

プレストレストコンクリート有孔梁の 終局強度設計法の提案

浜原 正行*1・浜戸 昇*2・蔵田 富雄*3・嶋司 靖彦*4

本研究では、トラス、アーチの両機構を考慮した開口部弦材の設計法とアーチモデルを用いた開口間隔の設計法を提案した。本設計法の妥当性の検討には 208 体の PC 有孔梁の実験資料を用いた。これらの試験体の多くは、開口高さが梁せいの 1/2 となっており、さらに、これらの中には、母材破壊が先行したも含まれている。本研究では、このような試験体も含めて本設計法によって開口部破壊が回避できることを示し、これを基に開口高さの上限を PC 規準で規定している梁せいの 1/3 から 1/2 に改めた。

キーワード：プレストレストコンクリート、開口部、終局強度

1. はじめに

PC 規準¹⁾の開口部設計では、開口部のせん断破壊と曲げ破壊が母材の曲げ破壊に先行しないよう検査を行っている。その際、開口部のせん断破壊耐力はトラス機構、同曲げ破壊モーメントはトラス機構の残余分で評価している。また、開口間隔については、構造規定で制約しているだけである。

本報告で提案する設計法も、検査項目は PC 規準を踏襲した。ただし、PC 規準における開口部のせん断破壊耐力はアーチ機構を無視しているため、開口部のせん断補強が過剰となることが少なくなかった。本設計法では、この問題を解消するために、開口部のせん断破壊耐力をトラス、アーチ両機構の和で与え、曲げ破壊モーメントはトラス機構の残余分とアーチ機構を考慮して誘導した。さらに開口間隔については、アーチモデルを用いた設計式を提案した。

本設計法の検討には、208 体の実験資料²⁻¹²⁾を用いた。これらの中には、開口高さが梁せいの 1/2 のものも多数ある。本研究では、このような試験体でも開口部破壊が確実に回避できることを示し、開口高さ規定の緩和を試みた。

2. 定 義

本研究で用いた用語の定義を以下に示す。

弦材：開口の上下にある材の総称

圧縮弦材：曲げによって圧縮力を受ける側の弦材

引張弦材：曲げによって引張力を受ける側の弦材

束材：隣接する開口間にある鉛直材

開口部：束材と弦材の総称

開口部の設計用応力：地震時では、母材曲げ破壊時または母材を含む架構機構時において開口部に作用する応力。

地震時以外では、PC 技術基準第 14 章の組合せから求まる開口部に作用する応力のこと。

3. 記 号

a_{wp} ：束材あばら筋の総断面積

b, D ：梁の幅、梁の全せい

D_p ：束材のせい

F_c ：コンクリートの設計基準強度

h_c, h_t ：圧縮弦材のせい、引張弦材のせい

h_o, L_o ：開口の高さ、開口の長さ

j_c ：圧縮弦材を通る主筋から圧縮弦材に配置した開口部軸補強筋までの距離

j_t ：引張弦材を通る主筋から引張弦材に配置した開口部軸補強筋までの距離

j_o ：圧縮弦材重心から引張弦材重心までの距離

M_D ：弦材の設計用曲げモーメント

M_{ou} ：弦材の曲げ破壊モーメント

p_w ：弦材あばら筋比

p_{wn} ：設計用せん断力から求まる弦材あばら筋比

Q_a ：アーチ機構による弦材のせん断力

Q_w ：トラス機構による弦材のせん断力

Q_D ：弦材の設計用せん断力

Q_{ou} ：弦材のせん断破壊耐力

Q_{Dp} ：束材の設計用せん断力

Q_{pu} ：束材のせん断破壊耐力

T_c ：トラス機構による圧縮弦材の軸筋の引張力

T_t ：トラス機構による引張弦材の軸筋の引張力

T_{hyc} ：圧縮弦材の開口部軸補強筋の降伏荷重

T_{hyt} ：引張弦材の開口部軸補強筋の降伏荷重

T_{pyt} ：引張弦材を通る PC 鋼材の降伏荷重

T_{pyc} ：圧縮弦材を通る梁主筋の降伏荷重

*1 Masayuki HAMAHARA：日本大学 理工学部 教授

*2 Noboru HAMATO：(株)ピーエス三菱

*3 Tomio KURATA：三井住友建設(株)

*4 Yasuhiko SHIMAJI：日本大学 大学院 博士前期課程

T_{yt} : 引張弦材を通る梁主筋の降伏荷重
 T_{yc}, T_{yt} : $\min(T_{hyc}, T_{ryc}), \min(T_{hy}, T_{ryt})$
 X : 開口間隔
 σ_{wp} : 束材あばら筋の降伏強度
 σ_{wy} : 弦材あばら筋の降伏強度
 ν : コンクリート圧縮強度の有効係数

図 - 1 に PC 有孔梁の主な用語と記号を示す。

4. 解析上の仮定

- 1) 円形開口は、これと中心位置、面積が等しい正方形開口に置換する^{2~4)}。
- 2) 束材と弦材はフィーレンデル部材として取り扱い、その反曲点は、それぞれの材の中央とした。
- 3) 弦材の応力伝達は、下界定理に基づいたアーチ機構と 45 度トラス機構によってなされる。
- 4) 束材の応力伝達はアーチ機構によってなされる。
- 5) 鋼材の引張強度と圧縮強度は規格降伏点、コンクリートの圧縮強度は設計基準強度とする。ただし、PC 鋼材については、圧縮強度を無視する。

