

# 矩形開口を有するプレストレストコンクリート梁の 終局強度型設計法

浜原 正行<sup>\*1</sup>・中山 優<sup>\*2</sup>・本岡 順二郎<sup>\*3</sup>

## 1. はじめに

ダクトや給排水管を梁貫通させることにより、建物は階高の節約が図れ、建設コストを低減することができる。

鉄筋コンクリート（以後、RCと略称）造建物においては、有孔梁に関する設計規定がRC計算規準・同解説<sup>1)</sup>に明記されていることもあって、梁に開口部を設けることは日常的に行われている。これに対してプレストレストコンクリート（以後、PCと略称）造建物については、空調ダクト、給排水管を梁貫通させたいとの要求が高いにもかかわらず、関連諸規準に開口部に関する規定が明記されていないため、梁に開口部を設けることは実質的に許容されていないのが現状である。

周知のように通常のPC梁は、部材せいに対してスパンが極めて大きいため、そのせん断条件はRC梁よりかなり緩いと言える。したがって、PC有孔梁に開口部を設けることは力学的には何ら問題がないと考えられる。PC有孔梁の現状は、PC部材自体の力学的な問題というより、PC有孔梁に関する実験的な情報がRCと比較して著しく不足していたことに起因している。

本稿はRCおよびPC有孔梁の研究の現状、およびその問題点について論じ、さらに筆者等が行った136体のPC有孔梁の系統的な実験より得られたデータに立脚した矩形開口を有するPC梁の終局強度型設計方法について概説しようとするものである。

## 2. 有孔梁の終局強度に関する既往の研究

コンクリート系の有孔梁の力学的挙動は、母材が曲げ卓越型かせん断卓越型であるかによって大きく異なる。すなわち、母材せん断卓越型有孔梁の破壊は、図-1(a)に示すように<sup>2)</sup>、母材のトラス・アーチ作用によるせん断伝達を開口部が阻害することによって起こると考えられる。一方、母材曲げ卓越型有孔梁にあっては、母

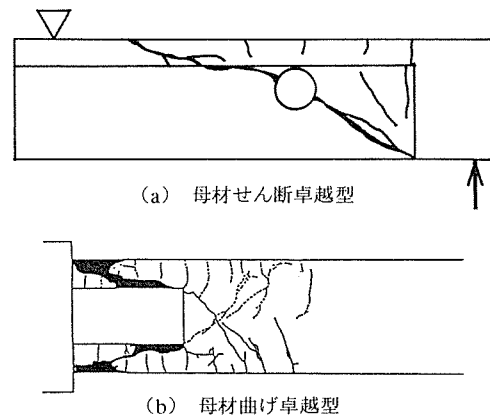


図-1 有孔梁の破壊性状

材にトラス・アーチ機構が構成される可能性は殆ど皆無であると言える。このような部材は、図-1(b)に示すように、開口部の局所的な破壊のみによって支配されるため、母材のせん断伝達は考慮する必要はないと考えられる<sup>3)</sup>。

RC有孔梁に関する実験例は、PC有孔梁と比較するとかかなり多く、その力学的性状も比較的よく把握されていると言える。また、これらの実験資料に基づいた有用な設計式も多数提案されている<sup>4)~7)</sup>。これらの実験式の実験結果に対する適合性は、いずれも比較的高いことが指摘されている。しかし、RC有孔梁の既往の実験資料は、母材せん断卓越型のものが殆どであり<sup>8)</sup>、これらの実験式の母材曲げ卓越型有孔梁に対する適合性については疑問が残ると言わざるをえない。

近年、RC部材のせん断設計規定をトラス・アーチモデルと下界定理を用いた塑性理論によって再評価しようとする動向が見られる<sup>9)</sup>。RC有孔梁についても、この下界定理の枠組の中で設計規定の理論化が進められている。この論は、母材にせん断ひびわれが一様に発生していること(図-2)、および開口部軸筋は降伏しないことを前提としている。開口部せん断補強は、このせん断ひ

\*1 Masayuki HAMAHARA : 日本大学 理工学部海洋建築工学科 専任講師

\*2 Yasashi NAKAYAMA : 日本大学 理工学部建築学科 助手

\*3 Junjiroh MOTOOKA : 日本大学 理工学部建築学科 教授

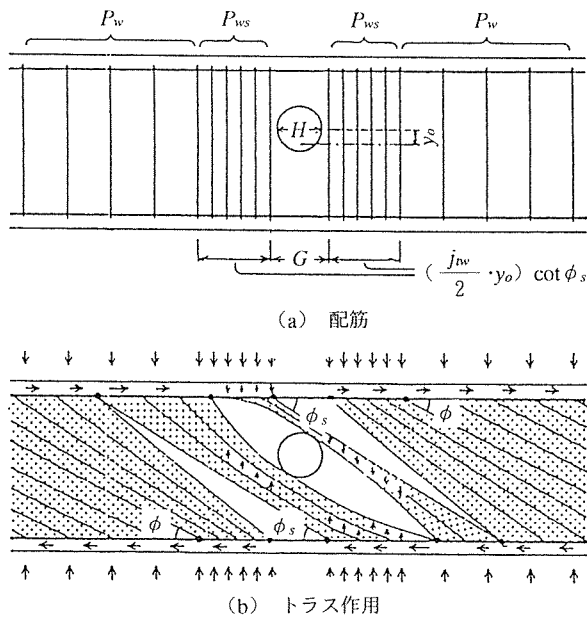


図-2 下界定理によるせん断伝達モデル

びわれによって構成されるトラス作用による伝達せん断力を開口部でいかに円滑に伝達させるかに主眼が置かれている。この理論は、開口部に対する理論的取扱い方法（ひび割れ性状、軸筋の取扱い等）からも分かるように、先の実験式同様、母材せん断卓越型の有孔梁がその解析の対象となっていると考えられる。

通常の PC 梁は、曲げが極めて卓越している。また RC 梁についても、母材の曲げが卓越する場合が少なくない。先に述べたように、有孔梁の挙動は母材が曲げ卓越型であるか、せん断卓越型であるかに強く依存するため、設計に際しても、これら 2 つのタイプの有孔梁に対する取扱いは必然的に異なったものとなる。したがって、上述の母材せん断卓越型部材を対象としている

既往の RC 有孔梁の終局強度推定式を、PC 有孔梁のような母材曲げ卓越型部材に適用するには、疑問が残ると言える。

一方、矩形開口を有する RC および PC 梁については、フィーレンデルモデルを用いたアプローチが比較的多く見られる<sup>11)~14)</sup>。この論においては、開口部の終局強度を圧縮弦材と引張弦材の和として表しており、母材のせん断伝達は考慮していない。したがって、このアプローチにおいては、開口部の破壊は開口部弦材のみに起こることが前提となっているため、母材曲げ卓越型有孔梁のせん断伝達機構に比較的良好に対応していると考えられる。

浜原ほか<sup>3)</sup>は、フィーレンデルモデルを用い、矩形開口を有する PC 有孔梁の終局強度の推定式を提案した。この論では、開口部圧縮弦材と引張弦材のそれぞれの終局強度を下界定理に基づき、リッターのトラス機構による負担せん断力と弦材の材端を対角線状に結んだコンクリートの圧縮力の鉛直成分として伝達されるアーチ機構による負担せん断力の和で評価している<sup>15)</sup>。開口部の終局強度は、引張弦材と圧縮弦材の終局強度の和として表し、有孔梁としての終局強度は開口部終局強度と母材終局強度のうち、いずれか小さい方の値として評価している。この理論の実験結果に対する適合性は、136 体の PC および RC 有孔梁の実験結果から得られた資料によって検証されている。

