

くり返し荷重による連続桁橋のたわみ安定性について

ON THE DEFLECTION STABILITY ON THE TWO-SPAN CONTINUOUS GIRDER BRIDGES UNDER VARIABLE REPEATED LOADS

福本 暁士*・吉田 博**
 By Yuhshi Fukumoto and Hiroshi Yoshida

1. 緒 言

橋梁構造物への塑性解析および塑性設計の適用に関する問題点の1つとして、橋梁に弾性限度を越えたり返し移動荷重が作用した場合の橋桁のたわみに関する安定性の問題がある。

弾性限度を越えた変動くり返し荷重が構造物に作用した場合、構造物の応答につきの3形式があることはよく知られている。すなわち

(1) 変動荷重のくり返し数とともに構造物の永久変形が増していく漸増崩壊荷重 (Incremental Collapse Load)

(2) 変動荷重があるくり返し数を越えると、構造物の永久変形が一定値に収れんし、以後は弾性的な応答を示すいわゆる変形硬化荷重 (Shake-Down Load)

(3) 変動荷重によるある断面での交番塑性応力の発生による低サイクルでの材料の破断 (Alternative Plasticity)

橋梁構造物の塑性設計の立場からは、設計荷重を対象に、単純塑性理論による崩壊メカニズムをもとにして求めた崩壊荷重と上記の3形式に相当する荷重との定量的な比較検討が望まれる。

本研究では、くり返し作用する荷重列のモデル化されたものとして、現行鋼道路橋設計示方書に規定される1個の線荷重と等分布荷重よりなる L 荷重が連続桁上をくり返し通過する場合の;

(1) メカニズムによる崩壊荷重と安定したたわみ性状を与える変形硬化荷重との関係、および両者のたわみ量をスパン長および死荷重をパラメーターとして求め、

(2) メカニズムによる崩壊荷重と漸増崩壊荷重による塑性ヒンジの発生位置の相違を比較検討した。

2. 用いた条件および仮定

(1) 等断面等スパン2径間連続桁を解析の対象とする。

(2) 線荷重として単位幅員当り M_p/L_0 の大きさの荷重が橋上を1個通過する。ここに M_p は桁の全塑性

モーメントであり、 L_0 は1スパン長とする。

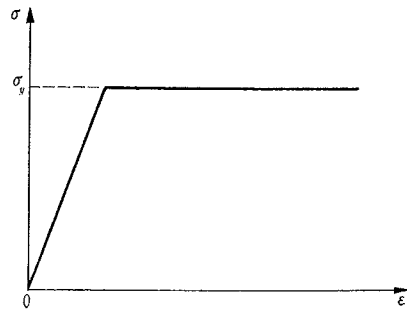
(3) 等分布活荷重として単位面積当り $\alpha \cdot M_p/L_0^2$ の荷重が任意の長さにとわって載荷されるものとする。すなわち、鋼道路橋設計示方書の $L-20$ 荷重によれば、線荷重 $P=5$ t/m, 等分布活荷重 $p=0.35$ t/m² ($L_0 \leq 80$ m) であるから、係数 α は $\alpha=0.07 L_0$ (ただし L_0 in m) となる。

(4) 等分布死荷重として単位面積当り $\beta \cdot M_p/L_0^2$ の荷重が全スパンにわたり載荷されるものとする。ここに β は線荷重と1スパン上の全死荷重との比を示す。

(5) 鋼材は理想弾塑性体とする (図-1)。

(6) 桁は全塑性モーメント M_p まで達することができるものとする。すなわち、いかなる形の座屈も塑性ヒンジ形成までは起こらず、また、せん断力による全塑性モーメントの低下は無視する。

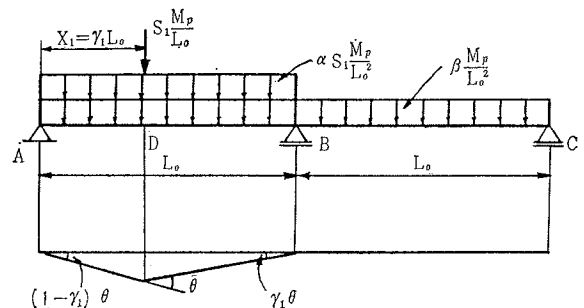
図-1



3. 崩壊荷重

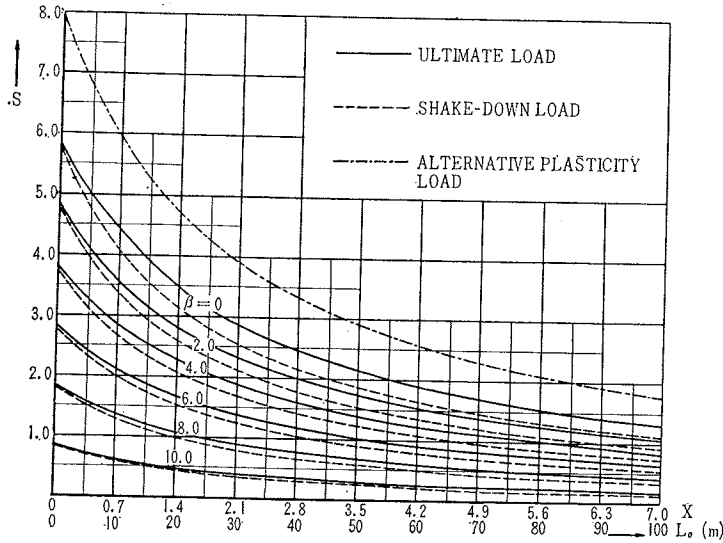
図-2 に示すように線荷重 $S \cdot M_p/L_0$, 等分布活荷重

図-2



* 正会員 Ph.D. 名古屋大学助教授 工学部土木工学科
 **正会員 金沢大学助手 工学部土木工学科

図-3



$\alpha \cdot S \cdot M_p / L_0^2$ および等分布死荷重 $\beta \cdot M_p / L_0^2$ が作用した場合の崩壊係数 S が最小値となるような線荷重位置は $X = rL_0 = (\sqrt{2} - 1)L_0$ であり、一方塑性ヒンジの位置は B 支点上および D 点である。このときの崩壊係数 S は式 (1) により与えられる。

