

飛来物衝突を受ける鋼繊維補強無孔性コンクリート版の局部破壊特性に関する実験的研究

防衛大学校 学生会員 ○森 広毅 正会員 別府 万寿博 市野 宏嘉
太平洋セメント株式会社 正会員 河野 克哉 岸良 竜

1. 緒言

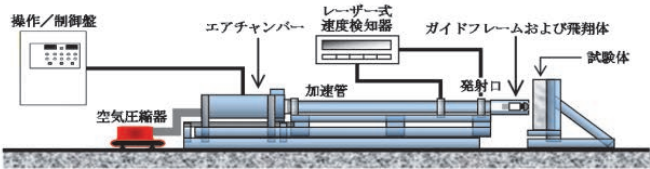
近年、原子力発電所は航空機衝突や竜巻飛来物に対しても十分な安全性を有することが求められている．このような飛来物に対する対策指針類において、防護構造物の設計法は確立されていないため、飛来物衝突に対する合理的な耐衝撃設計法および耐衝撃補強法を検討する必要がある．本研究は、飛翔体の衝突を受ける 350N/mm^2 程度の極めて高い圧縮強度を有する鋼繊維補強無孔性コンクリート（Porosity Free Concrete, PFC）版の局部破壊の特性について実験的な検討を行ったものである．

2. 実験の概要

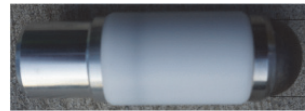
実験は、図－1 に示す高圧空気式飛翔体発射装置を用いて行った．質量 300g 、先端部の直径 25mm の鋼製飛翔体を、鉄筋コンクリート（RC）版および PFC 版に対して衝突させる実験を行った．図－2 に試験体の外観および寸法を示す．図－3 に試験体の設置要領を示す．試験体の寸法は、縦 $500\text{mm} \times$ 横 500mm であり、RC 版の版厚は 100mm とし、PFC 版の版厚は $40, 50$ および 60mm に変化させた．図－4 に RC 版の寸法を示す．PFC 版は、無孔性の超高強度モルタルに鋼繊維（直径： 0.2mm 、長さ： 15mm 、引張強度： 2800N/mm^2 ）を体積比で 2.0% および 3.5% 混入して作製した．コンクリートの圧縮強度は 28N/mm^2 である．PFC の圧縮強度は、繊維量 2.0% および 3.5% でそれぞれ 347N/mm^2 および 337N/mm^2 である．RC 版の実験ケースは、版厚 100mm に対して衝突速度 $150\text{m/s} \sim 240\text{m/s}$ で衝突させた．PFC 版の実験ケースは、版厚 $40\text{mm} \sim 60\text{mm}$ に対して衝突速度 $50\text{m/s} \sim 240\text{m/s}$ で衝突させた．表－1 に、以下で考察する実験ケース名を示す．

3. 実験結果および考察

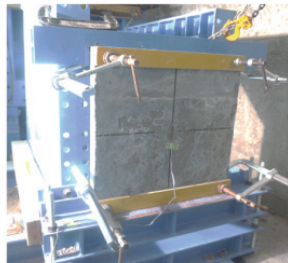
図－5 に、衝突速度約 150m/s のケースで生じた試験体の破壊性状を示す．図に示す破線は試験体に生じたひび割れを示している．RC-100-1 のケースでは、断面の斜めひび割れが裏面に進展している．しかし、裏面には 1 本のひび割れしか生じていないため、破壊モードを裏面



