

# 鉄筋コンクリート橋脚の地震時変形性能を 考慮するためのノモグラム

## SOME NOMOGRAMS TO CONSIDER THE DUCTILITY OF REINFORCED CONCRETE PIERS IN EARTHQUAKE RESISTANT DESIGN

石橋忠良\*・吉野伸一\*\*・斉藤俊彦\*\*\*・渡邊忠朋\*\*\*\*

By Tadayoshi ISHIBASHI, Shin-ichi YOSHINO, Toshihiko SAITOU and Tadatomo WATANABE

In order to establish the reliable earthquake-proof design for railway reinforced concrete bridges and piers, it is essential to evaluate the ductility of RC members quantitatively. The authors had conducted reversed cyclic loading tests on several RC members which were scale modeled the piers of railway bridges, and derived an equation to evaluate the ductility factor of RC members reasonably. In this report, some nomographs (design aids) which are obtained from the derived equation are introduced. These nomographs can be used to obtain the ductility factor when the dimensions of RC member are given, and also can be used to obtain the volume of transverse reinforcement when the required ductility is given.

Besides the derivation of the equation to evaluate the ductility factor and the presentation of some nomographs, we demonstrated how to use these nomographs in an actual design process.

Keywords: reinforced concrete pier, earthquake resistant design, nomogram, evaluation of ductility

### 1. はじめに

鉄筋コンクリート(以下RCという)構造物の耐震設計を、合理的、経済的に行うためには、部材降伏以後の変形能力を定量的に把握し、設計に取り入れることが必要である。

著者らは、RC橋脚をモデル化したRC脚柱供試体を用いて水平力交番載荷実験を行い、RC部材の変形能力(靱性率)を比較的精度良く評価する方法を見出した<sup>1)</sup>。

以下に、これらの研究成果をもとに、設計実務に便利なように断面諸元が明らかな場合の部材の靱性率を求める場合、および、部材が必要な靱性率を有するためのせん断補強鉄筋(スターラップ、帯鉄筋)量を求める場合に使用するノモグラムを作成したので紹介する。

### 2. RC部材の靱性率算定法

RC脚柱の水平力交番載荷実験から得られる脚柱天端

の水平変位は、脚柱躯体部分の弾性・塑性変形および軸方向鉄筋がフーチングから抜け出すことによる回転変位が合計されたものである。したがって、RC脚柱の靱性率( $\mu$ )は、次式で表わすことができる。

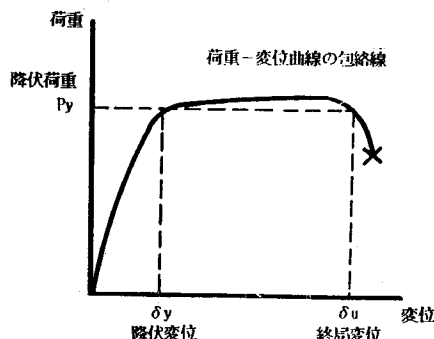
$$\mu = \delta_u / \delta_y = (\mu_0 \cdot \delta_{y_0} + \delta_u) / (\delta_{y_0} + \delta_y) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $\delta_u$ : 終局変位 (図-1)

$\delta_y$ : 降伏変位 (図-1)

$\mu_0$ : 躯体のみの靱性率

$\delta_{y_0}$ : 降伏時の躯体のみの変位



降伏変位: 引張鉄筋のひずみか降伏値に達したときの変位  
終局変位: 荷重-変位曲線上の降伏荷重を下回らない最大変位  
じん性率:  $\mu = \delta_u / \delta_y$

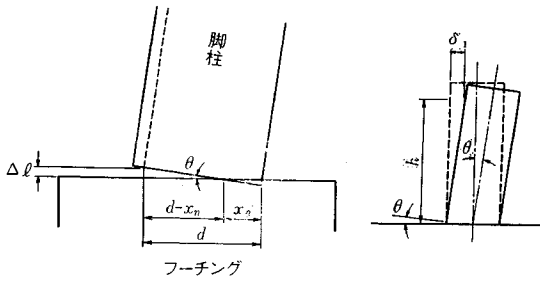
図-1 荷重-変位曲線の包絡線

\* 正会員 工博 東日本旅客鉄道(株)東北工事事務所工事管理室

\*\* 正会員 北海道旅客鉄道(株)工務部工事2課  
(〒060 札幌市中央区北5条西4丁目)

