

要旨

骨材とマトリックスから成る単体複合材料の境界面における引張付着強度を有限要素法による応力解析の結果を利用して単体の割裂試験によって推定する方法について提案し、この方法によって数種の骨材とセメントペーストとの割裂引張付着強度を評価した。

骨材とセメントペーストとの割裂引張付着強度は、骨材およびセメントペーストのいずれの引張強度よりも、相当小さい。この結果は、コンクリートの破壊過程は骨材とモルタルまたはペーストの境界面から始まることを示唆していると考えられる。

まえがき

図-1に示すように割裂荷重を受ける試験体が単一材料であるときには、この試験体内の応力分布は *Sneddon*⁽¹⁾ によって下記のように与えられており、したがって、破壊時の P の値を実験によって得られれば試験体の割裂強度を推定することが出来る。しかしながら、図-2に示したように、試験体が複合材料から成る場合には、これを構成する骨材やマトリックスまたはこれらの境界面における応力分布の解析的な解は未だ発表されていないと思われる。したがって、破壊時の P を知っても骨材とマトリックスの割裂付着強度を推定できない。骨材とマトリックスの境界面に沿った応力は有限要素法によって推定できると考えられるが、本研究ではまず単一材料内の応力について有限要素法(FEM)による解と *Sneddon* による解との比較を行ない、次に、骨材とマトリックスの境界面に沿った応力を有限要素法によって求め、この結果を利用して骨材とマトリックスとの割裂付着強度を推定した。

1. 割裂荷重を受ける単一材料内の応力分布

図-1に示す試験体内の任意の点における応力は *Sneddon*⁽¹⁾ によってつぎのように与えられている。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= -\frac{q_0}{\pi} \int_0^\infty \left(\frac{\sin \alpha t - t \cosh t}{\sinh(2t) + 2t} \cosh(\alpha \eta) + t \eta \sinh t \sinh(\alpha \eta) \right) \cdot \frac{\sin(\alpha t)}{t} \cos(\alpha \xi) dt \\ \sigma_y &= -\frac{q_0}{\pi} \int_0^\infty \left(\frac{\sin \alpha t + t \cosh t}{\sinh(2t) + 2t} \cosh(\alpha \eta) - t \eta \sinh t \sinh(\alpha \eta) \right) \cdot \frac{\sin(\alpha t)}{t} \cos(\alpha \xi) dt \\ \tau_{xy} &= -\frac{q_0}{\pi} \int_0^\infty \left(\frac{t \eta \sinh t \cosh(\alpha \eta) - t \cosh t \sinh(\alpha \eta)}{\sinh(2t) + 2t} \right) \cdot \frac{\sin(\alpha t)}{t} \sin(\alpha \xi) dt \end{aligned} \right\} \text{----- (1)}$$

ここに $\alpha = \pi/c$, $\eta = \pi/c$, $\xi = \pi/c$, $\delta = \frac{P}{2a}$

図-3は、(1)式およびFEMで求められた σ_y の分布図の一例である。なお、有限要素法では、CSTエレメントを用いた。この結果、(1)式とFEMによる結果は十分一致すると考えられる。

図-4は、種々の載荷版の巾 $2a$ に対して(1)式によって得られた割裂面($\alpha=0$)における σ_x の分布状況である。また、図-5は上記と同様の σ_x をFEMによって求めたものである。これらの結果によると、*Sneddon* およびFEMによる σ_x の分布は、 σ_y と同様、ほぼ一致していると考えられる。

割裂断面における σ_x は、載荷面直下で大きな圧縮応力となり、断面中央部ではほぼ一定の最大引張応力となる。今、供試体が、この引張応力によって割裂破壊すると仮定すれば、供試体の引張強度 σ_t は、(2)式によって推定される。

$$\sigma_t = K \sigma \frac{P_{max}}{2c} \text{----- (2)}$$

ここに、 P_{max} は破壊時の荷重、 c は供試体の厚さ、 $2c$ は供試体の高さ、 K は α/c の大きさによる補正係数でこれらの関係は、図-6に示すとおりである。また、(2)式は供試体の長さ $2a$ と高さ $2c$ の比 a/c が2以上の値に対して精度がよいと推定される。

