

論文 剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリート板の局部破壊性状における短繊維補強と鉄筋補強の効果に関する実験的検討

森田 武*1・別府 万寿博*2・鈴木 誠*3

要旨：本検討では、剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリート板を短繊維と鉄筋で補強した場合および2種類の短繊維を併用して補強した場合における局部破壊の抑制効果を把握することを目的とした。実験パラメータは、剛飛翔体の衝突速度、短繊維補強と鉄筋補強の有無とし、短繊維補強にはポリプロピレン短繊維とポリエチレンテレフタレート短繊維の2種類を用いた。実験の結果、短繊維補強による表面破壊直径の低減と裏面剥離の抑制、鉄筋補強による裏面剥離深さの低減などの効果が確認された。これらの局部破壊の抑制効果は、2種類の短繊維を併用し、かつ鉄筋で補強することによって、さらに高くなる傾向が認められた。

キーワード：高速衝突、剛飛翔体、局部破壊、コンクリート板、短繊維補強、鉄筋補強

1. はじめに

近年、不測の爆発事故や自然災害によって衝撃的な荷重がコンクリート構造物に作用し、予測できない損傷や破壊を生じるケースが増加している。

衝撃荷重を受けるコンクリート構造物の破壊は、大きく全体破壊と局部的な破壊に分類できる。飛翔体が高速で衝突すると、衝突条件によっては表面破壊（衝突面の破壊）、裏面剥離（衝突面と反対面のコンクリートの剥離）、貫通等の局部破壊が生じる¹⁾。コンクリート構造物で裏面剥離や貫通が生じると、衝突面裏側に飛散物が生じて構造物内の人命や機器に危害を及ぼす恐れがある。

既報では、短繊維補強コンクリートの局部破壊性状を実験的に検討するとともに、有限要素法による局部破壊解析方法の検討ならびにコンクリートの引張軟化特性が局部破壊性状に及ぼす影響をパラメトリックスタディによって検討した。これらの検討により、短繊維補強が局部破壊の抑制に効果があることを示した²⁾。さらに、飛翔体の衝突速度や短繊維の種類・長さ・径・混入率をパラメータとした実験によって、短繊維補強による局部破壊の抑制効果を示すとともに、短繊維補強していないコンクリート板の局部破壊性状について、鉄筋補強の有無によって大きな差異がないことを示した³⁾。

本研究では、既報で未検討であった、鉄筋補強した短繊維補強コンクリート板および2種類の短繊維を併用した短繊維補強コンクリート板における局部破壊の抑制効果の把握を目的として、高速衝突実験を実施した。実験では、剛飛翔体の衝突速度、短繊維補強と鉄筋補強の有

無を実験パラメータとし、短繊維補強にはポリプロピレン短繊維とポリエチレンテレフタレート短繊維を用いた。

2. 実験方法

2.1 試験体

(1) 使用材料と調合

コンクリートの使用材料を表-1に、ベースコンクリート（繊維を混入していないコンクリート、以下、PLAINと称す）の調合を表-2に示す。短繊維補強には、繊維長10mm・繊維径0.05mmのポリプロピレン短繊維（以下、PP短繊維と称す）および繊維長30mm・繊維径0.70mmのポリエチレンテレフタレート短繊維（以下、PET短繊維と称す）を用いた（写真-1）。短繊維の混入率は、PLAINに対して外割りで1.0vol%とした。短繊維補強は、PP短繊維を単独で使用した場合（以下、PP10と称す）およびPP短繊維とPET短繊維を0.5vol%ずつ混合して使用した場合（以下、P5T5と称す）の2種類とした。P5T5

表-1 使用材料

材料	種類・物性など
セメント	普通ポルトランドセメント
粗骨材	硬質砂岩（砕石2005，青梅産），表乾密度2.65 g/cm ³
細骨材	山砂（君津法木産），表乾密度2.63g/cm ³
混和剤	AE減水剤，AE剤，空気量調整剤
短繊維	ポリプロピレン： 長さ20mm，径0.05mm，密度0.91g/cm ³ ポリエチレンテレフタレート： 長さ30mm，径0.70mm，密度1.32g/cm ³