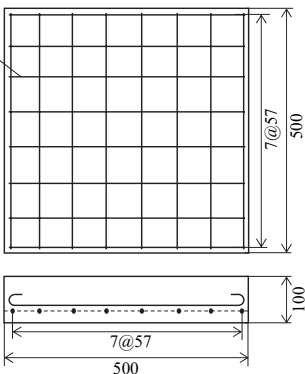
図－1 高圧空気式飛翔体発射装置の概要



図－2 飛翔体の外観および寸法



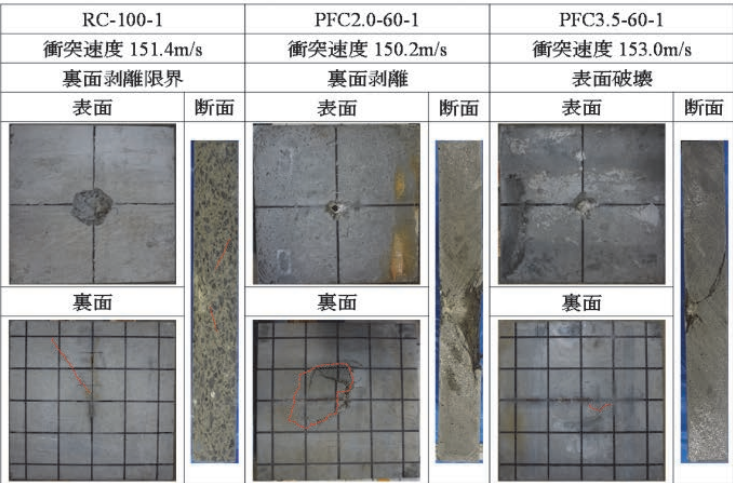
図－3 試験体の設置要領



図－4 RC 版の寸法

表－1 実験ケース名

ケース	繊維混入量 (%)	版厚 (mm)	圧縮強度 (N/mm ²)	衝突速度 (m/s)
RC-100-1	0.0	100	28	151.4
RC-100-2	0.0	100	28	181.4
PFC2.0-60-1	2.0	60	347	150.2
PFC2.0-60-2	2.0	60	347	184.7
PFC3.5-60-1	3.5	60	337	153.0
PFC3.5-60-2	3.5	60	337	179.2



図－5 試験体の破壊性状（衝突速度約 150m/s ）

剥離限界とした。PFC2.0-60-1 の破壊モードは裏面剥離であり、断面には多数の斜めひび割れが生じ、裏面には破線で示すひび割れが認められた。PFC3.5-60-1 の破壊モードは表面破壊であり、断面に明瞭な斜めひび割れが生じているが、裏面には微小なひび割れのみが生じていた。すなわち、版厚 60mm、繊維量 3.5% の PFC 版は衝突速度約 150m/s において、版厚 100mm の RC 版と同様あるいはより小さな破壊を示すことがわかる。

図-6 に、衝突速度約 180m/s における試験体の破壊性状を示す。RC-100-2 の破壊モードは裏面剥離であり、断面のひび割れが分散することなく斜めひび割れが生じ、裏面のコンクリートが飛散した。PFC2.0-60-2 のケースでは、断面に複数のひび割れが生じており、裏面をみると裏面剥離が生じるとともに試験体の中心部に貫通孔が生じていた。PFC3.5-60-2 のケースは裏面剥離限界であり、断面には衝突部から裏面にかけて斜めひび割れが生じており、ひび割れが大きく開口しているが、繊維の架橋効果により剥離片の飛散が抑制されていた。また、PFC 版の断面には多数のひび割れが発生しており、ひび割れ分散効果が発現されている。すなわち、繊維混入量の増加により、同等の圧縮強度でも裏面剥離の抑制効果が高くなることがわかる。

図-7 に、修正 NDRC 式¹⁾による PFC 版の裏面剥離限界版厚の評価を示す。なお図中には、各 PFC 版の実験結果に適合するように、修正 NDRC 式により算出した RC 版の裏面剥離限界版厚および貫通限界版厚に、それぞれ低減係数 α および β を乗じた限界版厚を示している。図-7 より、繊維量 2.0% および 3.5% の PFC 版の裏面剥離限界に関する低減係数 α は、それぞれ 0.65 および 0.55 であった。すなわち、RC 版の裏面剥離限界版厚と比較すると、繊維量 2.0% および 3.5% の PFC 版の裏面剥離限界版厚は、それぞれ 35% および 45% 低減したことを示している。また、図-7 より、繊維量 2.0% および 3.5% の PFC 版の貫通限界版厚に関する低減係数 β は、それぞれ 0.70 および 0.65 であった。すなわち、RC 版の貫通限界版厚と比較すると、繊維量 2.0% および 3.5% の PFC 版の貫通限界版厚は、それぞれ 30% および 35% 低減したことを示している。

