

剛飛翔体の中速度衝突を受けるコンクリート板の 損傷に関する基礎的考察

別府万寿博 上野裕稔

平成27年3月

防衛大学校理工学研究報告 第52巻 第2号 別刷

剛飛翔体の中速度衝突を受けるコンクリート板の損傷に関する基礎的考察

別府 万寿博* 上野 裕稔**

A FUNDAMENTAL STUDY OF THE LOCAL DAMAGE OF CONCRETE PLATES SUBJECTED TO MEDIUM VELOCITY IMPACT

By Masuhiro Beppu* and Hironori Ueno**

This study is intended to investigate failure mechanism of plain concrete plates subjected to medium velocity impact. In a series of tests, a spherical nose projectile of a mass of 8.3kg and a concrete plate of 18cm in thickness were used. In order to examine the impact behavior, impact load, reaction force and strain time history were measured. Test data revealed that the failure of the concrete plate under medium velocity impact loading was generated after the reaction force emerged unlike high velocity impact condition. In order to estimate the failure state of a concrete plate subjected to medium velocity impact, the theoretical model proposed by Miwa et al. was applied and validated through comparison between theoretical and experimental results.

Keywords: medium velocity impact, concrete plate, spalling, scabbing

1. 緒言

近年の気候変動の影響を受けて竜巻が多発する傾向にあり、人命および建物への被害が多く発生している。2007～2012 年を平均した 1 年あたりの竜巻発生確認数は、海上竜巻を除いて約 24 件であり、平成 24 年に発生した茨城県の竜巻災害においては、1 名が死亡、37 名が負傷し、238 棟の建物が被害を受けた¹⁾。また、平成 25 年に埼玉県および千葉県で発生した竜巻災害では、計 64 名が負傷し、1,156 棟の建物が被害を受けた¹⁾。これらの災害の中には、竜巻の風圧力による直接的な被害だけでなく、様々な物体が飛来物となって

衝突し、人命または構造物に被害が発生したケースも多い。国内における竜巻の最大風速は 100m/s と考えられており²⁾、この風圧によって落下する飛散物（以下では竜巻飛散物と呼ぶ）の衝突速度は最大で 60m/s と推測されている（表 1）³⁾。このような竜巻飛散物に対して、これまでにガラス窓や建築物の外装材の耐衝撃性の把握や補強対策が検討されている⁴⁾。また、2013 年に提示された原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（案）及び解説⁵⁾の中では、飛来物の質量と速度が具体的に明示されており、これらの竜巻飛散物に対して原子力発電施設の安全性を確認することを義務づけている。しかし、衝突速度数十 m/s の竜巻飛散物に対する構造物の耐衝撃設計法は確立されていないのが現状である。

* 防衛大学校 システム工学群 建設環境工学科 准教授
**防衛大学校 理工学研究科前期課程(第 52 期)

表 1 飛来物および最大速度の設定例³⁾

Table.1 Set up example of projectile and maximum velocity

飛来物の種類	棒状物		板状物	塊状物	
	鋼製パイプ	鋼製材	コンクリート板	コンテナ	トラック
サイズ(m)	長さ×直径 2×0.05	長さ×幅×奥行 4.2×0.3×0.2	長さ×幅×厚さ 1.5×1×0.15	長さ×幅×奥行 2.4×2.6×6	長さ×幅×奥行 5×1.9×1.3
質量(kg)	8.4	135	540	2300	4750
最大水平速度(m/s)	49	57	30	60	34
最大鉛直速度(m/s)	33	38	20	40	23