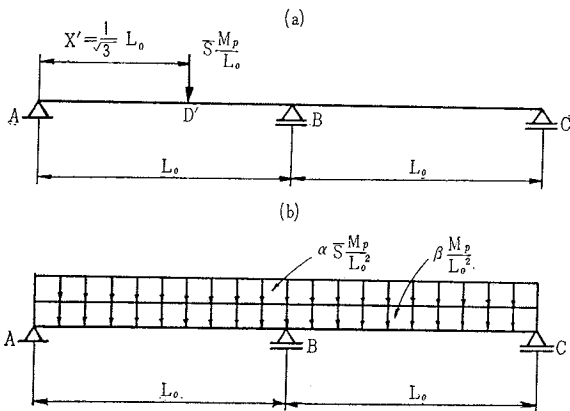
$$S = \frac{2(1+r) - r(1-r)\beta}{r(1-r)(2+\alpha)} \dots\dots\dots(1)$$

図-3 の実線で示す曲線群は式 (1) の β をパラメータとした S の値を示したものである。この図で $\alpha=0$, $\beta=0$ に相当する $S=5.828$ は線荷重のみが作用する場合の崩壊荷重 $P=5.828 M_p / L_0$ を示す。なお、この点線は後述の変形硬化荷重を示したものである。

4. 変形硬化荷重

ある範囲で大きさが変動する荷重がくり返し桁の上を通過するとき、桁は荷重の通過後塑性変形を起こす。ある一定の塑性変形が起こった後に通過荷重に対して桁が弾性的な性状を示すことを桁が変形硬化すると呼ばれる。

図-4



すなわち、これを条件式によって示すと

$$\left. \begin{aligned} M_i^e)_{\max} + m_{Ri} &\geq M_p \\ M_j^e)_{\min} + m_{Rj} &\geq -M_p \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2)$$

である。ここに、 $M_i^e)_{\max}$, $M_j^e)_{\min}$ は、 i 点および j 点に生ずる最大および最小曲げモーメントであり、 m_{Ri} , m_{Rj} は i 点および j 点に生ずる桁の塑性変形による残留曲げモーメントである。

線荷重および等分布荷重が移動して作用する場合、1つの塑性ヒンジが中央支点上に生ずることは容易にわかる。

単一线荷重 $\bar{S} \cdot M_p / L_0$ が通過する

とき $X = \frac{1}{\sqrt{3}} L_0$ で支点 B に弾性最大負曲げモーメント

$$M_{B1\min} = -\frac{1}{6\sqrt{3}} \bar{S} M_p$$

を生ずる (図-4)。また、等分布荷重による支点 B の弾性最大負曲げモーメントは図-4(b) の載荷状態で生じ、その値は $M_{B2\min} = -\frac{1}{8} (\alpha \bar{S} + \beta) M_p$ である。したがって

$$M_B^e)_{\min} = M_{B1\min} + M_{B2\min} \dots\dots\dots(3)$$

となる。

一方、弾性最大正曲げモーメントの生ずる位置を D 点 (支点 A より $X = \bar{r} L_0$) とすると (図-5)、単一线荷重 $\bar{S} \cdot M_p / L_0 (X' = r_1 L_0)$ による D 点の曲げモーメントは

$$M_{D1\max} = \left\{ -\frac{1}{4} r_1 (1-r_1) (1+r_1) \bar{r} + (1-r_1) \bar{r} - [\bar{r} - r_1] \right\} \bar{S} M_p$$

となる。ただし、 $\bar{r} \leq r_1$ では [] 内は無視する。

また、等分布荷重による D 点に最大正曲げモーメントを生ぜしめる載荷は図-5(b) であり、そのときの D 点の曲げモーメントは、

$$M_{D2} = \frac{\bar{r}}{16} \{ (\alpha \bar{S} + \beta) (7-8\bar{r}) - \beta \} M_p$$

である。したがって、線荷重および等分布死荷重が作用するときの D 点の弾性曲げモーメントは

$$M_D^e = M_{D1} + M_{D2} \dots\dots\dots(4)$$

となる。

塑性変形によって生ずる残留曲げモーメント m_R は図-6 のような分布をとるので

$$m_{RD} = \bar{r} m_{RB} \dots\dots\dots(5)$$

の関係がある。

したがって、変形硬化条件式 (2) に (3), (4) および式 (5) を代入し、 \bar{S} に関して解くと

図-5

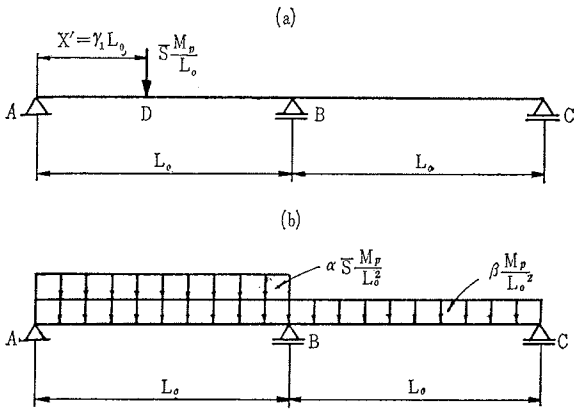
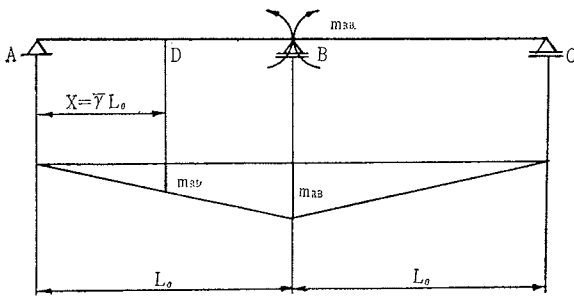


