

# 鉄筋コンクリートはりの破壊荷重に 関する実験的研究

正 員 山 田 順 治\*

## EXPERIMENTAL RESEARCH ON THE BREAKING LOAD OF THE REINFORCED CONCRETE BEAMS

(JSCE May 1954)

Junji Yamada, C.E. Member

**Synopsis** In view of his test results of a group of many reinforced concrete beams, the author showed that there was remarkable difference between the experimental breaking load of the reinforced concrete beam and the calculated breaking load based on elastic theory, and obtained a simple general formula to calculate the reasonable breaking load from the test results of a group of reinforced concrete beams, and this paper describes on this general formula.

**要旨** 著者の一連の鉄筋コンクリートはりの実験結果から、従来の弾性理論による計算破壊荷重と実測破壊荷重と相当の違いがあり、また、アメリカのように弾性係数比 $n$ をコンクリートの強度の函数として計算しても相当の違いがあつて、問題を解決するものでないことを示した。よつて実験結果をもととして、はりの曲げ圧縮応力度は円柱形供試体の強度の1.2~1.3倍程度に考えてよいことを実験結果をもつて示し、鉄筋コンクリートはりの破壊時におけるコンクリートのひずみの実用式を提案し、鉄筋コンクリートはりに亀裂の生じた場合の鉄筋応力度、附着強度等を論じ、これらの数値を用いて、限界鉄筋比を求める著者の式を提案し、はりの鉄筋比がこれより小さい場合と、大きい場合とについて、破壊荷重を求める合理的な実用式

を示したものである。

### 1. 実験破壊荷重と弾性理論による計算破壊荷重との相違

著者の行つた、2種類のセメントを使用した9型式の総計72本に及ぶ鉄筋コンクリートはりの実験破壊荷重<sup>1)</sup>と、弾性理論による計算破壊荷重との相違をみてみよう。

鉄筋コンクリートはりの鉄筋による破壊曲げモーメントと、コンクリートによる破壊曲げモーメントのうち、小さい方の曲げモーメントで、鉄筋コンクリートはりは破壊すべきであるから、小さい方とつて比較してみると表-1のごとくであり、これを図示すれば図-1のごとくである。

表-1

(日本社普通セメント使用)

型 式	材 令 4 週				材 令 13 週			
	計 算 破 壊 曲 げ モ ー メ ン ト kg-cm	同左荷重 kg	実 際 破 壊 荷 重 kg	実 際 破 壊 荷 重 計 算 破 壊 荷 重	計 算 破 壊 曲 げ モ ー メ ン ト kg-cm	同左荷重 kg	実 際 破 壊 荷 重 kg	実 際 破 壊 荷 重 計 算 破 壊 荷 重
I	鉄 筋 64 310	2 144	2 608	1.22	鉄 筋 64 310	2 144	2 558	1.19
II	鉄 筋 116 562	3 885	5 008	1.29	鉄 筋 116 562	3 885	4 633	1.19
III	鉄 筋 161 402	5 380	6 133	1.14	鉄 筋 161 402	5 380	6 408	1.19
IV	コンクリート 152 047	5 068	8 158	1.61	鉄 筋 211 254	7 042	8 858	1.26
V	コンクリート 142 403	4 747	8 983	1.89	コンクリート 203 292	6 776	9 708	1.43
VI	コンクリート 151 088	5 036	10 008	1.99	コンクリート 236 442	7 881	10 608	1.36
VII	コンクリート 148 324	4 944	11 408	2.31	コンクリート 205 130	6 838	12 358	1.81
VIII	コンクリート 148 995	4 967	10 508	2.12	コンクリート 208 811	6 960	12 258	1.76
IX	コンクリート 167 665	5 589	11 358	2.03	コンクリート 228 152	7 605	14 608	1.92

\* 建設省土木研究所

(小野田社早強セメント使用)

I <sub>0</sub>	鉄筋	64 310	2 144	2 583	1.21	鉄筋	64 310	2 144	2 633	1.23
II <sub>0</sub>	鉄筋	116 562	3 885	4 908	1.26	鉄筋	116 562	3 885	4 908	1.26
III <sub>0</sub>	鉄筋	161 402	5 380	7 158	1.33	鉄筋	161 402	5 380	6 733	1.26
IV <sub>0</sub>	コンクリート	192 924	6 431	9 033	1.40	鉄筋	211 254	7 042	8 958	1.27
V <sub>0</sub>	コンクリート	193 471	6 449	9 233	1.43	鉄筋	228 858	7 629	9 233	1.21
VI <sub>0</sub>	コンクリート	166 785	5 559	12 008	2.16	コンクリート	232 518	7 751	11 258	1.45
VII <sub>0</sub>	コンクリート	203 026	6 767	12 358	1.83	コンクリート	242 311	8 077	12 258	1.52
VIII <sub>0</sub>	コンクリート	214 249	7 142	13 008	1.82	コンクリート	268 627	8 954	14 358	1.60
IX <sub>0</sub>	コンクリート	238 764	7 959	14 108	1.80	コンクリート	230 274	7 679	15 908	2.07

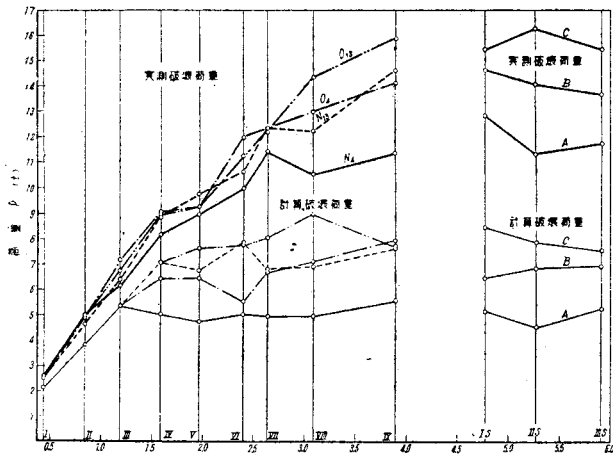
以上から見ると、著者の行つた一連の鉄筋コンクリートはりでは、限界鉄筋比以上のはりがほとんどないことがわかり、限界鉄筋比以上の鉄筋コンクリートは\*

