

V-26 支圧強度に対する補強効果の理論的考察

神戸大学工学部 正負 藤井 孝

§1. まえがき

無補強コンクリートの支圧強度に関しては従来多くの研究結果が報告されてきたが、補強されたコンクリートの支圧強度に関しては、実験的に少なく、理論的研究は皆無に近い。本文は、先に報告した無補強コンクリート支圧強度式¹⁾の場合とほぼ同様の手法を用い、補強筋の効果をも含んだ解を求め、その特性と妥当性について検討したものである。

§2. 解析モデルと破壊モード

図-1に示すように、先般¹⁾と同様円柱コンクリート供試体(径 $2R$)を考え、これを支圧板(径 $2R$ の剛体と仮定)と同一の大きさの円柱とそれを取り巻く円筒とに分け、円筒内に同心円のスパイラル筋を挿入したモデルを考える。本解の基本的考え方は、まず、図-1の円筒に内圧を加え、破壊時の内圧 Q_k を求め、これを側圧として径 $2R$ の円柱に作用させ、すなわち、3軸応力状態での最大軸圧、すなわち、支圧強度 Q_k を求めようとするものである。スパイラル筋(厚さ s の薄肉円筒に置換)で補強すれば Q_k は増大し、従って、 Q_k も増大することになる。コンクリート供試体の破壊時には、図-2に示すように、円筒コンクリートは塑性状態になっていきと仮定する。また、領域IIの外周($r=R_2$)の円周方向ひずみ ϵ_θ がコンクリートの引張最終ひずみ $\epsilon_{\theta 0}$ に達したとき、領域IIのコンクリートは剥落し、支圧強度は高止しぬいどと仮定する。コンクリート供試体の円周方向ひずみ ϵ_θ は、およそ図-2の分布になることを考えると、限界応力状態として次の3つが考えられる。

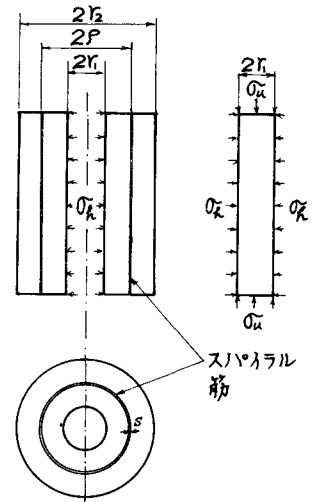


図-1 解析モデル

(a) スパイラル筋が降伏する前にコンクリートの $r=R_2$ での円周方向ひずみが $\epsilon_\theta = \epsilon_{\theta 0}$ に達する場合で、しかもIIのコンクリートが剥落直前の状態。

(b) スパイラル筋の降伏が、 $\epsilon_\theta = \epsilon_{\theta 0}$ とならず、あるいは、同時に生ずる場合。

(c) Iのコンクリートと降伏したスパイラル筋で形成した状態。(d)の状態は(a)、(b)の最終状態である。

最大荷重は、(b)の場合は(c)より常に大きいと考えられる。しかし、(a)の場合は、スパイラル筋の巻径 $2P$ の大きさによって(c)より大きい場合と小さい場合とが生ずる。

§3. 応力と変位

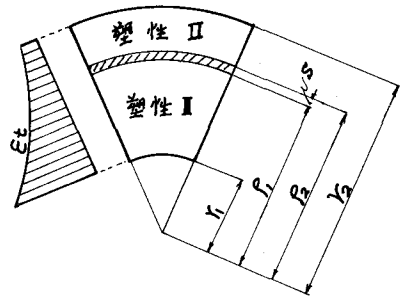


図-2

(1) コンクリートの応力と変位：図-2の塑性状態にあるIおよびIIの領域のコンクリートの半径方向の応力 σ_r は、先報¹⁾と同様、(1)式で表わされる。また、半径方向の変位 u_c は、非圧縮性、平面ひずみ状態を仮定すると、(2)式で与えられる。 σ_c, σ_{c0} = コンクリートの圧縮、引張強度。 C, C' = 積分定数。

$$\sigma_r = \frac{1}{m_1 - 1} \{ m_1 \sigma_{c0} - C r^{\frac{1-m_1}{m_1}} \} \quad \dots \dots \dots (1) \quad u_c = \frac{C'}{r} \quad \dots \dots \dots (2)$$