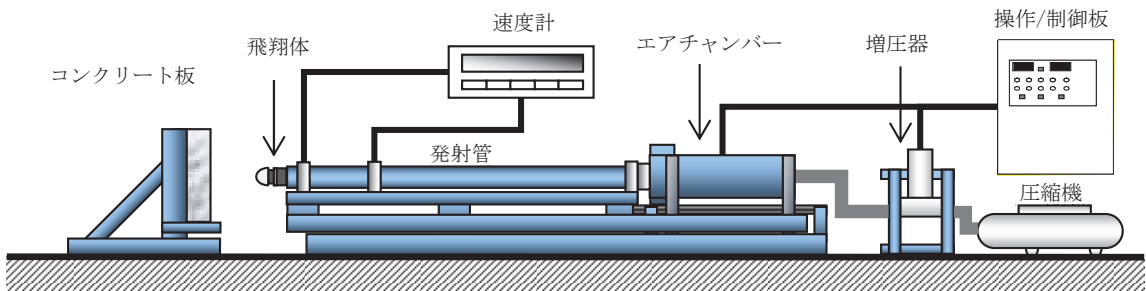


図 1 高圧空気式飛翔体発射装置

Fig.1 Air gun using high pressurized air



図 2 鋼製飛翔体

Fig.2 Rigid steel projectile

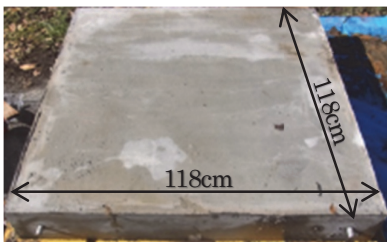


図 3 コンクリート試験体

Fig.3 Concrete specimen

一般に、衝撃荷重を受けるコンクリート構造物は、曲げ・せん断破壊等の全体破壊だけでなく、衝突エネルギーの増大につれて表面破壊、貫入、裏面剥離および貫通といった局所的な破壊が発生する⁵⁾。既往の研究としては、岸らは落石に対する防護構造物であるロックシェッドを対象として、衝突速度 10m/s 以下の低速度衝突に対する鉄筋コンクリートはりや版の耐衝撃設計法を検討している^{6),7)}。また、航空機落下や爆発災害を対象として、衝突速度 200m/s～500m/s の高速度衝突を受けるコンクリート板の局部破壊に関する研究も行われている^{8)~13)}。しかし、竜巻飛散物のような中速度領域（衝突速度 20～60m/s）に対するコンクリート部材の破壊や耐衝撃設計法に関する研究は非常に

少ない。

本研究は、中速度衝突に対するコンクリート版の耐衝撃性に関する基礎的な検討を行ったものである。まず、質量 8.3kg の鋼製飛翔体を数十 m/s の中速度で衝突させる飛翔体発射装置を開発した。次に、中速度衝突実験装置を用いて、板厚 18cm のプレーンコンクリート板に対する衝突実験を行い、試験体の破壊性状を確認した。なお、中速度衝突を受けるプレーンコンクリート板の衝撃応答の特徴を調べるため、衝撃荷重、支点反力およびコンクリート板内部のひずみ応答を計測した。最後に、三輪らが提案した高速衝突を受けるコンクリート板の裏面剥離発生を評価する手法¹³⁾を、中速度衝突を受けるプレーンコンクリート板へ適用し、中速度領域における妥当性を検討した。

2. 中速度衝突を受けるコンクリート板の破壊性状

2.1 中速度衝突実験の概要

現有している高速飛翔体発射装置は、質量 50g～1kg の飛翔体を速度 100m/s～500m/s で発射することができるが、質量が数 kg の飛翔体を数十 m/s の中速度で発射することはできない。そこで、図 1 に示す高圧空気式飛翔体発射装置を新たに開発した。

高圧空気式飛翔体発射装置は、圧縮器、増圧器、エアチャンバーおよび発射管で構成されている。本装置は、圧縮空気圧力を調節することによって、質量 3～10kg の鋼製飛翔体を速度約 10～70m/s の速度で発

表2 コンクリートの配合

Table.1 Mix proportion of concrete

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg / m ³)				
				水 W	セメント C	細骨材 s	粗骨材 G	混和材
20	15	52	45.3	168	324	809	1006	3.24

