

宮崎大学工学部 正員 太田 俊昭

" 正員 中沢 隆雄

" 学生員 ○山崎 竹博

1. まえがき

本論文は、一定軸力と漸増曲げを受けるR. C. 単純桁を対象として、曲げ亀裂発生から剥離過程を経て、桁が破壊に至るまでの内部応力の遷移ならびに曲げ剛性の低減を理論的に解明したもので、桁を微小要素に分割し、各要素での力の釣合条件と破壊現象に合った変形の適合条件とを適宜導入し、極めて一般化された *Beam theory* を確立し、剥離現象進行過程における桁の非線型挙動や最終的なせん断キレツ形状などを究明しようという試みにものである。

2. 基礎理論

著者らは先に文献(1)において、軸力と曲げを受ける鉄筋コンクリート桁のキレツおよび塑性域を考慮した曲率算定公式を誘導し、さらに文献(2)において、曲げキレツが増し桁が櫛歯構造に移行した際の櫛歯部の鉄筋張力差 ΔT_i による2次的変形量を算出したうえで、片持ばりとしての機能をもつ櫛歯の耐力を求めた。本論文ではこれらの理論式を拡張応用し、櫛歯の剥離後も適用可能な一般理論を以下に提案する。すなわち、図-1(a)に示すような軸圧縮力 N と、2点集中荷重 P を受ける矩形断面鉄筋コンクリート単純ばりを想定し、座標軸を同図のごとく設定する。断面 i において曲げキレツの高さを S_i とし、応力の釣合条件式を求めれば、図-1(b)から

$$\left. \begin{aligned} N_i - \int_{y_s}^h \sigma_c dA - \sum \sigma_s A_s &= 0 \\ M_i - N_i \eta_i + \int_{y_s}^h \sigma_c y dA + \sum \sigma_s y_s A_s &= 0 \end{aligned} \right\} \text{-----(1)}$$

ただし、 M_i, N_i : 断面 i に作用する曲げモーメントおよび軸力、 y_s, η_i, A_s : 下縁から鉄筋および中立軸までの距離、鉄筋断面積。

ここに、 σ_c, σ_s は、それぞれコンクリートと鉄筋との応力で、文献(1)に導くものとする。また変形については、次の仮定を採用する。すなわちコン

クリートのキレツの生じていない部分は平面保持の法則が成立し、キレツ部では、それ自体が引張力の差 ΔT_i ($\Delta T_i = T_{i+1} - T_i$) を受けて1次元影響を考慮した次のようなひずみを付加するものとする(図-2参照)。たとえば、鉄筋のひずみ ϵ_{si} は、平面保持に従うひずみ ϵ_i に上記のひずみ量 ϵ_i^* が加算される。このとき、コンクリートおよび鉄筋のひずみは、それぞれ次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \text{コンクリート: } \epsilon_{ci} &= (1-\bar{y})\epsilon_{ci} + \bar{y}\epsilon_{ci} \\ \text{鉄筋: } \epsilon_{si} &= \epsilon_i + \epsilon_i^* \end{aligned} \right\} \text{-----(2)}$$

ここに、 $\epsilon_i^* = -(\delta_i - \delta_{i-1})/\Delta x$

ただし、 $\delta_i = \Delta T_i S_i^2 / 3E_c I_i$, $\epsilon_i = (1-\bar{y})\epsilon_{ci} + \bar{y}_s \epsilon_{ci}$