(2) スパイラル筋の応力と変位：薄肉円筒を考えると、力のつりあいより、スパイラル筋の円周方向応力 σ_θ および半径方向変位 u_s は $\sigma_s \leq \sigma_{sy}$ の場合、それぞれ(3)および(4)式で与えられる。こゝに、 E_s, σ_{sy} = スパイラル筋の弾性係数、降伏点応力である。

$$\sigma_s = \frac{(\sigma_\theta - \sigma_{c0}) \rho}{s} \quad \dots \dots \dots (3) \quad u_s = \epsilon_s \cdot r = \frac{(\sigma_\theta - \sigma_{c0}) \cdot \rho \cdot r}{s \cdot E_s} \quad \dots \dots \dots (4)$$

8.4 境界条件、内圧 P および支圧強度 P_u

まず、限界状態(II)の場合を考える。境界条件は次の6つであり、これを(1)～(4)式を用いて示すと、左のように(5)～(10)式のようになる。

$$r = r_1 \text{ のとき } \sigma_r = \sigma_c : \sigma_c = \frac{1}{m_1 - 1} \{ m_1 \sigma_{c0} - C_1 r_1^{\frac{1-m_1}{m_1}} \} \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$r = \rho_1 \text{ " } \sigma_r = \sigma_{\theta_1} : \sigma_{\theta_1} = \frac{1}{m_1 - 1} \{ m_1 \sigma_{c0} - C_1 \rho_1^{\frac{1-m_1}{m_1}} \} \quad \dots \dots \dots (6)$$

$$r = \rho_2 \text{ " } \sigma_r = \sigma_{\theta_2} : \sigma_{\theta_2} = \frac{1}{m_1 - 1} \{ m_1 \sigma_{c0} - C_2 \rho_2^{\frac{1-m_1}{m_1}} \} \quad \dots \dots \dots (7)$$

$$r = r_2 \text{ " } \sigma_r = 0 : m_1 \sigma_{c0} - C_2 r_2^{\frac{1-m_1}{m_1}} = 0 \quad \dots \dots \dots (8)$$

$$r = r_2 \text{ " } \epsilon_t = \epsilon_{t0} : \frac{C_2}{r_2^2} = \epsilon_{t0} \quad \dots \dots \dots (9)$$

$$r = \rho \text{ " } u_c = u_s : \frac{C_2}{\rho} = \frac{(\sigma_{\theta_1} - \sigma_{c0}) \rho^2}{s \cdot E_s} \quad \dots \dots \dots (10)$$

以上の(6)～(10)式の5つの式より、 $C_2, C_3, \sigma_{\theta_1}, \sigma_{\theta_2}$ を消去して、 C_1 を求め、これを(5)式に代入すると内圧 P が求められる。 $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ とおいた最終式は(11)式のようになる。

$$\sigma_c = \frac{-m_1 \sigma_{c0}}{m_1 - 1} \left\{ \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^{\frac{m_1 - 1}{m_1}} - 1 + \frac{m_1 - 1}{m_1} \cdot \frac{(m_1 - 1) s \cdot E_s \cdot \epsilon_{t0} \left(\frac{\rho}{r_1} \right)^{\frac{m_1 - 1}{m_1}} \cdot \rho^{-3} r_2^2}{(-\sigma_{c0})} \right\} \quad \dots \dots \dots (11)$$

(b)の状態は、(7)において $\sigma_s = \sigma_{sy}$ の場合である。すなわち、(3)、(4)、(9)、(10)式より、 $\sigma_s = E_s \epsilon_{t0} (r_2/\rho)^2$ となり、この値が σ_{sy} 以上と算定される場合(すなわち、(11)において、 $E_s \epsilon_{t0} (r_2/\rho)^2 = \sigma_{sy}$ とすればよい。(c)の状態では、コンクリートの外径は 2ρ と等しくなるので、(b)の状態に対する式において $r_2 = \rho$ とあればよい。