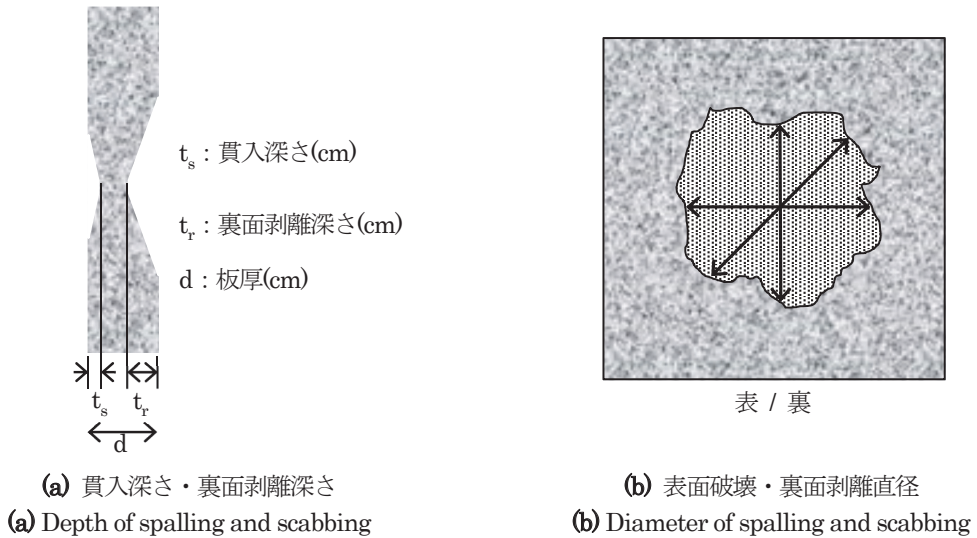


図4 局部破壊の計測位置

Fig.4 Measurement position of local damage

射することができる。図2に、本研究で用いた鋼製飛翔体を示す。飛翔体は、先端形状が半球形であり、表1に示す竜巻飛散物において最も軽量である飛散物を参考にして、質量8.3kg（直径80mm）とした。図3にコンクリート試験体を示す。コンクリート板の寸法は、縦118cm×横118cm、板厚が18cmである。衝突実験によるコンクリートの破片化を防止するため、補強用鉄筋D22を周囲に4本配筋している。コンクリートの平均圧縮強度は29.4N/mm²である。コンクリートの配合を表2に示す。コンクリート板は、飛翔体射出口からコンクリート板表面まで約10cmとなるように、周囲4か所をL型クランプで反力壁に固定し、裏面が4辺支持となるよう設置した。計測項目は、破壊モード、貫入深さおよび表面破壊直径ならびに裏面剥離深さおよび直径である。

図4に、局部破壊の計測位置を示す。貫入または裏面剥離深さは、表面または裏面から破壊によって生じた凹みの一番深い位置までの距離を計測した。表面破壊直径および裏面剥離直径は、コンクリート板中央を中心として、垂直方向、水平方向及び斜め45度方向を計測し、その平均値とした。衝突速度については、

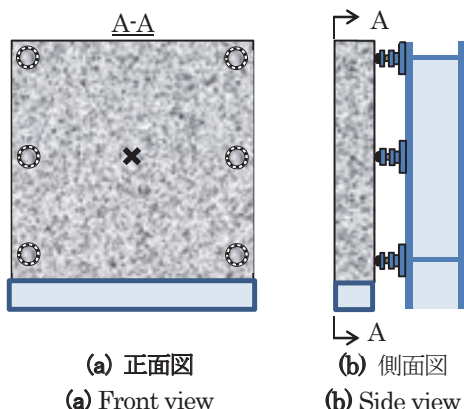
中速度衝突を受けるコンクリート板の破壊限界に関する研究事例がないため、飛翔体の衝突速度を約10m/sから40m/sまで少しずつ増加させ、合計5回（5体）の実験を行った。

また、上記の実験とは別に、衝突荷重、支点反力およびコンクリート板内部のひずみ応答を計測する実験も行った。この実験では、試験体に過度の損傷が生じないように衝突速度は33m/sとした。衝突荷重については、飛翔体にロードセルや加速度計を取付けて計測する方法が一般的であるが、中速度衝突の実験では計測機器のケーブルが断線する可能性が高い。そこで、高速ビデオカメラで飛翔体の衝突前後の変位時刻歴を記録し、その変位データを2回微分して求めた加速度に、質量を乗じて荷重に換算することとした。高速度ビデオカメラの撮影速度は50,000フレーム/秒である。支点反力については、図5に示すように衝撃用ロードセル（応答周波数30kHz）を6個設置して計測した。ひずみについては、計測精度について過去に検証した図6に示すアクリル棒にひずみゲージを貼付したひずみ計測装置¹²⁾をコンクリート打設時に埋設した。なお、過去に行った同様の高速衝突実験¹²⁾を参考に、裏面に