表-2 ベースコンクリートの調合

調合名	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)			混和剤	
			水	セメント	細骨材		粗骨材
PLAIN	55	46	175	318	817	973	AE減水剤1.0%

*1 清水建設（株） 技術研究所 博士（工学）（正会員）

*2 防衛大学校 建設環境工学科 博士（工学）（正会員）

*3 清水建設（株） 技術研究所 工博

では2種類の繊維を併用しているが、細径のPP短繊維は、微細ひび割れに対する抵抗性の向上、太径で骨材の最大寸法よりも長いPET短繊維は、拡大したひび割れに対する抵抗性の向上を目的としたものである。

コンクリートの空気量は空気量調整剤を適宜添加して、約5%になるように調整した。高速衝突実験時（材齢35、36日）の圧縮強度は、PLAINが39N/mm²、PP10が25N/mm²、P5T5が33N/mm²であった。また、短繊維補強コンクリートの曲げ特性を把握するため、曲げタフネス試験⁴⁾を併せて実施した結果、曲げじん性係数はPLAINが0.43N/mm²、PP10が1.93N/mm²、P5T5が2.54N/mm²であった。PP10とP5T5は短繊維の混入によってPLAINよりも圧縮強度は低く、曲げじん性は高くなった。鉄筋にはD6(SD295A、降伏点342N/mm²)を用いた。

(2) 試験体の種類と実験条件

試験体の種類と実験条件の一覧を表-3に、試験体の形状・寸法を図-1に示す。試験体記号はコンクリートの種類、鉄筋の有無(N, R)および衝突速度(3, 4)を表すものとした。今回の実験に供した試験体は合計9体である。表-3中のPLAIN-N-3, PLAIN-R-3およびPP10-N-3は本実験とは別に行った実験であるが、比較・考察のために文献3)から引用して示すこととした。

試験体は衝突面を正方形とした板で、寸法は[縦]50cm×[横]50cm×[厚さ]8cmである。図-1に示す無筋コンクリート板と鉄筋コンクリート板(D6@100, 格子状配筋)をPLAIN, PP10およびP5T5の各々について製作した。

2.2 高速衝突実験装置

高速衝突実験には、図-2に示す高圧空気式飛翔体発射装置を用いた。本装置は、圧縮器・増圧器・エアチャンバー・発射管（長さ12m、内径35mm）で構成され、圧縮空気て飛翔体を発射・加速する。本実験では、直径25mm、質量50g、先端形状が半球型の鋼製（SS400）の剛飛翔体を本装置から発射し、上下端を5cm幅で固定支持したコンクリート板に衝突させた。衝突速度は、既往の実験結果⁵⁾を参考にして、普通強度コンクリート板で裏面剥離が生じる速度である315m/sおよび飛翔体が貫通する速度である415m/sとした。衝突速度は、図-2の発射口に設置したレーザー式速度検出センサで測定した。

3. 実験結果および考察

実験における飛翔体の衝突速度は、設定速度315m/sに対して305~315m/s、415m/sに対して406~409m/sで

あった。以下では設定速度を衝突速度として表記する。

3.1 破壊状況（外観・切断面）

高速衝突実験後の試験体の表面・裏面および厚さ方向に切断した断面の状況を衝突速度ごとに写真-2, 3に示す。写真とともに示した貫入深さおよび裏面剥離深さは、各々の深さの最大値である。また、表面破壊直径と裏面剥離直径は、破壊面の最大長さ、最小長さおよび中間程度の長さの測定値を平均して求めた値である。