5. 検査項目

本設計法では、設計用応力に対して開口部が破壊しないよう、以下の検査を行う。

弦材での検査

$$Q_{ou} \geq Q_D \dots\dots\dots (1)$$

$$T_{yt} \geq T_t \quad T_{yc} \geq T_c \dots\dots\dots (2)$$

$$M_{ou} \geq M_D \dots\dots\dots (3)$$

束材での検査

$$Q_{pu} \geq Q_{Dp} \dots\dots\dots (4)$$

6. 弦材のせん断破壊耐力と曲げ破壊耐力

6.1 せん断破壊耐力

4 節でも述べたように、弦材のせん断破壊耐力は、図 - 2 に示すようなトラス機構によるせん断力とアーチ機構によるせん断力の和で与える。すなわち、

$$Q_{ou} = p_w \cdot \sigma_{wy} \cdot b \cdot (j_t + j_c) + \lambda_c \cdot b \cdot h_c (\nu \cdot F_c - 2p_w \cdot \sigma_{wy})/2 + \lambda_t \cdot b \cdot h_t (\nu \cdot F_c - 2p_w \cdot \sigma_{wy})/2 \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{ここに、} \lambda_c = \sqrt{(L_o/h_c)^2 + 1} - (L_o/h_c)$$

$$\lambda_t = \sqrt{(L_o/h_t)^2 + 1} - (L_o/h_t)$$

(5) 式中、 ν はコンクリート圧縮強度の有効係数であり、PC 規準¹⁾に倣い、(6)式で与えた。

$$\nu = a \cdot L_r \quad \text{ただし、} 1 \geq a \geq 0.65 \dots\dots\dots (6)$$

$$\text{ここに、} a = \sqrt{60/F_c} \quad \text{ただし、} a \leq 1, F_c (\text{N/mm}^2)$$

$$L_r = L_o / \{2(h_c + h_t)\}$$

(5) 式を p_w を含む項とそれ以外の項に分けて表現すると、弦材のせん断破壊耐力は、最終的に (7) 式のようになる。

$$Q_{ou} = Q_a + Q_w \dots\dots\dots (7a)$$

$$Q_a = \lambda_c \cdot C_{mc} + \lambda_t \cdot C_{mt} \dots\dots\dots (7b)$$

$$Q_w = p_w \cdot \sigma_{wy} \cdot A_{tr} \dots\dots\dots (7c)$$

$$\text{ここに、} C_{mc} = \nu \cdot F_c \cdot b \cdot h_c / 2 \quad C_{mt} = \nu \cdot F_c \cdot b \cdot h_t / 2$$

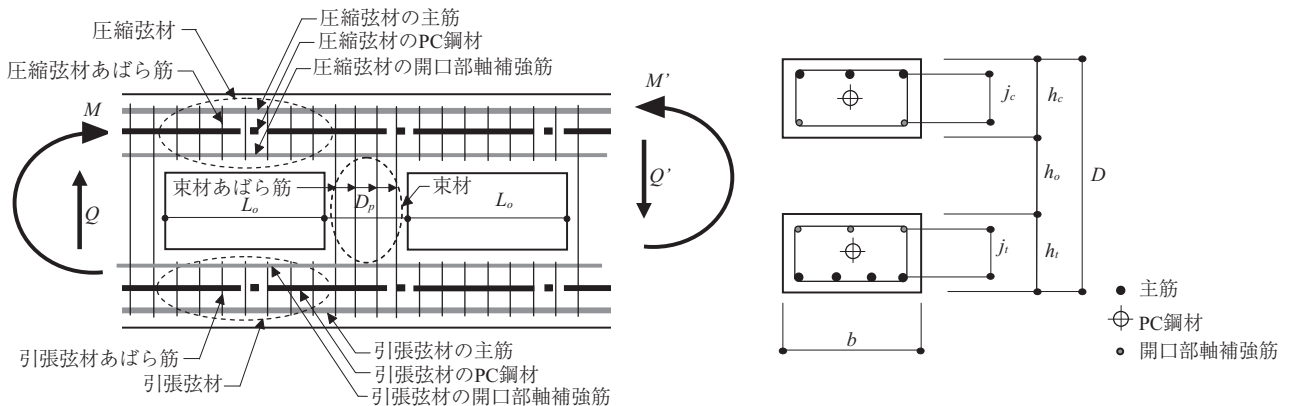


図 - 1 記号の定義

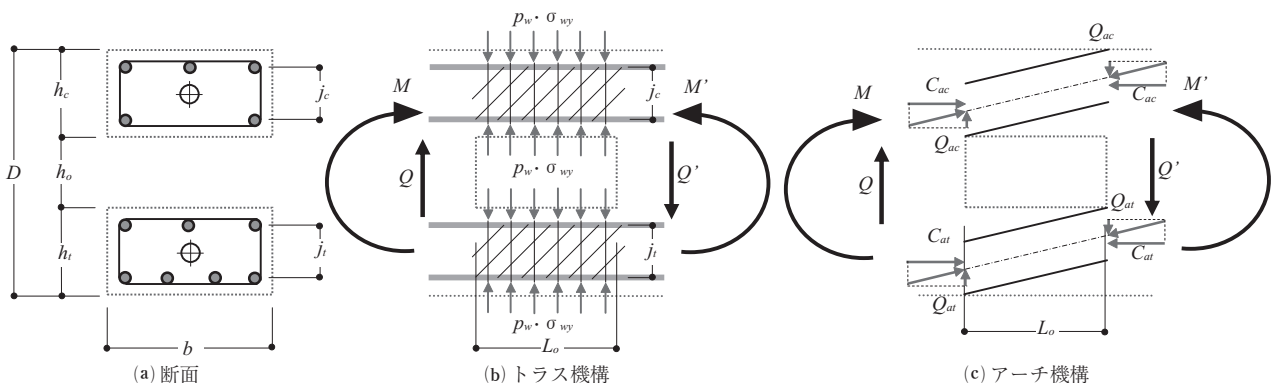


図 - 2 弦材におけるせん断抵抗機構

$$A_{tr} = b \cdot (j_c + j_t - \lambda_c \cdot h_c - \lambda_t \cdot h_t)$$

(7b)式をアーチ機構によるせん断力, (7c)式をトラス機構によるせん断力と定義する。

設計用せん断力 Q_D に対して必要とされる弦材のあばら筋比は, (7a)式に (7c)式に代入したものを設計用せん断力に等置し, さらにこれを p_w について解くことにより, (8)式のように求まる。

$$p_{wm} = (Q_D - Q_a) / (\sigma_{wy} \cdot A_{tr}) \dots\dots\dots (8)$$

ただし, $Q_a \geq Q_D$ の場合は, $p_{wm} = 0$

圧縮弦材または引張弦材のトラス機構によるせん断力 Q とコンクリートの圧縮力 N は図 - 3 中の $\triangle ABC$ と $\triangle DEF$ における釣合条件より, それぞれ (9a)式と (9b)式で与えられる。

$$Q = p_{wm} \cdot \sigma_{wy} \cdot b \cdot j \dots\dots\dots (9a)$$

$$N = p_{wm} \cdot \sigma_{wy} \cdot b \cdot j \dots\dots\dots (9b)$$

4. 仮定 2) より, 弦材両端部のトラス機構による曲げモーメントは, (10)式のようになる。

$$M = (L_o/2) \cdot Q = (L_o/2) \cdot p_{wm} \cdot \sigma_{wy} \cdot b \cdot j_i \dots\dots\dots (10)$$