りの破壊時の性質を判然とさせるために、鉄筋比のさらに大きい3種類について同一寸法のはりを追加製作して実験を行つた。その詳細は表-2のごとくである。

表-2

はりの型式	コンクリートの種類	$\sigma_{28}$ kg/cm <sup>2</sup>	使用鉄筋本数-径 mm	有効高さ $d$ cm	鉄筋比 $\rho$ %	弾性理論による計算 破壊荷重	実測破壊荷重 kg
I S	A	153	} 6- $\phi$ 13 2- $\phi$ 16	15.65	4.78	5 148	13 600
	B	192				5 488	12 100
	C	250				8 480	14 900 14 370 15 350 15 570
II S	A	143	} 4- $\phi$ 13 4- $\phi$ 16	15.83	5.27	4 655	11 800
	B	197				6 977	10 950
	C	224				7 933	14 000 14 050 16 400 16 150
III S	A	153	} 2- $\phi$ 13 6- $\phi$ 16	15.55	5.91	5 367	11 850
	B	201				7 050	11 650
	C	219				7 682	13 920 13 500 16 000 14 900

図-1



この追加鉄筋コンクリートはりの結果も、図-1に図示した。

これからわかることは、現在用いられている弾性理論に基づく設計計算式では、あらゆる鉄筋比を有する

鉄筋コンクリートはりすべてに一樣の安全率を期待することができない。

また、わが国ではヤング係数比  $n$  の値は 15 として一定値を用いているが、アメリカでは、 $n$  の値をコンクリートの圧縮強度の函数として、 $n = 30\,000/\sigma_c$  lb/in<sup>2</sup> すなわち  $n = 2\,109/\sigma_c$  kg/cm<sup>2</sup> という式を用いて計算している。著者の実験結果にこれを用いて、 $n = 15$  の一定値の場合と比較してみたが、大体において、 $n$  の値の多少の変化は、計算破壊荷重の比の値に大した影響は与えないことがわかつた。すなわち、ヤング係数比  $n$  の値を変化させても実測破壊荷重に一致するような計算破壊荷重を求めることはできないのである。

2. 鉄筋コンクリートはりの破壊時におけるコンクリートの曲げ圧縮応力度

鉄筋コンクリートはりの圧縮側における最大曲げ圧縮応力度については、Saliger 氏は角柱供試体の強度

以上の強度になりえないとしており、Schreyer 氏、Melan 氏らは正立方体供試体の強度に達するといひ、Brandtzaeg 氏、Bittner 氏、Whitney 氏、Cox 氏等は円柱形標準供試体の強度としている。

しかるに一方これらと大いに趣きを異にする理論や実験結果があり、高橋逸夫博士の説<sup>2)</sup>によれば、鉄筋コンクリートはりの圧縮側コンクリートが破壊する場合には、最大応力度をうける所は圧縮側の一部分に過ぎないから立方体供試体の強度より大きな応力度に達しうるものとされており、また、Herr 氏は<sup>3)</sup>鉄筋コンクリートはりの曲げ圧縮応力度は円柱形供試体の強度の 1.37~1.44 倍になることを実験的に証明している。

また、木村二郎氏によれば<sup>4)</sup>、供試体の両端面にフェルトをはさんだ場合に応力が最もよく等布され、信頼すべき結果がえられるとしており、普通の状態を試験した場合より 1.5 倍以上になっている。

以上から鉄筋コンクリートはりにおける最大曲げ圧縮応力度は円柱形供試体の強度の 1.2~1.3 倍程度に考えても差支えないものと思われる。

一方、著者の一連の鉄筋コンクリートはりの実験結果から、最大曲げ圧縮応力度は円柱形供試体の強度のどれくらいに当るかをしらべてみた。いま、鉄筋コンクリートはりの最大曲げ圧縮応力度を  $\sigma_r$  をもつて表わし、相対応力度値  $\alpha\sigma$ 、最大曲げ圧縮応力度を円柱形供試体の強度  $\sigma$  の  $\alpha$  倍で表わせば、内力によるモーメント  $M_i$  は、

$$M_i = vx \sigma_r bz = vx bz \alpha \sigma v$$

となり、これが外力によるモーメントと等しくなければならぬから、

$$\alpha \sigma = \frac{M}{vxbz \sigma_r}$$

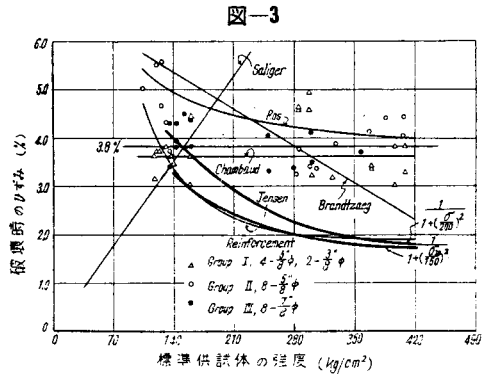
から  $\alpha\sigma$  の値が求まり、一方円柱形供試体の強度  $\sigma$  の実験値があるので  $\alpha$  の値が求まる。

この計算を、鉄筋コンクリートはりのひずみが円柱形標準供試体を圧縮したときの最大応力度に達するときのひずみ以上でも、応力度はそのままとするという仮定の下に、 $\sigma_r$  があまり小さくない IV 型以上のはり

について行い、 $\alpha$  の値の度数分布図を求めると 図-2 のごとくなり、これからも  $\alpha=1.2\sim 1.3$  程度に考えて差支えないことがわかる。

### 3. 鉄筋コンクリートはりの破壊時におけるコンクリートのひずみ

鉄筋コンクリートはりの破壊時の最大ひずみについては 図-3 のごとく種々の異論がある。従つて本論文ではコンクリートの強度に応じてどれくらいのひずみをとることにするかの問題であつて、 図-3 に最も妥



