

短繊維補強によるコンクリート板の裏面剥離抑制効果に関するエネルギー論的考察

防衛大学校 学生会員 ○上野 裕稔 正会員 別府 万寿博 市野 宏嘉
デンカ 正会員 高橋 順

1. 緒言

繊維補強コンクリート (FRC) 板は、短繊維を混入することで現れる架橋効果やひび割れ分散効果によって裏面剥離が抑制されることが報告されている¹⁾。しかし、短繊維補強によるコンクリート板の裏面剥離抑制に関するメカニズムや補強設計法については検討すべき課題が多い。本研究は、短繊維補強によるコンクリート板の裏面剥離抑制効果について、エネルギー論的な観点から検討したものである。

2. 裏面剥離時におけるエネルギー散逸のモデル化

図-1 に、プレーンコンクリート (以下、PC と呼ぶ。) 板および FRC 板に裏面剥離が発生する際のエネルギー散逸モデルを示す。飛翔体が衝突する際の運動エネルギー (以下、衝突エネルギーと呼ぶ。) E_k は、貫入によって散逸するエネルギー E_p (以下、貫入エネルギーと呼ぶ。)、裏面剥離の形成で散逸するエネルギー E_s (以下、裏面剥離エネルギーと呼ぶ。) および剥離片の飛散で散逸するエネルギー E_d (以下、飛散エネルギーと呼ぶ。) で消散されると仮定する。

$$E_k = E_p + E_s + E_d \quad (1)$$

ある貫入深さが与えられた場合、飛翔体の質量を m_p 、修正 NDRC 式²⁾によって算定される速度を V_{NDRC} とすると、貫入エネルギーは $E_p = \frac{1}{2} m_p V_{NDRC}^2$ と求められる。

裏面剥離エネルギー E_s については、図-2 に示すように、裏面剥離は斜めひび割れが進展して形成されるものと仮定する。ここで、ひび割れの角度 θ は三輪らの検討³⁾を基に 27.9° とした。すなわち、裏面剥離エネルギーは、この円錐台の破壊面積 A_s に対し引張破壊エネルギー G_f を乗じることで $E_s = A_s G_f$ と求められる。

飛散エネルギー E_d は、質量 m_p の飛翔体が速度 V_p でコンクリート板に衝突し、質量 M_c の裏面剥離片が速度 V_c で飛散すると仮定すると、運動量保存則から次式のように求められる。

$$E_d = \frac{1}{2} M_c V_c^2 = \frac{1}{2} \frac{m_p^2}{M_c} V_p^2 \quad (2)$$

3. 提案モデルおよび実験結果による貫入エネルギーの特徴

過去に行われた実験³⁾では、直径 25 mm、質量 46 g の飛翔体を、衝突速度 200 m/s (衝突エネルギー 920 J) で板厚 60 mm の PC 板 (圧縮強度 25.5 N/mm²) に衝突さ