2. 境界面に割裂荷重をかける複合材料内の応力分布

図-2に示す構造における骨材とマトリックスの境界面附近における応力分布をFEMによって求めた。一般には、骨材面が粗であるという点を考慮して、FEMの解析においては、図-7に示すように骨材だけの領域A、マトリックスだけの領域B、および、境界面を含んだストリップ部分Iに分割し、Iの領域には境界面要素⁽²⁾を導入して解析した。

図-8は、境界面における σ_x の分布を示す。ここに E は骨材とマトリックスの弾性係数比 E_a/E_m である。

σ_x の分布状況は、単一材料の場合とほぼ同様のパターンである。また、解析結果によると載荷面直下附近では弾性係数の小さい方の成分には大きな圧縮応力が生じ、弾性係数の大きい方の成分には、大きな引張応力が生じる。したがって、相対的に強度の低い骨材の場合には、破壊は境界面では生ぜず、載荷面直下の骨材の部分で生じる場合も考えられる。

3. 引張付着強度の推定

図-9は、図-2の試験体の骨材とマトリックスの境界面における最大引張主応力 σ_{max} の線荷重 $g(=P/2a)$ に対する割合と弾性係数比 E_a/E_m との関係を示したものである。(ただし $2C=1.5"$, $2a=0.5"$, $g_c=0.1$)。

したがって、弾性係数が既知の骨材とマトリックスの引張付着強度は、図-2に示すような試験を行なうことにより P_{max} が得られれば、図-9に示すチャートを利用することによって推定される。

4. セメントペーストと骨材の引張付着強度

W/C=0.65のセメントペーストと石灰岩、花崗片麻岩、中粒砂岩および縞状花崗岩の4種類の骨材との割合28日における引張付着強度を上記の割裂試験によって求めた。

破壊は境界面において急激に起り、破壊面の骨材側にはセメントペーストの一部が被覆が付着しており、セメントペースト側にも骨材の一部が埋込されたような状態を付着していた。

表-1は、各種骨材およびセメントペーストの弾性係数、圧縮強度、およびこれらの引張付着強度の実験結果である。なお表-7には、通常の曲げ試験によって求められた骨材とマトリックスの曲げ引張付着強度をも付記した。

割裂引張強度は曲げ引張強度の $1/3 \sim 1/4$ 程度であり、試験を行った骨材のうち、石灰岩とセメントペーストの付着はもっとも不良で、花崗片麻岩とセメントペーストとの付着がもっとも秀れているようである。

曲げおよび割裂のいずれの付着強度も、骨材およびセメントペーストの引張強度よりも小さく、コンクリートにおいて、異常な空洞を除けば骨材とペーストまたはモルタルとの付着面が、いわゆる「Weakest Link」であると推定される。

結論

一般にコンクリートの引張試験は困難であるが、ここに提案した骨材とマトリックスの引張付着強度を求める方法は、有限要素法による解析が伴うという弱点はあるが、比較的簡単な圧縮型の試験であるという点が長所であろうかと考えられる。

参考文献

- (1) Sneddon, I.N., "Fourier Transforms", McGraw-Hill Book Co., PP4/3, 1951
- (2) Ono, K., Ph.D. dissertation, University of Toronto, 1972

表-7 実験結果

材 料	弾性係数 (10^5 psi)	圧縮強度 (10^3 psi)	曲げ引張 付着強度(%)	割裂引張 付着強度(%)
石灰岩	3.12×10^5	1246	37.9(6.0)	8.1(1.4)
花崗片麻岩	2.58×10^5	1778	47.7(1.3)	15.8(0.7)
中粒砂岩	2.28×10^5	994	39.0(1.3)	12.8(0.5)
縞状花崗岩	2.27×10^5	1554	43.3(2.0)	11.8(1.0)
セメントペースト	1.44×10^5	588	98.7(3.9)	24.4(1.5)