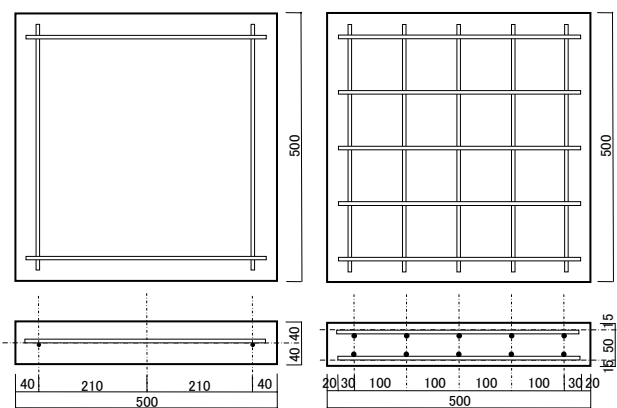
〔PP短繊維〕 〔PET短繊維〕

写真-1 短繊維の外観

表-3 試験体の種類

試験体記号	短繊維(vol%)		鉄筋D6	衝突速度(m/s)	
	PP	PET		315	415
PLAIN-N-3 [※]	—	—	—	○	—
PLAIN-N-4	—	—	—	—	○
PLAIN-R-3 [※]	—	—	○	○	—
PLAIN-R-4	—	—	○	—	○
PP10-N-3 [※]	1.0	—	—	○	—
PP10-N-4	1.0	—	—	—	○
PP10-R-3	1.0	—	○	○	—
PP10-R-4	1.0	—	○	—	○
P5T5-N-3	0.5	0.5	—	○	—
P5T5-N-4	0.5	0.5	—	—	○
P5T5-R-3	0.5	0.5	○	○	—
P5T5-R-4	0.5	0.5	○	—	○

※本実験とは別に行った実験結果³⁾を引用



〔無筋コンクリート板〕 〔鉄筋コンクリート板〕

図-1 コンクリート板試験体の形状・寸法

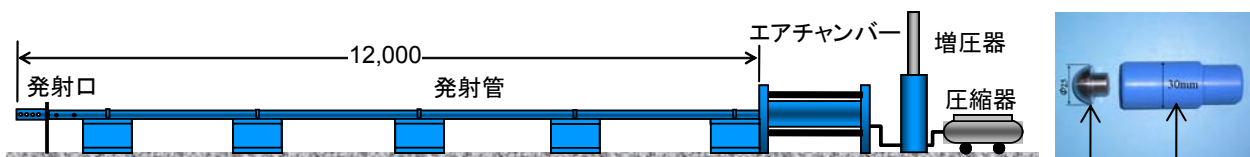


図-2 高圧空気式飛翔体発射装置と剛飛翔体

剛飛翔体 固定具

試験体	無筋コンクリート		鉄筋コンクリート	
	左：衝突面，右：裏面，下：断面(上面＝衝突面)		左：衝突面，右：裏面，下：断面(上面＝衝突面)	
PLAIN				
	衝突面：貫入深さ＝26mm，表面破壊直径＝130mm 裏面：剥離深さ＝38mm，裏面剥離直径＝244mm		衝突面：貫入深さ＝21mm，表面破壊直径＝117mm 裏面：剥離深さ＝33mm，裏面剥離直径＝230mm	
PP10				
	衝突面：貫入深さ＝23mm，表面破壊直径＝95mm 裏面：裏面剥離なし		衝突面：貫入深さ＝27mm，表面破壊直径＝114mm 裏面：裏面剥離なし	
P5T5				
	衝突面：貫入深さ＝26mm，表面破壊直径＝77mm 裏面：裏面剥離なし		衝突面：貫入深さ＝28mm，表面破壊直径＝83mm 裏面：裏面剥離なし	

写真-2 高速衝突実験後の試験体の状況（衝突速度 315m/s）

(1) 衝突速度 315m/s の場合

PLAIN のみが裏面剥離した。表面破壊直径は PLAIN > PP10 > P5T5 の順に小さく，表面破壊直径の低減に PP 短繊維と PET 短繊維の併用が有効であると言える。PLAIN-R の裏面剥離は，鉄筋によって剥離片の脱落が辛うじて防止されたが，裏面剥離深さと直径は PLAIN-N よりも若干小さくなる程度であった。PP10-N,R と P5T5-N,R では，板内部から裏面近くまで斜め方向にひび割れが生じており，PP10 と P5T5 において鉄筋補強の効果は明確には認められない。