図 - 3 より, 弦材両端部の抵抗モーメントは(11)式で与えられる。

$$M = (j/2) \cdot (C + T) \dots\dots\dots (11)$$

一方, 同位置における軸方向力の釣合より, (12)式を得る。

$$C = T - N = T - p_{wm} \cdot \sigma_{wy} \cdot b \cdot j \dots\dots\dots (12)$$

(12)式を (11)式に代入したものを (10)式に等置し, T について解くと, (13a)式を得る。

$$T = p_{wm} \cdot \sigma_{wy} \cdot b \cdot (L_o + j)/2 \dots\dots\dots (13a)$$

(13a)式を (12)式に代入すると, (13b)式を得る。

$$C = p_{wm} \cdot \sigma_{wy} \cdot b \cdot (L_o - j)/2 \dots\dots\dots (13b)$$

(13a)式と (13b)式を圧縮弦材と引張弦材に適用すると (14a)式, (14b)式のようになる。

$$\begin{aligned} \text{圧縮弦材: } T_c &= p_{wm} \cdot \sigma_{wy} \cdot b \cdot (L_o + j_c)/2 \\ C_c &= p_{wm} \cdot \sigma_{wy} \cdot b \cdot (L_o + j_c)/2 \dots\dots\dots (14a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{引張弦材: } T_t &= p_{wm} \cdot \sigma_{wy} \cdot b \cdot (L_o + j_t)/2 \\ C_t &= p_{wm} \cdot \sigma_{wy} \cdot b \cdot (L_o - j_t)/2 \dots\dots\dots (14b) \end{aligned}$$

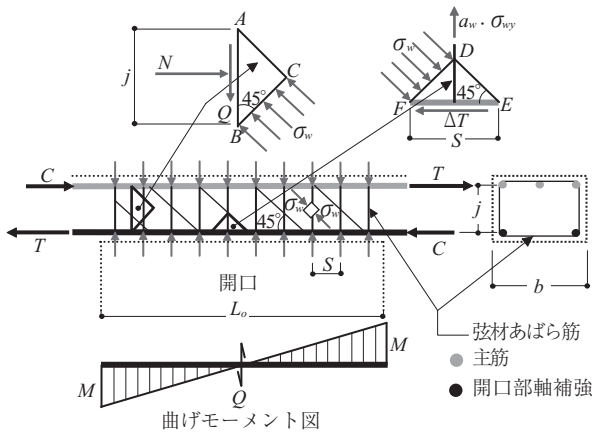


図 - 3 トラス機構による軸筋の応力

6.2 開口位置の曲げ破壊モーメント

式の誘導に際しての方針 図 - 4 に示すように, 開口の

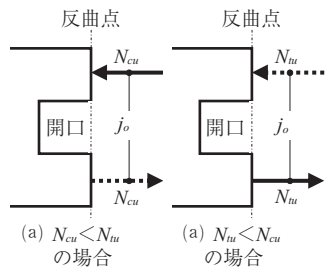


図 - 4 弦材の曲げ破壊モーメント

反曲点位置の曲げ破壊モーメントは, それぞれ (15a)式と (15b)式によって与えられる。

$$N_{cu} < N_{tu} \text{ の場合: } M_{uo} = N_{cu} \cdot j_o \dots\dots\dots (15a)$$

$$N_{tu} < N_{cu} \text{ の場合: } M_{uo} = N_{tu} \cdot j_o \dots\dots\dots (15b)$$

ここに, N_{cu} , N_{tu} は, それぞれ圧縮弦材と引張弦材の軸方向耐力であり, 後述するように, それぞれトラス機構, アーチ機構によるコンクリート圧縮応力と鋼材応力の和で与えられる。弦材の曲げ破壊モーメントに極値を与えるためには, 圧縮弦材では, 鋼材を圧縮強度に設定し, アーチ機構によるコンクリート圧縮応力をできるだけ大きく取る必要がある。一方, 引張弦材では, 鋼材を引張強度に設定し, アーチ機構による圧縮応力は, 圧縮弦材とは逆にできるだけ小さくする必要がある。

軸方向鉄筋の応力 (15a)式, (15b)式からも分かるように, 開口位置での曲げ破壊モーメントは圧縮弦材の軸方向力が圧縮強度に達したとき, または引張弦材では引張強度に達したときに最大となる。一方, 軸方向鉄筋には, 弦材のあばら筋に見合うトラス機構を成立させるために必要な応力が生じている。軸方向鉄筋の強度は, この成分を差し引いておく必要がある。

トラス機構が形成されているとき, 弦材の左端と右端の軸方向の鉄筋に働く力には (16)式に示す差が生じている。

$$S = T_c + C_c = T_t + C_t \dots\dots\dots (16)$$

(16)式に (14)式を代入すると, (17)式を得る。

$$S = T_c + C_c = T_t + C_t = p_{wm} \cdot \sigma_{wy} \cdot b \cdot L_o \dots\dots\dots (17)$$

