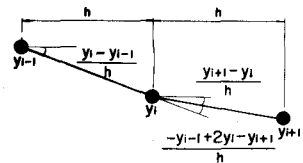


図-5

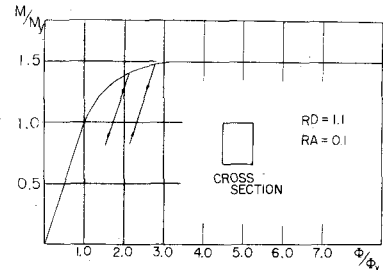


図-6

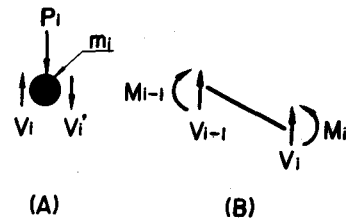


図-7

任意の時間の動たわみ、速度、加速度、曲げモーメント等が求まる。

図-8は周期荷重 $P(t) = P_0(1 + \beta \sin \omega t)$ で、 $P_0 = 2.0 \text{ My/L}$ 、 $\beta = 0.2$ 、 $\omega = 2\pi \times 7/\text{sec}$ 、 $V = 2.0 \text{ L/sec}$ の場合である。荷重がけたのスパン中央点に載荷した場合のけたの固有振動数は $2\pi \times 7.13/\text{sec}$ であるが、振動数を種々変えて比較すると、最大動たわみはこの振動数の場合になる。このことは2節の実験結果(5)と一致する。

つぎに走行荷重の速度の影響は弾性域においては小さいが、塑性域に入るとその影響は大きい。荷重がけたを通過後の自由振動における各点の最大と最小の動たわみを平均して得られた最終変形が図-9である。最大たわみが速度を遅くにつれ終端に近づくことがよくわかる(2節(2))。ここで $\alpha = T \cdot V / L$ (T : 固有周期) は速度効果を表わすパラメーターである。また曲げモーメントと曲率の関係を履歴線と仮定すると、剛比 R (塑性域での剛性/弾性域の剛性) が減るにしたがって最大たわみは終端よりへ移る。

従来塑性ヒンジは単純けたの場合、スパン中央点のみにできるものと考えることが多かったが、移動荷重の場合には図-10に示すように塑性域の広がりが見られ、スパン中央点よりも終端よりに多く生ずることがわかる。

4. むすび

解析に取り入れたようなけたのモデル化すなわち図-4のモデルは、移動荷重によるけたの振動を解析するのに適しており、時間間隔 Δt が適当なら十分な精度で計算しうる。連続体であるけたを不連続な(discrete)けたとしたための修正は、接点で一時的衝撃作用をうけるとして計算すればよいことを確認した。

周期荷重が移動する場合、荷重の質量も考慮する必要があり、特にけたの質量にくらべて荷重の質量が大きい場合は、けた-荷重系の基本振動周期としてけたの中点に荷重の質量が作用していると考えた方がよい。

本研究で行った数値計算の結果は実験結果の傾向をよく示しており、解析方法の妥当性を表わしていると思う。不特定構造物例えば連続けたなどにもこの解析法を適用して目下解析中である。

参考文献

- 1) Toridis, T.G & Wen, R.K; Inelastic Response of Beams To Moving Loads. ASCE, EM 6, December 1966.
- 2) 藤内敏、小坂為雄、吉田博、松田誠; 移動荷重による弾塑性ばりの動的応答。昭和42年度土木学会中部支部研究発表講演概要集

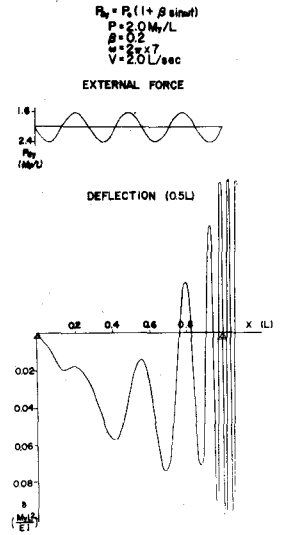


図-8

PERMANENT SETS

$P = 4.4 \text{ My/L}$
 $R = 0$

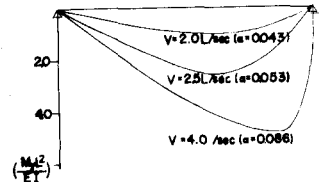


図-9

MOMENT DIAGRAM

$P = 4.4 \text{ My/L}$
 $V = 2.0 \text{ L/sec}$
 $R = 0$

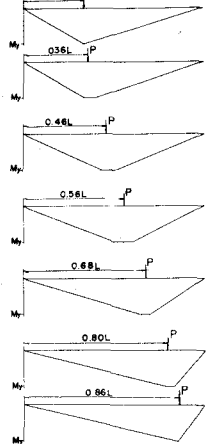


図-10