

1. まえがき

コンクリートの付着ひびわれの一部は 載荷前からすでに生じているものであるが、これは まだ固まらないコンクリートの不均一な沈降、自発性体積変化、養生に伴う膨張、乾燥収縮、炭酸化収縮などが基因して生じる体積変化によるものである。いずれにしても、セメントの凝結・硬化中に骨材粒子とペーストまたはモルタルマトリクス間の高い垂直応力とせん断応力のために、付着ひびわれが生じるものと報告されている¹⁾。硬化後の付着強度は骨材の鉱物学的な特性・マトリクスの水セメント比・骨材の表面粗度・材令・含水量・セメントの種類・骨材寸法・載荷速度などの広範な要因に影響される。付着ひびわれは 応力レベルの上昇とともに増大するが、界面の最大引張応力が付着強度に達した場合に生じるとする引張形付着ひびわれと、界面に沿う最大せん断応力が界面のせん断強度に達した場合にひびわれが生じるとするせん断形付着ひびわれとがある²⁾。しかし、後者には 内部摩擦という概念の物理的意味の明りようさを欠く因子を含んでいる。本報告は 引張形付着ひびわれがマトリクスとインクルージョンとの相対的弾性係数の比、ポアソン比などによってどのように影響されるかという観点から、前報³⁾を踏まえて解析を行なった。

2. 球状骨材粒子回りの応力と付着ひびわれ発生下限応力

圧縮応力 T の応力場での球状粒子の赤道方向引張応力 σ_{rr} を、Hansen⁴⁾は粒子を剛体として

$$\sigma_{rr}/T \equiv \phi = -\{(1-\nu_1)/(1+\nu_1) - (5-5\nu_1)/(8-10\nu_1)\} \quad (1)$$

付着ひびわれ長さ ℓ_c を導入した著者の方法³⁾によると、

$$\begin{aligned} \sigma_{rr}/T \equiv K = & \frac{0.5(k-1)}{(7-5\nu_1)k + (8-10\nu_1)} \times \frac{2(1-2\nu_2)(6-5\nu_1)k + (3+19\nu_2-2\nu_1\nu_2)}{2(1-2\nu_2)k + (1+\nu_2)} - \frac{\{(1-\nu_1)\frac{1+\nu_2}{1+\nu_1} - \nu_2\} - (1-2\nu_2)k}{2(1-2\nu_2)k + (1+\nu_2)} \\ & + \frac{0.5(k-1)\{(-6+5\nu_1) - (7-5\nu_1)\cos(\ell_c/d)\}}{(7-5\nu_1)k + (8-10\nu_1)} \end{aligned} \quad (2)$$

となり、一定の付着ひびわれ長さを発生させるための圧縮応力は、粒径が小なるほど 対数的に増大することを実証できる。ただし、 $\nu_1 \cdot \nu_2, E_1 \cdot E_2$: マトリクスおよびインクルージョンのポアソン比、弾性係数。 $E_1/E_2 \equiv k$ 。(2)で $\ell_c \rightarrow 0$ とした場合の K を K_c とすると、微小ひびわれ発生時の最小応力レベル T_c は

$$T_c = 0.035 \sigma_{cB}/K_c \quad \text{〈モルタルマトリクスの場合〉} \quad (3)$$

(3)は粒径に関せず $\nu_1 \cdot \nu_2 \cdot k$ のみの関数となり、 $\nu_1=0.5, \nu_2=0.2, k=0.6$ では 応力レベル 0.17 で 微小付着ひびわれが生長開始することを意味する。ただし、 σ_{cB} : コンクリートの圧縮強度。

$K_c \rightarrow 0$ で $T_c \rightarrow \pm\infty$ となる ν_1 を $\nu_{1,c}$ とすると、

$$\begin{aligned} \nu_{1,c} = & \frac{1}{2\{8(k-1)\nu_2 - 5(k+1)\}} \left[\sqrt{\{(4+7\nu_2)k + 3(2+\nu_2)\}^2 - 4\{8(k-1)\nu_2 - 5(k+1)\}\{-(9k+1)\nu_2 + (k-1)\}} \right. \\ & \left. - \{(4+7\nu_2)k + 3(2+\nu_2)\} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

一方、 $\nu_1 \geq \nu_{1,c}^*$ であれば $T_c/\sigma_{cB} \leq 1$ となり、コンクリートの単純圧縮破壊以前に 付着ひびわれが生じることになる。

$$\begin{aligned} \nu_{1,c}^* = & \frac{1}{2\{8(k-1)\nu_2 - 5(k+1) + \alpha\}} \left[\sqrt{\{(4+7\nu_2)k + 3(2+\nu_2) + \beta\}^2 - 4\{8(k-1)\nu_2 - 5(k+1) + \alpha\}\{-(9k+1)\nu_2 + (k-1) + \tau\}} \right. \\ & \left. - \{(4+7\nu_2)k + 3(2+\nu_2) + \beta\} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

ただし、 $\alpha \equiv 5A(k+2), \beta \equiv -2A(k-1), \tau \equiv -A(7k+8), A \equiv \frac{0.035}{3} \{2(1-2\nu_2)k + (1+\nu_2)\}$