反曲点位置の軸方向鉄筋の応力は, 図 - 5 に示すよう

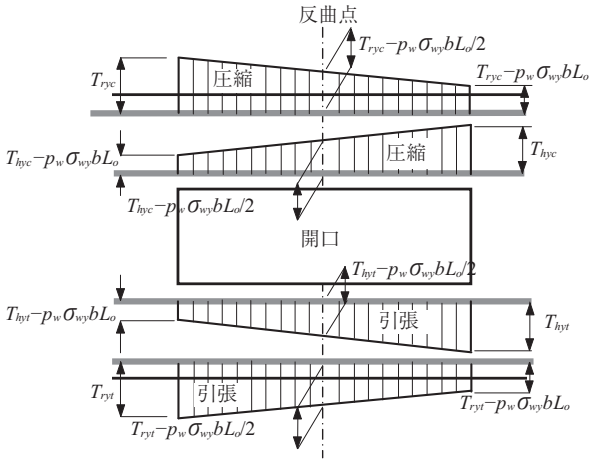


図 - 5 軸方向鉄筋の応力

に、圧縮弦材は圧縮をプラス、引張弦材は引張をプラスに取ると、それぞれ (18a)式、(18b)式によって与えられる。

$$\begin{aligned} T_{rc} &= T_{ryc} - S/2 = T_{ryc} - p_{wn} \cdot \sigma_{wy} \cdot b \cdot L_o/2 \\ T_{hc} &= T_{hye} - S/2 = T_{hye} - p_{wn} \cdot \sigma_{wy} \cdot b \cdot L_o/2 \end{aligned} \quad \dots (18a)$$

$$\begin{aligned} T_{rt} &= T_{ryt} - S/2 = T_{ryt} - p_{wn} \cdot \sigma_{wy} \cdot b \cdot L_o/2 \\ T_{ht} &= T_{hyt} - S/2 = T_{hyt} - p_{wn} \cdot \sigma_{wy} \cdot b \cdot L_o/2 \end{aligned} \quad \dots (18b)$$

圧縮弦材と引張弦材の軸方向力 圧縮弦材と引張弦材のコンクリートの圧縮力は、トラス・アーチ両機構によるものを考慮すると、それぞれ (19a)式、(19b)式で与えられる。

$$C_{cc} = C_{ac} - p_{wn} \cdot \sigma_{wy} \cdot b \cdot (h_c - j_c) \dots (19a)$$

$$C_{ct} = -C_{at} + p_{wn} \cdot \sigma_{wy} \cdot b \cdot (h_t - j_t) \dots (19b)$$

ここに、 C_{ac} : 圧縮弦材のアーチ機構によるストラット応力の水平方向成分
 C_{at} : 引張弦材のアーチ機構によるストラット応力の水平方向成分

図 - 6 に示すように、圧縮弦材と引張弦材の反曲点の軸方向力は、鋼材応力とコンクリート応力の和で与えられるから、それぞれ (20a)式、(20b)式のようになる。

$$N_{cu} = T_{ryt} + T_{hyt} + T_{pyt} - C_{at} - p_{wn} \cdot \sigma_{wy} \cdot b \cdot (L_o - h_t + j_c) \dots (20b)$$

$$N_{cu} = C_{ac} + T_{ryc} + T_{hye} - p_{wn} \cdot \sigma_{wy} \cdot b \cdot (L_o + h_c - j_c) \dots (20a)$$

圧縮弦材に関する曲げ破壊モーメント M_{uc} と、引張弦材に関する曲げ破壊モーメント M_{ut} は、それぞれ (21a)式、(21b)式で与えられる。

$$M_{uc} = N_{cu} \cdot j_o = \left\{ \begin{array}{l} C_{ac} + T_{ryc} + T_{hye} \\ - p_{wn} \cdot \sigma_{wy} \cdot b \cdot (L_o + h_c - j_c) \end{array} \right\} \cdot j_o \dots (21a)$$

$$M_{ut} = N_{ut} \cdot j_o = \left\{ \begin{array}{l} T_{ryt} + T_{hyt} + T_{pyt} - C_{at} \\ - p_{wn} \cdot \sigma_{wy} \cdot b \cdot (L_o - h_t + j_t) \end{array} \right\} \cdot j_o \dots (21b)$$

弦材の曲げ破壊モーメントは、圧縮弦材に関する曲げ破壊モーメントと引張弦材に関する曲げ破壊モーメントのうち、いずれか小さいほうの値として評価できる。すなわち、

$$M_{uo} = \min (M_{uc}, M_{ut}) \dots (22)$$

アーチ機構によるストラット応力の水平方向成分 弦材の設計用せん断力 Q_D が、(6b)式によるアーチ機構によるせ

ん断力 Q_a 以上の場合、(21a)式と (21b)式中の圧縮弦材と引張弦材におけるアーチ機構による斜め圧縮力の水平成分 C_{ac} 、 C_{at} は、それぞれとして (23a)式で与えられる。

$$Q_D \geq Q_a \text{ の場合} : \begin{array}{l} C_{ac} = C_{mc} \\ C_{at} = C_{mt} \end{array} \dots (23a)$$

(21a)式より、圧縮弦材に関する曲げ破壊モーメント M_{uc} は C_{ac} を大きく設定すれば増加し、これとは逆に、引張弦材に関する曲げ破壊モーメント M_{ut} は、(21b)式より、 C_{at} を小さくすれば増加する。これより、設計用せん断力 Q_D が、(7b)式に示すアーチ機構によるせん断力 Q_a 未満かつ圧縮弦材のアーチ機構によるせん断力の極大値 $\lambda_c \cdot C_{mc}$ 以上の場合、圧縮弦材のせん断力を $\lambda_c \cdot C_{mc}$ と置き、残余分 $Q_D - \lambda_c \cdot C_{mc}$ を引張弦材に負担させればよいことになる。この圧縮弦材と引張弦材のせん断力に対応する圧縮力 C_{ac} 、 C_{at} は、(23b)式で与えられる。

$$Q_a > Q_D \geq \lambda_c \cdot C_{mc} \text{ の場合} : \begin{array}{l} C_{ac} = C_{mc} \\ C_{at} = (Q_D - \lambda_c \cdot C_{mc}) / \lambda_t \end{array} \dots (23b)$$

設計用せん断力 Q_D が、圧縮弦材のアーチ機構によるせん断力の極大値 $\lambda_c \cdot C_{mc}$ 未満の場合、圧縮弦材のアーチ機構によるせん断力が Q_D に等しくなるまで C_{ac} を増加させる。アーチ機構によるせん断力 C_{ac} は、図 - 7 中の曲線で示すように、 $C_{ac} = C_{mc}$ で極値の $\lambda_c \cdot C_{mc}$ を取り、 $C_{ac} = 2 \cdot C_{mc}$ でゼロとなる。簡単のため、この二点を直線補間し Q_D 時の C_{ac} を求めると、(23c)式が得られる。

$$Q_D < \lambda_c \cdot C_{mc} \text{ の場合} : \begin{array}{l} C_{ac} = 2 \cdot C_{mc} - (Q_D / \lambda_c) \\ C_{at} = 0 \end{array} \dots (23c)$$