図-6



$$\bar{S} = \frac{8(1-\bar{\gamma})(\bar{\gamma}\beta-2)}{4r_1(1-r_1)(1+r_1) - \alpha\bar{\gamma}(9-8\bar{\gamma}) - 2\bar{\gamma}(8-8r_1 + \frac{1}{\sqrt{3}}\bar{\gamma}) + [16(\bar{\gamma}-r_1)]} \dots (6)$$

となる。ただし、 $\bar{\gamma} \leq r_1$ では [] 内を無視する。

あらゆる $\bar{\gamma} (0 \leq \bar{\gamma} \leq 1)$ および $r_1 (0 \leq r_1 \leq 1)$ の組合せに対し、求めた右辺の最小値が与えられた α, β に対する真の変形硬化荷重の係数 \bar{S} である。

式(6)の数値計算の結果を図-3に示す。崩壊荷重の表示と同じように β をパラメータとし α に対する変形硬化荷重の係数 \bar{S} の値を点線で示してある。ちなみに $\alpha=0, \beta=0$ に相当する $\bar{S}=5.716$ は線荷重のみが作用する場合の変形硬化荷重 $\bar{P}=5.716 \frac{M_p}{L_0}$ を示す。崩壊荷重との比は $\bar{P}/P=0.981$ となっている。

まず、用いた α, β の範囲では、線荷重作用点に弾性最大曲げモーメントが生ずることが数値計算の結果得られた。

5. 交番塑性荷重

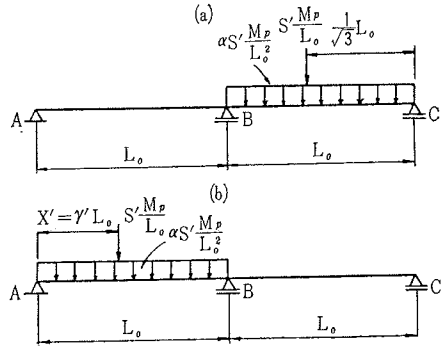
変動荷重がくり返し桁上を通過する場合の他の1つの崩壊現象に交番塑性崩壊がある。これはある断面に交番塑性応力が発生し、交番塑性流れが生ずることによる材料の破断である。

荷重の変動範囲が

$$M_i^e)_{\max} - M_i^e)_{\min} \leq M_p / f \dots (7)$$

を満足しないとき、断面 i では交番塑性流れが起こり、

図-7



この桁は交番塑性崩壊する。ただし、 f は断面の形状係数である。

いま考えている2径間連続ばりにおいて、死荷重は交番塑性崩壊には関係しないから、活荷重のみを考慮することにする。A 支点より $X=r'L_0$ の断面において最大負曲げモーメントが生ずるのは図-7(a)の荷重状態であり、最大正の曲げモーメントが生ずるのは図-7(b)の荷重状態である。交番塑性の係数を S' とすると式(7)より

$$S' = \frac{1}{f} \frac{8}{2\left(\alpha+2+\frac{1}{\sqrt{3}}\right)r' - (2\alpha+5)r'^2 + r'^4} \dots (8)$$

となる。

あらゆる $r' (0 \leq r' \leq 1)$

のうち、 S' が最小のものが与えられた α に対する交番塑性荷重の係数 S' である。

数値計算の結果を図-3の一点鎖線で示す。ただし、 $f=1.0$ としての値である。一般の橋梁では $f=1.11 \sim 1.14$ であり、図-3の交番塑性荷重の係数 S' を用いるに当たっては、形状係数 f で割って用いる必要がある。

図-3からわかるように崩壊荷重の係数 S 、変形硬化荷重の係数 \bar{S} よりかなり大きい値を示している。 $\alpha=0$ の集中荷重のみが通過する場合は $S'=7.953$ であり、 $f=1.14$ とすると交番塑性荷重 $P'=6.976 M_p/L_0$ となり、 $\alpha=0, \beta=0$ の崩壊荷重 $P=5.828 M_p/L_0$ 、変形硬化荷重 $\bar{P}=5.716 M_p/L_0$ の1.20~1.22倍の値である。

したがって、今考えている範囲では2径間連続桁は交番塑性で崩壊することはないと考えてよい。

6. たわみとヒンジ回転角

(1) 崩壊荷重によるもの

崩壊荷重により崩壊時に最大たわみが生ずるのは図-2に示す荷重状態である。まず、第1ヒンジが中央支点上にでき、第2ヒンジがD点に生じて崩壊メカニズムに入るものとする

$$\theta_{DA} = -\frac{1}{24}(\alpha S + \beta) \frac{L_0 M_p}{EI} + \frac{\delta}{r L_0} \frac{r L_0 M_p}{3 EI}$$

$$\theta_{DB} = \frac{(1-r)^3}{24}(\alpha S + \beta) \frac{L_0 M_p}{EI} - \frac{\delta}{(1-r)L_0}$$

$$+ \frac{1+r}{6} \frac{L_0 M_p}{EI}$$

$\theta_{DA} = \theta_{DB}$ より

$$\delta = \frac{r(1-r)}{6} \left\{ \frac{1}{4}(1-3r+3r^2)(\alpha S + \beta) + (1+r) \right\} \frac{L_0^2 M_p}{EI} \dots\dots\dots(9)$$