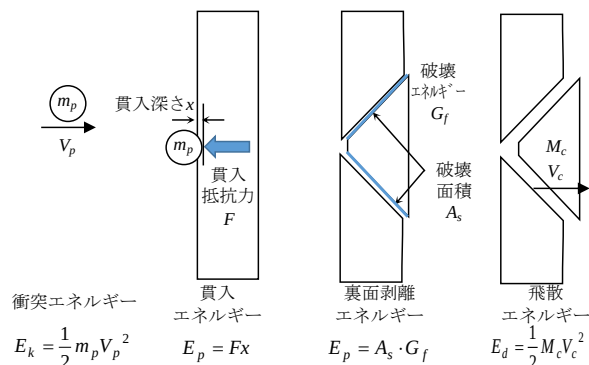


図-1 裏面剥離におけるエネルギー散逸モデル

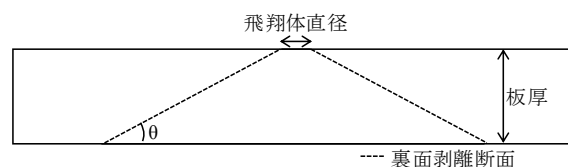


図-2 裏面剥離の断面モデル

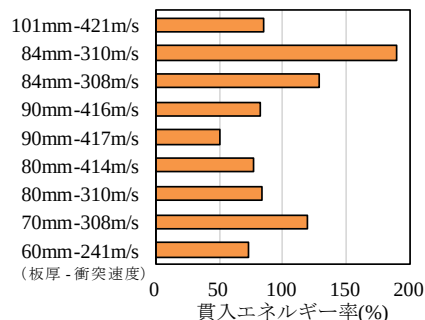


図-3 PC 板の貫入エネルギー率 (裏面剥離)

せた場合に裏面剥離が生じた。この衝突条件における貫入エネルギー、裏面剥離エネルギーおよび飛散エネルギーは、 $E_p=901$ J、 $E_s=1.95$ J および $E_d=16.7$ J と算定される。すなわち、98%の衝突エネルギーが貫入によって消費されていることを示している。図-3 に、これらの実験結果において、裏面剥離が生じた場合の衝突エネルギーに対する貫入エネルギーの比 (以下、貫入エネルギー率と呼ぶ。) を示す。図中において、貫入エネルギー率が 100%を超えるケースがある理由は、実験結果のばらつきによるものと考えられる。図から、裏面剥離が生じた場合、貫入エネルギー率は平均で 100%近くになっていることがわかる。つまり、裏面剥離が生じると、ほぼ全ての衝突エネルギーが貫入エネルギーとして散逸しており、モデルによる試算と同じ傾向を示している。

次に、同じ衝突条件における FRC 板の衝突実験¹⁾に

キーワード 繊維補強コンクリート、裏面剥離、衝突エネルギー、散逸エネルギー

連絡先 〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20 防衛大学校建設環境工学科 TEL. 046-841-3810 E-mail: ed15003@nda.ac.jp

対して、散逸エネルギーを試算する。実験で使用された各 FRC 板の材料特性を表-1 に示す。図-4 に、散逸エネルギーモデルを用いて、貫入深さ 15mm を与えた場合に、各 FRC 板において裏面剥離が発生する際の散逸エネルギーおよび散逸エネルギー率を示す。なお、既報の実験結果³⁾との比較から、短繊維補強が貫入深さに与える影響は無視できると仮定した。また、裏面剥離エネルギーは、静的および動的な破壊エネルギーを用いて算定した結果を示している。図から、FRC 板では動的と静的な場合では傾向がやや異なるが、FRC 板の裏面剥離エネルギーは PC 板よりもかなり大きくなるのがわかる。図-4 (b) では動的な裏面剥離エネルギーに対する散逸エネルギー率のみを示しているが、各 FRC 板の裏面剥離エネルギー率は 12%~18% となり、PC 板よりも非常に大きなエネルギーが消散している。

図-5 に、実験において裏面剥離が生じたケースに対して計算した各散逸エネルギーを示す。なお、図中の凡例において、FRC 板種類の後に表示した数字は衝突速度 (m/s) である。図中の「差分」は、実験の衝突エネルギーと総散逸エネルギーの差分を示している。図-6 に、実験の散逸エネルギー率を示す。図から、各 FRC 板の散逸エネルギーの割合は、図-4 (b) に示す散逸エネルギーモデルと近い傾向を示している。ただし、PC 板や VFRC 板では差分の割合が大きくなった。この理由は、実験データのばらつきおよび短繊維によるひび割れ分散効果等を考慮していないためと考えられる。

図-7 に、PC 板および FRC 板の実験結果から求めた貫入エネルギー率について、正規分布を仮定した場合の確率密度分布を示す。図から、PC 板で裏面剥離が生じた場合の貫入エネルギー率はほぼ 100% となっているのに対し、FRC 板の貫入エネルギー率が 65% 程度と小さくなっていることがわかる。これは、FRC 板では裏面剥離が発生した場合に裏面剥離エネルギーが大きくなるため、相対的に貫入エネルギー率が小さくなったものと考えられる。