当と思われる曲線を描き、 図-4 に示すような  $\beta$  の値を用いて簡単な実用式を求めれば、鉄筋コンクリートはりの中央部分にスターラップのあるものには、

$$\beta = \frac{1}{1 + \left(\frac{\sigma}{200}\right)^2} \dots\dots\dots (1)$$

となり、はりの中央部分にスターラップのないものには、

$$\beta = \frac{1}{1 + \left(\frac{\sigma}{150}\right)^2} \dots\dots\dots (2)$$

となり、本文にはこの  $\beta$  の値を使用することにした。

### 4. 鉄筋コンクリートはりにおける亀裂の影響

鉄筋コンクリートはりに亀裂が入つた場合、亀裂の入つた部分での鉄筋の性質は、切り込みのある棒鋼を引張つた場合と同様に考えられる。これについては、黒田正夫氏<sup>5)</sup>、中西不二夫氏<sup>6)</sup>、J. Marein 及び F.D. Cotterman 氏<sup>7)</sup>等の研究もあるが、著者は特に 図-5 のごとき直径 9 mm の丸鋼から試験片を作製して実験を行つた。その結果は表-3 のごとくである。

図-2

$\alpha$ の 値	回数	全回数に対する百分率
0.86 ~ 0.95	4	27.77
0.96 ~ 1.05	7	48.61
1.06 ~ 1.15	12	83.33
1.16 ~ 1.25	38	263.89
1.26 ~ 1.35	38	263.89
1.36 ~ 1.45	16	111.11
1.46 ~ 1.55	14	97.22
1.56 ~ 1.65	8	55.55
1.66 ~ 1.75	2	13.89
1.76 ~ 1.85	3	20.83
1.86 ~ 1.95	1	6.94
1.96 ~ 2.05	1	6.94

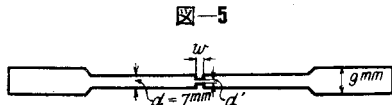


図-5

従つて鉄筋コンクリートはりの鉄筋比が小さく、はりの引張側に生じた亀裂が急激に発達するような場合、十分な付着力が働いていたとしても降伏点強度の上昇は20~30%程度あるものと思われる。従つて鉄筋の実際のひずみは変化しており、亀裂箇所では最大で、亀裂間の中央では最小である。よつて鉄筋コンクリートはりに亀裂が生じた場合、鉄筋応力度、付着応力度等については図-6のごとき分布が考えられる。

表-3

$\frac{d'}{d}$	$w$ (mm)	降伏点強度
1	0	3 120 kg/cm <sup>2</sup> = K
0.9	0.62	1.27 K
0.9	1.0	1.28 K
0.93	2.0	1.08 K
0.94	4.7	1.05 K
0.83	0.62	1.33 K

図-6

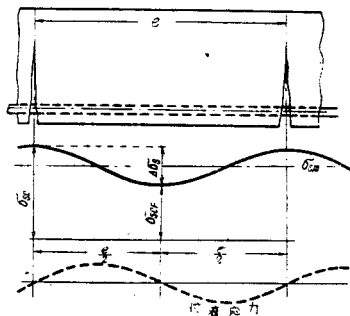
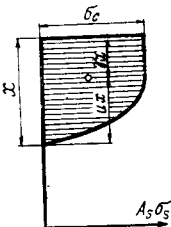


図-7



いま、断面の一般的記号を図-7のごとく用いれば、亀裂箇所では、

$$M = A_s \sigma_{sc} (d - r_1 x_1) \quad \dots \dots \dots (3)$$

であり、中央部では、

$$M = A_s \sigma_{sc} F (d - r_2 x_2) + T' z' \quad \dots \dots \dots (4)$$

である。近似的には、 $x_1 = x_2 = x$  と考えられ、 $r$  についても同様に  $r_1 = r_2 = r$  とおくことができる。従つて、

$$A_s (d - r x) (\sigma_{sc} - \sigma_{sc} F) = T' z' = v_2 (h - x) b \sigma_{ct} z'$$

$$\therefore \Delta \sigma_s = \sigma_{sc} - \sigma_{sc} F = \frac{v_2 (h - x) b \sigma_{ct} z'}{A_s (d - r x)} \quad \dots \dots \dots (5)$$

いま、 $v_2 = 0.832$ ,  $h = 1.1 d$ ,  $\sigma_{ct} = \frac{1}{10} \sigma$  を代入すれば、式 (5) は

$$\Delta \sigma_s = \frac{0.832 (1.1 - x) b \frac{\sigma}{10} z'}{p b d (d - r x)}$$

となり、一方平衡条件から、

$$\{v_0 + (1 - v_0) \beta\} b x \sigma_c = p b d \sigma_{sc}$$

であるから、

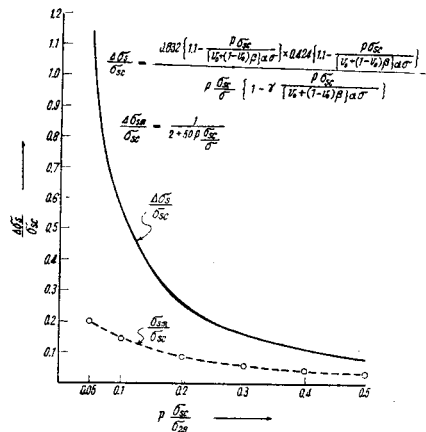
$$x = \frac{p \sigma_{sc}}{\{v_0 + (1 - v_0) \beta\} \sigma_c} d$$

