

高速衝突を受ける繊維補強コンクリート板の局部破壊限界板厚の評価法に関する検討

防衛大学校 学生会員 ○上野 裕稔 正会員 別府万寿博
(株)クラレ 正会員 小川 敦久

1. 緒言

コンクリート部材に飛散物が高速度で衝突すると、飛翔体の衝突部近傍で局部破壊が発生することがわかっており、局部破壊に対する設計法や補強方法を確立する必要がある。現在までに、繊維補強コンクリート(以下 FRC という)を用いた実験がいくつか行われ、局部破壊を抑制する効果があることが報告されている(例えば 1,2)。しかし、局部破壊の抑制効果を定量的に評価する方法について検討した例は少ない。本研究は、FRC 板に対する高速衝突実験を行い、修正 NDRC 式および飛翔体の運動エネルギーを指標として、局部破壊の限界板厚を評価する方法を検討したものである。

2. 高速衝突実験の概要

実験は、高圧空気式飛翔体発射装置を用いて行った。実験に用いた飛翔体は鋼製で、先端形状が半球形、直径 25mm、質量 46g である。試験体は、寸法が縦 50cm×横 50cm で板厚は 6~8cm である。表-1 に、短繊維および FRC の材料特性を示す。PPFRC、VFRC および DFRM は PP、PVA-1 および PVA-2 を用いており、PP および PVA-1 はコンクリートに、PVA-2 はモルタルにそれぞれ 2.0vol% 混入している。各試験体の圧縮強度は、約 43N/mm² である。実験パラメータは板厚および衝突

速度であり、各試験体の破壊モードが貫通となるまで、速度を 200m/s、250m/s、300m/s および 400m/s と変化させ、合計 17 ケースの実験を行った。

3. 修正 NDRC 式による各限界板厚の評価

図-1 に FRC 板の破壊モードおよび修正 NDRC 式³⁾で算出したプレーンコンクリート板の裏面剥離および貫通限界板厚を示す。また、各 FRC 板の実験結果に適合するように、裏面剥離限界板厚および貫通限界板厚にそれぞれ低減係数 α , β を乗じた曲線を示す。各 FRC 板の破壊モードに適合する低減係数を検討したところ、PPFRC 板、VFRC 板および DFRM 板でそれぞれ ($\alpha_P=0.85$, $\beta_P=1.00$), ($\alpha_V=0.75$, $\beta_V=0.90$) および ($\alpha_D=0.70$, $\beta_D=0.90$) となった。図から、低減係数を乗じた修正 NDRC 式の各限界板厚は、実験による破壊モードと整合していることがわかる。

4. 飛翔体の運動エネルギーによる各限界板厚の評価

修正 NDRC 式による貫入深さおよび裏面剥離限界板厚評価式($\frac{x}{d} \leq 0.65$ の場合)を、式(1)および(2)に示す。

$$\left(\frac{x}{d}\right) = \left[1.9 \times 10^{-5} \frac{NM}{d\sqrt{f_c}} \left(\frac{V_o}{d}\right)^{1.8} \right]^2 \tag{1}$$

$$\left(\frac{s}{d}\right) = 7.91 \left(\frac{x}{d}\right) - 5.06 \left(\frac{x}{d}\right)^2 \tag{2}$$

ここで、 x : 貫入深さ(m), d : 飛翔体直径(m), N : 飛翔体の形状係数, M : 飛翔体の質量(kg), V_o : 飛翔体の衝突速度(m/s), f_c : コンクリートの圧縮強度(N/m²), s : 裏面剥離限界板厚(m)である。

表-1 短繊維および FRC の材料特性

種類	短繊維の材料特性				混入量 (vol%)	圧縮強度 (N/mm ²)	マトリクス
	材料	直径 (mm)	長さ (mm)	引張強度 (N/mm ²)			
PPFRC	PP	0.7	30	500	2.0	43.8	コンクリート
VFRC	PVA-1	0.66	30	900		43.9	
DFRM	PVA-2	0.1	12	1,200		42.3	