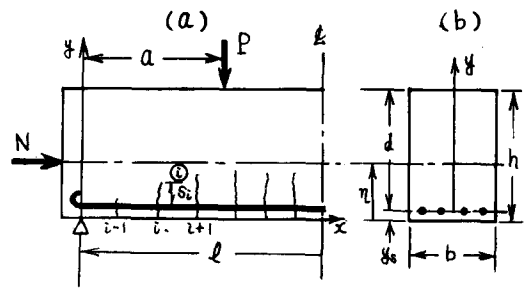


図-1

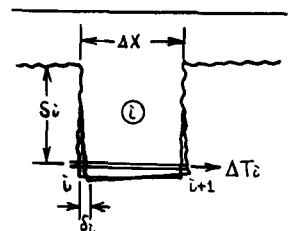


図-2

$$\varepsilon_u, \varepsilon_c: \text{上下縁のひずみ}, \bar{y}_s = y_s/h, T_i = Q_{si} A_s, Q_{ci} = V_{ci}(\varepsilon_{ci} - \varepsilon'_{ci}), Q_{si} = V_{si}(\varepsilon_{si} - \varepsilon'_{si}) \quad \text{----- (3)}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{式(2), (3) から, } Q_{ci} &= V_{ci}(1 - \bar{y}_s)\varepsilon_{ci} + V_{ci}\bar{y}_s\varepsilon_{ui} - V_{ci}\varepsilon'_{ci} \\ Q_{si} &= V_{si}(1 - \bar{y}_s)\varepsilon_{si} + V_{si}\bar{y}_s\varepsilon_{ui} + V_{si}\varepsilon'_{si} - V_{si}\varepsilon'_{ci} \end{aligned} \right\} \quad \text{----- (4)}$$

よって、式(1)の釣合条件式は次のように変形される。

$$N_i - \left\{ \int_{s_i+y_s}^h V_{ci}(1 - \bar{y}) dA + \sum V_{si}(1 - \bar{y}_s) A_s \right\} \varepsilon_{ci} - \left\{ \int_{s_i+y_s}^h V_{ci}\bar{y} dA + \sum V_{si}\bar{y}_s A_s \right\} \varepsilon_{ui} + \left\{ \int_{s_i+y_s}^h V_{ci}\varepsilon'_{ci} dA + \sum V_{si}\varepsilon'_{si} A_s - \sum V_{si}\varepsilon'_{ci} A_s \right\} = 0 \quad \text{----- (5)}$$

$$M_i - T_i N_i + \left\{ \int_{s_i+y_s}^h V_{ci}(1 - \bar{y}) y dA + \sum V_{si}(1 - \bar{y}_s) y_s A_s \right\} \varepsilon_{ci} + \left\{ \int_{s_i+y_s}^h V_{ci}\bar{y} y dA + \sum V_{si}\bar{y}_s y_s A_s \right\} \varepsilon_{ui} - \left\{ \int_{s_i+y_s}^h V_{ci}\varepsilon'_{ci} y dA + \sum V_{si}\varepsilon'_{si} y_s A_s - \sum V_{si}\varepsilon'_{ci} y_s A_s \right\} = 0 \quad \text{----- (6)}$$

式(5), (6)を、 $\varepsilon_{ci}, \varepsilon_{ui}$ について連立して解けば、与荷重 M_i, N_i に対する上下縁のひずみが次のように定められる。

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{ui} &= a_{1i} M_i + a_{2i} N_i + a_{3i} \\ \varepsilon_{ci} &= b_{1i} M_i + b_{2i} N_i + b_{3i} \end{aligned} \right\} \quad \text{----- (7)}$$

ただし、 $a_{1i}, a_{2i}, a_{3i}, b_{1i}, b_{2i}, b_{3i}$ は、それぞれの断面のキレツと応力状態によつて定まる定数である。また、断面 i の曲率 ϕ_i は、 $\phi_i = (\varepsilon_{ci} - \varepsilon_{ui})/h$ で与えられる。

以上は、曲げキレツが生じた場合の曲率算定法を論じたものであるが、さらに荷重が増大し、図-3のようにキレツ部が剥離した状態に対しては以下に述べる変形条件を式(3)に導入する。すなわち歯③が剥離すれば(曲げキレツ頂部から中央側に向つて、横に引張キレツが発生する)歯③の両側における鉄筋力は等しくなる。よつて次式がえられる。

$$\varepsilon'_{ci} + \varepsilon'_{ci} = \varepsilon'_{ci+1} + \varepsilon'_{ci-1} \quad \text{----- (8)}$$

式(8)に式(2)の第3式を代入して、 ε'_{ci} について解けば、結局次式をえる。

$$\varepsilon'_{ci} = \{ \delta_{ci+1} + \delta_{ci-1} + \Delta x (\varepsilon'_{ci} - \varepsilon'_{ci+1}) \} / 2 \quad \text{----- (9)}$$