以上のように、各限界状態に対する内圧 P が求められたので、これを側圧として受ける円柱の最大軸圧、すなわち支圧強度 P_u は、先報¹⁾と同様、モーメントを用いて、次のように表わされる。

$$(a) \text{ の限界状態 : } \frac{\sigma_u}{\sigma_c} = \frac{m_2}{m_1 - 1} \left\{ \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^{\frac{m_1 - 1}{m_1}} - 1 + \frac{m_1 - 1}{m_1} \left(-\frac{1}{\sigma_{c0}} \right) \cdot s \cdot E_s \cdot \epsilon_{t0} \left(\frac{\rho}{r_1} \right)^{\frac{m_1 - 1}{m_1}} \cdot \rho^{-3} r_2^2 \right\} + 1 \quad \dots \dots \dots (12)$$

$$(b) \text{ の限界状態 : } \frac{\sigma_u}{\sigma_c} = \frac{m_2}{m_1 - 1} \left\{ \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^{\frac{m_1 - 1}{m_1}} - 1 + \frac{m_1 - 1}{m_1} \left(-\frac{1}{\sigma_{c0}} \right) \cdot \frac{s}{\rho} \cdot \sigma_{sy} \left(\frac{\rho}{r_1} \right)^{\frac{m_1 - 1}{m_1}} \right\} + 1 \quad \dots \dots \dots (13)$$

$$(c) \text{ の限界状態 : } \frac{\sigma_u}{\sigma_c} = \frac{m_2}{m_1 - 1} \left\{ \left(\frac{\rho}{r_1} \right)^{\frac{m_1 - 1}{m_1}} - 1 + \frac{m_1 - 1}{m_1} \left(-\frac{1}{\sigma_{c0}} \right) \cdot \frac{s}{\rho} \cdot \sigma_{sy} \left(\frac{\rho}{r_1} \right)^{\frac{m_1 - 1}{m_1}} \right\} + 1 \quad \dots \dots \dots (14)$$

$$\text{無筋の場合 : } \frac{\sigma_u}{\sigma_c} = \frac{m_2}{m_1 - 1} \left\{ \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^{\frac{m_1 - 1}{m_1}} - 1 \right\} + 1 \quad \dots \dots \dots (15)$$

いま、簡単のため $m_1 = m_2$ (m_2 = モーメント包絡線の勾配に相当する係数⁴⁾)、 $m_1/(m_1 - 1) = (m - 1)/m_1 = 1$ とおくと、(12)～(15)式の近似化を行なうと、それぞれ、(12)～(15)式となる。

$$\sigma_u/\sigma_c = r_2/r_1 + (-1/\sigma_{c0}) E_s \epsilon_{t0} (r_2/\rho)^2 (s/r_1) \quad \dots \dots \dots (12)'$$

$$\sigma_u/\sigma_c = r_2/r_1 + (-1/\sigma_{c0}) \sigma_{sy} (s/r_1) \quad \dots \dots \dots (13)'$$

$$\sigma_u/\sigma_c = \rho/r_1 + (-1/\sigma_{c0}) \sigma_{sy} (s/r_1) \quad \dots \dots \dots (14)' \quad \sigma_u/\sigma_c = r_2/r_1 \quad \dots \dots \dots (15)'$$

§5 支圧強度式の妥当性の検討

以上、破壊モードを設定し、コンクリートの非圧縮性、平面ひずみ状態などを仮定して、補強効果も含んだ支圧強度式を導出した。しかし、これらの仮定が妥当かどうかについては実験的検討が必要である。とりわけ、実用式として価値を有するためには次のような事項の検討が必要である。

(1) 支圧板の大きさ(2 r)とラセン筋の巻径(2 p)とが等しく、ラセン筋の外側コンクリートが剥落した(Ⅱ)の状態では、ラセン鉄筋短柱の最大荷重と与える式となるが、本式と現在慣用のラセン鉄筋短柱の破壊荷重とどのような関係にあるか、すなわち、ある一つの特定のケースに対しては本式は的是なされているかどうかの検討。