(2) 衝突速度 415m/s の場合

P5T5-R 以外は裏面剥離した。表面破壊直径は PLAIN > PP10 > P5T5 の順に小さくなった。裏面剥離深さは PLAIN > PP10 > P5T5 の順に小さく，かつ，鉄筋補強によってさらに小さくなった。これらの結果からも P5T5 の有効性が認められる。また，鉄筋補強の効果は，PLAIN，PP10，P5T5 における裏面剥離深さの低減に現れている。

3.2 局部破壊の評価

(1) 表面破壊直径と貫入深さ

図-3 に表面破壊直径と貫入深さの関係を示す。なお，

試験体	無筋コンクリート		鉄筋コンクリート	
	左：衝突面，右：裏面，下：断面(上面＝衝突面)		左：衝突面，右：裏面，下：断面(上面＝衝突面)	
PLAIN				
	衝突面：貫入深さ＝24mm，表面破壊直径＝150mm 裏面：剥離深さ＝50mm，裏面剥離直径＝284mm		衝突面：貫入深さ＝26mm，表面破壊直径＝132mm 裏面：剥離深さ＝29mm，裏面剥離直径＝236mm	
PP10				
	衝突面：貫入深さ＝37mm，表面破壊直径＝120mm 裏面：剥離深さ＝44mm，裏面剥離直径＝162mm		衝突面：貫入深さ＝29mm，表面破壊直径＝113mm 裏面：剥離深さ＝22mm，裏面剥離直径＝184mm	
P5T5				
	衝突面：貫入深さ＝31mm，表面破壊直径＝108mm 裏面：剥離深さ＝35mm，裏面剥離直径＝206mm		衝突面：貫入深さ＝31mm，表面破壊直径＝114mm 裏面：裏面剥離なし	

写真-3 高速衝突実験後の試験体の状況（衝突速度 415m/s）

図-3 と後掲の図-5, 6 には, PLAIN-N,R と PP10-N の衝突速度 215m/s での実験結果³⁾, および PET 短繊維を 1.0vol% 混入した試験体 (以下, PET10-N と称す) の衝突速度 215m/s と 315m/s での実験結果³⁾を併せて示す。

普通強度コンクリート (圧縮強度 25.8N/mm²) を用いて本実験と同様な実験を行った研究⁵⁾によると, 表面破壊直径 (C_d) と貫入深さ (t_s) には $C_d=5.11t_s$ の関係がある。圧縮強度が文献⁵⁾と若干異なるが, PLAIN と PET10 は概ね $C_d=5.11t_s$ で近似されている。一方, PP10 と P5T5 の結果を線形回帰すると $C_d=3.54t_s$ となり, PLAIN と

PET10 に比べて表面破壊直径が約 3 割低減されている。

また, P5T5 と PET10 を比較すると, 表面破壊直径は P5T5 の方が小さい。飛翔体の衝突直後にコンクリート板には衝突点から塑性領域が半球状に進展するが⁶⁾, PET 短繊維よりも PP 短繊維の方がコンクリートの圧縮じん性の向上に効果があり³⁾, このために表面破壊直径が低減されたものと推定される。

鉄筋補強については, PLAIN-N,R の比較ならびに PP10-N,R および P5T5-N,R の比較において, 表面破壊直径や貫入深さの抑制に対して顕著な効果は認められない。

(2) 裏面剥離直径と裏面剥離深さ

図-4 に裏面剥離直径と裏面剥離深さの関係を示す。無筋の普通強度コンクリート板 (板厚 60~90mm) の裏面剥離直径は 225mm 程度になることが文献 5) に示されている。本実験では, PLAIN が 225mm 以上, PP10 と P5T5 が 225mm 以下になり, 短繊維補強による裏面剥離直径の低減効果が若干見られる。短繊維補強によってコンクリートの引張軟化特性や曲げじん性が向上するため^{2,3)}, 衝突速度 315m/s では裏面剥離が抑制され, 415m/s では裏面剥離直径が低減されたものと考えられる。

