

名古屋大学 正 福本 啓士

金沢大学 正 小堀 為雄

金沢大学 正 吉田 博

1. 緒言 構造物の設計において、構造物の塑性変形により生ずる崩壊メカニズムおよびそこから求められる崩壊荷重を基礎としたいわゆる塑性設計法はその考え方に於いて合理的なものであるとされている。橋梁構造物の塑性設計の適用に関する問題点の1つに、橋梁に弾性限度を超えたくり返し移動荷重が作用した場合のたわみ安定性の問題がある。本研究はくり返し移動荷重をうける桁橋構造物の弾塑性状態を実験的に求めようとしたものである。不静定はりとして一端固定他端単純支持はりを用い弾性限度を超えたくり返し固定点荷重と転動くり返し荷重による桁のたわみ挙動を調べ、これが桁のたわみ安定性に与える影響を明らかにし、また、塑性解析による崩壊荷重との比較検討を行ったものである。くり返し移動荷重による変形硬化現象についてはすでに文献(1)で報告済みである。それによればスパンの一端固定他端単純支持はりでは変形硬化荷重は $P_0 = 5.586 \text{ Mp/l}$ であり、また崩壊荷重は $P_u = 5.828 \text{ Mp/l}$ であり、塑性ヒンジ生成位置は固定端と単純支持端よりそれぞれ $0.372l$ と $0.628l$ である。ただし、 M_p ははりの全塑性モーメントである。

2. 実験装置および試験げた。本研究のために写真-1に示すくり返し移動荷重装置を試作した。写真-1中①はスパン1mの一端固定他端単純支持のけたで②は試験げたの固定支承である。③の単純支承はローラー支承である。

④は移動荷重装置である。⑥で示される2本のシャフトは移動のためのガイドラインとなる。⑤で示されるシャフトはこれと回転させることにより④からの動力を④の移動装置に伝える。荷重は死荷重を用いて④で示されるレバーを用いて載荷される。ここではレバー比を5:1にとった。⑧は桁がたわんでも常にレバーが水平になるよう調整できるようにした。⑨は駆動モーターで一定点で正確に荷重が静止するようブレーキモーターを取りつけた。試験げたはSS41鋼から機械切削により切り単一棒材で、横断面形状は矩形断面とI型断面の2種類からなっている。試験げたの諸元を表-1に示す。

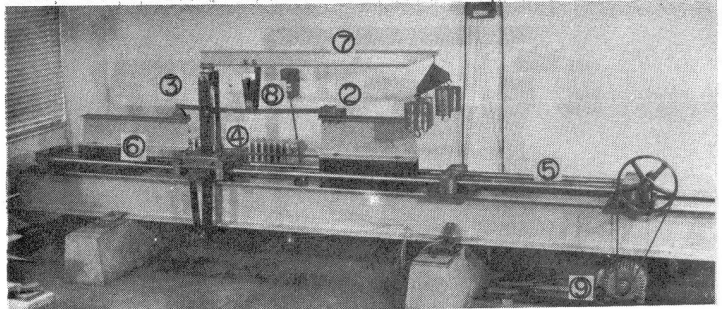


Photo. 1

3. 実験結果

1) 静的曲げ試験 矩形およびI型断面材の静的弾塑性状態を知るために、くり返し荷重に用いると同一部材寸法の試験げたを用いて静的曲げ試験を行った。載荷点は最小の崩壊荷重を与

	Rectangular cross section	I cross section
Z (plastic modulus)	1.50 cm ³	2.819 cm ³
S (section modulus)	1.00 cm ³	2.265 cm ³
f (shape factor)	1.50	1.249
Length	1170 cm	1170 cm
Span length	1000 mm	1000 mm
Numbers	10	6

Table 1

この単純支持端より $(\sqrt{2}-1)l$ の点に達して載荷した。図-1および図-2は矩形断面およびI型断面の荷重と荷重点下へのたわみとプロットしたものである。