発生するひび割れの方を裏面から 30° と仮定してひずみゲージの貼付位置を決定した。ひずみゲージおよびロードセルのサンプリング周波数は、250kHz である。

2.2 破壊性状

表 3 に、実験で得られた破壊モード、貫入深さおよび



● ロードセル設置位置
× 飛翔体衝突位置
図 5 ロードセル設置位置

Fig.5 Position of load cells

表面破壊直径ならびに裏面剥離深さおよび直径を示す。貫入深さは、衝突速度 12.9m/s で 4.5mm であり、衝突速度の増加とともに深くなり、衝突速度 37.9m/s で約 12mm となった。表面破壊直径は、衝突速度 12.9m/s で約 40mm であり、最大で約 66mm まで増大していることがわかる。図 7 に実験ケース C-2（衝突速度 16.4m/s）、C-3（衝突速度 18.4m/s）および C-5（衝突速度 37.9m/s）におけるコンクリート板の破壊性状を示す。なお、C-2 のケースでは、表面の写真は上半分のみを示している。衝突速度が 20m/s 以下の C-2、C-3 の場合、コンクリート板の破壊モードは表面破壊であった。図 7 からわかるように、コンクリート板の表面には、塑性変形による凹みが明瞭に形成されている

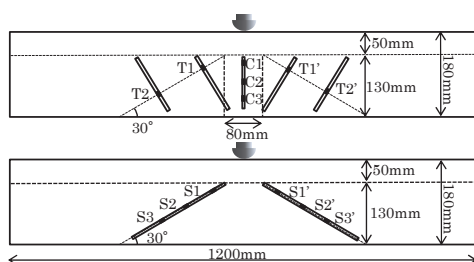


図 6 ひずみゲージ設置位置

Fig.6 Position of strain gauges

表 3 実験結果

Table.3 Experimental result

No	実験ケース	設定空気圧	計測速度	破壊モード	貫入深さ	表面破壊直径	裏面剥離深さ	裏面剥離直径
		(MPa)	(m/s)		(mm)	平均値 (mm)	(cm)	平均値 (cm)
1	C-1	0.15	12.9	表面破壊	4.5	40.0	-	-
2	C-2	0.25	16.4	表面破壊	5.9	44.0	-	-
3	C-3	0.30	18.4	表面破壊	6.4	48.0	-	-
4	C-4	0.35	20.0	表面破壊	7.0	49.0	-	-
5	C-5	1.00	37.9	裏面剥離限界	12.3	65.7	12.0	55.6

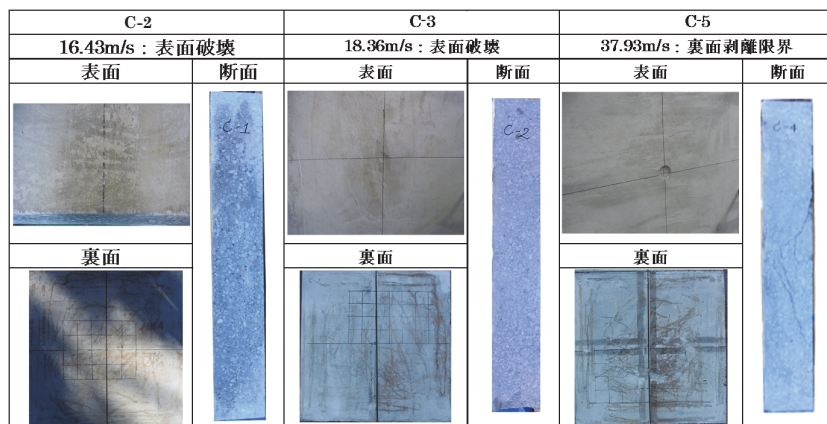
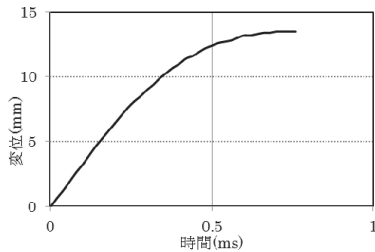
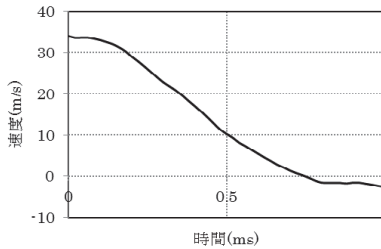