また、B 点のヒンジ回転角 θ_B は

$$\theta_B = \theta_{BD} - \theta_{BC} \dots\dots\dots(10)$$

より求められる。

また、第1ヒンジがD 点にでき、第2ヒンジが中央支点上に生じて崩壊メカニズムに入るものとする

$$\delta = \frac{1-r}{6} \left[-\frac{1}{4}\{(1-r)^2(\alpha S + \beta) + \beta\} + (3-r) \right] \frac{L_0^2 M_p}{EI} \dots\dots\dots(11)$$

また、この場合のD 点のヒンジ回転角 θ_D は、

$$\theta_D = \theta_{DA} - \theta_{DB} \dots\dots\dots(12)$$

より求められる。ただし、 $r = \sqrt{2} - 1$ である。

与えられた α および β に対して、式(9)および式(11)により δ を求め、 δ の大きい値が崩壊荷重によるたわみ量である。

(2) 変形硬化荷重によるもの

変形硬化荷重によるたわみおよび塑性ヒンジ回転角について求める。中央支点上に塑性ヒンジができる荷重状態は図-4のようであり、またスパン中間に塑性ヒンジができる荷重状態は図-5のようである。

まず、図-4の荷重状態で中央支点上に第1ヒンジが生じ、図-5の荷重状態で第2ヒンジが生じ、たわみが漸増していく場合を考える。第1ヒンジが中央支点上に生じたときのD' 点の曲げモーメントは、

$$M_{D'} = \left\{ \frac{1}{2} r_1 (1-r_1) (\alpha \bar{S} + \beta) + r_1 (1-r_1) \bar{S} - r_1 \right\} M_p$$

であり、D' 点のたわみを δ' とすると

$$\theta_{D'A} = -\frac{r_1^3}{24} (\alpha \bar{S} + \beta) \frac{L_0 M_p}{EI} + \frac{\delta'}{r_1 L_0} - \frac{r_1 L_0 M_{D'}}{3 EI}$$

$$\theta_{D'B} = \frac{(1-r_1)^3}{24} (\alpha \bar{S} + \beta) \frac{L_0 M_p}{EI} - \frac{\delta'}{(1-r_1)L_0}$$

$$+ \frac{1-r_1}{6} \frac{2M_{D'} - M_p}{EI}$$

$\theta_{D'A} = \theta_{D'B}$ より

$$\delta' = \frac{r_1(1-r_1)}{24} \{(1-r_1)^2(\alpha \bar{S} + \beta) + 4(1-r_1) + (2m_{D'} - 1) + r_1^3(\alpha \bar{S} + \beta) + 8m_{D'} r_1\} \frac{L_0^2 M_p}{EI}$$

となる。このとき、B 点のたわみ角は

$$\theta_{BD'} = -\frac{(1-r_1)^3}{24} (\alpha \bar{S} + \beta) \frac{L_0 M_p}{EI} - \frac{\delta'}{(1-r_1)L_0}$$

$$+ \frac{1-r_1}{6} \frac{(2-m_{D'})L_0 M_p}{EI}$$

$$\theta_{BC} = \frac{1}{24} (\alpha \bar{S} + \beta) \frac{L_0 M_p}{EI} - \frac{1}{3} \frac{L_0 M_p}{EI}$$

であり、B 点のヒンジ回転角は

$$\theta_B = \theta_{BD'} - \theta_{BC} = (\theta_{BD'} - \theta_{BC}) \frac{L_0 M_p}{EI} \dots\dots(13)$$

となる。図-4の荷重を除去したときのB 点に生ずる残留曲げモーメントは

$$m_{RB} = -\frac{3}{2} (\theta_{BD'} - \theta_{BC}) M_p$$

となる。この残留曲げモーメントに図-5の荷重状態によるB 点の曲げモーメントを加えると、

$$M_B = \left\{ -\frac{1}{16} (\alpha \bar{S} + 2\beta) - \frac{\bar{S}}{4} \bar{\gamma} (1-\bar{\gamma})(1+\bar{\gamma}) - \frac{3}{2} (\theta_{BD'} - \theta_{BC}') \right\} M_p$$

となる。これより

$$\theta_{DA} = -\frac{\bar{\gamma}^3}{24} (\alpha \bar{S} + \beta) \frac{L_0 M_p}{EI} + \frac{\delta}{\bar{\gamma} L_0} - \frac{\bar{\gamma} L_0 M_p}{3 EI}$$

$$\theta_{DB} = \frac{(1-\bar{\gamma})^3}{24} (\alpha \bar{S} + \beta) \frac{L_0 M_p}{EI} - \frac{\delta}{(1-\bar{\gamma})L_0}$$

$$+ \frac{1-\bar{\gamma}}{6} (2+m_B) \frac{L_0 M_p}{EI}$$

となり、 $\theta_{DA} = \theta_{DB}$ より

$$\delta = \frac{\bar{\gamma}(1-\bar{\gamma})}{24} \left\{ (1-\bar{\gamma})^2 (\alpha \bar{S} + \beta) + 4(1-\bar{\gamma})(2+m_B) + \bar{\gamma}^3 (\alpha \bar{S} + \beta) + 8\bar{\gamma} \right\} \frac{L_0 M_p}{EI} \dots\dots\dots(14)$$

となる。ここに $m_{D'} = M_{D'}/M_p$ 、 $m_B = M_B/M_p$ 、 $\theta_{BD'} = \frac{EI}{L_0 M_p} \cdot \theta_{BD'}$ 、 $\theta_{BC} = \frac{EI}{L_0 M_p} \theta_{BC}$ である。