### 3. 検討に用いた試験体概要と実験結果

#### 3.1 実験概要

検討に用いた試験体は 1 章でも述べた 136 体であり、開口部の材長方向、材せい方向の位置、開口部せい、開口部長さ、開口部あばら筋比、軸筋量、開口部軸筋量、

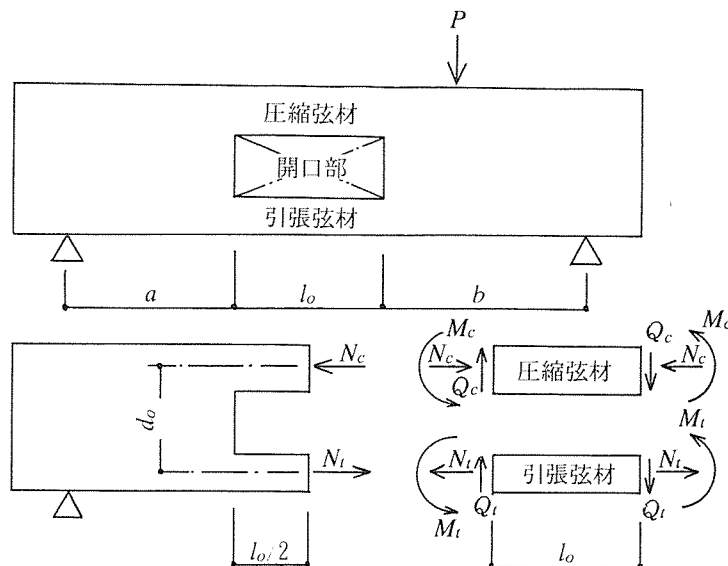


図-3 フィーレンデルモデル

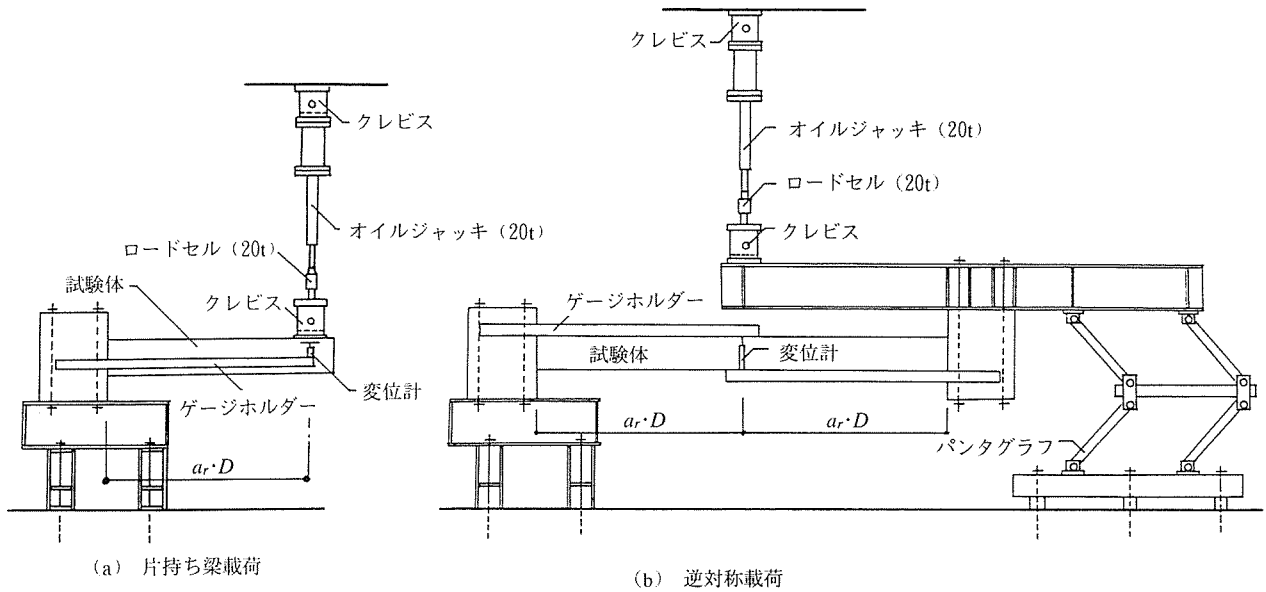


図-4 荷重方法

および鋼材係数を実験要因としている。これらの試験体のうち、開口部を梁の反曲点位置に設けたもの12体に対しては図-4 (a) に示すような逆対称荷重を、残り124体の試験体に対しては図-4 (b) に示すような片持ち梁

荷重を行った。荷重ルールは原則として曲げひび割れ発生荷重で正負1回繰り返した後、1/150を基準部材角とし、その1, 2, 3, 4, 6倍のそれぞれの変形レベルで正負3回ずつ繰り返した。

図-5 に試験体の配筋詳細の一例を示す。

### 3.2 実験結果

この実験より得られた破壊モードは、次のように分類できる。

- 1) 母材曲げ破壊 (記号: F) : この破壊モードを示した試験体は、母材が曲げ降伏したのち、コンクリートの圧壊、圧縮筋の座屈によって耐力低下を起こした。破壊は試験体付け根部分にのみ起こり、開口部でのコンクリートの顕著な劣化は見られなかった。また、この破壊モードを示した試験体は、いずれも比較的靱性に富んでおり、その耐力も母材曲げ終局強度と同等であった。
- 2) 開口部せん断破壊 (記号: DT) : この破壊モードを示した試験体は、開口部の圧縮弦材に発生した対

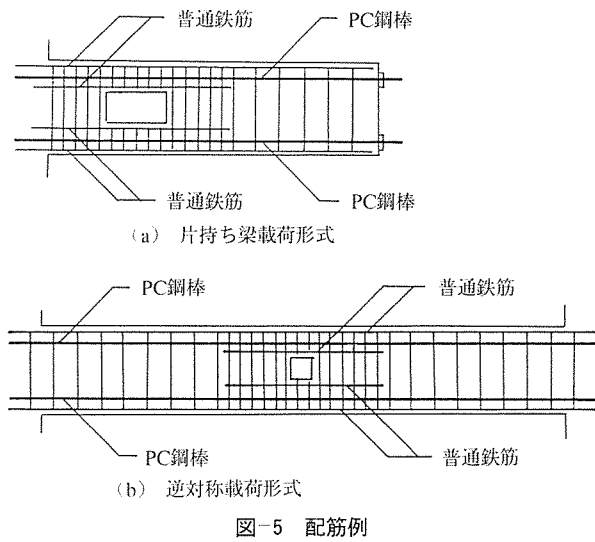


図-5 配筋例

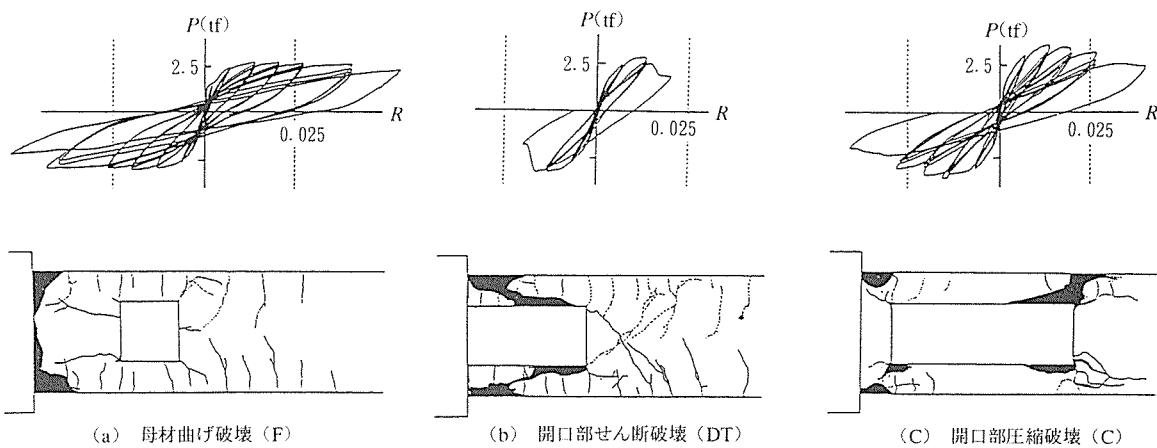


図-6 破壊モードと荷重-変形関係

角線状のせん断ひび割れによって急激な耐力低下を起し、靱性に極めて乏しかった。

3) 開口部圧縮破壊(記号:C): この破壊モードを示した試験体は、圧縮弦材の両端部分のコンクリートの圧壊によって耐力低下を起こした。この破壊モードを示した試験体の靱性は、あまり高くなかった。