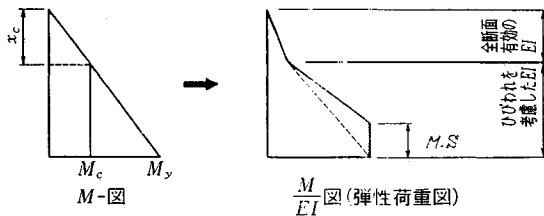
\*\*\* 正会員 (株)谷村建設(前・財)鉄道総合技術研究所基礎共通技術研究室

\*\*\*\* 正会員 (財)鉄道総合技術研究所線路構造研究室



ここに  $\Delta l$  : 軸方向鉄筋抜出し量  
 $\delta_1$  : 鉄筋抜出しによる回転変位  
 $\delta_1 = h \cdot \theta = \frac{\Delta l}{d-x_n} \cdot h$

図-2 鉄筋の抜け出しによる回転変位



$M_c$ : ひびわれ発生曲げモーメント  
 $M_y$ : 降伏曲げモーメント

図-3 脚柱の降伏変位

$\delta_{y1}$  : 降伏時の鉄筋の抜け出しによる回転変位  
 $\delta_{u1}$  : 終局時の鉄筋の抜け出しによる回転変位

鉄筋の抜け出しによる回転変位 ( $\delta_1$ ) は、降伏時、終局時、それぞれの鉄筋の抜け出し量 ( $\Delta l$ ) を求めて図-2より算定することができる。 $\Delta l_{y0}$ 、 $\Delta l_{u0}$  (それぞれ、降伏時、終局時の鉄筋の抜け出し量) は、鉄筋が十分フーチングに定着されている場合、鉄筋中心間隔 ( $D$ ) と鉄筋径 ( $\phi$ ) の比 ( $D/\phi$ ) の関数として、次式でほぼ算定することができる<sup>1)</sup>。

$$\Delta l_{y0} = 0.070 - 0.0054(D/\phi) + 0.00017(D/\phi)^2 \dots\dots\dots (2)$$

$$\Delta l_{u0} = 0.083 - 0.0054(D/\phi) + 0.00015(D/\phi)^2 \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 $3 \leq (D/\phi) \leq 16$  (単位: cm)

$\delta_{y0}$  は、躯体のひびわれ剛性を考慮し、図-3より求めることができる。データ解析の結果、実験から得られた  $\delta_u$  から  $\delta_{u1}$  を差し引いて、その値を  $\delta_{y0}$  で除した値を躯体のみの靱性率  $\mu_0$  とし、 $\mu_0$  をせん断耐力と曲げ耐力の比とせん断補強鉄筋比の関数からなる、次式を提案した<sup>1)</sup>。

$$\mu_0 = -1.9 + 6.6(S_u \cdot l/M_u) + (13.0 \cdot P_w - 1.6) \cdot P_w \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 $0.90 \leq (S_u \cdot l/M_u) \leq 2.7$ 、 $P_w \leq 0.60 \%$   
 $(13.0 \cdot P_w - 1.6) P_w \geq 0$ 、 $1.50 \leq l/d \leq 4.0$

ここに、 $l$  : せん断スパン (cm)

$M_u$  : 終局曲げモーメント (全鉄筋を有効) (kgf·cm)

$P_w$  : せん断補強鉄筋比 (%)

$S_u$  : せん断耐力、式 (5)、(6)、(7) による (kg)

$$S_u = S_c + S_o$$

せん断補強鉄筋以外によるせん断耐力  $S_c$

$$1.5 \leq l/d < 2.5$$

$$S_c = 3.58(l/d)^{-1.166} \cdot f_c^{1/3} \cdot \beta_p \cdot \beta_a \cdot \beta_n \cdot b \cdot d \dots\dots\dots (5)^3$$

$$2.5 \leq l/d$$

$$S_c = 0.94(0.75 + 1.4 \cdot d/l) \cdot f_c^{1/3} \cdot \beta_p \cdot \beta_a \cdot \beta_n \cdot b \cdot d \dots\dots\dots (6)^4$$