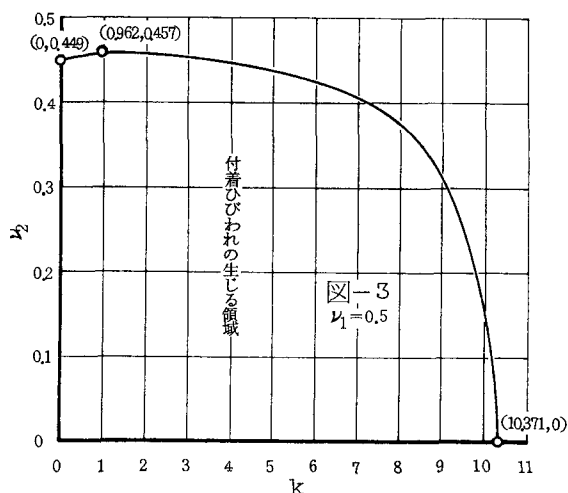
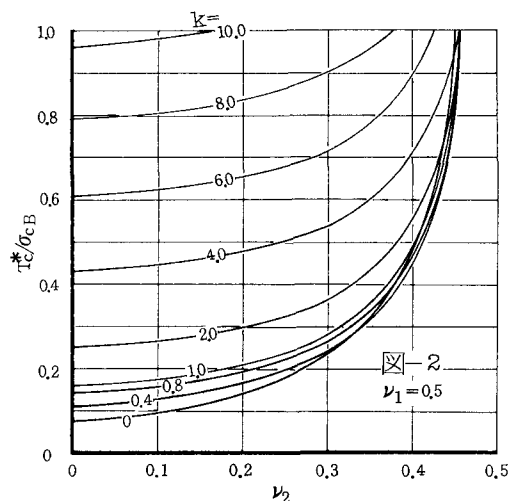
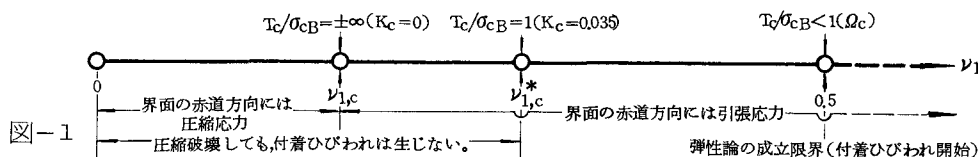
図-1は ν_1 の変化に伴う応力レベルと付着ひびわれ状態との意味づけの要点である。いま、開始応力 (Initiation stress) (平均強度範囲 142~580 kg/cm² に対し 0.65~0.88⁵⁾。) 以下の単純圧縮荷状態のコンクリートのポアソン比は 0.15~0.25 のオーダーで、この値が終局強度まで持続されるとすると、圧縮破壊まで付着ひびわれは生じないことになる。応力レベルの上昇に伴い 逐次増大するマトリクスのポアソン比を $\nu_1 > \nu_{1,c}^*$ の範囲で、 ν_1 をどのように決めるかが重要である。見掛けのポアソン比は、終局強度に近づくと0.5 以上にも達することが観察されており、この事実は塑性変形が生じるとポアソン比は0.5 に接近すること⁶⁾を意味する。弾性体の理論限界値は0.5であり、実験的にも 微小ひびわれの生じる塑性核の局部的なマトリクスのポアソン比は0.5でもある⁵⁾。したがって、

$$(\kappa c)_{\nu_1=0.5} \equiv \Omega_c = \left[\frac{(\kappa-1) \{7(1-2\nu_2)\kappa + (3+18\nu_2)\} + (1-2\nu_2)(3\kappa-1)(3\kappa+2)}{2(1-2\nu_2)\kappa + (1+\nu_2)} - 8(\kappa-1) \right] \times \frac{1}{3(3\kappa+2)} \quad (6)$$

最終的な付着ひびわれ発生の下限応力レベル T_c^* は

$$T_c^* = 0.035 \sigma_{cB} / \Omega_c \quad (7)$$

T_c^* / σ_{cB} , κ , ν_2 との関係を 図-2 に、また、付着ひびわれの生じる κ , ν_2 領域を 図-3 に示す。



3 あとがき

本研究を行なうに当たり、防衛大学校土木工学教室 荻野雪男技官の助力を受けた。謝意を表する。

4. 参考文献

- 1) Hsu, T. C. :Mathematical Analysis of Shrinkage Stresses in a Model of Hardened Concrete, ACIJour. Proc. V. 60, No.3, Mar. 1963, pp. 371-390.
- 2) Taylor, M. A. et al. :Shear Bond Strength Between Coarse Aggregate and Cement Paste or Mortar, ACIJour. Proc. V. 61, No.8, Aug. 1964, pp.939-957.
- 3) 加藤清志：付着微小ひびわれと骨材粒径に関する基礎的研究，28回年講，5，48.10，pp. 14-15.
- 4) Hansen, T. C. : Cracking and Fracture of Concrete and Cement Paste, ACI SP-20, Paper No.3, 1968.
- 5) 加藤清志：ブレンコンクリートの微小ひびわれと物性評価，土論 208, 1972.12, pp.121-136.
- 6) Talobre, J. : La Mécanique Des Roches, Paris, Dunod, 1957, p. 179.