図-6 (a)~(c) に、それぞれ 1)~2) で述べた破壊モードを示した試験体の典型的なひび割れパターンと荷重-変形関係を示す。

#### 4. 開口部弦材の終局強度

##### 4.1 理論の概要

本章では、筆者らが文献3) で提案した母材曲げ卓越型の矩形開口を有する PC 梁の終局強度推定法について概説する。

開口部弦材は、図-7 に示すようなフィーレンデル材として取り扱った。弦材の反曲点位置(図-7 中、A、A')はその中央とし、鋼材の非対称配置等の影響による反曲点の変化が、弦材に作用する軸力に及ぼす影響は無視した。

開口部の終局強度は、上弦材と下弦材の終局強度の和として表した。開口部の圧縮弦材と引張弦材の終局強度は、それぞれ、あばら筋、45度の傾斜角を有するコンクリートストラット、軸筋、および開口部軸筋によって構成されるトラス機構(図-8)による負担せん断力と弦材の材端部を対角線状に結ぶ圧縮力の鉛直成分として伝達されるアーチ機構(図-9)による負担せん断力の和として表した。

開口部の圧縮および引張弦材の終局強度の算定には、下界定理を適用した。鉄筋、PC 鋼材、およびコンクリートは、いずれも剛塑性体として取り扱い、構成材料の応力の許容範囲は(1 a)~(1 e) 式のように設定した。

軸筋応力:  $-rT_y \leq_r T \leq_r T_y \dots\dots (1 a)$

開口部軸筋応力:  $-hT_y \leq_h T \leq_h T_y \dots\dots (1 b)$

PC 鋼材応力:  $0 \leq_s T \leq_s T_y \dots\dots (1 c)$

あばら筋応力度:  $0 \leq_u \sigma \leq_u \sigma_y \dots\dots (1 d)$

コンクリート応力度:  $c\sigma = \nu \cdot F_c \dots\dots (1 e)$

ここに、

$rT_y, hT_y, sT_y$ : 軸筋, 開口部軸筋, PC 鋼材の降伏応荷重

$u\sigma_y$ : あばら筋の降伏応力度

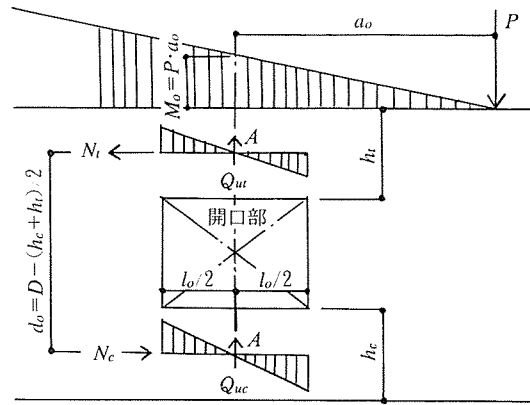


図-7 フィーレンデルモデルによる開口部弦材の応力

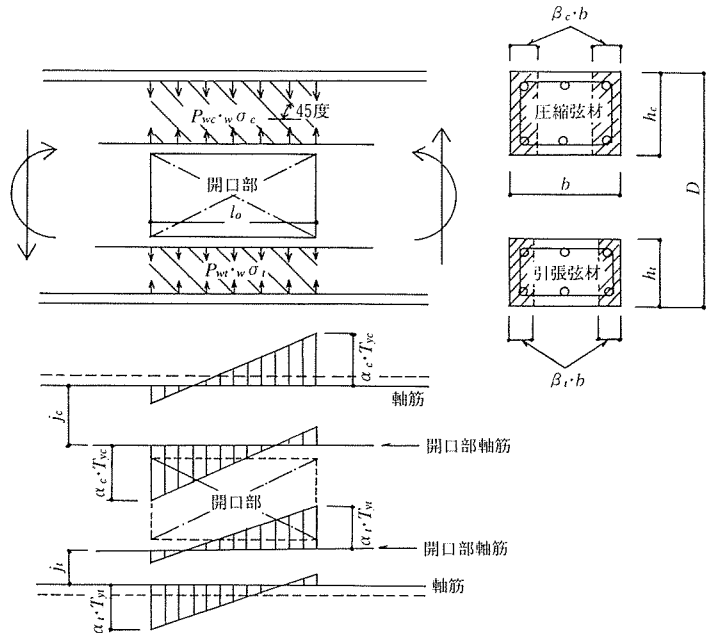


図-8 トラス機構

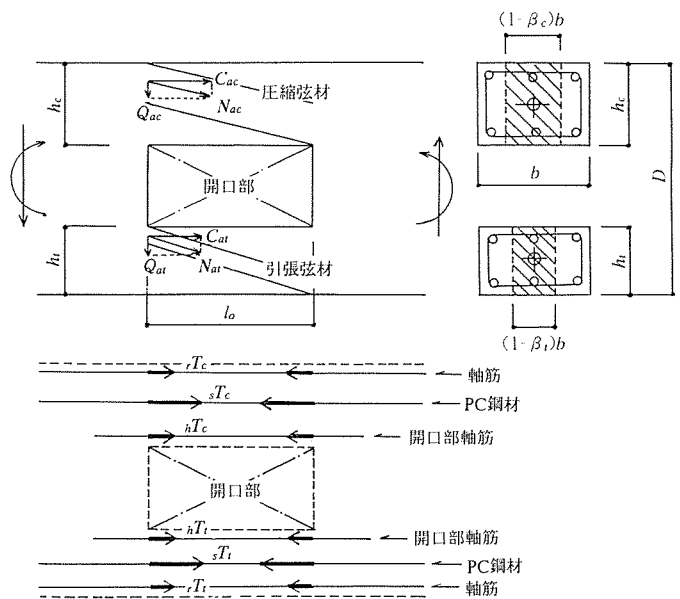


図-9 アーチ機構

$\nu$ : コンクリートの有効係数

開口部の圧縮弦材と引張弦材の終局強度は、(1 a)～(1 e) 式の許容応力の範囲内でトラス、アーチ両作用の和が最大となる値として評価した。

なお、鉄筋と PC 鋼材の応力の符号は引張を正、圧縮を負とし、コンクリートの応力と弦材に作用する軸力については圧縮を正、引張を負とした。

#### 4.2 トラス作用とアーチ作用によるせん断力

開口部の圧縮弦材と引張弦材のあばら筋降伏時におけるトラス作用によるせん断力 ( $Q_{wc}$ ,  $Q_{wt}$ ) は、それぞれ (2 a), (2 b) 式のように表される。

$$Q_{wc} = P_{wc} \cdot \omega \sigma_{yc} \cdot b \cdot j_c \dots \dots \dots (2 a)$$

$$Q_{wt} = P_{wt} \cdot \omega \sigma_{yt} \cdot b \cdot j_t \dots \dots \dots (2 b)$$