2) くり返し固定点荷重によるたわみ安定性実験 くり返し固定点荷重により最小の変形硬化荷重となる載荷点におよび D (単純支持端より $0.372l$ および $0.577l$) に交互に荷重と作用させてたわみ安定性の実験を行った。まず、荷重 P の大よそは E の弾性限度近くから出発し、点 C および点 D に交互に載荷し、一サイクルごとに点 C に載荷したときのたわみ δ_{cc} をダイヤルゲージで測定した。点 C のたわみがサイクル数にかかわらず一定値に収束すれば、荷重をわずかに増加させて同一実験操作をくり返した。さらに荷重を増加してゆくと、荷重のくり返し数と共に点 C のたわみはもはや一定値に収束せず発散するようになる。図-3 および図-4の自まはこのようなして得られた測点であり、縦軸に δ_{cc} (mm) と横にサイクル数をとっている。また、実測点曲線にそって書いてある数字はその C に作用した荷重 P の大よそである。

3) くり返し移動荷重によるたわみ安定性実験 くり返し固定点荷重実験と同一寸法の矩形断面およびI型断面の試験台を用いて移動荷重装置により、移動荷重実験を行った。移動荷重は単純支持端より固定端へ方向へくり返し移動して載荷した。移動荷重の場合も固定荷重の場合と同様に単純支持端より $0.372l$ の点 C に塑性ヒンジが生成されるから、移動荷重が点 C に至ると荷重を静止せしめ、たわみ指示が安定したのちの点 C のたわみを記録した。実験の方法は固定点荷重の場合と全く同じ方法で行った。図-3 および図-4の黒字は移動荷重に対するものである。固定点荷重のものを併記してある。

4. 考察

1) 曲げモーメントの曲率 引張試験より得られた応力歪曲線と理想化して図-5のよりに考える。たゞし $E\epsilon = \sigma/E$ とする。このように応力-歪関係と仮定すると矩形断面では図-6(a)に示す3つの、I型断面では図-6(b)に示す5つの応力分布が考えられる。それを用いた場合の曲げモーメントの曲率の関係を表-2に示す。