であり、これと  $z' = 0.424 (1.1 d - x)$  及び  $\sigma_c = \alpha \sigma$  を用いて、

$$\frac{\Delta \sigma_s}{\sigma_{sc}} = \frac{0.0832 \left\{ 1.1 - \frac{p \sigma_{sc}}{\{v_0 + (1 - v_0) \beta\} \alpha \sigma} \right\}}{p \frac{\sigma_{sc}}{\sigma} \left\{ 1 - r \right\}} \times 0.424 \left\{ 1.1 - \frac{p \sigma_{sc}}{\{v_0 + (1 - v_0) \beta\} \alpha \sigma} \right\} \times \frac{p \sigma_{sc}}{\{v_0 + (1 - v_0) \beta\} \alpha \sigma} \quad (6)$$

を得る。従つて  $\Delta \sigma_s / \sigma_{sc}$  は  $\beta$  及び  $p \sigma_{sc} / \sigma$  の関数であることがわかり、この関係を図示すると図-8のごとくなる。

図-8



付着応力度の分布を図-6の点線のごとく仮定すると、

$$A_s \Delta \sigma_s = \frac{A_s}{\pi D^2} \cdot \pi D \cdot \frac{1}{4} e \tau_1$$

となり、 $D$  は鉄筋の直径である。

$$\therefore \Delta \sigma_s = \frac{e}{D} \tau_1$$

従つて鉄筋の引張応力度は図-6のように波状形になり、その最大値は亀裂の点にある。また、鉄筋のひずみを求めるための平均の鉄筋応力度は、

$$\sigma_{sm} = \sigma_{sc} - \Delta \sigma_{sm}$$

であり、 $\Delta \sigma_{sm} \doteq \frac{1}{2} \Delta \sigma_s$  と考えられる。

鉄筋比の小さいはりなどでは亀裂の巾も大きく、付着力も亀裂の周辺では破壊されることを考慮すると、 $\Delta \sigma_{sm} / \sigma_{sc}$  は図-8のごとく、近似的に次のごとく考

られる。

$$\frac{d\sigma_{sm}}{\sigma_{sc}} = \frac{1}{2 + 50 p \frac{\sigma_{sc}}{\sigma}} \dots\dots\dots(8)$$

5. 鉄筋コンクリートはりの破壊荷重

鉄筋コンクリートはりの破壊の場合、鉄筋の応力度  $\sigma_s$  の大小によつて、(1)  $\sigma_s > \sigma_{sy}$  限界鉄筋比以下の場合、(2)  $\sigma_s = \sigma_{sy}$  限界鉄筋比の場合、(3)  $\sigma_s < \sigma_{sy}$  限界鉄筋比以上の場合の3つの場合が考えられる。

(1)  $\sigma_s > \sigma_{sy}$  の場合 鉄筋比が比較的小さい鉄筋コンクリートはりの場合には、コンクリートの曲げ圧縮応力度が最大値に達しないで、鉄筋コンクリートはりが破壊することも考えられる。

従つて亀裂のある断面について考えると、

$$M = A_s \sigma_{sc} z = A_s \sigma_{sc} (d - r x) \dots\dots\dots(9)$$

であり、平衡条件から  $v b x \sigma_s = A_s \sigma_{sc}$  であるから、

$$x = \frac{A_s \sigma_{sc}}{v b \sigma_s}$$

となる。

鉄筋応力度が鉄筋の降伏点強度以上に達して破壊する場合には、 $\sigma_{sm} > \sigma_{sy}$  と考えられる。

$$\sigma_{sm} = \sigma_{sc} - d \sigma_{sm} = \sigma_{sc} \left( 1 - \frac{1}{2 + 50 p \frac{\sigma_{sc}}{\sigma}} \right)$$

$$\therefore \sigma_{sc} = \frac{\sigma_{sm}}{1 - \frac{1}{2 + 50 p \frac{\sigma_{sc}}{\sigma}}} \dots\dots\dots(10)$$

上式は実用上次のように考えても差支えない。

$$\sigma_{sc} = \frac{\sigma_{sm}}{1 - \frac{1}{2 + 50 p \frac{\sigma_{sm}}{\sigma}}}$$

この場合には  $\sigma_{sm} > \sigma_{sy}$  であるから、

$$\sigma_{sc} = \frac{\sigma_{sy}}{1 - \frac{1}{2 + 50 p \frac{\sigma_{sy}}{\sigma}}}$$

である。従つて式(9)は次のごとくなる。

$$\begin{aligned} \frac{M}{bd^2\sigma} &= \frac{p\sigma_{sy}}{\sigma} \frac{1}{1 - \frac{1}{2 + 50 p \frac{\sigma_{sy}}{\sigma}}} \\ &\times \left[ 1 - \frac{r}{\alpha v \sigma_r} \frac{1}{1 - \frac{1}{2 + 50 p \frac{\sigma_{sy}}{\sigma}}} p \frac{\sigma_{sy}}{\sigma} \right] \dots\dots\dots(11) \end{aligned}$$

一般に鉄筋コンクリートはりが破壊するとき、鉄筋の降伏による場合でも、圧縮側のコンクリートの圧潰

がおもな原因である。また、コンクリートが破壊しないとしても  $r/\alpha v \sigma_r$  の値は実用的には 0.4 と考えてよい。従つて、

$$\begin{aligned} \frac{M}{bd^2\sigma} &= p \frac{\sigma_{sy}}{\sigma} \frac{1}{1 - \frac{1}{2 + 50 p \frac{\sigma_{sy}}{\sigma}}} \\ &\times \left[ 1 - 0.4 \frac{1}{1 - \frac{1}{2 + 50 p \frac{\sigma_{sy}}{\sigma}}} p \frac{\sigma_{sy}}{\sigma} \right] \dots\dots\dots(12) \end{aligned}$$

が鉄筋コンクリートはりの破壊時の曲げモーメントを求める式となる。これより破壊荷重を求める。

(2)  $\sigma_s = \sigma_{sy}$  の場合 限界鉄筋比について、平衡の条件より、

$$\frac{x}{d} = \frac{p_0 \frac{\sigma_{sy}}{\sigma}}{\alpha \{v_0 + (1 - v_0)\beta\} \times \left\{ 1 - \frac{1}{2 + 50 p_0 \frac{\sigma_{sy}}{\sigma}} \right\}} \dots\dots\dots(13)$$