このとき、圧縮弦材と引張弦材における軸筋と開口部軸筋の引張力は、それぞれ (3 a), (3 b) 式で表される。

$$T_{wc} = \alpha_c \cdot T_{yc} = P_{wc} \cdot \omega \sigma_{yc} \cdot b (l_o + j_c) / 2 \dots (3 a)$$

$$T_{wt} = \alpha_t \cdot T_{yt} = P_{wt} \cdot \omega \sigma_{yt} \cdot b (l_o + j_t) / 2 \dots \dots (3 b)$$

ここに、

$$T_{yc} = \min (r T_{yc}, h T_{yc})$$

$$T_{yt} = \min (r T_{yt}, h T_{yt})$$

(3 a), (3 b) 式を  $\alpha_c$ ,  $\alpha_t$  について解くと、(4 a), (4 b) 式が得られる。

$$\alpha_c = T_{wc} / T_{yc} = P_{wc} \cdot \omega \sigma_{yc} \cdot b (l_o + j_c) / (2 \cdot T_{yc}) \dots \dots \dots (4 a)$$

$$\alpha_t = T_{wt} / T_{yt} = P_{wt} \cdot \omega \sigma_{yt} \cdot b (l_o + j_t) / (2 \cdot T_{yt}) \dots \dots \dots (4 b)$$

$\alpha_c$ ,  $\alpha_t > 1$  は、軸筋または開口部軸筋の降伏があばら筋の降伏に先行している状態に対応しているため、 $\alpha_c$ ,  $\alpha_t = 1$  に修正する。このとき、トラス作用によるせん断力は (2 a), (2 b) 式にそれぞれ  $T_{yc} / T_{wc}$ ,  $T_{yt} / T_{wt}$  を乗じることにより、(2 a'), (2 b') 式のように修正される。

$$Q_{wc} = \{2 j_c / (l_o + j_c)\} T_{yc} \dots \dots \dots (2 a')$$

$$Q_{wt} = \{2 j_t / (l_o + j_t)\} T_{yt} \dots \dots \dots (2 b')$$

トラス作用によるコンクリートの負担幅  $b_w$  と弦材幅  $b$  の比  $\beta (= b_w / b)$  は、次式で与えられる。

$$\alpha_c < 1 : \beta_c = 2 P_{wc} \cdot \omega \sigma_{yc} / (\nu \cdot F_c) \dots \dots \dots (5 a)$$

$$\alpha_t < 1 : \beta_t = 2 P_{wt} \cdot \omega \sigma_{yt} / (\nu \cdot F_c) \dots \dots \dots (5 a')$$

$$\alpha_c = 1 : \beta_c = 4 T_{yc} / \{\nu \cdot b (l_o + j_c) \cdot F_c\} \dots \dots (5 b)$$

$$\alpha_t = 1 : \beta_t = 4 T_{yt} / \{\nu \cdot b (l_o + j_t) \cdot F_c\} \dots \dots (5 b')$$

アーチ機構は PC 鋼材、およびトラス作用の残余分として、幅  $(1 - \beta) b$  のコンクリート、強度が  $r T_y - \alpha \cdot T_y$  の軸筋、 $h T_y - \alpha \cdot T_y$  の開口部軸筋によって構成される。開口部圧縮弦材と引張弦材のアーチ作用によるせん断力は、コンクリートの斜め圧縮力 (図-9 (b) 中、 $N_{ac}$ ,  $N_{at}$ ) の鉛直成分として、それぞれ (6 a), (6 b) 式で与えられる。

$$Q_{ac} = \sqrt{2 C_{mc} \cdot C_{ac} + (r_c \cdot C_{mc})^2 - C_{ac}^2} - r_c \cdot C_{mc} \dots \dots \dots (6 a)$$

$$Q_{at} = \sqrt{2 C_{mt} \cdot C_{at} + (r_t \cdot C_{mt})^2 - C_{at}^2} - r_t \cdot C_{mt} \dots \dots \dots (6 b)$$

ここに、

$$C_{mc} = (1 - \beta_c) \cdot \nu \cdot b \cdot h_c \cdot F_c / 2, r_c = l_o / h_c$$

$$C_{mt} = (1 - \beta_t) \cdot \nu \cdot b \cdot h_t \cdot F_c / 2, r_t = l_o / h_t$$

$C_{ac}$ ,  $C_{at}$ : 圧縮弦材、引張弦材におけるコンクリートアーチの圧縮力の水平成分

圧縮弦材、引張弦のアーチ作用によるせん断力の極大値は、 $\partial Q_a / \partial C_a = 0$  より計算される  $C_a = C_m$  を (6) 式に代入することにより、それぞれ (7 a), (7 b) 式のように求まる。

$$Q_{amc} = C_{mc} (\sqrt{1 + r_c^2} - r_c) \dots \dots \dots (7 a)$$

$$Q_{amt} = C_{mt} (\sqrt{1 + r_t^2} - r_t) \dots \dots \dots (7 b)$$

軸力の釣合条件より、 $C_{ac}$ ,  $C_{at}$  は (8 a), (8 b) 式で表せる。

$$C_{ac} = N_c + (s T_c + r T_c + s T_c) \dots \dots \dots (8 a)$$

$$C_{at} = N_t + (s T_t + r T_t + s T_t) \dots \dots \dots (8 b)$$

ここに、

$s T_c$ ,  $r T_c$ ,  $h T_c$ : 圧縮弦材の PC 鋼材、軸筋、開口部軸筋の軸力

$s T_t$ ,  $r T_t$ ,  $h T_t$ : 引張弦材の PC 鋼材、軸筋、開口部軸筋の軸力

$N_c$ ,  $N_t$ : ( $N_t = -N_c$ ) 圧縮弦材と引張弦材の軸力  
圧縮弦材と引張弦材における鋼材の軸力の和は (1 a)～(1 c) 式より、それぞれ (9 a), (9 b) 式に示す範囲を取り得る。

$$S_{1c} = s T_{yc} + r T_{yc} + h T_{yc} - 2 \alpha_c \cdot T_{yc} \geq s T_c + r T_c + h T_c \geq S_{2c} = -(r T_{yc} + h T_{yc} - 2 \alpha_c \cdot T_{yc}) \dots \dots (9 a)$$

$$S_{1t} = s T_{yt} + r T_{yt} + h T_{yt} - 2 \alpha_t \cdot T_{yt} \geq s T_t + r T_t + h T_t \dots \dots \dots (9 b)$$

(6)～(9) 式より、圧縮弦材と引張弦材のアーチ作用によるせん断力 ( $Q_{ac}$ ,  $Q_{at}$ ) は、それぞれ (10 a)～(10 c) 式および (10 a')～(10 b') によって表される。

$N_{1c} \leq N_c \leq N_{2c}$  の場合:

$$Q_{ac} = C_{mc} (\sqrt{1 + r_c^2} - r_c) \dots \dots \dots (10 a)$$

$N_c < N_{1c}$  の場合:

$$Q_{ac} = \sqrt{2 C_{mc} (N_c + S_{1c}) + (r_c \cdot C_{mc})^2 - (N_c + S_{1c})^2} - r_c \cdot C_{mc} \dots \dots \dots (10 b)$$

$N_c > N_{2c}$  の場合:

$$Q_{ac} = \sqrt{2 C_{mc} (N_c + S_{2c}) + (r_c \cdot C_{mc})^2 - (N_c + S_{2c})^2} - r_c \cdot C_{mc} \dots \dots \dots (10 c)$$

$N_{1t} \leq N_t \leq N_{2t}$  の場合:

$$Q_{at} = C_{mt} (\sqrt{1 + r_t^2} - r_t) \dots \dots \dots (10 a')$$

$N_t < N_{1t}$  の場合:

$$Q_{at} = \sqrt{2 C_{mt} (N_t + S_{1t}) + (r_t \cdot C_{mt})^2 - (N_t + S_{1t})^2}$$