一方, 鉄筋補強によって裏面剥離深さが低減されている。本実験の鉄筋コンクリート板には衝突面側と裏面側に鉄筋が格子状に配されており, 鉄筋格子の交点が飛翔体の衝突軸上にあった。鉄筋格子によって裏面側に生じる局所的な変形が抑制された可能性や鉄筋格子の交点が不連続点となって応力波が緩和された可能性などが考えられ, これらの複合的な作用によって, 鉄筋コンクリート板の裏面剥離深さが無筋コンクリート板よりも低減されたものと推察される。

以上より, 短繊維補強と鉄筋補強はそれぞれ異なったメカニズムで裏面剥離を抑制していると考えられ, これらを併用することによって, さらに耐衝撃性能の向上が図れるものと考えられる。

3.3 裏面剥離限界の予測に関する検討

(1) 貫入深さ・板厚と裏面剥離の関係

図-5 に貫入深さ(t_s)/板厚(d)と衝突速度の関係を示し, 裏面剥離した試験体には赤矢印を付した。PLAIN-N,R は衝突速度 315m/s 以上で裏面剥離を生じ, PP10-N,R および P5T5-N は 415m/s 以上で裏面剥離を生じた。

文献 5) では, コンクリートの圧縮強度 (25.8~103.2N/mm²) や板厚 (30~100mm) に係わらず, $t_s/d > 0.25$ で裏面剥離することが示されており, 本実験の PLAIN-N,R も $t_s/d > 0.25$ で裏面剥離した。一方, PP10-N,R と P5T5-N では, $t_s/d > 0.35$ で裏面剥離した。裏面剥離を生じる t_s/d の下限 (以下, 裏面剥離限界相対貫入深さと称す) は PLAIN で 0.25, PP10 と P5T5 で 0.35 となり, 短繊維の混入により, 裏面剥離に至る裏面剥離限界相対貫入深さが大きくなる。短繊維補強の有無で t_s が変わらないならば, 短繊維補強は無補強コンクリート板の板厚を 1.4 倍したのと同様な効果があると言える。

なお, 貫入深さが既知であれば, それを裏面剥離限界相対貫入深さで除すことで, 裏面剥離する板厚を求められる。貫入深さの算定については, 次の(2)で述べる。

(2) 貫入深さと衝突速度の関係

図-6 に, 貫入深さと衝突速度の関係に関する実験結果, 修正 NDRC 式 (式(1), 式(2)参照)¹⁾によって算定した貫入深さ, および(1)で述べた裏面剥離限界相対貫入深