Fig. 1 LOAD VERSUS LOADING POINT DEFLECTION RELATIONSHIPS OF BEAMS WITH RECTANGULAR CROSS SECTION

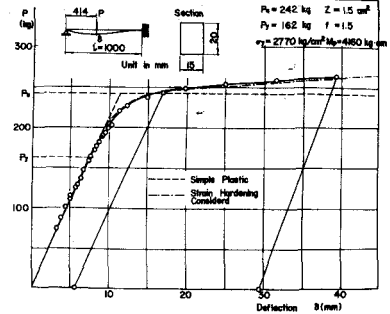


Fig. 2 LOAD VERSUS LOADING POINT DEFLECTION RELATIONSHIPS OF BEAMS WITH I CROSS SECTION

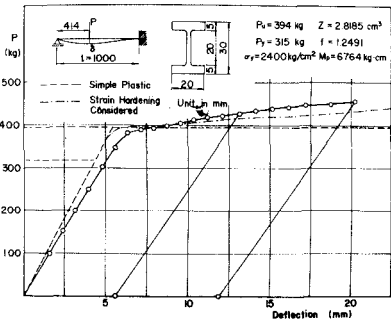


Fig. 3 CYCLES FIXED LOAD OR CYCLE MOVING LOAD VERSUS DEFLECTION RELATIONSHIP OF RECTANGULAR CROSS SECTION

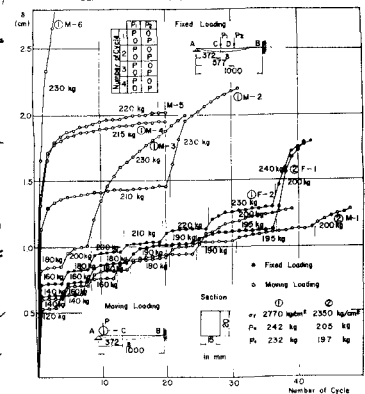


Fig. 4 CYCLES FIXED OR CYCLE MOVING LOAD VERSUS DEFLECTION RELATIONSHIP OF I CROSS SECTION

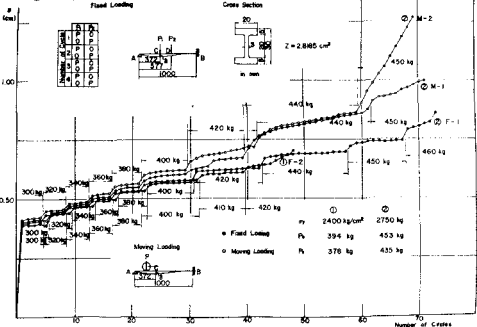


Table 2 矩形断面

弾性範囲内	$\frac{M}{M_y} = \frac{\phi}{\phi_y} \quad 0 \leq \frac{\phi}{\phi_y} \leq 1$
歪硬化以前	$\frac{M}{M_y} = \frac{2}{3} \left[1 - \frac{1}{3} \left(\frac{\phi}{\phi_y} \right)^2 \right]$ $1 \leq \frac{\phi}{\phi_y} \leq \lambda$
歪硬化以後	$\frac{M}{M_y} = \frac{2}{3} \left[1 - \frac{1}{3} \left(\frac{\phi}{\phi_y} \right)^2 \right] + k \left(\frac{\phi}{\phi_y} \right) - \frac{1}{2} \lambda^2 \left(\frac{\phi}{\phi_y} \right)^2 - \frac{3}{2} \lambda$ $\lambda \leq \frac{\phi}{\phi_y}$

工型断面

弾性範囲内	$\frac{M}{M_y} = \frac{\phi}{\phi_y} \quad 0 \leq \frac{\phi}{\phi_y} \leq 1$
フランジ内降伏	$1 \leq \frac{\phi}{\phi_y} \leq d/d_w$ $\frac{M}{M_y} = \frac{bd^2}{24} \left[1 - \frac{1}{3} \left(\frac{\phi}{\phi_y} \right)^2 \right] + \frac{\phi}{\phi_y} \left[1 - \frac{bd^2}{24} \right]$
ウェブ内降伏	$d_w/d \leq \frac{\phi}{\phi_y} \leq \lambda$ $\frac{M}{M_y} = \frac{bd^2}{12} \left(\frac{\phi}{\phi_y} \right)^2$
歪硬化域フランジ内	$\lambda \leq \frac{\phi}{\phi_y} \leq \lambda_y d_w$ $\frac{M}{M_y} = \frac{bd^2}{12} \left(\frac{\phi}{\phi_y} \right)^2 + \frac{kbd^2}{6} \left(\frac{\phi}{\phi_y} \right) \left(1 - \lambda \left(\frac{\phi}{\phi_y} \right) \right) - \frac{3}{2} \lambda \left(1 - \lambda \left(\frac{\phi}{\phi_y} \right) \right)^2$
歪硬化域ウェブ内	$\lambda_y d_w \leq \frac{\phi}{\phi_y} \leq \frac{\phi}{\phi_y}$ $\frac{M}{M_y} = \frac{bd^2}{12} \left(\frac{\phi}{\phi_y} \right)^2 + \frac{kbd^2}{12} \left[2 \left(\frac{\phi}{\phi_y} \right) - \lambda \left(\frac{\phi}{\phi_y} \right) \right] \left(\frac{\phi}{\phi_y} \right) - 3 \lambda \left(\frac{\phi}{\phi_y} \right) - \lambda \left(\frac{\phi}{\phi_y} \right)^2 + \frac{kbd^2}{24} \left[4 \left(\frac{\phi}{\phi_y} \right) \left(1 - \frac{d_w}{d} \right) - 6 \left(1 - \frac{d_w}{d} \right)^2 \right]$

ただし、 b は工型断面のフランジ巾、 W はウェブ厚、 d は桁高、 d_w はウェブ高さである。図-7 は実験に用いた矩形および工型断面の曲げモーメント-変位関係式

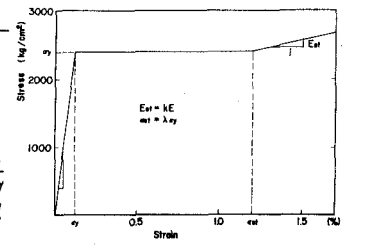


Fig. 6 STRESS DISTRIBUTION

モーメント-曲率の関係を図示したもので、ここでは $\lambda = E_{sh}/E_y = 10$, $k = E_{sh}/E_y = 1/40$ を用いた。