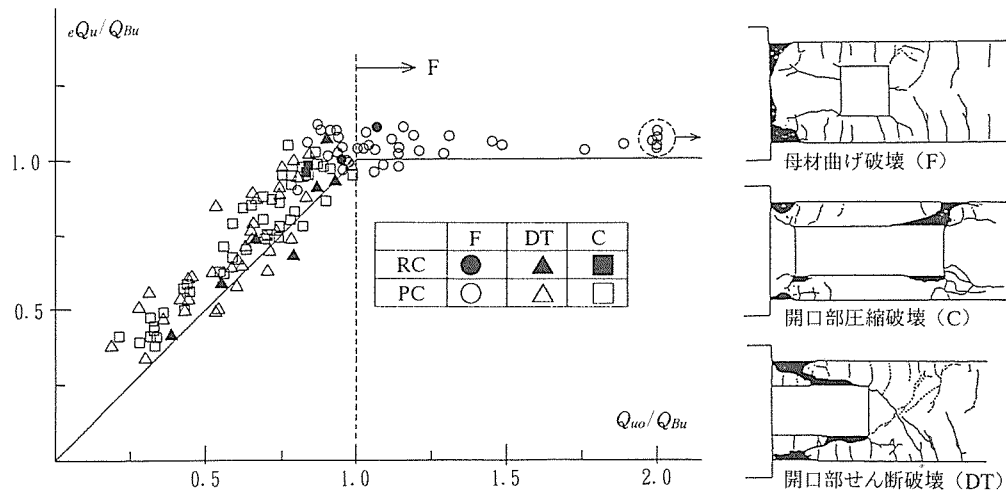


図-10  $eQ_u/Q_{Bu}$  と  $Q_{uo}/Q_{Bu}$  の相関

$$-r_t \cdot C_{mt} \dots\dots\dots (10b')$$

ここに,

$$N_{1c} = C_{mc} - S_{1c}, N_{2c} = C_{mc} - S_{2c}, N_c : \text{圧縮弦材の軸力}$$

$$N_{1t} = C_{mt} - S_{1t}, N_{2t} = C_{mt} - S_{2t}, N_t : \text{引張弦材の軸力}$$

#### 4.3 下界定理による開口部弦材の終局強度

4.2節では、トラス作用によるせん断力の最大値を求め、アーチ作用によるせん断力はその残余分として評価した。しかし、このようにして求めたトラス、アーチ両作用によるせん断力の和が弦材の終局強度に最大値を与えるとは限らない。下界の解としての正解値を得るためには、弦材の終局強度に最大値を与えるトラス、アーチ両作用の分担割合を収斂計算によって求める必要がある。圧縮弦材と引張弦材の終局強度は、この収斂計算によって求めたトラス、アーチ両作用のせん断力の和として、それぞれ(11)、(12)式のように表される。

$$Q_{uc} = Q_{wc} + Q_{ac} \dots\dots\dots (11)$$

$$Q_{ut} = Q_{wt} + Q_{at} \dots\dots\dots (12)$$

開口部の終局強度  $Q_{uo}$  は引張弦材と圧縮弦材の終局強度の和として(13)式のように表される。

$$Q_{uo} = Q_{ut} + Q_{uc} \dots\dots\dots (13)$$

図-7で示したように、試験体の弦材には、(14)式で表される軸力が偶力として作用する。

$$N_c = -N_t = a_o \cdot Q_{uo} / d_o \dots\dots\dots (14)$$

ここに、 $d_o$  : 圧縮弦材-引張弦材の重心間距離

開口部弦材の終局強度は(13)、(14)式によって求める。しかし、具体的な計算に際しては、(13)、(14)式を同時に満たす  $Q_{uo}$  を  $N_c$ 、 $N_t$  に関する収斂計算によって見いだす必要がある。なお、コンクリートの有効係数は次式で評価した。

$$\nu = 0.7 - F_c / 2000^{16)} \dots\dots\dots (15)$$

#### 4.4 開口部終局強度の計算値と実験値の比較

図-10は、最大荷重  $eQ_u$  と開口部終局強度計算値  $Q_{uo}$  の曲げ終局強度  $Q_{Bu}$  による無次元値をそれぞれ縦軸と横軸に取り、3章で述べた136体の試験体についてプロットしたものである。

なお、試験体の曲げ終局強度は(16)式で求めた。

$$Q_{Bu} = \{r \cdot q \cdot r \cdot d_1 + s \cdot q \cdot s \cdot d_1 - (s \cdot q + r \cdot q)^2 / 2\} b \cdot D^2 F_c / a \dots\dots\dots (16)$$

ここに、

$$r \cdot q : \text{普通鉄筋の鋼材係数} = r \cdot T_y / (b \cdot D \cdot F_c)$$

$$s \cdot q : \text{PC鋼材の鋼材係数} = s \cdot T_y / (b \cdot D \cdot F_c)$$

$$r \cdot d_1 \cdot D, s \cdot d_1 \cdot D : \text{普通鉄筋とPC鋼材に関する有効せい}$$

$$a : \text{せん断スパン}$$

図-10より  $Q_{uo}/Q_{Bu} \geq 1$  の試験体、すなわち開口部終局強度計算値が曲げ終局強度計算値を上回っているすべての試験体は、母材の曲げ破壊が先行していることが分かる。

### 5. プレストレストコンクリート有孔梁の設計方法

本章では、母材の曲げ破壊が開口部の破壊に先行することを規範としたPCおよびRC有孔梁の設計法<sup>17)</sup>について概説する。

4章でも述べたように、この設計規範は条件式(17)によって自動的に満たされることになる。

$$Q_{uo} \geq Q_{Buo} \dots\dots\dots (17)$$

ここに、

$$Q_{uo} : \text{4章で求めた開口部終局強度}$$

$$Q_{Buo} : \text{曲げ終局強度における開口部せん断力}$$

しかし、 $Q_{uo}$  の算定に際しては複雑な収斂計算が必要となるため、4章の理論を設計式としてそのまま用いる

と、実用性の面から問題が残る。そこで、設計に際しては、計算の簡略化を図るため、開口部に作用するせん断力は、すべて弦材のトラス作用によって負担させ、トラス作用の残余分は弦材の軸力のみで抵抗するものとした。これにより、(17)式は(18)式ようになる。

$$Q_{Bu0} \leq Q_{u0} = b(j_c \cdot P_{wc} \cdot \omega \sigma_{yc} + j_l \cdot P_{wl} \cdot \omega \sigma_{yl}) \dots \dots \dots (18)$$

ここに、

- $j_c$  : 圧縮弦材での軸筋-開口部軸筋間の距離
- $j_l$  : 引張弦材での軸筋-開口部軸筋間の距離
- $P_{wc}, P_{wl}$  : 圧縮弦材と引張弦材のあばら筋比
- $\omega \sigma_{yc}, \omega \sigma_{yl}$  : 圧縮弦材と引張弦材のあばら筋の降伏応力度

図-11に示すように、(18)式のせん断力に対し、圧縮弦材と引張弦材の軸筋と開口部軸筋には、それぞれ(19 a), (19 b)式の引張力と(20 a) (20 b)式の圧縮力が作用する。

$$T_{wc} = P_{wc} \cdot \omega \sigma_{yc} \cdot b (l_o + j_c) / 2 \dots \dots \dots (19 a)$$

$$T_{wl} = P_{wl} \cdot \omega \sigma_{yl} \cdot b (l_o + j_l) / 2 \dots \dots \dots (19 b)$$

$$C_{wc} = P_{wc} \cdot \omega \sigma_{yc} \cdot b (l_o + j_c) / 2 \dots \dots \dots (20 a)$$

$$C_{wl} = P_{wl} \cdot \omega \sigma_{yl} \cdot b (l_o + j_l) / 2 \dots \dots \dots (20 b)$$