つぎに、図-5の荷重状態でD 点に第1ヒンジが生じ、図-4の荷重状態でB 点に第2ヒンジが生じ、たわみが漸増していく場合を考える。第1ヒンジがD 点に生じたときの図-5の荷重状態によるB 点の曲げモーメント $M_{B'}$ は、

$$M_{B'} = \left[\frac{1}{\bar{\gamma}} - \left\{ \frac{1}{2} \bar{\gamma} (\alpha S + \beta) + S \right\} (1-\bar{\gamma}) - \frac{1}{2} (1-\bar{\gamma})^2 (\alpha \bar{S} + \beta) \right] M_p$$

となる。D 点のたわみを δ' とすると

$$\theta_{BD} = -\frac{(1-\bar{\gamma})^3}{24} (\alpha \bar{S} + \beta) \frac{L_0 M_p}{EI} - \frac{\delta}{(1-\bar{\gamma})L_0}$$

$$- \frac{(1-\bar{\gamma})}{6} (2m_{B'} + 1) \frac{L_0 M_p}{EI}$$

$$\theta_{BC} = \frac{\beta}{24} \frac{L_0 M_p}{EI} + \frac{m_{B'}}{3} \frac{L_0 M_p}{EI}$$

となり、 $\theta_{BD} = \theta_{BC}$ より

$$\delta' = \frac{1-\bar{\gamma}}{24} \{ -(1-\bar{\gamma})^2 (\alpha \bar{S} + \beta) + \beta \}$$

$$-4(1-\bar{\tau})(2m_{B'}+1)-\beta-8m_B\} \frac{L_0^2 M_p}{EI}$$

となる。これより

$$\theta_{DA} = -\frac{\bar{\tau}^3}{24}(\alpha \bar{S} + \beta) \frac{L_0 M_p}{EI} + \frac{\bar{\delta}'}{\bar{\tau} L_0} - \frac{\bar{\tau}}{3} \frac{L_0 M_p}{EI}$$

$$\theta_{DB} = \frac{(1-\bar{\tau})^3}{24}(\alpha \bar{S} + \beta) \frac{L_0 M_p}{EI} - \frac{\bar{\delta}'}{(1-\bar{\tau})L_0} + \frac{(1-\bar{\tau})}{6}(2+m_{B'}) \frac{L_0 M_p}{EI}$$

となる。D 点のヒンジ回転角は

$$\theta_D = \theta_{DA} - \theta_{DB} = (\theta_{DA} - \theta_{DB}) \frac{L_0 M_p}{EI} \dots (15)$$

となる。したがって、図-5 の荷重除去後 D 点に生ずる残留曲げモーメントは、

$$m_{RD} = -\frac{3}{2}(\theta_{DA} - \theta_{DB})\bar{\tau}^2 M_p$$

図-8

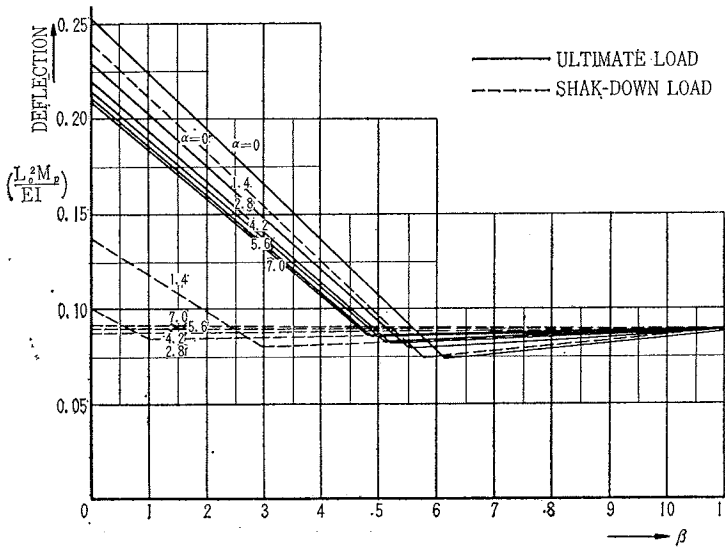
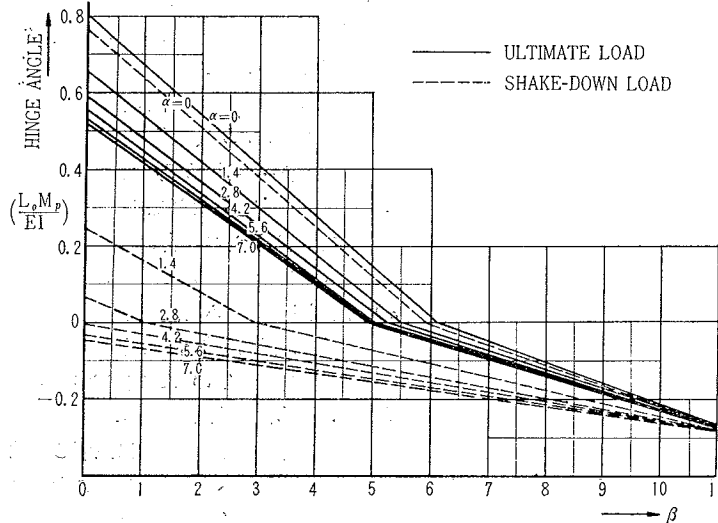


図-9



である。この残留曲げモーメントに、図-4 の荷重状態による B 点の曲げモーメントを加えると、

$$M_B = \left\{ -\frac{1}{16}(\alpha \bar{S} + 2\beta) - \frac{1}{4}\bar{\tau}(1-\bar{\tau})(1+\bar{\tau})\bar{S} - \frac{3}{2}(\theta_{DA} - \theta_{DB})\bar{\tau} \right\} M_p$$