(2) 本式から、ラセン筋の配置範囲は決定出来ない。これをどのように定めるべきかの検討。

(3) 本式によれば、 $r=p$ とするのが補強効果が最大であるが、ある実験では、ラセン筋の巻径が支圧板の大きさに近い場合はかえって破壊荷重が減少しているが、本式の修正法の検討。

(4) コンクリートの最終ひずみ ε_{co} の検討。

(5) 本解では、ラセン筋位置でのコンクリートとラセン筋とは同一ひずみを呈すると仮定しているが、ラセン筋のめり込みによる影響の検討。

それ以上であるが、上記のうち、(1)については簡単に検討できるが、(2)以下の問題はかなり困難な問題もあるが、現在までの実験結果に照らして検討考察してみたい。

1. ラセン鉄筋短柱としての妥当性

上記(1)の問題に同じ、例えば、土木学会標準示方書にある短柱式と比較してみる。軸方向筋をい

ま無視すると、許容中心軸方向荷重は、 $P = \frac{1}{3} (0.85 f_c A_c + 2.5 f_y A_s)$ (16)

(16)式との比較対象式は、(Ⅱ)の状態に対するもので、いま簡略式を用いるものとすると、(14)'式である。

2 $r = 2p$ であるから、これを(14)'式に用いると、破壊荷重 P_u は、結局(17)式となる。

$$P_u = A_c f_c + \frac{m_1}{2} f_y A_s \quad (17)$$

m_1 の値は、一般のコンクリートの場合、 $m_1 = f_c / (-f_{co}) = 8 \sim 14$ であるが、いま $m_1 = 10$ として、 $f_y A_s$ の係数 $m_1/2 = 10/2 = 5$ となる。これを(16)式と比較すると約2倍となっている。ボアソン比の仮定によって変化するものと界られるが、 $f_y A_s$ の係数はさらに検討される必要がある。

2. ラセン筋の配置範囲の検討

許容応力設計法では、補強筋の配置範囲は割裂応力分布より決定しようが、本解では決定できない。支圧板直下に生成される円錐コーンの押し抜けに対して補強するという考えから立てば、補強範囲はコーンの先端まで位でよいのではなかろうかと推察される。このような仮定の元々実験的検討を実施しているが、実験結果の一例を図-3に示す。図面は、無筋コンクリート供試体に対する補強コンクリート供試体の破壊荷重比(これを補強効果と定義し α で表わす)とラセン筋(φ42)の配置範囲(載荷端からの距離 l)との関係を示す。供試体は円柱でφ20×40cm、 $f_c = 250 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\beta = 2$ 、巻径2 $p = 13 \text{ cm}$ 、ボリツチ $\alpha = 0.75$ cm、支圧板直径2 $r = 7.5$ cmで一定である。

図-3より、配置範囲 l の値が小さい場合は l が増大すると補強効果 α も増大するが、 l が約12cm以上では $\alpha = 1.33$ と一定値となり、これ以上補強しても効果がなくなることを意味している。過

主の変形¹⁾によると、蒸気コンクリートの円錐コーンの高さ l' は、およそ $l'=3r_1$ となっている。本実験での r_1 の値は $2r_1=7.5\text{cm}$ であり、 $l'=11.25\text{cm}$ となる。すなわち、 $l=l'$ にとっておけばよいことを図-3は示しているが、さらに実験資料が必要である。なお、建築学会PC規準での許容応力設計法によると、その補強範囲は、載荷端から $x=3.2\sim 4.2\text{cm}$ と算出され、上記値とは一致しているのは興味深い。

3. 補強効果の実験値との比較

前記(3)の問題を主に検討するため、補強効果を実験値と比較してみる。簡略式による補強効果 α は(18)~(20)式より、次のように表わされる。

$$(a)\text{の状態: } \alpha = 1 + \left(-\frac{1}{\sigma_{60}}\right) E_s \varepsilon_{60} (s/r_2) (r_2/p)^2 \quad \dots (18)$$

$$(b)\text{の状態: } \alpha = 1 + (-\sigma_{60}/\sigma_{60}) \cdot (s/r_2) \quad \dots (19)$$

$$(c)\text{の状態: } \alpha = s/r_2 + (-\sigma_{60}/\sigma_{60}) (s/r_2) \quad \dots (20)$$