7. 束材のせん断破壊耐力²⁾

束材では、図 - 8 に示すように束材あばら筋の張力と束材を対角線に結ぶ圧縮ストラットによって構成されるアーチ機構によってせん断伝達が行なわれるものとした。このような抵抗機構の下では、束材せん断終局強度は (24)式で与えられる。

$$Q_{pu} = C_m \cdot \left[\sqrt{\frac{2T_w}{C_m} - \left(\frac{T_w}{C_m}\right)^2} + \left(\frac{h_o}{D_p}\right)^2} - \frac{h_o}{D_p} \right] \dots (24)$$

ここに、 $T_w = a_{wp} \cdot \sigma_{wp}$ $C_m = v \cdot F_c \cdot b \cdot D_p/2$

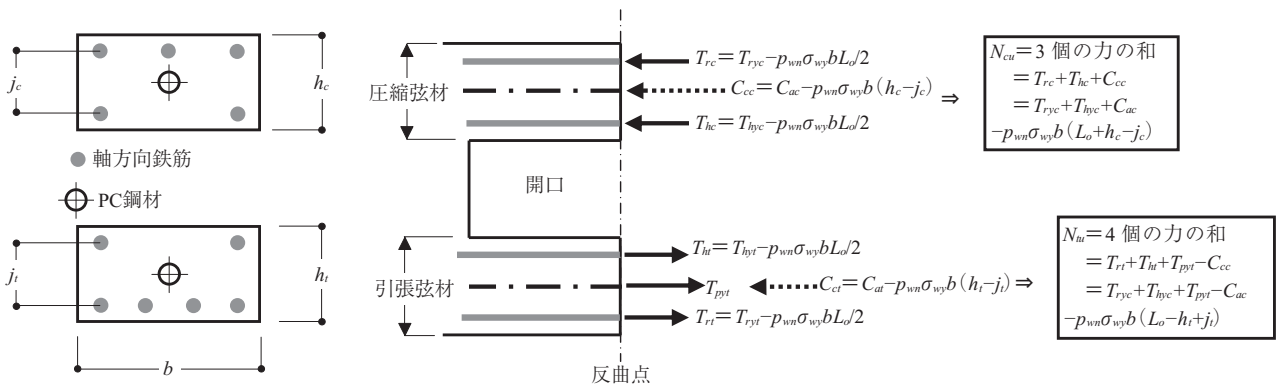


図 - 6 圧縮弦材と引張弦材の軸方向力

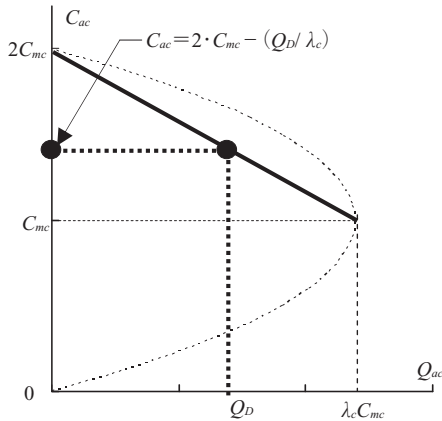


図 - 7 $Q_{ac}-C_{ac}$ 関係

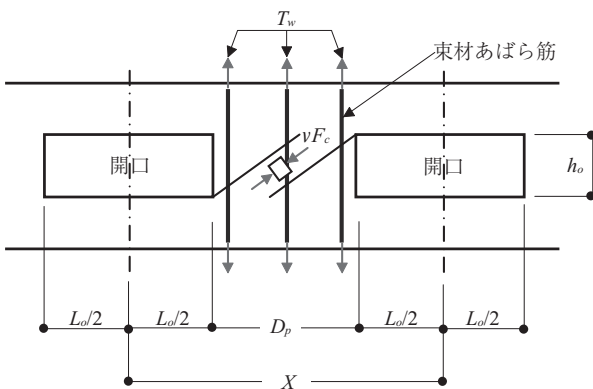


図 - 8 東材のせん断伝達機構

周知のように、(24)式は、 $T_w = C_m$ で極大値を取り、 $T_w \leq C_m$ の条件下では、東材あばら筋の応力度がその降伏強度 σ_{wp} に達したとき最大となる。しかしながら、文献3)では、 $T_w < C_m$ であるにもかかわらず、東材あばら筋が σ_{wp} に達する前に、東材の終局強度が最大荷重に達する場合があることが実験的に明らかになった。これは、東材あばら筋には補強限界が存在することを意味している。このようなことから T_w の上限値を (25)式のように設定した。この式は、この試験体の最大荷重から東材あばら筋の降伏荷重 T_w を逆算し、係数を安全側となるように定めたものである。

$$T_w \leq T_{wu} \dots\dots\dots (25a)$$

$$\text{ここに、} T_{wu} = 0.15 \cdot b \cdot D_p \cdot F_c \dots\dots\dots (25b)$$

8. 実験結果との比較

8.1 検討に用いた実験資料

検討に用いた実験資料は文献3)~13)に掲載されている試験体総数 208 体の実験資料である。

8.2 弦材

図 - 9 は Y 軸に最大荷重 Q_u (実験) を母材曲げ破壊時に開口中心に作用するせん断力 Q_D で除したものを、X 軸に弦材の耐力 Q_u (弦材) を Q_D で除したものを取り、8.1 の実験資料から東材破壊した資料を除いた 193 体分の結果