2) 静的曲げ試験 図-1 および図-2 中の一点鎖線は歪硬化の影響を考慮した上記の曲げモーメント-曲率の関係から計算された理論値である。歪硬化を考慮した荷重-変位曲線と理論値の間に良好な一致が見られる。

3) くり返し荷重によるけいむの性質

(a) くり返し固定点荷重 図-3 中に示す一端固定他端弾性支持けいむにおいて、点C および点D に交互に弾性限度を超え変形歪み荷重以内の集中荷重が作用した場合、点C に載荷したとき点C の変位は一定値に収束し、変位は安定化する。その時の収束変位は以下のようにして計算することが出来る。スパンの任意の一点X において、点C に載荷したときの残留変形による曲げモーメントをも考慮した曲げモーメントを M_{rc} 、点D に載荷したときの残留曲げモーメントをも含めた曲げモーメントを M_{rd} とする。いま、点C に載荷した場合の収束変位を求めるわけであるから、点C に載荷したときの各点の曲率は次のようにして求めることが出来る。すなわち、 M_{rc} および M_{rd} が弾性範囲内であれば図-9 に示す曲げモーメント-曲率関係の直線OS 間にある。また、XC が弾性範囲内であり、 M_{rd} よりその絶対値が大である場合はM-中曲線上ST 間にあることになる。しかし、点D の載荷に対する M_{rd} が弾性範囲内にあり、かつ M_{rc} よりその絶対値が大である場合はM-中曲線上にはなく、 M_{rd} の点(E とする)より弾性部分OS に平行に $|M_{rc} - M_{rd}|$ だけ減じた点(F とする)にあることになる。これを式で示せば以下のようになる。このようにして変位を算出したときの対応する荷重に対してスパンに生じた曲率が求まるとモーメント-変位関係式

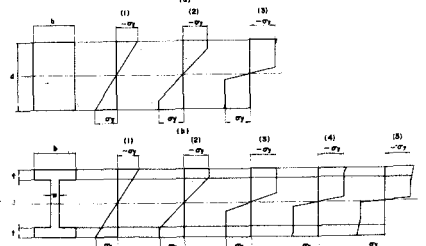


Fig. 7 NONDIMENSIONALIZED MOMENT CURVATURE RELATIONSHIPS

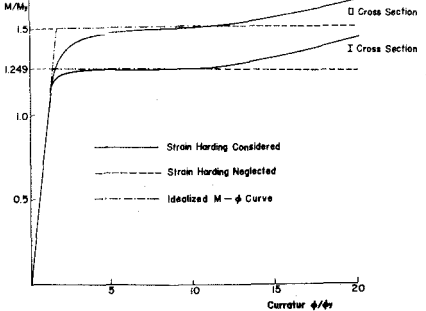


Fig. 8

Table 3		矩形断面	I 型 断面
	$ M_{xc} \leq M_y$	$\frac{\phi}{\phi_y} = \frac{M_{xc}}{M_y}$	$\frac{\phi}{\phi_y} = \frac{M_{xc}}{M_y}$
$ M_{xc} \geq M_{xp} $	$ M_{xc} \geq M_y$	$\frac{\phi}{\phi_y} = \frac{1}{\sqrt{3-2\frac{ M_{xc} }{M_y}}}$	フランジ内降伏 $\frac{bd^3}{48} [1 - \frac{1}{3}(\frac{\phi}{\phi_y})^2] + \frac{\phi}{\phi_y} [1 - \frac{bd^3}{48}] - \frac{ M_{xc} }{M_y} = 0$ の3次方程式より求める。 ウェブ内降伏 $\frac{\phi}{\phi_y} = \frac{1}{\sqrt{\frac{125}{64d^2} (1 - \frac{ M_{xc} }{M_y})}}$
	$ M_{xc} \leq M_y$	$\frac{\phi}{\phi_y} = \frac{M_{xc}}{M_y}$	フランジ内降伏 $\frac{bd^3}{48} [1 - \frac{1}{3}(\frac{\phi}{\phi_y})^2] + \frac{\phi}{\phi_y} [1 - \frac{bd^3}{48}] - \frac{ M_{xp} }{M_y} = 0$ の3次方程式より $\frac{\phi}{\phi_y}$ を求め $\frac{\phi}{\phi_y} = \frac{\phi}{\phi_y} - (1 - \frac{ M_{xc} }{M_y} - \frac{M_{xc}}{M_y})$ ウェブ内降伏 $\frac{\phi}{\phi_y} = \frac{1}{\sqrt{\frac{125}{64d^2} (1 - \frac{ M_{xc} }{M_y})}} - (1 - \frac{ M_{xc} }{M_y} - \frac{M_{xc}}{M_y})$