となる。これより

$$\theta_{BD} = -\frac{(1-\bar{\tau})^3}{24}(\alpha \bar{S} + \beta) \frac{L_0 M_p}{EI} - \frac{\bar{\delta}}{(1-\bar{\tau})L_0}$$

$$- \frac{(1-\bar{\tau})}{6}(2m_{B'}+1) \frac{L_0 M_p}{EI}$$

$$\theta_{BC} = \frac{\beta}{24} \frac{L_0 M_p}{EI} + \frac{m_B}{3} \frac{L_0 M_p}{EI}$$

となる。 $\theta_{BD} = \theta_{BC}$ より

$$\bar{\delta} = \frac{1-\bar{\delta}}{24} \{ -(1-\bar{\tau})^3(\alpha \bar{S} + \beta)$$

$$+ 4(1-\bar{\tau})(2m_{B'}-1) - \beta$$

$$+ 8m_B \} \frac{L_0 M_p}{EI} \dots (16)$$

となる。ここに、 $m_{B'} = M_{B'}/M_p$, $m_B = M_B/M_p$, $\theta_{DA} = \frac{EI}{L_0 M_p} \theta_{DA}$, $\theta_{DB} = \frac{EI}{L_0 M_p} \theta_{DB}$ である。また、 $r_1 = \frac{1}{\sqrt{3}}$ であり、 $r_1 L_0$ は支点 A よりスパン中間の塑性ヒンジまでの距離である。

与えられた α および β に対して、式 (14) および式 (16) により $\bar{\delta}$ を求め、 $\bar{\delta}$ の大きい値が変形硬化荷重によるたわみ量である。

図-8 は崩壊荷重および変形硬化荷重によるたわみ量を α および β を変数として表わしたものである。すなわち、崩壊荷重によるたわみ量とは、桁が崩壊メカニズムにはいる直前の塑性ヒンジ点のたわみ量であり、図の実線で示した曲線群である。 β の値がほぼ 6 より低い範囲では、最終ヒンジが支点上に生じて崩壊メカニズムを形成し、6 より高い範囲では、最終ヒンジが荷重作用点に生じ崩壊メカニズムを形成する。

変形硬化荷重によるたわみ量とは、桁のたわみ量が漸次増加して桁が変形崩壊にいたる直前、すなわち、変形硬化荷重によりたわみ量が一定値に取れんしたときの桁のヒンジ点のたわみ量であり、図の点線で示されている。 β の値の低いときには漸増崩壊による最終ヒンジは中央支点上に生じ、 β の値

の高いときには最終ヒンジは線荷重作用点に生ずる。

図-9は図-8と同じような表示による塑性ヒンジの回転角を示したものである。実線は崩壊荷重によるものであり、点線は変形硬化荷重によるものである。なお、ヒンジ回転角の負の値は中央支点上に第1ヒンジが生じることを意味している。

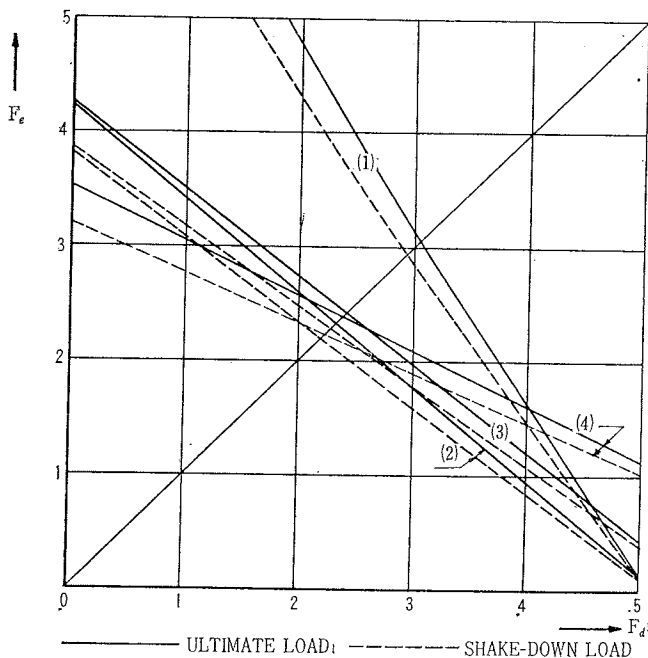
7. 実橋による数値例

名神高速道路の深草中橋外1橋の2径間連続橋の内外桁4桁についての数値例を示す。

桁はフランジ断面の変化により、全塑性モーメント M_p 、断面2次モーメント I が各断面により異なるが、スパン中央付近の最大断面および中央支点上断面の平均値をとった。それらの値を表-1に示す。表にて、集中活荷重、等分布活荷重は設計用荷重 $L-20$ であり、 $\alpha=0.07 L_0$ 。および M_p/L_0 に対する1スパン上の等分布死荷重の比より α, β を決定することができる。この α, β を用いて図-3より S, \bar{S} を、また、図-8より $\delta, \bar{\delta}$ を知ることができる。 M_p/L_0 と図-3より得られた S および \bar{S} より、崩壊荷重および変形硬化荷重の設計荷重に対する比、すなわち、荷重係数 F_l, \bar{F}_l を知ることができる。なお、表-1にて δ^* は設計活荷重および死荷重による桁の弾性たわみである。

以上の数値例では等分布死荷重に対する荷重係数 $F_d=1.0$ にとっている。異なった F_d の値に対する F_l, \bar{F}_l の値を示すと図-10のようになる。 $F_d=F_l$ 、すなわち、活荷重および死荷重に対する荷重係数を同一値に