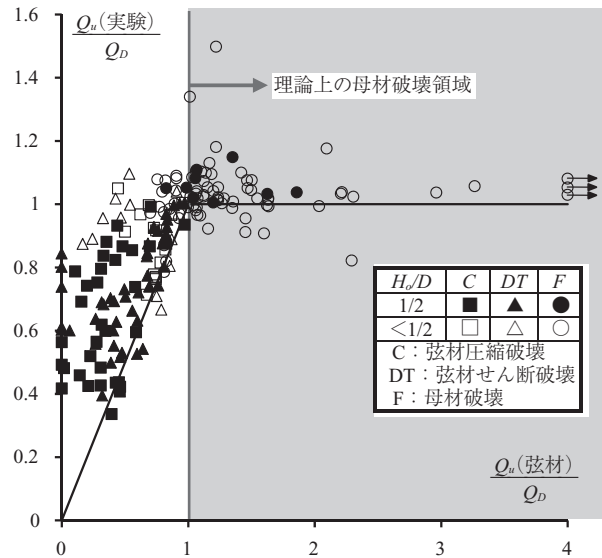


図 - 9 Q_u (実験) / Q_D と Q_u (弦材) / Q_D の相関

をプロットしたものである。弦材の耐力は、(26)式で与えた。

$$Q_u(\text{弦材}) = \min(Q_{ou}, M_{ou} \text{ 時の弦材せん断力}) \dots\dots (26)$$

Q_u (弦材) と Q_D は材料試験結果を用いて算定した。

図 - 9 より、 Q_u (弦材) / $Q_D \geq 1$ (すなわち、 $Q_{ou} > Q_D$ かつ $M_{ou} \geq M_D$) を満たす試験体は、開口高さが梁せいの 1/2 の実験資料 (図中●) も含めて、すべて母材破壊が先行していることが分かる。この結果は、(1)式~(3)式を満足する試験体は、母材破壊先行が保証されていることを示している。また、本設計法は開口高さが梁せいの 1/2 の実験資料にも適用可能であったことを勘案し、圧縮弦材と引張弦材のせいを以下のように規定する。

$$h_c \geq 1/4, \quad h_t \geq 1/4 \dots\dots\dots (27)$$

8.3 東材

弦材の破壊は試験体の耐力を支配するが、東材の破壊は試験体の耐力低下に結びつかない場合がある。これは、東材が破壊しても弦材に余力があれば耐力上昇を続けることができるからである¹⁰⁾。このようなことから、東材については、最大荷重ではなく、破壊モードによって検討する。

図 - 10 は、Y 軸に母材曲げ破壊時に東材に入力するせん断力 Q_{DP} を (24)式による Q_{pu} で無次元化したものを、X 軸に最大荷重時に東材に入力するせん断力 (Q_{pmax}) を東材断面積と $\sqrt{F_c}$ の積で除した値を取り、8.1 で述べた資料の内、複数開口を有する 57 体の実験資料の結果をプロットしたものである。図 - 10 より、 $Q_{DP} / Q_{pu} \leq 1$ (すなわち、 $Q_{pu} > Q_{DP}$) を満たす試験体 (図中、 \triangle 、 \circ) は東材での破壊が回避されていることが分かる。この結果は、(4)式を満足する試験体は、東材破壊先行が回避されていることを意味している。

9. 設計例

9.1 設計の対象とした建物の概要

設計の対象とした建物は、柱を RC 造、梁を PC 造とした X 方向スパン 15 m、Y 方向スパン 6 m の 4 階建の事務

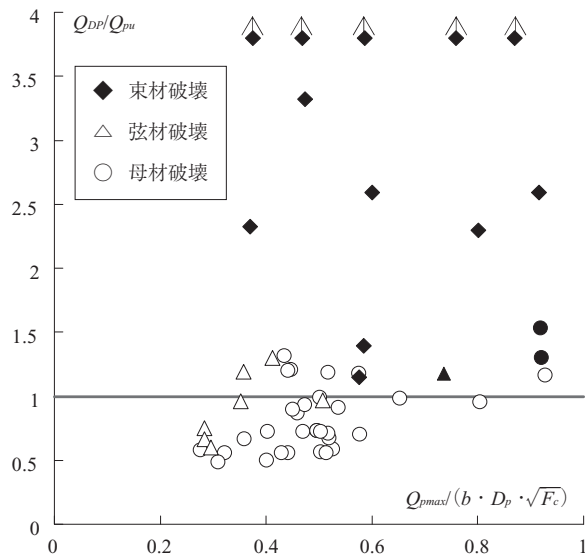


図 - 10 Q_{DP}/Q_{pu} と $Q_{pmax}/(b \cdot D_p \cdot \sqrt{F_c})$ の相関

所ビルである。ここでは、図 - 11 に示す Y 方向 2 階梁に直径 500 mm の開口をスパンに関して正対称に設置したケースについて検討する。材料諸元は $F_c = 30 \text{ N/mm}^2$, $T_{py} = 1404 \text{ kN}$ (5-12.7φ, 材種 SWPR7B), $T_{ry} = 875 \text{ kN}$ (5-D25, 材種 SD345), $p_w = 0.42\%$ (□ D13@100, 材種 SD295) である。

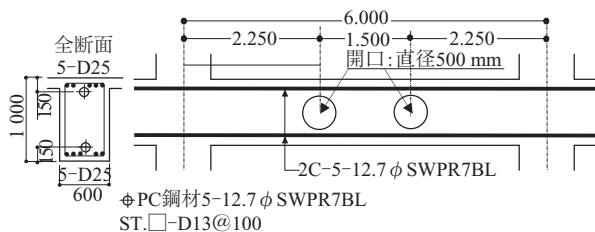


図 - 11 設計例の有孔梁の概要

9.2 設計方針と設計用応力

設計方針本建物は、両方向ともに純ラーメン構造で地震力により支配される建物であるため、安全を考慮して設計ルート 3a (終局強度設計) とする。表 - 1 に開口部の設計用応力の考慮すべき組合せを示す。

表 - 1 弦材の設計用応力の考慮すべき組合せ

状態	設計用せん断力 Q_D	設計用曲げモーメント M_D
常時時	$1.7(Q_G + Q_P) + Q_X$	$1.7(M_G + M_P) + M_X$
	$1.2Q_G + 2.0Q_P + Q_X$	$1.2M_G + 2.0M_P + M_X$
地震時	$Q_G + Q_P + Q_X + 1.2Q_M$	$M_G + M_P + M_X + 1.2M_M$
積雪時	$Q_G + Q_P + Q_X + 1.4Q_S$	$M_G + M_P + M_X + 1.4M_S$
暴風時	$Q_G + Q_P + Q_X + 1.6Q_W$	$M_G + M_P + M_X + 1.6M_W$