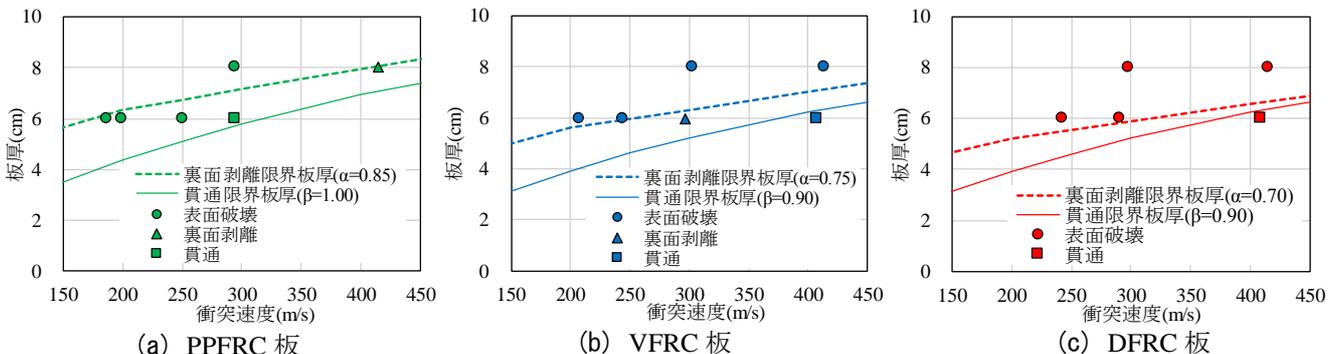


図-1 裏面剥離および貫通限界板厚の比較

キーワード 繊維補強コンクリート, 高速衝突, 裏面剥離, 貫通
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