であり、一方平面保持の条件から、鉄筋とコンクリートとの弾性係数比を  $n$  とすると、

$$\frac{x}{d} = \frac{1}{\frac{\sigma_{sy}(1-\beta)}{2\alpha n} + 1} \dots\dots\dots(14)$$

なる関係がえられるので、式(13)と式(14)から次式がえられる。

$$p_0 \frac{\sigma_{sy}}{\sigma} = K = \frac{\alpha \{v_0 + (1 - v_0)\beta\} \left\{ 1 - \frac{1}{2 + 50 p_0 \frac{\sigma_{sy}}{\sigma}} \right\}}{\frac{\sigma_{sy}(1-\beta)}{2\alpha n} + 1}$$

しかるに、

$$p_0 \frac{\sigma_{sy}}{\sigma} = 0.4 \sim 0.7$$

であるから、

$$1 - \frac{1}{2 + 50 p_0 \frac{\sigma_{sy}}{\sigma}}$$

の値は 0.955~0.923 の間にあり、大体平均値として、0.94 とすることができる。従つて、上式は次のごとくなる。

$$p_0 \frac{\sigma_{sy}}{\sigma} K = \frac{0.94 \alpha \{v_0 + (1 - v_0)\beta\}}{\frac{\sigma_{sy}(1-\beta)}{2\alpha n} + 1} \dots\dots\dots(15)$$

上式中に弾性係数比  $n$  の値が入っているが、これについては特別な考慮を払わなければならない。一般に鉄筋コンクリート用コンクリートの強度は、150~

300 kg/cm<sup>2</sup> ぐらいであるが、この範囲内では  $E_0 = 125\,000 + 1\,000\sigma$  kg/cm<sup>2</sup> と考えてよい。従つて、

$$n = \frac{E_s}{E_0} = \frac{E_s}{125\,000 + 1\,000\sigma}$$

となる。鉄筋コンクリートはりの場合には  $\sigma$  の  $\alpha$  倍になるから、

$$n = \frac{E_s}{E_0} = \frac{E_s}{125\,000 + 1\,000\alpha\sigma} \dots\dots\dots(16)$$

となる。\*

\*著者の行つた一連の鉄筋コンクリートはりについて、式(15)を用い、また既往の各研究者の式により限界鉄筋比を求めると表-4のごとくなる。ただし、式(15)で、

$$\alpha = 1.3, \beta = \frac{1}{1 + \left(\frac{\sigma}{200}\right)^2}$$

を使用した場合である。

表-4

鉄筋コンクリートはりの種類	$\sigma$ (kg/cm <sup>2</sup> )	式(16) (%)	Jensen 氏 (%)	Whitney 氏 (%)	Cox 氏 (%)	Herr 氏 (%)	$n=15$ による従来の弾性理論 (%)
N <sub>1</sub>	151	3.46	2.69	2.09	2.15	2.44	0.93
O <sub>4</sub>	191	4.05	2.98	2.64	2.72	2.82	1.34
N <sub>13</sub>	221	4.28	3.19	3.05	3.15	3.10	1.68
O <sub>13</sub>	240	4.49	3.30	3.32	3.42	3.29	1.99

(3)  $\sigma_s < \sigma_{sy}$  の場合 すなわち  $p > p_0$  の場合

平面保持の法則から、

$$\frac{x}{d} = k = \frac{1}{\frac{\sigma_{sc}(1-\beta)}{2\alpha\sigma n} + 1} \dots\dots\dots(14)$$

となり、また平衡の条件から、

$$\frac{x}{d} = k = p \frac{\sigma_{sc}}{\sigma} \times \frac{1}{\alpha\{v_0 + (1-v_0)\beta\} \times \left\{1 - \frac{1}{2 + 50p \frac{\sigma_{sy}}{\sigma}}\right\}} \dots\dots\dots(17)$$

となる。しかるに  $p > p_0$  の場合は、実用上、

$$\frac{1}{2 + 50p \frac{\sigma_{sy}}{\sigma}} \approx 0$$

と考へても差支えない。

従つて式(17)は次のごとくなる。

$$k = p \frac{\sigma_{sc}}{\sigma} \frac{1}{\alpha\{v_0 + (1-v_0)\beta\}} \dots\dots\dots(18)$$

従つて式(14)、式(18)より、

$$k = \frac{-1 + \sqrt{1 + 2\frac{\{v_0 + (1-v_0)\beta\}}{pn}(1-\beta)}}{\frac{\{v_0 + (1-v_0)\beta\}}{pn}(1-\beta)} \dots\dots\dots(19)$$

となり、この  $k$  の値を用いて、破壊荷重を求める式は次式のごとくなる。

$$\frac{M}{bd^2\sigma} = \alpha\{v_0 + (1-v_0)\beta\}k(1-rk) \dots\dots(20)$$

6. 鉄筋コンクリートはりの破壊荷重を求める実用式

鉄筋コンクリートはりの破壊荷重を求めるのに、その鉄筋コンクリートはりの鉄筋比が限界鉄筋比  $p_0$  より小さい場合と、大きい場合とに分けて、それぞれ次式を用いばよい。

(1) 鉄筋比  $p$  が限界鉄筋比  $p_0$  より小さい場合

$$\frac{M}{bd^2\sigma} = p \frac{\sigma_{sy}}{\sigma} \frac{1}{1 - \frac{1}{2 + 50p \frac{\sigma_{sy}}{\sigma}}} \times \left[ 1 - 0.4 \frac{1}{1 - \frac{1}{2 + 50p \frac{\sigma_{sy}}{\sigma}}} p \frac{\sigma_{sy}}{\sigma} \right]$$

(2) 鉄筋比  $p$  が限界鉄筋比  $p_0$  より大きい場合

$$\frac{M}{bd^2\sigma} = \alpha\{v_0 + (1-v_0)\beta\}k(1-rk)$$

ただし、

$$k = \frac{-1 + \sqrt{1 + 2\frac{\{v_0 + (1-v_0)\beta\}}{pn}(1-\beta)}}{\frac{\{v_0 + (1-v_0)\beta\}}{pn}(1-\beta)}$$