3. 解析例

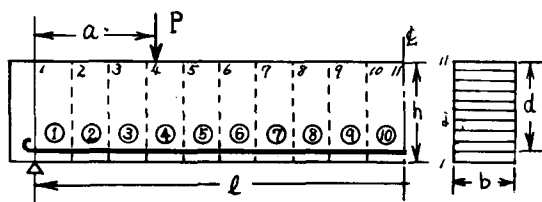


図-4

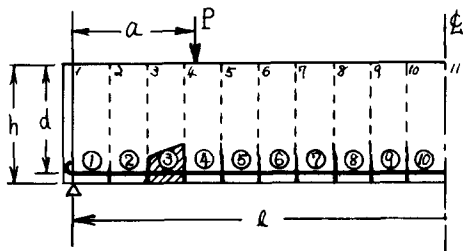


図-5

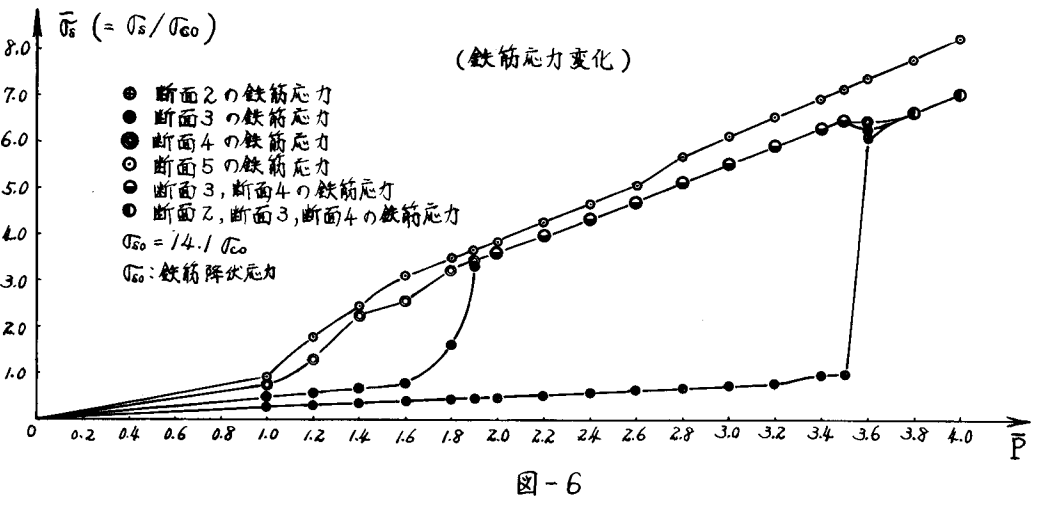
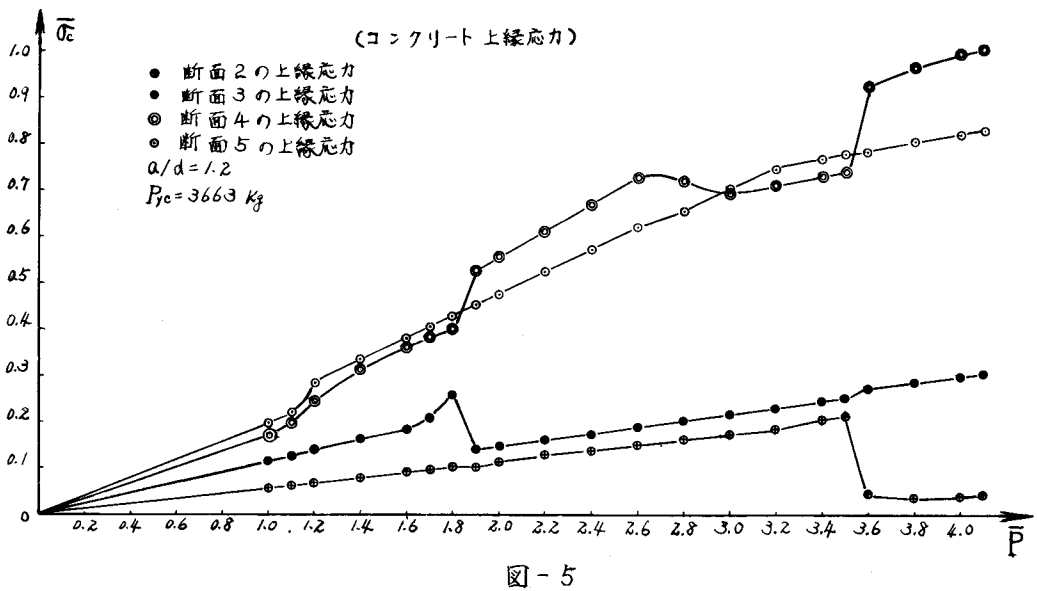
断面寸法諸量、桁幅 $b = 15\text{cm}$ 、桁高 $h = 30\text{cm}$ 、桁有効高さ $d = 27\text{cm}$ 、コンクリート圧縮破壊強度 $\sigma_c = 253\text{ kg/cm}^2$ 、引張強度 $\sigma_t = 0.15\sigma_c$ 、コンクリートヤング係数 $E_c = 2.7 \times 10^5\text{ kg/cm}^2$ 、鉄筋比 $P = 1.8\%$ 、鉄筋ヤング係数 $E_s = 2.1 \times 10^6\text{ kg/cm}^2$ を用いた場合の解析結果を以下に示す。