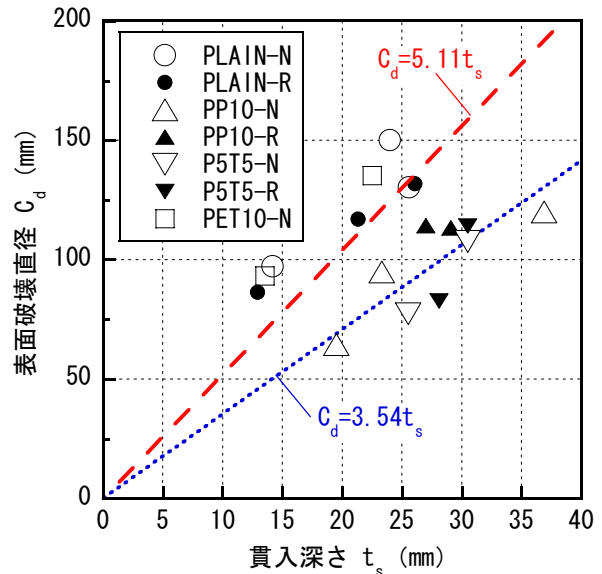


図-3 表面破壊直径と貫入深さの関係

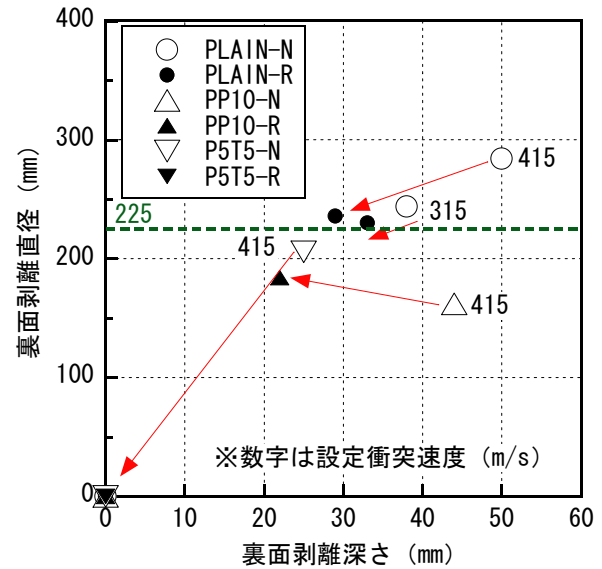


図-4 裏面剥離直径と裏面剥離深さの関係

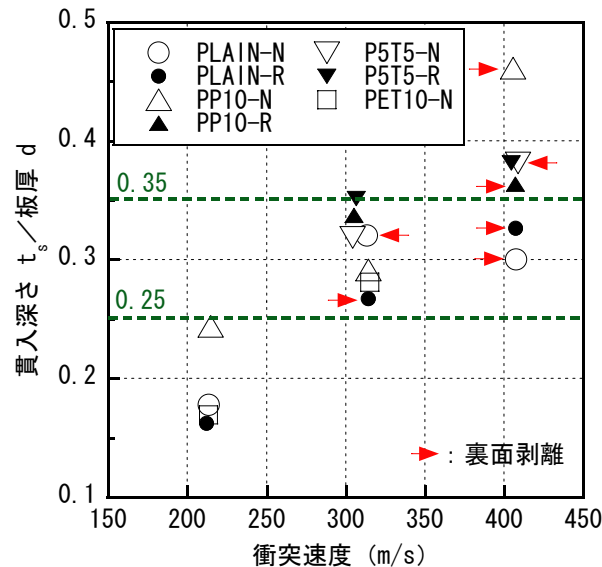


図-5 貫入深さ/板厚と衝突速度の関係と裏面剥離

さに板厚を乗じて求めた裏面剥離を生じる貫入深さの下
限値（以下、裏面剥離限界貫入深さと称す）を示す。

$$t_s = 3.899 \cdot 10^{-3} \frac{NWD(V_0/D)^{1.8}}{\sqrt{f'_c}} \quad (t_s \leq 2D) \quad (1)$$

$$t_s = 3.787 \cdot 10^{-6} \frac{NWD(V_0/D)^{1.8}}{\sqrt{f'_c}} + D \quad (t_s \geq 2D) \quad (2)$$

ここに、

t_s : 衝突面における飛翔体の貫入深さ (cm), N : 先端形状係数 (半球: 0.84), W : 飛翔体の質量 (kg),
 D : 飛翔体の直径 (cm), V_0 : 飛翔体の衝突速度 (m/s), f'_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

修正 NDRC 式による算定結果は、概ね今回の実験結果
の上限を近似しており、短繊維補強コンクリート板の貫
入深さも修正 NDRC 式によって大略算定可能であると
判断される。なお、PP10 と P5T5 の貫入深さの実験値が
PLAIN よりも若干深くなったのは、PLAIN よりも圧縮強
度が低かったことによるものと考えられる。