(3) 限界鉄筋比

$$p_0 \frac{\sigma_{sy}}{\sigma} = \frac{0.94 \alpha\{v_0 + (1-v_0)\beta\}}{2\alpha\sigma n} + 1$$

これらの式を用いて、著者が行つた一連の鉄筋コンクリートはりの破壊時の  $\frac{M}{bd^2\sigma}$  について、計算値と実験結果による実測値とを比較すると、表-5~9のごとくである。

表-5 (日本社普通セメント, 材令4週)

型 式	$\rho$	$\sigma$	$\sigma_{sy}$	$\rho \frac{\sigma_{sy}}{\sigma}$	$\frac{M}{bd^2\sigma}$ 計算値	$\frac{M}{bd^2\sigma}$ 実測値	実測値 計算値
I型 No. 1 No. 2	0.0044	143	3 120	0.096	0.108	0.106	0.981
II型 No. 5 No. 6	0.00838	164	"	0.159	0.164	0.161 0.197	0.982 1.201
III型 No. 9 No. 10	0.01184	173	"	0.214	0.210	0.208 0.207	0.990 0.986
IV型 No. 13 No. 14	0.01578	145	"	0.340	0.307	0.337 0.321	1.097 1.046
V型 No. 17 No. 18	0.01971	145	"	0.424	0.365	0.394 0.429	1.078 1.164
VI型 No. 21 No. 22	0.02399	154	"	0.486	0.403	0.469 0.437	1.164 1.084
VII型 No. 25 No. 26	0.02630	141	"	0.582	0.456	0.535 0.540	1.173 1.184
VIII型 No. 29 No. 30	0.03084	137	3 300	0.743	0.530	0.493 0.527	0.930 0.994

 $(\rho > \rho_0)$ 

型 式	$\rho$	$\sigma$	$\sigma_{sy}$	$\frac{x}{d}$	$\frac{M}{bd^2\sigma}$ 計算値	$\frac{M}{bd^2\sigma}$ 実測値	実測値 計算値
IX型 No. 33 No. 34	0.03877	154	3 300	0.705	0.552	0.527 0.527	0.960 0.960

表-6 (小野田社早強セメント, 材令4週)

型 式	$\rho$	$\sigma$	$\sigma_{sy}$	$\rho \frac{\sigma_{sy}}{\sigma}$	$\frac{M}{bd^2\sigma}$ 計算値	$\frac{M}{bd^2\sigma}$ 実測値	実測値 計算値
I型 No. 1 No. 2	0.0044	171	3 120	0.080	0.092	0.088 0.086	0.957 0.937
II型 No. 5 No. 6	0.00838	190	"	0.138	0.146	0.150 0.152	1.027 1.041
III型 No. 9 No. 10	0.01184	190	"	0.194	0.194	0.224 0.219	1.155 1.129
IV型 No. 13 No. 14	0.01578	184	"	0.268	0.253	0.291 0.285	1.150 1.126
V型 No. 17 No. 18	0.01971	197	"	0.312	0.287	0.307 0.316	1.070 1.101
VI型 No. 21 No. 22	0.02399	170	"	0.440	0.375	0.486 0.497	1.300 1.325
VII型 No. 25 No. 26	0.02630	193	"	0.425	0.365	0.425 0.425	1.164 1.164
VIII型 No. 29 No. 30	0.03084	197	3 300	0.517	0.422	0.444 0.434	1.052 1.028
IX型 No. 33 No. 34	0.03877	225	"	0.569	0.450	0.424 0.488	0.942 1.084

表-7 (日本社普通セメント, 材令13週)

型 式	$\rho$	$\sigma$	$\sigma_{sy}$	$\rho \frac{\sigma_{sy}}{\sigma}$	$\frac{M}{bd^2\sigma}$ 計算値	$\frac{M}{bd^2\sigma}$ 実測値	実測値 計算値
I型 No. 3 No. 4	0.0044	228	3 120	0.060	0.072	0.0671 0.0621	0.931 0.862
II型 No. 7 No. 8	0.00838	234	"	0.112	0.122	0.121 0.115	0.992 0.943
III型 No. 11 No. 12	0.01184	247	"	0.150	0.167	0.148 0.155	0.886 0.928
IV型 No. 15 No. 16	0.01578	230	"	0.214	0.210	0.219 0.232	1.042 1.105
V型 No. 19 No. 20	0.01971	207	"	0.297	0.276	0.307 0.316	1.112 1.145
VI型 No. 23 No. 24	0.02399	241	"	0.311	0.286	0.314 0.300	1.099 1.048
VII型 No. 27 No. 28	0.02630	195	"	0.421	0.363	0.421 0.421	1.159 1.159
VIII型 No. 31 No. 32	0.03084	192	3 300	0.530	0.425	0.421 0.428	0.891 1.007
IX型 No. 35 No. 36	0.03877	215	"	0.595	0.423	0.377 0.494	0.891 1.176

表—8 (小野田社早強セメント, 材令 13 週)

型 式	$\rho$	$\sigma$	$\sigma_{sy}$	$\rho \frac{\sigma_{sy}}{\sigma}$	$\frac{M}{bd^2\sigma}$ 計算値	$\frac{M}{bd^2\sigma}$ 実測値	実測値 計算値
I型 No. 3 No. 4	0.0044	225	3 120	0.061	0.073	0.0654 0.0692	0.90 0.95
II型 No. 7 No. 8	0.00838	234	"	0.112	0.122	0.124 0.121	1.02 0.99
III型 No. 11 No. 12	0.01184	261	"	0.142	0.150	0.147 0.156	0.98 1.04
IV型 No. 15 No. 16	0.01578	251	"	0.196	0.196	0.209 0.209	1.07 1.07
V型 No. 19 No. 20	0.01971	253	"	0.243	0.233	0.239 0.240	1.03 1.03
VI型 No. 23 No. 24	0.02399	237	"	0.316	0.290	0.334 0.328	1.15 1.13
VII型 No. 27 No. 28	0.02630	237	"	0.346	0.312	0.346 0.341	1.11 1.09
VIII型 No. 31 No. 32	0.03084	247	3 300	0.412	0.356	0.386 0.386	1.08 1.08
IX型 No. 35 No. 36	0.03877	217	"	0.590	0.460	0.522 0.525	1.13 1.14