ここに、

- $l_o$  : 開口部長さ
- 圧縮弦材と引張弦材に作用する軸力は、モーメントの釣合条件より、(21)式のように求まる。

$$N_{Bu0} = M_{Bu0} / d_o \dots \dots \dots (21)$$

ここに、

- $M_{Bu0}$  : 曲げ終局時の開口部位置の曲げモーメント
- $d_o$  : 圧縮弦材-引張弦材の重心間距離

圧縮弦材と引張弦材が(18)式のせん断力を伝達できるトラス機構を構成し、同時に(21)式の軸力に抵抗するためには、(22 a)~(22 d)の条件を満たしている必要がある。

圧縮弦材：

$$r T_{yc}, h T_{yc} \geq T_{wc} \dots \dots \dots (22 a)$$

$$N_{Bu0} \leq r T_{yc} + h T_{yc} - 2 \cdot C_{wc} + (A_c - \beta_c \cdot b \cdot h_c) \nu \cdot F_c \dots \dots \dots (22 b)$$

引張弦材：

$$r T_{yl}, h T_{yl} \geq T_{wl} \dots \dots \dots (22 c)$$

$$N_{Bu0} \leq r T_{yl} + h T_{yl} + s T_{yl} - 2 \cdot T_{wl} \dots \dots \dots (22 d)$$

ここに、

- $A_c$  : 圧縮弦材の断面積
- $\nu = 0.7 - F_c / 2000$
- $r T_{yc}, r T_{yl}$  : 圧縮弦材と引張弦材の軸筋の降伏荷重
- $h T_{yc}, h T_{yl}$  : 圧縮弦材と引張弦材の開口部軸筋の降伏荷重
- $s T_{yl}$  : 引張弦材のPC鋼材の降伏荷重
- $\beta_c = 2 \cdot P_{wc} \cdot \omega \sigma_{yc} / (\nu \cdot F_c)$

図-12は縦軸に開口部の試験体基部側の曲げモーメント  $M'$  の試験体基部の曲げモーメント  $M$  による無次元値  $M' / M$  を、横軸に曲げ終局時の開口部位置での平均せん断応力度の  $\sqrt{F_c}$  による商  $\tau_{Bu} / \sqrt{F_c}$  を取り、前述

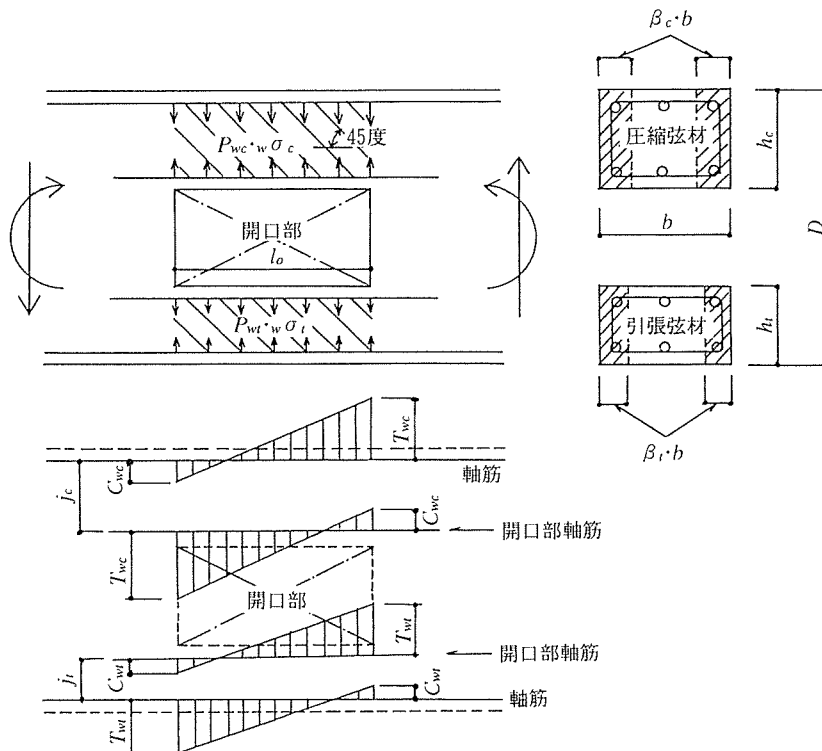


図-11 設計に用いた解析モデル

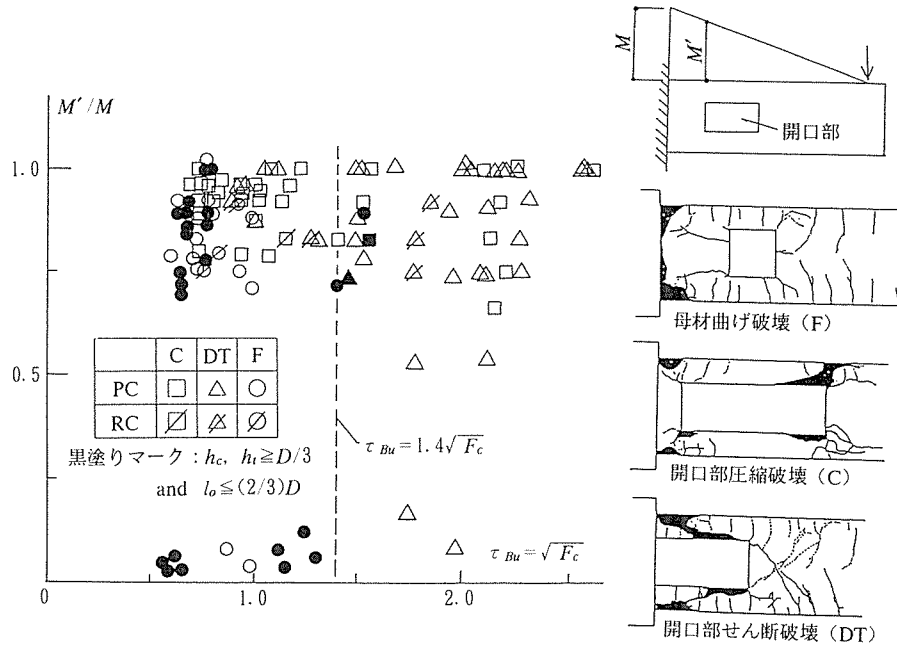


図-12 開口部諸元, 平均せん断応力度と破壊モードの関係

の試験体についてプロットしたものである。この図より、圧縮弦材と引張弦材の全せい  $h_c, h_t$  が  $D/3$  以上、かつ開口部長さ  $l_o$  が  $2D/3$  以下の試験体（図中、黒塗マーク）で、曲げ終局時の開口部の平均せん断応力度が  $1.4\sqrt{F_c}$  以下のものは、すべて母材の曲げ破壊が先行していることが分かる。これより、開口部寸法の限界値を以下のように設定する。

$$h_c \geq D/3, h_t \geq D/3, l_o \leq 2D/3 \dots \dots \dots (23)$$

$$\tau_{Bu0} = Q_{Bu0} / \{b(h_c + h_t)\} \leq 1.4\sqrt{F_c} \dots \dots \dots (24)$$