せん断補強鉄筋によるせん断耐力  $S_o$

$$S_o = A_w \cdot \sigma_{sy} \cdot z(\sin \theta + \cos \theta) / s \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $\beta_p = \sqrt[3]{100 \cdot P_t}$ 、 $\beta_a = \sqrt{100/d}$

$$\beta_n = 1 + 2 M_o/M_u$$

$f_c$  : コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$d$  : 部材の有効高さ (cm)

$P_t$  : 軸方向引張鉄筋比 ( $A_s/bd$ )

$A_s$  : 軸方向引張鉄筋

$M_o$  : 部材断面に引張応力が生じる限界の曲げモーメント (kgf·cm)

$A_w$  : 区間  $s$  中の 1 組のせん断補強鉄筋の断面積 (cm<sup>2</sup>)

$\sigma_{sy}$  : せん断補強鉄筋の降伏点応力度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$\theta$  : せん断補強鉄筋が部材軸となす角度 (°)

$$z = d/1.15$$

### 3. ノモグラムの作成

2. で述べた  $\delta_{y0}$ 、 $\delta_{y1}$ 、 $\delta_{u1}$  を求めるためには、若干煩雑な計算を必要とするので、実設計においては、式 (1) ~ (7) の関係を用いて、これらを比較的容易に求められるノモグラムを作成し、これを用いることとする。

以下に、各ノモグラムについて説明する。

① ノモ1 (図-4) ノモ1は  $l/d$  と  $P_t$  から  $\delta_{y0}$  を求めるノモグラムである。設計部材の有効高さを  $d$  (cm) とした場合、ノモ1により求められる値に、 $d/100$  を乗じることにより設計部材の  $\delta_{y0}$  を求めることができる。

② ノモ2 (図-5) ノモ2は  $D/\phi$  と  $P_t$  から  $\delta_{y1}$  を求めるノモグラムである。設計部材のせん断スパン比を  $x$  とした場合、ノモ2により求められる値に  $x$  を乗じることにより設計部材の  $\delta_{y1}$  を求めることができる。

③ ノモ3 (図-6) ノモ3は  $D/\phi$  と  $P_t$  から  $\delta_{u1}$  を求めるノモグラムである。設計部材のせん断スパン比

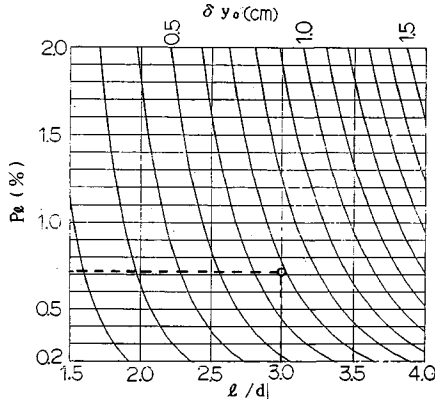


図-4 ノモ1 ( $\delta_{y_0}$ を求めるノモグラム)

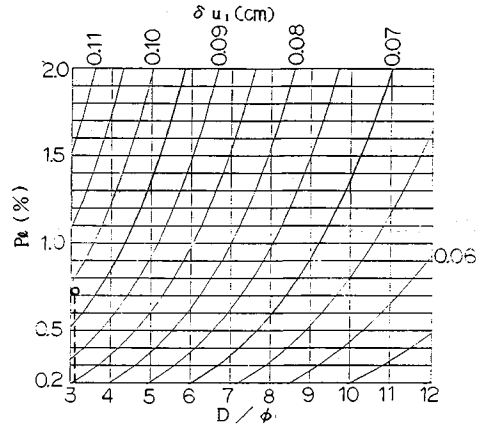


図-6 ノモ2 ( $\delta_{u_1}$ を求めるノモグラム)