(3) 裏面剥離と衝突速度の関係

図-6 において、裏面剥離を生じる衝突速度の下限値
(以下、裏面剥離限界衝突速度と称す) は、PLAIN では
修正 NDRC 式(39)と $0.25d=20\text{mm}$ の交点である 250m/s 、
PP10 では修正 NDRC 式(25)と $0.35d=28\text{mm}$ の交点であ
る 315m/s となる。実験で裏面剥離した衝突速度はこれら
の値以上であり、本実験結果の範囲では妥当な評価結果
となっている。このことから、裏面剥離限界衝突速度は、
(1)で示した裏面剥離限界相対貫入深さ、および(2)で示
した修正 NDRC 式による貫入深さと衝突速度の関係を
用いることによって、概ね推定可能であると言える。

なお、修正 NDRC 式には、無補強コンクリート板の裏
面剥離限界厚さに関する評価式も示されている。その式
を適用して 80mm のコンクリート板の裏面剥離限界衝
突速度を算定すると、コンクリートの圧縮強度が 25N/mm^2
で 218m/s , 39N/mm^2 で 246m/s となり、図-6 に示した修
正 NDRC 式による貫入深さと $0.25d=20\text{mm}$ の交点の衝
突速度とほぼ一致する。

4. まとめ

短繊維補強と鉄筋補強による局部破壊の抑制効果を
把握するため、コンクリート板に対する高速衝突実験を
実施した。その結果、裏面剥離の抑制に対する短繊維補
強の有効性が確認された。鉄筋補強は主に裏面剥離深さ
の低減に効果があった。そして、細径短繊維 (PP) と太
径短繊維 (PET) を併用して短繊維補強し、かつ鉄筋補

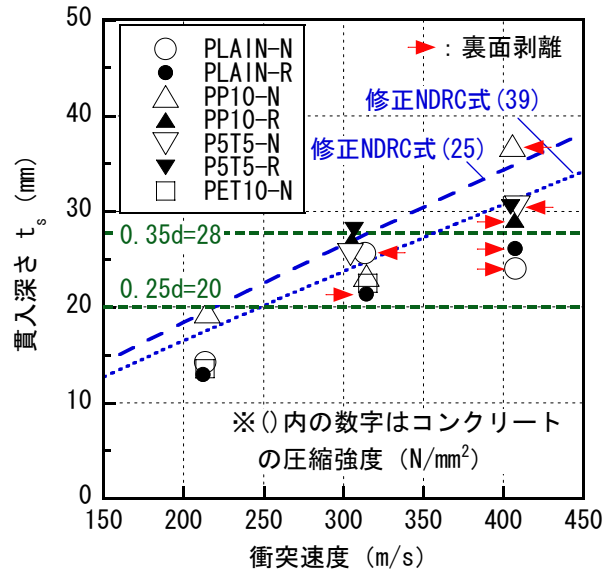


図-6 貫入深さと衝突速度の関係と裏面剥離

強すると裏面剥離の抑制効果がさらに高くなる可能性が
示された。また、飛翔体の条件、繊維混入率、板厚など、
適用範囲に関する検討が必要であるが、貫入深さの評価
式と本実験から得られた裏面剥離限界相対貫入深さの関
係を用いた、短繊維補強コンクリート板に関する裏面剥
離限界（板厚と衝突速度）の予測方法の一案を示した。

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, 37, pp.183-203, 1976.
- 2) 森田武, 別府万寿博, 鈴木誠: 剛飛翔体の高速衝突に対する短繊維補強コンクリート板の破壊性状に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.661~666, 2012.6.
- 3) 森田武, 別府万寿博, 鈴木誠: 高速衝突を受けるポリプロピレン短繊維補強コンクリートの耐衝撃性能, 日本建築学会構造系論文集, 第 684 号, pp.319-327, 2013.3.
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書 [規準編]「鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度および曲げタフネス試験方法 (案) (JSCE-G 552-2010)」, 2010.
- 5) 別府万寿博, 三輪幸治, 大野友則, 塩見昌紀: 鋼製剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリート板の局部破壊に関する実験的研究, 土木学会論文集, Vol.63, No.1, pp.178-191, 2007.3.
- 6) 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, 2009.10.