ここに、

$h_c, h_t$  : 圧縮弦材と引張弦材の全せい

$l_o$  : 開口部の長さ

さらに、部材ヒンジ領域での十分な回転能力を確保させるため、開口部はヒンジ領域外に設ける。すなわち、

$$X \geq 2D \dots \dots \dots (25)$$

とする（図-13）。

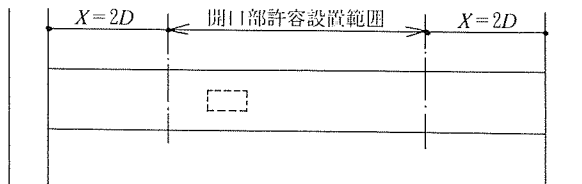


図-13 開口部の許容設置範囲

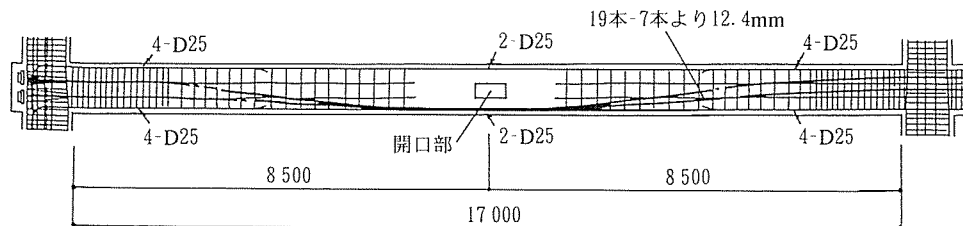


図-14 設計に用いた梁の概要

## 6. 設計手順と設計例

### 6.1 設計手順

5章で述べたことを設計手順としてまとめると、[STEP 1]～[STEP 4]のようになる。

[STEP 1] 開口の位置と寸法を決める。

ただし、 $h_c \geq D/3, h_t \geq D/3, l_o \leq 2D/3, X \geq 2D$  とする。

[STEP 2] 母材の曲げ終局時に開口部に作用する曲げモーメント  $M_{Bu0}$  とせん断力  $Q_{Bu0}$  を求め、(24)式によって平均せん断応力度のチェックをする。

[STEP 3] 弦材の必要あばら筋比  $P_{wc}, P_{wt}$  を(18)式より計算する。

ただし、 $0.002 \leq P_{wc}, P_{wt} \leq 0.012$  とする。

[STEP 4] (21)式を用いて開口部弦材に作用する軸力を計算し、(22a)～(22d)式によるチェックを行う。

### 6.2 設計例

図-14、表-1に設計に用いた梁の諸元を、図-15に曲げ終局時における曲げモーメントとせん断力を示す<sup>18)</sup>。

[STEP 1]

開口部は内法スパン中央に設置する。



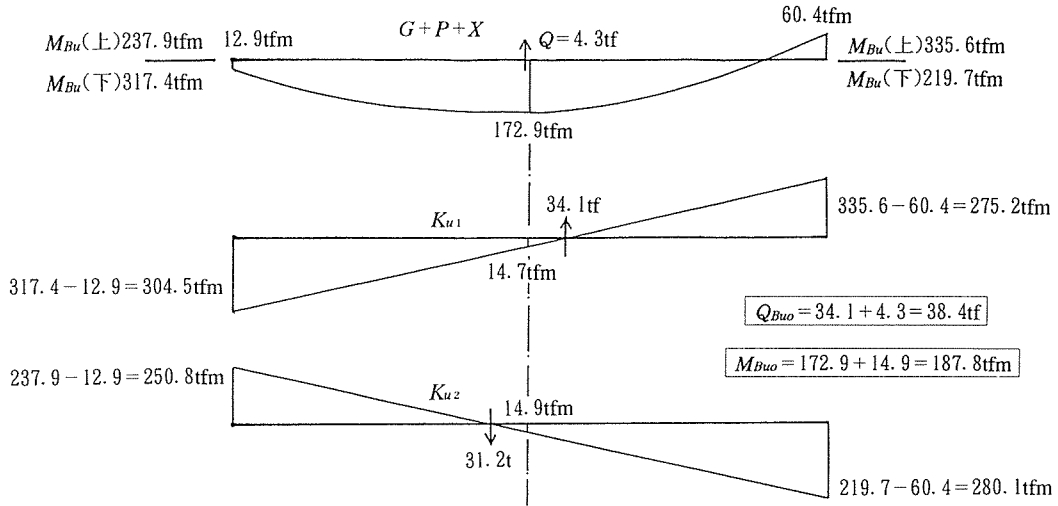


図-15 応力分布

表-1 設計に用いた梁の諸元

	普通鉄筋		PC鋼材		弦材	
	断面積 (cm <sup>2</sup> )	降伏応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	断面積 (cm <sup>2</sup> )	降伏応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	h (cm)	j (cm)
引張弦材	10.14	3 500	0	-	34	24
圧縮弦材	10.14	3 500	35.3	15 000	34	24

開口部寸法は、 $h_c=h_t=34$  cm、 $j_c=j_t=24$  cm、 $l_o=64$  cm とする。

[STEP 2]

$$Q_{Bu0} = 38.4 \text{ tf}, M_{Bu0} = 187.8 \text{ tfm}$$

$$\begin{aligned} \tau_{Bu0} &= Q_{Bu0} / \{b(h_c+h_t)\} \\ &= 38\,400 \text{ kgf} / (35 \text{ cm} \times 68 \text{ cm}) \\ &= 16.1 \text{ kgf/cm}^2 < 1.4\sqrt{F_c} = 26.2 \text{ kgf/cm}^2 \\ &\dots\dots\dots \text{O.K.} \end{aligned}$$

[STEP 3]

圧縮弦材と引張弦材のあばら筋量を等しくすると、

$$\begin{aligned} P_{wc} &= P_{wt} = Q_{Bu0} / \{b(j_t+j_c)\omega\sigma_y\} \\ &= 38.4 \text{ tf} / (35 \text{ cm} \times 48 \text{ cm} \times 3 \text{ tf/cm}^2) \\ &= 0.76 \% < 1.2 \% \dots\dots\dots \text{O.K.} \end{aligned}$$

あばら筋として 3-D13-@ 140 mm ( $P_w=0.78\%$ ) を用いる。

[STEP 4]

$$N_{Bu0} = M_{Bu0} / d_o = 187.8 \text{ tfm} / 0.748 \text{ m} = 251.1 \text{ tf}$$

$$\begin{aligned} T_{wt} &= P_{wt} \cdot \omega \sigma_{yt} \cdot b(l_o+j_t) / 2 \\ &= 0.0076 \times 3 \text{ tf/cm}^2 \times 35 \text{ cm} \\ &\quad \times (64 \text{ cm} + 24 \text{ cm}) / 2 = 35.1 \text{ tf} \\ C_{wc} &= P_{wc} \cdot \omega \sigma_{yc} \cdot b(l_o+j_c) / 2 \\ &= 0.0076 \times 3 \text{ tf/cm}^2 \times 35 \text{ cm} \\ &\quad \times (64 \text{ cm} - 24 \text{ cm}) / 2 = 16.0 \text{ tf} \end{aligned}$$