図-5は、漸増垂直荷重に対する、各断面の上縁応力の変化を表わしたもので縦軸に応力 $\bar{\sigma} = 0/\sigma_c$ 、横軸に荷重強度 $\bar{P} = P/P_{yc}$ (P_{yc} : 曲げキレツ発生時の荷重強度)をとっている。 $P_{yc} = 3663\text{ kg}$

図-5の $\bar{P} = 1.0 \sim 1.2$ および $\bar{P} = 1.6 \sim 1.8$ における区間では、断面4、5および断面3の曲げキレツが増大したため中立軸の位置が上昇し、それによつて上縁圧縮応力が急激に増加している。それと対応して、コンクリート部の曲げ剛性は低下し、鉄筋には大きな引張応力が発生している(図-6)。

さて $\bar{P} = 1.8$ で、図-3のごとく歯③が破壊し、応力は急変する。このときの各断面の応力分布

の変化を、図-7(a)(b)に示す。つぎに $\bar{P} = 2.6 \sim 3.5$ の区間では、断面4の応力が荷重増加に対して減少しているが、これは図-7(e)($\bar{P} = 3.5$)にも見られるように、コンクリート圧縮部の一部が塑性域($\bar{\sigma} = 0.75$ を弾性限界とみなし、それ以降のヤング率を $E_c/3$ とあいだ)に入り、応力の再配分が行なわれはじめである。ついで $\bar{P} = 3.5 \sim 3.6$ の間では、櫛歯③に続いて、櫛歯②も破壊し(図-8(a)参照)応力は再び大きく変化する。それ以降は準弾性的挙動をとり、 $\bar{P} = 4.1$ で断面4の上縁部が圧壊して桁全体の崩壊がもたらされる。図-6は、荷重の変化に対する鉄筋応力の変化を示したもので縦軸に $\bar{\sigma}_s = \sigma_s / \sigma_{co}$ 、横軸に $\bar{P}$ をとっている。この図で櫛歯③が剥離した後、断面4と3の σ_s が急速に一致し、さらに櫛歯②が剥離した後は断面4、3、2の σ_s がほぼ一致していることは本理論の妥当性を裏づけるものである。ただし、完全に一致していない点については、収束計算回数の不足による計算誤差と考えてよい。図-7(a)~(e)は、各断面における櫛歯剥離直前、直後の応力分