表—9 ( $\rho > \rho_0$ ; 追加実験の分, 材令 4 週)

型 式	$\rho$	$\sigma$	$\sigma_{sy}$	$\frac{x}{d}$	$\frac{M}{bd^2\sigma}$ 計算値	$\frac{M}{bd^2\sigma}$ 実測値	実測値 計算値	
I S	A	0.0478	153	3 300	0.738	0.577	0.686 0.611	1.19 1.06
	B	"	192	"	0.683	0.528	0.598 0.577	1.13 1.09
	C	"	250	"	0.620	0.478	0.473 0.480	0.99 1.00
II S	A	0.0527	143	"	0.758	0.579	0.623 0.579	1.08 1.00
	B	"	197	"	0.692	0.531	0.536 0.538	1.01 1.02
	C	"	224	"	0.662	0.507	0.551 0.543	1.09 1.07
III S	A	0.0591	153	"	0.770	0.589	0.606 0.596	1.03 1.01
	B	"	201	"	0.706	0.535	0.541 0.525	1.01 0.98
	C	"	219	"	0.682	0.519	0.570 0.531	1.10 1.02

著者が行つた一連の鉄筋コンクリートはりについての計算結果は、大体よく実験結果と一致している。追加実験の分の鉄筋コンクリートはりの  $\alpha$  は 1.3 とし計算した。

次に他の研究者が行つた鉄筋コンクリートはりの\*

\*実験結果について計算してみる。

まず吉田彌七氏の実験結果<sup>9)</sup>を比較してみると次のごとくである。すべて鉄筋比は限界鉄筋比以下の場合である。

表—10

はり番号	$\rho$	$\sigma$	$\sigma_{sy}$	$\rho \frac{\sigma_{sy}}{\sigma}$	$\frac{M}{bd^2\sigma}$ 計算値	$\frac{M}{bd^2\sigma}$ 実測値	実測値 計算値
C	0.0184	258	3 200	0.232	0.226	0.212	0.938
B	"	289	"	0.207	0.205	0.195	0.951
A	"	300	"	0.199	0.198	0.186	0.939
F	"	300	"	0.199	0.198	0.186	0.939
G	"	324	"	0.185	0.187	0.172	0.920
E	"	358	"	0.167	0.171	0.153	0.895

また、Inge Lyse 氏の実験結果<sup>10)</sup>に著者の破壊荷重を求める式を用いて比較してみると表—11のごとく

である。鉄筋比はいずれも限界鉄筋比以下の場合である。



表-11

はり番号	$\rho$	$\sigma$	$\sigma_{sy}$	$\rho \frac{\sigma_{sy}}{\sigma}$	$\frac{M}{bd^2\sigma}$ 計算値	$\frac{M}{bd^2\sigma}$ 実測値	実測値 計算値
2	0.0113	196	3 304	0.191	0.192	0.187	0.974
3	0.01153	190	3 234	0.197	0.197	0.193	0.980
5	0.00716	189	3 979	0.150	0.156	0.177	1.135
6	0.00755	196	3 340	0.129	0.138	0.168	1.217
7	0.00754	186	3 515	0.143	0.151	0.177	1.176
9	0.00332	203	3 234	0.053	0.065	0.077	1.181
10	0.00303	197	3 867	0.060	0.069	0.081	1.167
11	0.00336	183	5 273	0.097	0.109	0.127	1.169
12	0.00343	238	6 714	0.097	0.109	0.116	1.060
21	0.01402	218	3 733	0.240	0.231	0.238	1.029
22	0.01328	221	3 410	0.205	0.203	0.201	0.991
23	0.01490	217	3 312	0.228	0.222	0.213	0.962
24	0.01320	219	3 536	0.214	0.210	0.217	1.034
25	0.01153	217	3 304	0.175	0.178	0.184	1.034
26	0.00980	211	3 515	0.163	0.168	0.197	1.176
28	0.02140	225	2 739	0.260	0.247	0.250	1.013
29	0.00770	370	6 539	0.136	0.145	0.142	0.979
31	0.0160	202	3 326	0.266	0.252	0.255	1.012
32	0.00725	404	3 515	0.063	0.076	0.077	1.016

以上のごとく吉田彌七氏の実験結果も、Inge Lyse 氏の実験結果もきわめてよく一致する。また  $\alpha$  の値については 1.2~1.3 程度であることはすでに述べたが、一般には 1.2 を使用すれば安全側である。

## 7. 結 論

わが国ではもちろん、米国も英国も鉄筋コンクリートはりの設計には依然として従来の弾性理論によるように規定されているが、最近では米国でも従来の弾性理論では適確な設計ができないから、これに代る新しい方法にしなければならないと論議されている。もつとも、ロシア、ブラジル、チェコスロバキア、その他欧州の数ヶ国では、すでに従来の弾性理論による設計をやめて、コンクリートの塑性をもとにした新しい設計方法を採用しているところもある。

また最近欧米各国でいちじるしい発達を見ているプレストレスト コンクリートの設計に当つては亀裂荷重を求めることの大切なことはもちろん、プレストレスト コンクリートの破壊荷重を求めるのに、従来の弾性理論によるより、この新しい方法による方が実際に近いので、すでにこれを用いて多数計算されている状態である。