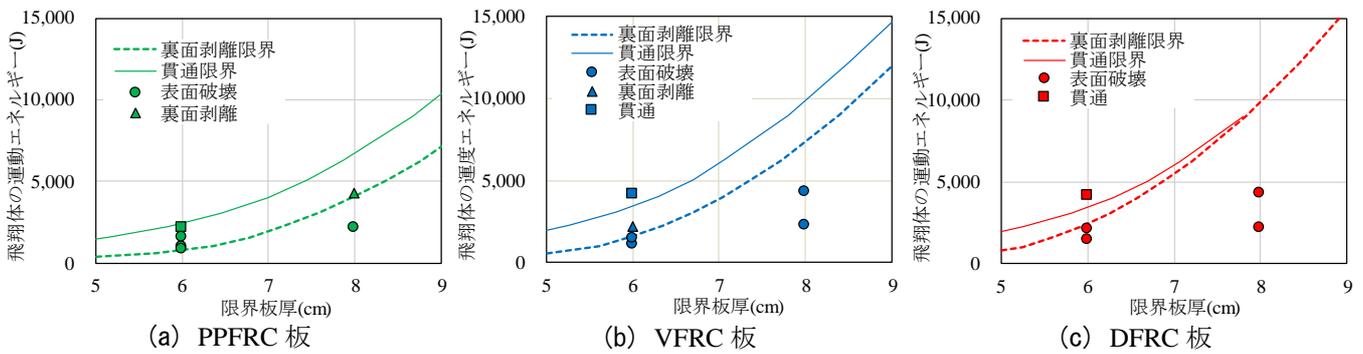


図-2 飛翔体の運動エネルギー～限界板厚関係

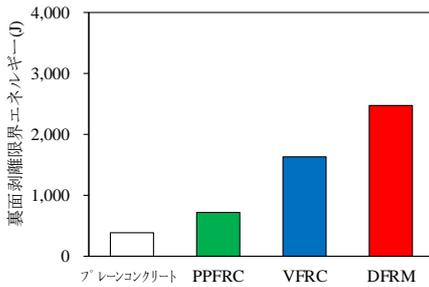


図-3 裏面剥離限界エネルギー

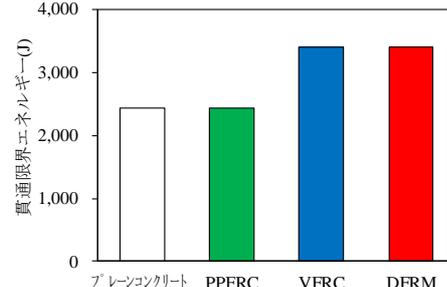


図-4 貫通限界エネルギー

Liら⁴⁾は、修正 NDRC 式の裏面剥離や貫通限界板厚評価式を修正することにより、飛翔体の運動エネルギーと各限界板厚の関係を誘導している。式(1)および(2)から求めた飛翔体の運動エネルギーと裏面剥離板厚の関係は、式(3)のようになる。

$$\left(\frac{E_k}{d^3 f_c}\right) = \left(\frac{V_o}{d}\right)^{0.2} f_c^{-\frac{1}{2}} \left[4.851 \times 10^{-3} - \sqrt{2.395 \times 10^3 - 7.748 \times 10^2 \left(\frac{s}{d}\right)^2} \right] \quad (3)$$

ここで、 E_k ：飛翔体の運動エネルギーである。

飛翔体の運動エネルギーと限界板厚の関係中の裏面剥離限界板厚 s に 3. で提案した低減係数を乗じること、飛翔体の運動エネルギーと限界板厚の関係を算出した。図-2 に、各 FRC 板の飛翔体の運動エネルギーと限界板厚の関係を示す。図から、飛翔体の運動エネルギーが与えられると、裏面剥離限界および貫通板厚が算定できることがわかる。ここで、各限界板厚時の運動エネルギーをそれぞれ裏面剥離および貫通限界エネルギーと定義する。図-3 に、板厚 6cm の場合の裏面剥離限界エネルギーを示す。裏面剥離限界エネルギーは、プレーンコンクリート板で 372J、PPFRC 板で 723J、VFRC 板で 1,626J、DFRM 板で 2,481J となった。すなわち、各 FRC 板の裏面剥離限界エネルギーをプレーンコンクリート板と比較すると、PPFRC 板で約 2 倍、VFRC 板で約 4 倍、DFRM 板で約 6.5 倍となることがわかった。また図-4 に、板厚 6cm の場合の各 FRC 板の貫通限界エネルギーを示す。貫通限界エネルギーは、プレーンコン

クリート板および PPFRC 板で 2,433J、VFRC 板および DFRM 板で 3,404J となり、プレーンコンクリート板と比較すると VFRC 板および DFRM 板では約 1.4 倍となることがわかった。

5. 結言

本研究の成果を以下に要約する。

- (1) 修正 NDRC 式に対して低減係数を乗じること、FRC 板の破壊モードを評価する方法を提案した。
- (2) 飛翔体の運動エネルギーと限界板厚の關係に低減係数を考慮することで、FRC 板の局部破壊抑制効果を定量的に評価する方法を提案した。

参考文献

- 1) 山田昌義, 田邊靖宏, 国枝稔: 飛翔体衝突下でのポリエチレン繊維補強モルタルの破壊性状, 材料, Vol.60, No.4, pp.325-331, 2011.
- 2) Tarek, H., Almusallam, Nadeem A. S., Rizwan A. I., Husain A.: Response of hybrid-fiber reinforced concrete slabs to hard projectile impact, International Journal of Impact Engineering, Vol.58, pp.17-30, 2013.
- 3) Kennedy, R. P.: A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects, Nuclear Engineering and Design, 37, pp.183-203, 1976.
- 4) Li, Q. M., Reid, S. R., Ahmad-Zaidi, A. M.: Critical impact energies for scabbing and perforation of concrete target, Nuclear Engineering and Design, 236, pp.1140-1148, 2006.