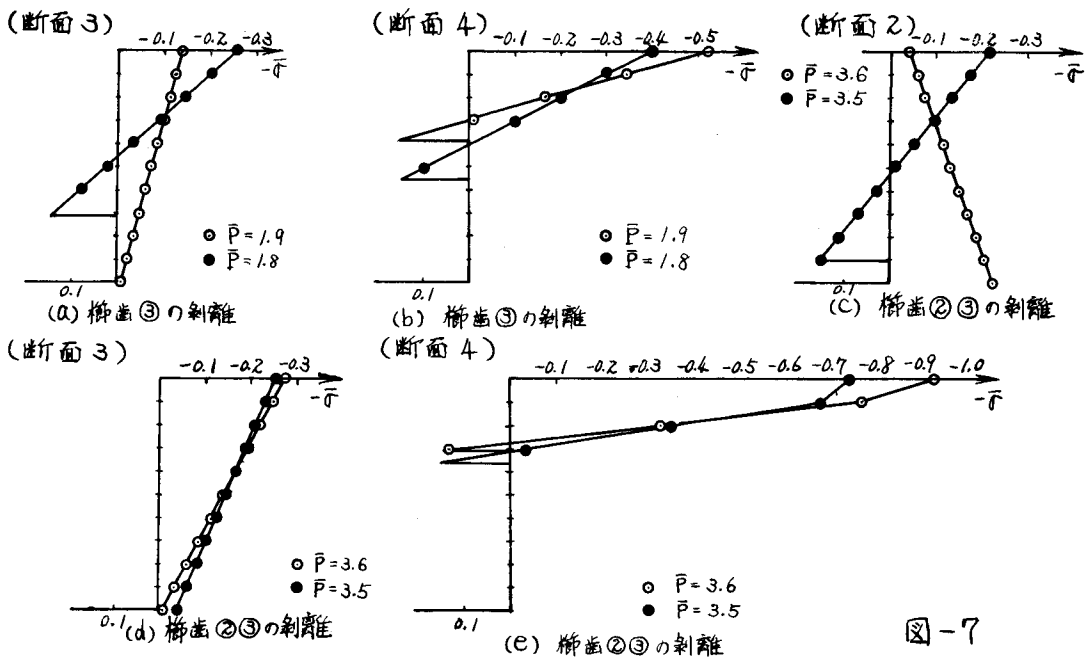


図-7

布状態を示したもので、横軸に示、縦軸に断面の高さをとったものである。この図で特に注目すべき点は図(a)、(c)であり、櫛歯剥離によって鉄筋力が増大添加しているため、コンクリートの引張部に、圧縮応力が発生する現象が了解される。図-8は、櫛歯③および②が剥離した直後のキレツの形状と桁のX方向の鉄筋の応力分布を示したもので縦軸はσを示す。

以上はN=01についての解析例であるが、軸力を受ける桁との比較については、講演当日に報告する予定である。

4. 結び

本研究の結果、櫛歯の剥離現象とタイドアーチ構造への移行現象を、単純タイドアーチ弾塑性理論で解明することは不可能であり(理由1、コンクリート桁の下縁部に引張キレツが生じることは、そのまゝコンクリートアーチの曲げ破壊に直結するが、実際は鉄筋の引張力によってこの破壊がある程度抑えられている。2、中立軸が不明であること。3、櫛歯の逐次剥離現象が連続的につかめない。)、あくまで一貫した弾塑性Beam理論によつて逐次追跡累積したうえで、非線形挙動を解明しなければならないことが確認された。

5. 参考文献

- 1) T.Ohta and T.Fujise; Proc. 14th J.C.M.R 1971
- 2) 太田俊昭、金沢孝、藤元安宏; 土木学会西部支部発表会論文集 S.46.2
- 3) 太田俊昭、山崎竹彦、金沢孝; 土木学会西部支部発表会論文集 S.47.2
- 4) G.N.J. Kani; Jour of the A.C.I. April 1964
- 5) P.E. Ragan; Magazine of Concrete Research, Vol. 21, No 66, March 1969

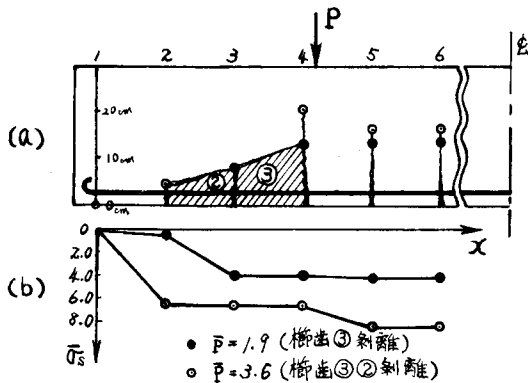


図-8