4. 結言

本研究は、飛翔体の衝突を受ける鋼繊維補強無孔性コンクリート (PFC) 版の耐衝撃性を検討したものである。実験結果から、PFC 版の破壊損傷は RC 版と比較して飛躍的に抑制された。修正 NDRC 式に乗じる低減係数から、繊維を 2.0% および 3.5% 混入した PFC 版の破壊限界版厚は、RC 版と比較して、裏面剥離に対してそれぞれ 35% および 45%、貫通に対してそれぞれ 30% および 35% 低減した。

参考文献

- 1) Kennedy, R. P. : A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects, *Nuclear Engineering and Design*, Vol37, pp183-203, 1976.

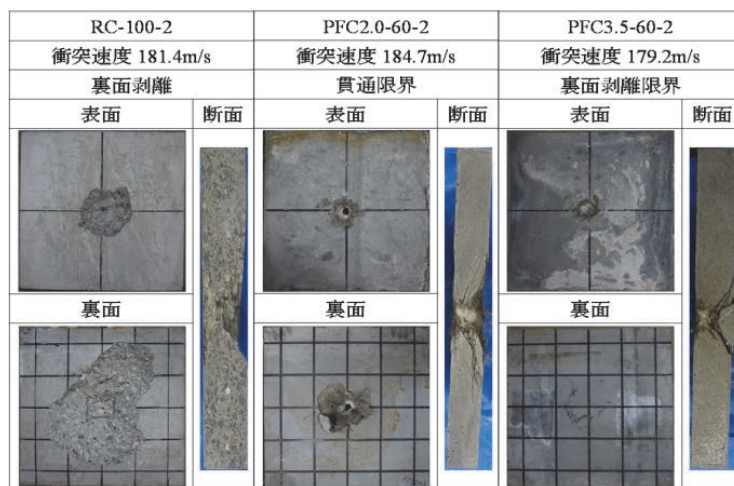
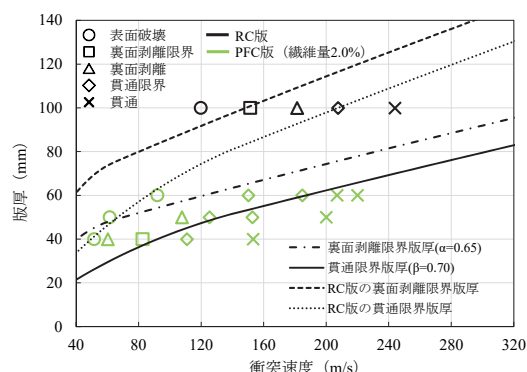
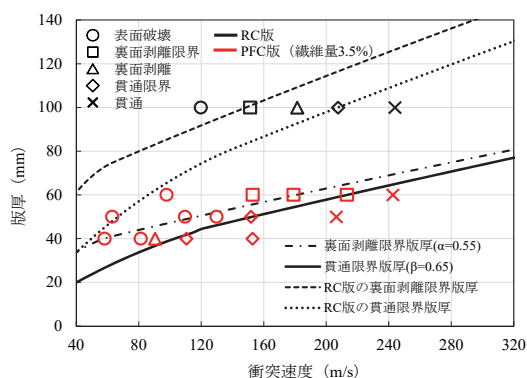


図-6 試験体の破壊性状 (衝突速度約 180m/s)



(a) PFC 版 (繊維混入量 2.0%)



(b) PFC 版 (繊維混入量 3.5%)

図-7 修正 NDRC 式による限界版厚の評価