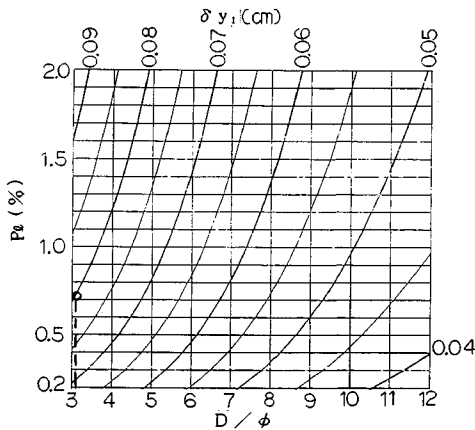


図-5 ノモ2 ( $\delta_{y_1}$ を求めるノモグラム)

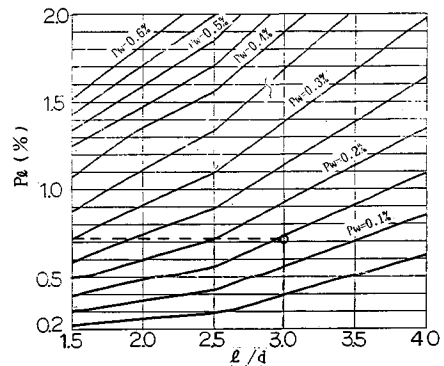


図-7 ノモ4 (靱性率4以上を確保するせん断補強鉄筋 ( $P_w$ )を求めるノモグラム)

を  $x$  とした場合、ノモ3により求められる値に  $x$  を乗じることにより設計部材の  $\delta_{u_1}$  を求めることができる。

したがって、ノモ1, 2, 3より  $\delta_{y_0}$ ,  $\delta_{y_1}$ ,  $\delta_{u_1}$  を求め、さらに部材の  $S_c$ ,  $M_u$  を算定することにより、必要な靱性率に対するせん断補強鉄筋比を算定できる。

④ ノモ4 (図-7) ノモ4は引張鉄筋比 ( $P_t$ ) と、せん断スパン比 ( $l/d$ ) から、所要靱性率を確保するためのせん断補強鉄筋比 ( $P_w$ ) を求めるノモグラムである。ここでは、例として靱性率4を確保するとした場合を示している。ノモ4は部材の有効高さが150 cmで軸力が  $15 \text{ kgf/cm}^2$  の場合のノモグラムである。軸力が小さくなると、所要の靱性率を確保するためのせん断補強鉄筋量が減少する傾向にある。通常の橋脚は軸力は  $15 \text{ kgf/cm}^2$  以下であるので、このノモグラムを用いて靱性率4以上を確保するためのせん断補強鉄筋量を求めても、安全側の値を与えるので、実用上は十分である。

なお、ノモ4については、式(4)の80%信頼限界式(式(8))を用いて作成している。

$$\mu_0 = -1.6 + 5.6(S_u \cdot l/M_u) + (11.4 \cdot P_w - 1.4) \cdot P_w \quad \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 $0.90 \leq (S_u \cdot l/M_u) \leq 2.7$ ,  $P_w \leq 0.60\%$   
 $(11.4 \cdot P_w - 1.4) \geq 0$ ,  $1.50 \leq l/d \leq 4.0$

#### 4. ノモグラムの使用例

以下に、図-8に示すような断面諸元をもつRC橋脚を用いてノモグラムを用いる場合の計算例を示す。

##### (1) 靱性率を求める計算

(ノモ1, 2, 3を使用する場合)

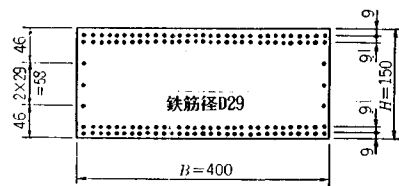


図-8 橋脚の断面諸元

計算条件

$$l/d=3.0, N=962.1 \text{ tf}, f_c=240 \text{ kgf/cm}^2, \\ \sigma_{sv}=3500 \text{ kgf/cm}^2, P_w=0.15\%, \phi=2.9 \text{ cm}$$

図-8より,  $M_u=2441.42 \text{ tf}\cdot\text{m}^{5),6)}$ 

せん断耐力を求める際の軸方向引張鉄筋は, 引張側外縁鉄筋(2×31本)と中立軸よりも引張側にある側鉄筋とを有効として, 軸方向引張鉄筋比を求める<sup>7)</sup>.