圧縮弦材と引張弦材の軸筋および開口部軸筋に 2-D25 (断面積=10.14 cm<sup>2</sup>) を用いる。

$$rT_{yc} = hT_{yc} = rT_{yt} = hT_{yt} = 3.5 \text{ tf/cm}^2 \times 10.14 \text{ cm}^2 = 35.5 \text{ tf} > T_w = 35.1 \text{ tf} \dots\dots\dots \text{O.K.}$$

$$\begin{aligned} rT_{yt} + hT_{yt} + sT_{yt} - 2 \cdot T_{wt} \\ &= 2 \times 35.5 \text{ tf} + 528.2 \text{ tf} - 2 \times 35.1 \text{ tf} \\ &= 529.0 \text{ tf} < N_{Bu0} = 290.0 \text{ tf} \dots\dots\dots \text{O.K.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \beta_c &= 2 \cdot P_{wc} \cdot \omega \sigma_{yc} / (\nu \cdot F_c) \\ &= 2 \times 0.0076 \times 3 \text{ tf/cm}^2 / 0.184 \text{ tf/cm}^2 = 0.248 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_c &= B \cdot t + b(h_c - t) = 387 \text{ cm} \times 12 \text{ cm} \\ &\quad + (34 - 12) \text{ cm} \times 35 \text{ cm} = 5\,435 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{ce} &= A_c - \beta_c \cdot h_c \cdot b = 5\,435 \text{ cm}^2 - 0.248 \\ &\quad \times 35 \text{ cm} \times 34 \text{ cm} = 5\,119 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} rT_{yc} + hT_{yc} - 2 \cdot C_{wc} + A_{ce} \cdot \nu \cdot F_c \\ &= 2 \times 35.5 \text{ tf} - 2 \times 16.0 \text{ tf} + 5\,119 \text{ cm}^2 \\ &\quad \times 0.184 \text{ kgf/cm}^2 \\ &= 980.9 \text{ tf} > N_{Bu0} = 251.1 \text{ tf} \dots\dots\dots \text{O.K.} \end{aligned}$$

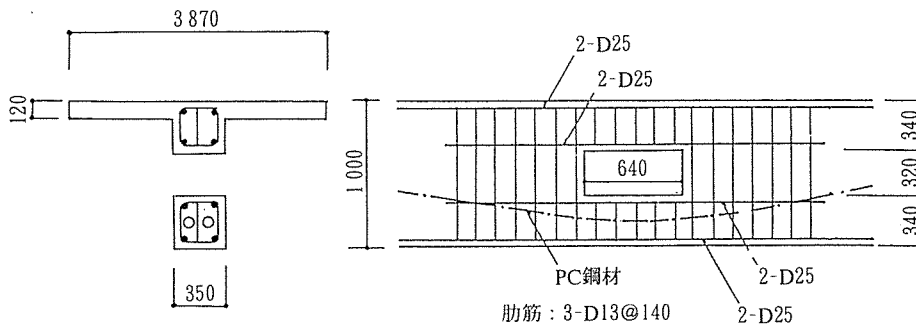


図-16 開口部の配筋詳細

図-16に開口部の詳細を示す。

## 7. ま と め

トラス・アーチモデルと下界定理に基づいて、開口部の終局強度の推定式を提案し、さらに、この理論に立脚したPC有孔梁の簡便な設計手法を提案した。

[記号]

$a$  : せん断スパン ( 載荷点から試験体基部までの距離 )

$a_o$  : 載荷点から開口部中心までの距離

$b, D$  : 梁幅, 梁せい

$B$  : T形梁の有効せい

$d_o$  : 圧縮弦材-引張弦材の重心間距離

$F_c$  : コンクリートの圧縮強度

$l_o$  : 開口部の長さ

$M_{Bu}$  : 母材の終局モーメント

$M_{Buo}$  : 母材終局時における開口部位置のモーメント

$N_{Buo}$  : 母材終局時に弦材に作用する軸力

$Q_{uo}$  : 開口部の終局強度

$Q_{Buo}$  : 母材終局時における開口部位置のせん断力

$t$  : スラブの厚さ

$\nu$  : コンクリートの有効係数

以下の記号でサフィックス  $c$  の付いたものは圧縮弦材,  $t$  の付いたものは引張弦材に関する変数を表す。

$h a_c, h a_t$  : 開口部軸筋の断面積

$r a_c, r a_t$  : 軸筋の断面積

$s a_c, s a_t$  : PC鋼材の断面積

$j_c, j_t$  : 軸筋から開口部軸筋までの距離

$h_c, h_t$  : 弦材のせい

$N_t, N_c$  : 弦材に作用する軸力

$P_{wc}, P_{wt}$  : 開口部弦材のあばら筋比

$Q_{ac}, Q_{at}$  : アーチ作用によるせん断力

$Q_{wc}, Q_{wt}$  : トラス作用によるせん断力

$r_c : l_o/h_c$

$r_t : l_o/h_t$

$Q_{uc}, Q_{ut}$  : 圧縮弦材と引張弦材の終局強度

$r \sigma_{yc}, r \sigma_{yt}$  : 軸筋の降伏応力度

$h \sigma_{yc}, h \sigma_{yt}$  : 開口部軸筋の降伏応力度

$s \sigma_{yc}, s \sigma_{yt}$  : PC鋼材の降伏応力度

$w \sigma_{yc}, w \sigma_{yt}$  : 開口部あばら筋の降伏応力度

$r T_{yc}, r T_{yt}$  : 軸筋の降伏荷重 ( $=r a_c \cdot r \sigma_{yc}, =r a_t \cdot r \sigma_{yt}$ )

$h T_{yc}, h T_{yt}$  : 開口部軸筋の降伏荷重

( $=h a_c \cdot h \sigma_{yc}, =h a_t \cdot h \sigma_{yt}$ )

$s T_{yc}, s T_{yt}$  : PC鋼材の降伏荷重

( $=s a_c \cdot s \sigma_{yc}, =s a_t \cdot s \sigma_{yt}$ )

$T_{wc}, T_{wt}$  : トラス作用によって軸筋, 開口部軸筋に生じる引張力

$C_{wc}, C_{wt}$  : トラス作用によって軸筋, 開口部軸筋に生じる圧縮力

## 参 考 文 献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, pp. 463~464, 1986.8
- 2) N.F. Sones and W.G. Corley : Circular Openings In Web Of Continuous Beams, SHEAR IN REINFORCED CONCRETE, Vol. 1, pp. 359~398, 1974
- 3) 浜原ほか2名：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, 1991.6
- 4) 有孔梁委員会：鉄筋コンクリート有孔はりに関する研究 (その10), 日本建築学会論文報告集, No. 69, pp. 541~544, 1961.10
- 5) 広沢雅也ほか2名：鉄筋コンクリート造有孔梁のせん断強度と靱性 (その2), 建築技術, No. 332, pp. 139~152
- 6) 津村浩三ほか3名：鉄筋コンクリート造有孔梁におけるせん断の推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C, 構造II, pp. 463~464, 1986.8
- 7) 古屋則之ほか1名：鉄筋コンクリート有孔梁のせん断補強 (その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭和54年9月
- 8) 日本建築学会：鉄筋コンクリート終局設計に関する資料, pp. 40~42, 1987.9, 技報堂
- 9) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説, 1990.11
- 10) 市之瀬敏勝ほか1名：鉄筋コンクリート有孔はりのせん断設計法の一提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 319~322, 1990.10
- 11) 辻英一ほか4名：多数の大型貫通孔を有するPC小梁の載荷実験 (その1~5), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1989~1990
- 12) M.A. Mansur, et al.: Design Method for Reinforced Concrete Beams with Large Openings, ACI JOURNAL, pp. 517~524, 1985.7~8
- 13) Barney, George B., et al. : Behavior and Design of Prestressed Concrete Beams with Large Web Openings, Jour. of PCI, Vol. 22, No. 6, pp. 32~61, 1977.11~12
- 14) Nasser, Karim W, et al. : Behavior and Design of Large Openings in Reinforced Concrete Beams, Jour. of ACI, Vol. 64, No. 7, pp. 25~33, 1967.1
- 15) 称原良一, 加藤勉：鉄筋コンクリート部材の耐力 (圧力場の適用), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1731~1732, 1978.9
- 16) Nielsen, M.P. : Limit Analysis and Concrete Plasticity, Prentice Hall, 1984
- 17) 浜原正行ほか2名：プレストレストコンクリート有孔はりの終局強度型設計法, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 442, 1992.12
- 18) 日本建築学会：プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説, pp. 285~316, 1987

【1993年3月12日受付】