上表中の添え字は以下の状態を示す。
 G: 固定荷重時, P: 積載荷重時, M: 部材のメカニズム時
 K: 地震時, X: プレストレスによる不静定二次応力

母材曲げ破壊モーメントと設計用応力

$$T = 1.1 \cdot T_{ry} + T_{py} = 1.1 \times 875 + 780 = 1742 \text{ kN}$$

$$\text{正側: } x_n = T / (B \cdot F_c) = 1742 / (1200 \times 0.03 \times 1000) = 0.048 \text{ m}$$

$$M_B = 1.1 \cdot T_{ry} \cdot d_r + T_{py} \cdot d_p - T \cdot x_n / 2 = 1.1 \times 875 \times 0.95 + 780 \times 0.85 - 1742 \times 0.048 / 2 = 1536 \text{ kNm}$$

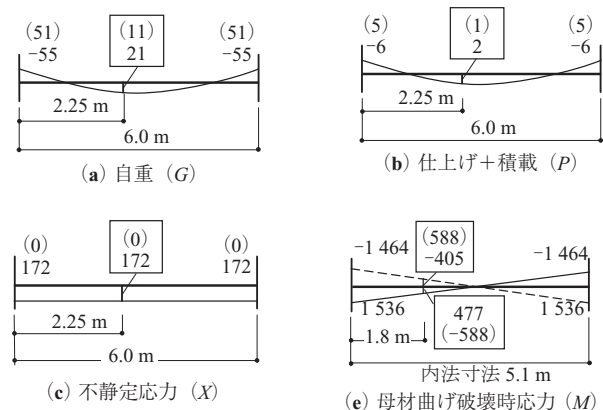
$$\text{負側: } x_n = T / (b \cdot F_c) = 1742 / (600 \times 0.03 \times 1000) = 0.096 \text{ m}$$

$$M_B = 1.1 \cdot T_{ry} \cdot d_r + T_{py} \cdot d_p - T \cdot x_n / 2 = 1.1 \times 875 \times 0.95 + 780 \times 0.85 - 2366 \times 0.096 / 2 = 1464 \text{ kNm}$$

図 - 12 に各状態における弦材位置の応力、表 - 2 に弦材の設計用応力を示す。設計ではもっとも条件の厳しい母材曲げ破壊時における応力の組合せ ($G + P + 1.2M + X$) で検討する。

東材の設計用せん断力は、自重、仕上+積載、不静定応力時がいずれもゼロであるから、母材曲げ破壊時の検討のみを行えばいいことになる。すなわち、

$$Q_{Dp} = 1.2Q_M(X/j_o) = 1.2 \times 588 \times (1.5/0.744) = 1423 \text{ kN}$$



• () 内数値せん断力, □ 内の数値は開口部位置の応力を表す
 • 応力の単位: せん断力 kN 曲げモーメント kNm

図 - 12 設計用応力

表 - 2 弦材の設計用応力

	Q_D (kN)	M_D (kNm)
1.7 (G+P)+X	$1.7 \cdot (11 + 1) = 20.4$	$1.7 \cdot (21 + 2) + .85 \cdot 172 = 185$
1.2G+2P+X	$1.2 \cdot 11 + 2 \cdot 1 = 15.2$	$1.2 \cdot 21 + 2 \cdot 2 + .85 \cdot 172 = 175$
L-R G+P+1.2M+X	$11 + 1 - 1.2 \cdot 588 = -693$	$21 + 2 + .85 \cdot 172 + 1.2 \cdot 477 = 741$
R-L G+P+1.2M+X	$11 + 1 + 1.2 \cdot 588 = 717$	$21 + 2 + .85 \cdot 172 - 1.2 \cdot 405 = -316$

9.3 弦材の設計

準備計算

$$v = 0.65 \quad L_o = (\sqrt{\pi}/2) \times 500 = 443 \text{ mm}$$

$$h_c = h_t = h = (1000 - 443) / 2 = 278.5 \text{ mm}$$

$$L_o/h = 443/278.5 = 1.59$$

$$\lambda_c = \lambda_t = \sqrt{(L_o/h)^2 + 1} - (L_o/h)$$

$$= \sqrt{1.59^2 + 1} - 1.59 = 0.288$$

$$A_{tr} = b \cdot (j_c + j_t - \lambda_c \cdot h_c - \lambda_t \cdot h_t)$$

$$= 600 \times (2 \times 101.5 - 2 \times 0.288 \times 278.5)$$

$$= 25.55 \times 10^3 \text{ mm}^2$$

$$C_m = v \cdot F_c \cdot b \cdot h / 2$$

$$= 0.65 \times 0.030 \times 600 \times 278.5/2 = 1\,629 \text{ kN}$$

開口部のせん断破壊耐力(R-Lで検討)

$$Q_{ac} = Q_{at} = \lambda \cdot C_m = 0.288 \times 1629 = 469.2 \text{ kN}$$

$$Q_a = Q_{ac} + Q_{at} = 2 \times 469.2 \text{ kN} = 938.4 \text{ kN}$$

$$Q_w = p_w \cdot \sigma_{wy} \cdot A_{tr} \\ = 0.0042 \times 0.295 \times 25.55 \times 103 = 31.6 \text{ kN}$$

$$Q_{wa} = Q_a + Q_w = 938.4 + 31.6 = 970.0 > Q_D = 717 \text{ kN}$$

$$Q_a = 938.4 > Q_D = 717 \text{ kN} \text{ であるので, } p_{wn} = 0$$

曲げに対する検討:L-R (下弦材が引張弦材で検討)

$$M_D = 741 \text{ kNm} \quad Q_D = 693 \text{ kN}$$

$$Q_a > Q_D > \lambda \cdot C_m = 469.2 \text{ より, } C_{ac} = C_m = 1\,629 \text{ kN}$$

$$C_{at} = (Q_D - \lambda \cdot C_m) / \lambda \\ = (693 - 469.2) / 0.288 = 777.1 \text{ kN}$$