$$A_s=(\sum d_i \cdot A_{si})/d \\ = (199.1 \times 141.0 + 199.1 \times 132 + 12.8 \\ \times 104 + 12.8 \times 75 + 12.8 \times 46)/141 \\ = 405.9 \text{ cm}^2$$

$$P_i = A_s / b d = 405.9 / (400 \times 141.0) = 0.0072$$

せん断補強鉄筋以外によるせん断耐力は, 式(6)を用いて求める.

$$S_c = 0.94 \times (240)^{1/3} \times (0.75 + 1.4 \times 0.33) \\ \times \sqrt[3]{100 \cdot 0.0072} \times \sqrt[3]{100/141} \times (1 + 2 \times 240.5 / \\ 2441.42) \times 400 \times 141 = 391.997 \times 10^3 \text{ kgf} \\ (M_0 = N \cdot D / 6 = 962.1 \times 1.5 / 6 = 240.5 \text{ tf}\cdot\text{m})$$

せん断補強鉄筋によるせん断耐力は, 式(7)を用いて求める.

$$S_o = 0.0015 \times 3500 \times 400 \times 141 / 1.15 = 257.48 \times 10^3 \text{ kgf}$$

したがって, せん断耐力  $S_u$  は

$$S_u = (391.997 + 257.48) \times 10^3 = 649.48 \times 10^3 \text{ kgf}$$

躯体のみの靱性率 ( $\mu_0$ ) を式(4)より求める.

$$\mu_0 = -1.9 + 6.6 \times 649.48 \times 4.231 / 2441.42 \\ + (13 \times 0.15 - 1.6) \times 0.15 = 5.58$$

図-4, 5, 6より

$$\delta_{y0} = 0.68 \times 141 / 100 = 0.96 \text{ cm}$$

$$(D/\phi = 9/2.9 = 3.1)$$

$$\delta_{y1} = 0.080 \times 3.0 = 0.24 \text{ cm}$$

$$\delta_{u1} = 0.098 \times 3.0 = 0.29 \text{ cm}$$

橋脚の靱性率 ( $\mu$ ) を式(1)により求める.

$$\mu = (5.58 \times 0.96 + 0.29) / (0.96 + 0.24) = 4.70$$

(2) 靱性率  $\mu \geq 4$  とするための帯鉄筋量の計算  
(ノモ4を使用する場合)

計算条件

$$l/d=3.0, P_i=0.72\%$$

図-7より  $P_w=0.14\%$  を得る.

## 5. おわりに

ノモグラムを使用してRC橋脚の地震時変形性能を確保するためのせん断補強鉄筋量を計算する手法について示した. なお, 本式の適用は  $1.5 \leq l/d \leq 4$  と通常最も靱性の問題の生ずる範囲としているが, 文献8)には  $1.5 \leq l/d \leq 5.5$  の範囲に適用しても十分な精度が得られたことが示されている.

## 参考文献

- 1) 石橋・吉野：鉄筋コンクリート橋脚の地震時変形能力に関する研究, 土木学会論文集, 第390号/V-8, pp. 57~66, 1988年2月.
- 2) 周 礼良・二羽淳一郎・岡村 甫：マッシブなコンクリート中の異形鉄筋の付着モデル, 第2回RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集, 日本コンクリート工学協会, pp. 45~52, 1983.10.
- 3) 石橋・松田・斉藤：少数本のくいを用いたフーチングのせん断設計について, 土木学会論文集, 第377号, pp. 197~204, 1983.9.
- 4) 二羽・山田・横沢・岡村：せん断補強鉄筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, 第372号/V-5, pp. 167~176, 1986.8.
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書, 設計編, 昭和61年制定.
- 6) 土木学会：建造物設計標準(鉄筋コンクリート構造物及び無筋コンクリート構造物・プレストレストコンクリート鉄道橋), 昭和58年2月.
- 7) 石橋・斉藤・寺田：せん断スパン比の小さいRCはりのせん断補強効果について, コンクリート工学年次論文報告集, pp. 311~316, 1987年.
- 8) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物のじん性とその評価法に関するコロキウム委員会報告, March 28, 29, 1988.

(1988.11.7・受付)