図-10 () 内の番号は表-1の桁番号を示す。



とると表-1の最下段の2行のような値になる。

表-1

桁番号	1	2	3	4
スパン (m)	24.75	24.75	21.00	21.00
M_p (t-m)	607	470	327	334
$I \times 10^8$ (cm ⁴)	1620	1210	870	870
集中活荷重 (t)	9.727	14.000	12.282	15.065
等分布活荷重 (t/m)	0.681	0.980	0.860	1.055
等分布死荷重 (t/m)	2.292	1.734	1.563	1.150
α	1.733	1.733	1.47	1.47
β	2.313	2.260	2.109	1.600
S	2.50	2.52	2.77	2.93
\bar{S}	2.26	2.27	2.52	2.66
荷重係数 F_l	6.30	3.42	3.51	3.09
荷重係数 \bar{F}_l	5.70	3.08	3.19	2.81
δ/L_0	1/133	1/137	1/156	1/141
$\bar{\delta}/L_0$	1/243	1/249	1/277	1/248
δ^*/L_0	1/919	1/979	1/1219	1/795
$F_l = F_d$	3.06	2.33	2.41	2.38
$\bar{F}_l = F_d$	2.94	2.19	2.28	2.23

8. 考察

2径間連続桁橋を研究対象に、鋼道路橋設計示方書に規定された活荷重列のくり返し移動荷重による桁のたわみ安定性についての解析結果を述べたが、桁のたわみ安定性を決定する変形硬化荷重と、崩壊メカニズムによる崩壊荷重との比較検討結果および両荷重によるたわみ量、塑性ヒンジ回転角の比較検討結果について考察を加えると以下のようなになる。

(1) 現行鋼道路橋設計示方書の荷重模型すなわち、線荷重、等分布活荷重、等分布死荷重の組合せ荷重についての崩壊荷重と変形硬化荷重を求め図-3に示した。図-11は両荷重の比を示したものであり、両者の比は死荷重の大きさ β にほとんど無関係であり、活荷重の大きさ α のみの関数で示されている。図-11から $\alpha=0$ すなわち、線荷重のみが通過する場合は、変形硬化荷重と崩壊荷重の比は約98%であり、 α が増すにしたがってこの比は減少する傾向を示している。鋼道路橋設計示方書による設計荷重では $\alpha=0.07 L_0$ (線荷重 $P=5$ t/m, 等分布活荷重 $p=350$ kg/m²) であるから、 $\alpha=7.0$ では同示方書によれば1スパン100mの橋梁に相当し、その場合の変形硬化荷重と崩壊荷重の比は約85%である。

(2) 崩壊メカニズム時に生ずる塑性ヒンジの位置は等分布活荷重、等分布死荷重の大きさに無関係に図-2のA支点より $(\sqrt{2}-1)L_0=0.414 L_0$ の点であるが、たわみ不安定より生ずる漸増塑性変形時に生ずる塑性ヒンジの位置は活荷重および死荷重の大きさに影響される。図-12は塑性ヒンジの位置

を α および β を変数として図示したものである。 $\alpha < 1$ では、漸増塑性変形による塑性ヒンジの位置は崩壊荷重による塑性ヒンジの位置より端支点側に移り、 $\alpha > 1$ で

は中央支点側に移っている。示方書に示された活荷重比のとり方によれば $\alpha = 1$ は $L_0 = 14.3$ m のスパンに相当する。 $\beta = 0$ では漸増塑性変形による塑性ヒンジと、崩壊

荷重による塑性ヒンジの位置とは最もはなれた状態になるが、 β が大きくなるとともに、両者の位置は接近している。 $\beta = 11.657$ では両者が完全に一致し、死荷重のみで桁が崩壊する増合に相当する。

(3) 交番塑性荷重は崩壊荷重よりはるかに大きくなり、交番塑性変形による桁の崩壊は考慮する必要はない。

(4) 変形硬化荷重と崩壊荷重による桁のたわみ量の比較を行なったものが図-13に示したものである。この図で点線は両荷重の比 α を変数として示したものであり、図-12と同一のものである。実線は漸増塑性変形に入る直前の最終ヒンジのたわみ量と崩壊メカニズムに入る直前の最終ヒンジのたわみ量の比を β をパラメーターとして示したものであるが、荷重比が β の値と無関係に得られるのに反し、たわみ比は図からもわかるように β の値によってかなり影響されている。

9. む す び

本研究では、橋梁構造物の塑性解析および塑性設計への一資料として、2径間連続桁橋のメカニズムによる崩壊荷重と桁のたわみ安定性を決定する変形硬化荷重に関して両荷重の比、崩壊時の塑性ヒンジの位置、塑性ヒンジの回転角およびたわみ量などを活荷重比 α 、死荷重比 β 、または、スパン長との相関関係において求め、使用に便利のように設計図表にまとめた。

なお、計算にあたっては、金沢大学電子計算機 NEAC-2230 を使用した。

10. 記 号

- E = ヤング係数
- F_d = 死荷重の荷重係数 (崩壊荷重)