圧縮弦材, 引張弦材とも, 開口部軸補強筋に 2-D25 (材種 SD345) を使用すると, $T_{hy} = 345 \times 1\,014 / 1\,000 = 350 \text{ kN}$

$$M_{uc} = (T_{ryc} + T_{hy} + C_{ac}) \cdot j_o \\ = (875 + 350 + 1\,629) \times 0.744 = 2\,123 \text{ kNm}$$

$$M_{ut} = (T_{ryc} + T_{hy} + T_{pyt} - C_{at}) \cdot j_o \\ = (875 + 350 + 780 - 804.9) \times 0.744 = 892.9 \text{ kNm}$$

$$M_{ou} = \min(M_{uc}, M_{ut}) = 892.9 \text{ kNm} > M_D = 741 \text{ kNm}$$

9.4 束材の設計

(24)式を束材の断面積について解くと, 下式を得る。

$$a_{wp} = C_m \left\{ 1 - \sqrt{1 - q_{Dp}^2 - 2 \cdot h \cdot q_{Dp}} \right\} / \sigma_{wp}$$

$$\text{ただし, } a_{wp} \leq 0.15b \cdot D_p \cdot F_c / \sigma_{wp}$$

$$\text{ここに, } C_m = v \cdot F_c \cdot b \cdot D_p / 2, \quad h = h_o / D_p$$

$$q_{Dp} = Q_{Dp} / C_m$$

$$D_p = X - L_o = 1\,500 - 443 = 1\,057 \text{ mm}$$

$$C_m = v \cdot F_c \cdot b \cdot D_p / 2 = 0.65 \times 0.03 \times 600 \times 1\,057 / 2 = 6\,183 \text{ kN}$$

$$h = h_o / D_p = 443 / 1\,057 = 0.419$$

$$q_{Dp} = Q_{Dp} / C_m = 1\,423 / 6\,183 = 0.230$$

$$a_{wp} = 6\,183 \times \left\{ 1 - \sqrt{1 - 0.2322 - 2 \times 0.419 \times 0.232} \right\} / 0.295 \\ = 2\,787 \text{ mm}^2 \Rightarrow 11 - \square \text{ D13}$$

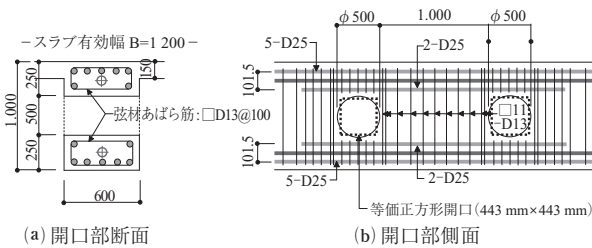


図 - 13 開口部配筋詳細

図 - 13 に配筋詳細を示す。

10. ま と め

本研究では, 検査項目等の設計における基本的な枠組は PC 規準の開口部設計法を踏襲し, 開口部の曲げ破壊耐力とせん断破壊耐力を以下のように評価した PC 有孔梁の設

計法を提案した。

1) 開口部弦材のせん断破壊耐力と曲げ破壊モーメントを 下界定理に基づいたトラス機構とアーチ機構による和で与えた。

2) アーチ機構による開口間隔の算定式を誘導した。

本研究で提案した設計法の適合性を検討は, 208 体の PC 有孔梁の実験資料を用いて行った。その結果, 本設計法を適用すれば開口部破壊が回避できることが分かった。さらに本設計法では, 開口高さが梁せいの 1/2 のものも含めて適用可能であることを受け, 開口高さの上限を梁せいの 1/2 まで緩和した。

謝辞

本研究は (社) プレストレスト・コンクリート建設業協会と日本大学理工学部海洋建築工学科浜原研究室との共同で行われたものである。ご協力をいただいた関係各位に深い感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 日本建築学会: PC 設計施工規準・同解説, pp.240-251, 1998, 11
- 2) 原孝文ほか: 複数の円形開口を有する PC 梁の力学的挙動に関する実験的研究 (その 1~3), 日本建築学会学術講演梗概集構造 IV, pp.957-962, 2008
- 3) 浜原正行ほか: PC 有孔梁の終局強度と設計法, 日本建築学会構造系論文 No.654, pp.1509-1516, 2010, 8
- 4) 原孝文ほか: 開口の形状と寸法および束材の補強筋量を要因とした PC 梁の力学的挙動に関する実験的研究 (その 1~3), 日本建築学会学術講演梗概集構造 IV, pp.871-876, 2009
- 5) 坂梨嘉洋ほか: PC 有孔梁の終局強度に関する実験的研究 (その 1, 2), 日本建築学会学術講演梗概集構造 IV, pp.855-858, 2011
- 6) 日本建築総合試験所: 有開口プレストレストコンクリート梁の正負繰り返し曲げせん断実験報告書, 1994.2
- 7) 日本建築総合試験所: 有開口プレストレストコンクリート梁の正負繰り返し曲げせん断実験報告書 (プレストレスト応力および PC 鋼棒の配置形式による影響), 1995.3
- 8) 建設省建築研究所ほか: 共同研究 PC 構造設計・施工指針の作成, 平成 8 年度研究報告書, pp. II-2-111 ~ 139, 1997.3
- 9) 前田潔: 矩形開口を有するプレストレストコンクリート梁の終局強度に関する実験的研究 (連続した開口部を有する場合の基礎的研究), 昭和 61 年度日本大学理工学部建築学専攻修士論文, 1987.2
- 10) 小西智貴ほか: 複数の開口を有する PC 梁の力学的挙動に関する実験的研究 (その 1, 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, vol.C-2, pp.953 ~ 956, 2008
- 11) 浜原正行ほか: 矩形開口を有するプレストレストコンクリート部材の終局強度に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, No.424, pp.67 ~ 77, 1991.1
- 12) 浜原正行ほか: アーチ機構が卓越するコンクリート系有孔梁の力学的挙動に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.937 ~ 942, 2000.
- 13) 浜原正行ほか: プレキャストプレストレストコンクリート有孔梁の力学的挙動に関する実験的研究, プレストレストコンクリート第 41 巻 (第 3 号), pp.14 ~ 19, 1999.6, 7

[2012 年 6 月 4 日受付]