4. 結言

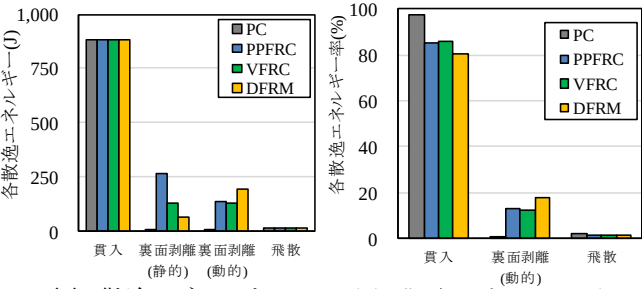
本研究は、短繊維補強によるコンクリート板の裏面剥離抑制効果について、エネルギー論的な観点から検討を行ったものである。エネルギー散逸モデルを用いて、PC 板の裏面剥離においては貫入によってほとんどのエネルギーが散逸していることがわかった。また、FRC 板では裏面剥離の形成によって散逸するエネルギーが 12%~18% と大きくなることがわかった。

参考文献

1) 上野裕稔, 別府万寿博, 小川敦久: 高速衝突を受ける繊維補強セメント系複合材料板の局部破壊低減効果に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.517-522, 2014.

表-1 FRC の寸法および力学特性

種類	短繊維の材料特性				圧縮強度 (N/mm ²)	破壊エネルギー G _f (N/m)
	材料	直径 (mm)	長さ (mm)	引張強度 (N/mm ²)		
PPFRC	ポリプロピレン	0.70	30	500	43.8	4.8
VFRC	ポリビニル	0.66	30	900	43.9	2.3
DFRM	アルコール	0.10	12	1200	42.3	1.2



(a) 散逸エネルギー (b) 散逸エネルギー率
図-4 FRC 板の散逸エネルギー (散逸モデル)

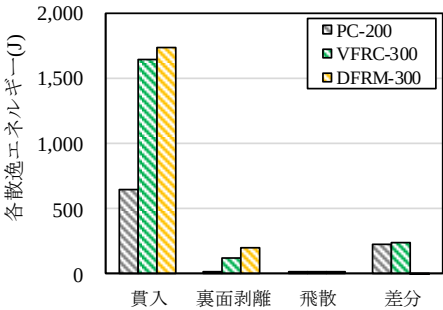


図-5 散逸エネルギー (実験値)

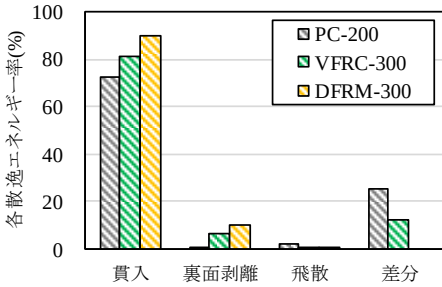


図-6 散逸エネルギー率 (実験値)

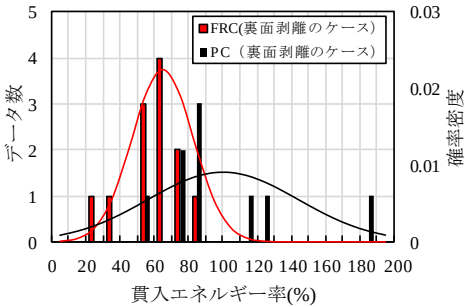


図-7 裏面剥離が生じたケースにおける貫入エネルギー率の確率密度

2) Kennedy, R. P.: A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects, Nuclear Engineering and Design, Vol.37, pp.183-203, 1976.
3) 三輪幸治, 別府万寿博, 大野友則, 伊東雅晴, 片山 雅英: 改良理論モデルによるコンクリート板の局部破壊評価法, 土木学会論文集 A, vol. 65, No.4, pp 844-858, 2009.