図-11

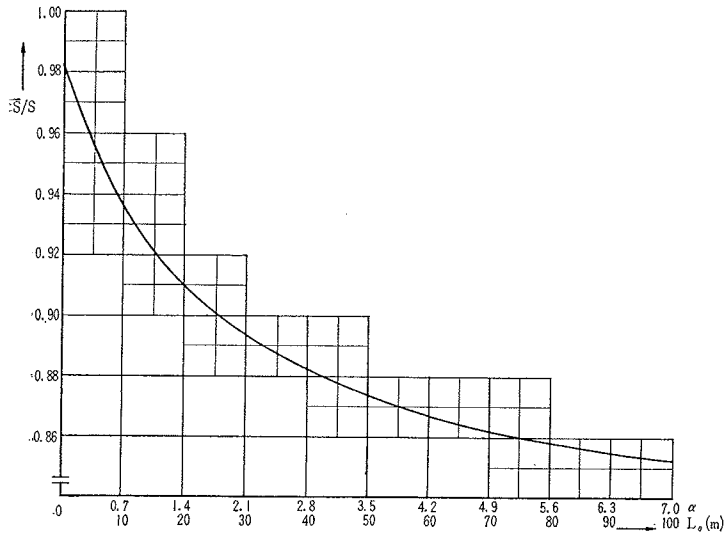


図-12

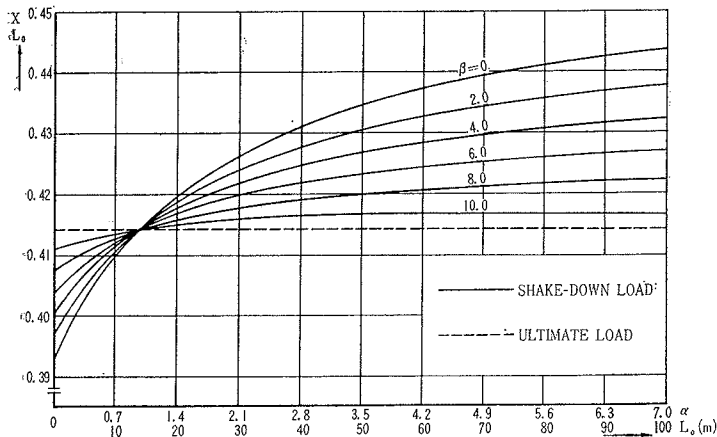
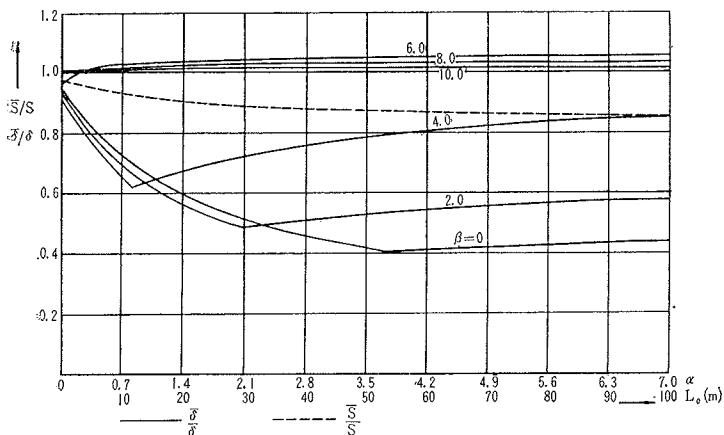


図-13



\bar{F}_d = 死荷重の荷重係数 (変形硬化荷重)
 F_l = 活荷重の荷重係数 (崩壊荷重)
 \bar{F}_l = 活荷重の荷重係数 (変形硬化荷重)
 f = 形状係数
 I = 断面 2 次モーメント
 L_0 = 2 径間連続桁の 1 スパン長
 M_A = 第 2 ヒンジが生じたときの A 点での曲げモーメント
 $M_{A'}$ = 第 1 ヒンジが生じたときの A 点での曲げモーメント
 $M_{A1\max(\min)}$ = 集中荷重による A 点での最大 (または最小) 曲げモーメント
 $M_{A2\max(\min)}$ = 等分布荷重による A 点での最大 (または最小) 曲げモーメント
 M_A^e = A 点での弾性曲げモーメント
 $M_{A^e\max(\min)}$ = A 点での弾性最大 (または最小) 曲げモーメント
 M_p = 全塑性モーメント
 m_{RA} = A 点での残留曲げモーメント
 $m_A(m_{A'}) = M_A/M_p (M_{A'}/M_p)$
 P = 崩壊荷重
 \bar{P} = 変形硬化荷重
 P' = 交番塑性荷重
 p = 等分布活荷重
 S = 崩壊荷重係数
 \bar{S} = 変形硬化荷重係数
 S' = 交番塑性荷重係数
 $X(X')$ = A 支点よりの距離

α = 集中荷重に対する 1 スパン上の等分布活荷重の比
 $\beta = M_p/L_0$ に対する 1 スパン上の等分布死荷重の比
 r = 崩壊荷重によりできる塑性ヒンジの A 支点からの距離/ L_0
 r = 変形硬化荷重によりできる塑性ヒンジの A 支点からの距離/ L_0
 r' = 交番塑性荷重による崩壊点の A 支点からの距離/ L_0
 r_1 = 集中荷重の A 支点からの距離/ L_0
 δ = 崩壊荷重による塑性ヒンジの点のたわみ
 $\bar{\delta}$ = 変形硬化荷重による塑性ヒンジの点のたわみ
 δ' = 第 1 ヒンジができたときの集中荷重点下のたわみ
 δ^* = 設計死活荷重による集中荷重による最大曲げモーメントの点のたわみ
 θ_A = ヒンジ A の回転角
 θ_{AB} = 部材 AB の A 端のたわみ角
 $\theta_{AB} = \frac{EI}{L_0 M_p} \cdot \theta_{AB}$

参考文献

- 1) Neal, B.G. : Plastic Method of of Structural Analysis, John Wiley & Sons, New York, 1957
- 2) Hodge, P.G. : Plastic Analysis of Structures, McGraw-Hill, New York, 1959
- 3) Baker, J.F., Horne, M.R. and Heyman, J. : The Steel Skelton, Vol. 2, Cambridge University Press, Cambridge, 1956
- 4) 田中 尚 : 骨組の塑性力学, コロナ社, 1963

(1965.2.10・受付)