()内の値は5個の測定値の標準偏差

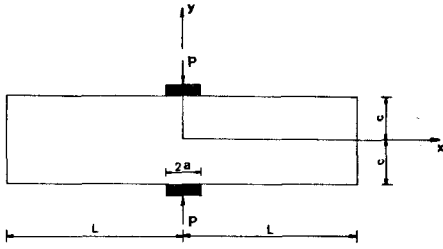


図-1 割裂荷重を受ける試験体

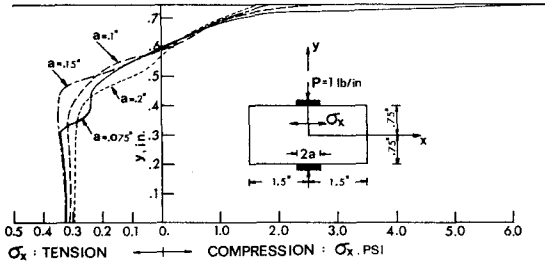


図-4 Sneddonによる割裂面におけるσxの分布図

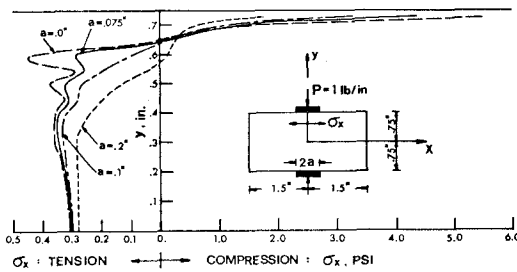


図-5 FEMによる割裂面におけるσxの分布図

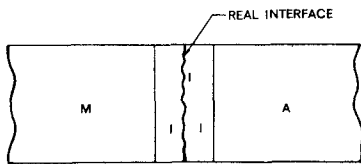


図-7 複合材料のマトリクスM, 骨材Aおよび境界面要素Iの分割

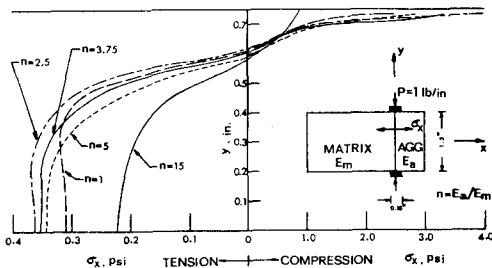


図-8 割裂荷重を受ける骨材とマトリクスの割裂面におけるσxの分布

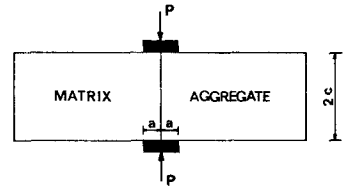


図-2 割裂引張付着試験

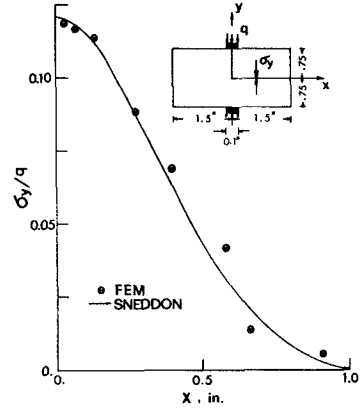


図-3 SneddonとFEMによるσy=0平面におけるσyの分布図

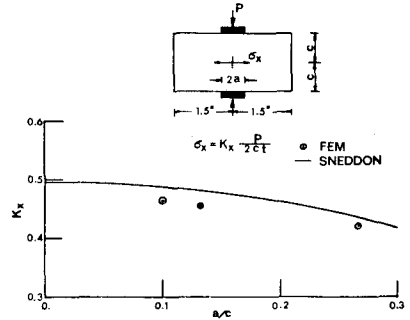


図-6 割裂試験における修正係数Kx

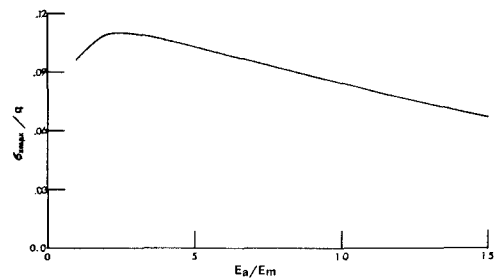


図-9 骨材とマトリクスの割裂面に直角な単位荷重当りの応力の最大値σmax/qの弾性係数比との関係