鉄筋コンクリートはりの曲げ強度は、完全弾性体にきわめて近い鋼で、できたはりの曲げ強度とはいちじるしくその趣きを異にする。従つて従来の弾性理論によつて鉄筋コンクリートはりを設計したのでは、弾性よりもむしろ塑性に近い鉄筋コンクリートはりでは、載荷された場合、従来の弾性理論でわかっていた各種の性質と異なることはすでに土木学会論文集で発表したとおりである<sup>10)</sup>。すなわち従来の弾性理論による設

計では、所期の目的を達するような適正な安全率を有する鉄筋コンクリートはりを合理的かつ経済的に、しかも簡単に設計することはできない。

よつて著者はこれを究明するべく、一連の大型鉄筋コンクリートはりの系統的实验を行い、実験結果の各事項を整理し、はりの破壊の様相を明らかにし、これらをもとにした鉄筋コンクリートはりの合理的な破壊荷重を求める実用式をあげ、著者の実験結果にも、他の研究者の実験結果にもよく一致する結果を与えることを示した。

なお、本実験研究には当所材料研究室伊藤茂富技官その他の方々の絶大なる助力をえた。また使用した各セメントは日本社および小野田社より御提供を頂きここに記して謝意を表する次第である。

## 参 考 文 献

- 1) 山田順治：鉄筋コンクリートはりの破壊実験に関する 2,3 の結果に就て、昭和 26 年セメント技術年報 p.335  
山田順治：土木学会第 7 回年次学術講演会にて講演、「鉄筋コンクリートはりの破壊に関する実験的研究」於大阪、昭和 26 年
- 2) 高橋逸夫：コンクリートの弾性係数に就いて、土木学会誌、33 卷 3 号
- 3) Sester A. Herr : Studies of Compressive Stress Distribution in Simply Reinforced Concrete near the point of Failure, Proceedings of Highway Research Board, 1950
- 4) 木村三郎：土木学会誌、17 卷 8 号
- 5) 黒田正夫：軟鋼の降伏点発生機構、理化学研究所彙報、第 17 輯 12 号
- 6) 中西不二夫：鑄鉄はりの曲げによる破壊に就て機械学会誌、36 卷 195 号

- 7) Joseph Marein, F.D. Cotterman : Experiments on Plastic Bending for Aluminium Alloy 17 S-T ; Proc., A.S.T.M., Vol. 43, 1943
- 8) 吉田彌七 : 鉄筋コンクリート梁設計法の根本概念について, 昭和 27 年セメント技術年報
- 9) Inge Lyse : A Study of Reinforcement in Concrete Slabs, A.C.I. Journal, Sep.-Oct., 1936
- 10) 山田順治 : 塑性理論を応用したる鉄筋コンクリート部材の破壊理論, 土木学会論文集, 第 4 号 昭和 24 年 (昭.28.11.6)

## AE コンクリートの付着力に関する研究\*

正 員 荒 木 謙 一\*\*

### EFFECT OF ENTRAINED AIR ON BOND BETWEEN CONCRETE AND REINFORCING STEEL

(JSCE May 1954)

Ken-ichi Araki, C.E. Member

**Synopsis** This paper reports an experimental investigation of the effect of entrained air on the bond properties of the round bars, which are cast vertically in the concrete cubes. Applying the method of factorial design of experiment, each effect of air, water and cement contents on the Bond Strength are examined.

**要旨** 本文はコンクリートに丸鋼を鉛直に埋め込み引き抜き試験を行い, AE コンクリートと普通コンクリートとの付着力を比較し, 特に空気量, 水量及びセメント量の影響を要因配列実験法を用いて調べたものである。

#### 1. 緒言

鉄筋とコンクリート間の付着力は 2 者間の真の付着力と, コンクリートの硬化収縮による圧力によつて生じ, コンクリートの性質 (特にセメントの種類, 量, 使用水量, 空気量等) と鉄筋の表面の状況, 埋め込みの位置, 方向, 長さなどによつて異なる。これらについては古くより研究されており, AE コンクリートについても Wuerpel<sup>1)</sup> や Hognestad<sup>2)</sup> などの研究がある。著者は丸鋼について付着力が AE コンクリートと普通コンクリートとではどう違うかを空気量, 水量, およびセメント量を変えて実験した。すなわち配合としては強度とウォーカービリチーとのほぼ等しい普通コンクリートと AE コンクリートの 2 種 (表-4 の No.1 と No.8) を選び, その他の配合はその組み合わせとした。なお本研究は文部省科学研究助成補助金により実施した。

#### 2. 材料および実験の方法

**a) 材料** セメントは日本セメント土佐工場製の普通ポルトランドセメント (表-1 参照), 骨材は吉野川

\* 土木学会第 9 回年次学術講演会 (昭.28.5.24) において発表

\*\* 徳島大学助教授, 工学部土木工学教室

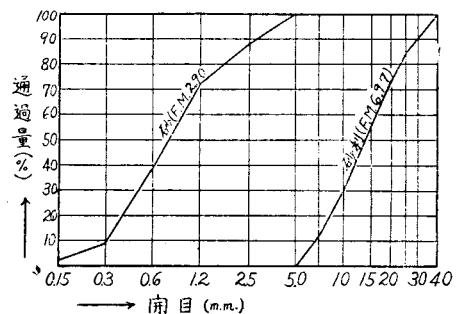
表-1 セメント

比 重	曲げ強度 (kg/cm <sup>2</sup> )		圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	
	7 日	28 日	7 日	28 日
3.14	39.0	62.3	172	362

表-2 骨 材

	比 重	吸水率 (%)	空隙率 (%)	粗粒率
砂	2.62	1.6	35.3	2.90
砂 利	2.61	1.1	33.2	6.97

図-1 骨材の粒度曲線



産で砂利の最大寸法は 30 mm である (表-2 及び 図-1 参照)。AE 材はダレックスで 10 倍薄液として用い, 鉄筋は径 16 mm の軟鋼の丸鋼とし表面の浮き錆を落して用いた (表-3 参照)。

**b) 配合** 配合は表-4 のとおりで 8 種類とし要因配列実験法が使えるように, まず基準配合 (普通コン