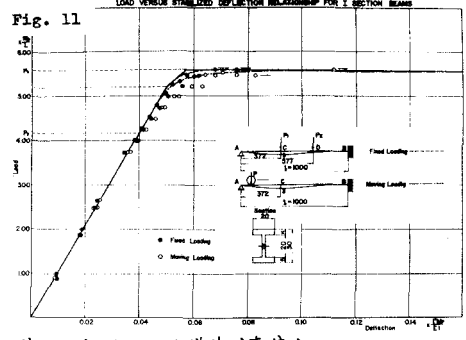
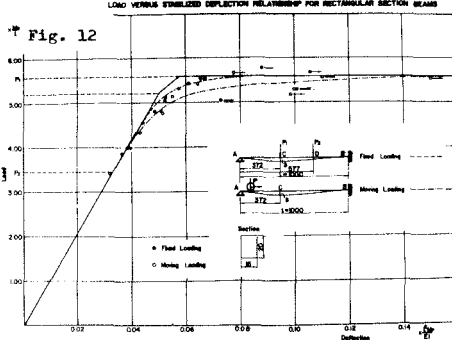
大小関係からより上の各点の曲率が求まる。

(2) 収束にわみ 図-10および図-11は一点線線は弾性限度以上の荷重の収束にわみを矩形断面とI型断面に対して移動荷重によるものと示し、点線は固定点荷重によるものである。図-12(a), (b)はくり返し移動荷重およびくり返し固定点荷重により生ずる塑性域の広がり示したものでこれから移動荷重による場合の方が大きいことがわかる。

5. 結論

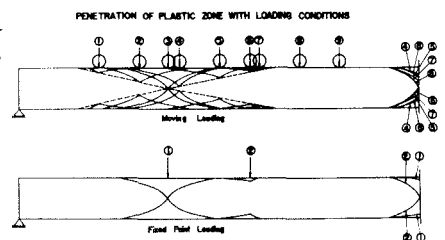
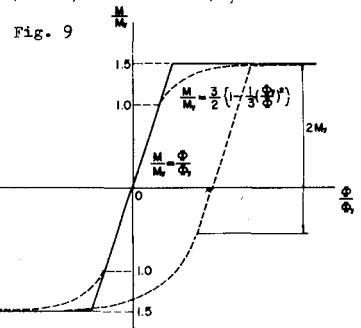
1) くり返し固定点荷重とくり返し移動荷重による変形硬化荷重は破壊荷重よりわずかに小さく、実験値はほとんど差が認められなかった。

2) くり返し固定点荷重によるものとくり返し移動荷重による変形硬化荷重の大きさは同一であるが、収束にわみ性状は異なっている。収束にわみ性状は形状係数により影響を受けるが通常I型断面では荷重の移動を考慮する必要はない。



により容易に安定にわみと求めることが出来る。図-8はそのフローチャートと示したものである。

(b) くり返し移動荷重とくり返し移動荷重による収束にわみはくり返し固定点荷重と同様の考え方と求めることが出来る。荷重が点しに載荷したときの点しの収束にわみは、点しに載荷したときの任意の点Xの回折モーメントを M_{xc} とし、荷重が移動したとき生ずる点Xの残留モーメントをも含めた絶対値が最大の回折モーメントを M_{ymax} とし、固定点荷重の場合と同様 M_{xc} と M_{ymax} の



1) 福本, 小坂, 吉田 鋼の反形硬化荷重に関する実験的研究

第21回年次学術講演会 I-72