ラセー筋は中々 $(\sigma_{60}=2400\text{kg/cm}^2)$ 、 $t=2.75\text{cm}$ 、 $l=10\text{cm}$ 、 $2r_1=7.5\text{cm}$ で、 $\sigma_c=224\text{kg/cm}^2$ 、 $\sigma_{60}=-20.0\text{kg/cm}^2$ である。 $\varepsilon_{60}=200 \times 10^{-6}$ と仮定すると、以上の式(18)~(20)式に用いると次のようになる。

$$\alpha = 1 + 0.753 [1/(s/r_1)^2] \quad \dots (18), \quad \alpha = 1.604 \quad \dots (19)$$

$\alpha = 0.375 (s/r_1) + 0.604 \quad \dots (20)$ これら3つの式を並べたものが、図-4のA、B、C、D、Eの鎖線で示すもので、●印は実験値である。

実験値が数少ないため全般的な比較はできないが、 $r_1=p$ の場合($2p=7.5\text{cm}$ 、 $2p=8.4\text{cm}$)は図-4より、実験値は理論値より非常に小さく、補強効果はほとんど得られていない。これら2種の試体の破壊後の観察によると図-5に示すように、ラセー筋でとりかこまれたコンクリートの先端に円錐コーンが生成されており、ラセー筋内コンクリートがあたり支圧板の働きをなしており、従って、ラセー筋径をあたりの支圧板径と考えた方が実際に近いものと考えられる。この場合の α は、 $\alpha = s/r_1 \quad \dots (21)$ となり、理論値を修正すると、図-4の実際(F、C、D、E)のようになる。果して、このような理論線がある場合に妥当であるかについては、今後さらに実験資料の多くの蓄積が必要であり、検討を続けていく予定である。

以上のように、本文は補強効果の基礎理論の域までであるのではないが、今後の研究の手がかりは充分得られるものと考えらる。

参考文献 1) 藤井 孝, "軽量コンクリートの支圧強度" 技料 Vol.18, No.185, 1969. 2

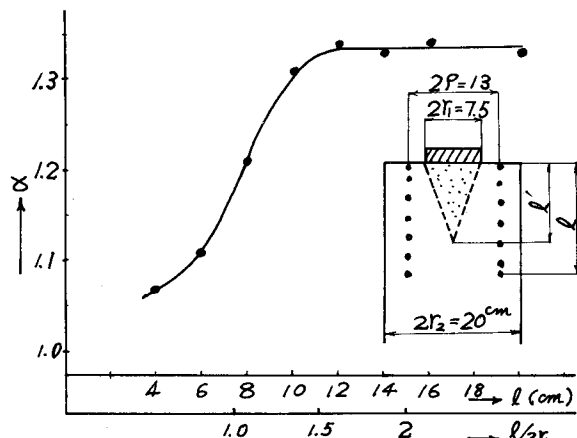


図-3 補強範囲 l と補強効果 α との関係

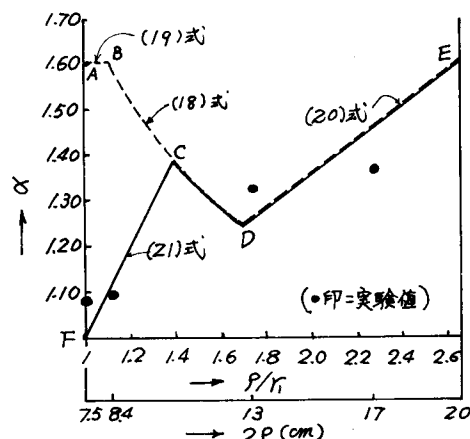


図-4 補強効果 α の実験値との比較

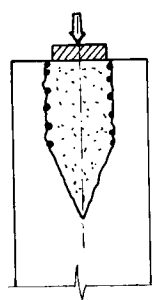


図-5