図 7 破壊後の試験体損傷状況

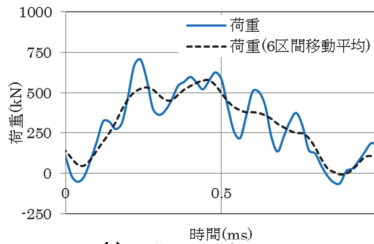
Fig.7 Damage state of specimen after test



(a) 変位～時間関係
(a) Displacement time history



(b) 速度～時間関係
(b) Velocity time history



(c) 荷重～時間関係
(c) Load time history

図8 高速度ビデオカメラによる計測データ
Fig. 8 Measured data recorded by high speed video camera

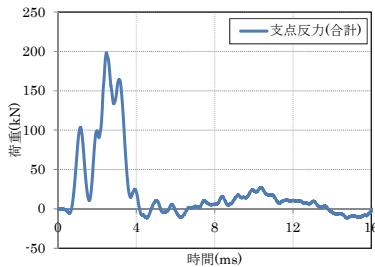


図9 支点反力～時間関係
Fig.9 Reaction force time history

ことがわかる。しかし、断面および裏面には、ひび割れは認められなかった。衝突速度約 38m/s の実験ケース C-5 では、破壊モードは裏面剥離限界となった。表面には、塑性変形が生じるとともに、断面にはコンクリート板中央から裏面に向かって斜め方向にひび割れ

が発生している。これは、飛翔体が衝突してコンクリート板に入力される応力波による破壊や飛翔体の貫入による押し抜きせん断的破壊が複合して生じたものと考えられる。試験体の裏面においては、円弧上に剥離片が発生するとともに、放射線状にひび割れが進展していることがわかる。なお、この裏面剥離限界時に飛翔体が有していた運動エネルギーは、 $E=6,640\text{J}$ であった。

高速衝突実験では、貫入深さが板厚に対して 25%程度に達した場合に裏面剥離が発生すると報告されているが、本実験においては約 7%であった。すなわち、中速度衝突によって生じるコンクリート板の破壊メカニズムは、衝突速度数百 m/s の高速衝突とは異なっている可能性がある。

2.3 変形メカニズムに関する基礎的考察

中速度衝突を受けるコンクリート板の変形メカニズムを検討するため、衝突速度約 33m/s の実験を行った。図8に、高速度ビデオカメラで撮影した画像の分析から算定した、飛翔体の変位、速度、荷重の時刻歴応答を示す。なお、本ケースの破壊モードは表面破壊（裏面垂直・水平方向に微小なひび割れ）であった。

図8の原点は、飛翔体がコンクリート板試験体に衝突した時刻を示している。図8(a)から、飛翔体は衝突後約 0.75ms で最大変位約 13.5mm を示している。実験後に計測した貫入深さ(11.3mm)に比べて約 2mm 程度大きい。これはコンクリート試験体の曲げ変形による変位を含んでいるためと考えられる。

図8(b)に示す速度～時間関係から、飛翔体は速度約 33m/s でコンクリート試験体へ衝突し、最大変位を示す時刻約 0.75ms で跳ね返り速度約 2.5m/s へ変化している。また、衝突前後の速度変化から求めた反発係数は $e=0.07$ 程度であり、完全塑性衝突に近いと言える。すなわち、コンクリートが速度 33m/s 程度の中速度衝突を受けると、非常に大きなエネルギーが局部的に吸収されることがわかる。

図8(c)の荷重～時間関係は、速度～時間関係を微分して得られた加速度に質量 8.3kg を乗じて算定したものである。なお、このような操作を行うと高周波成分が増加してくるため、6 区間の移動平均を行ったデータも示している。図から、荷重は衝突とともに増加し、時刻約 1.4ms で最大荷重約 550kN を示している。

図9は、6 個のロードセルで計測した支点反力の合計値を示している。支点反力の計測では、高速度ビデオカメラと同じトリガーを用いて計測しており、図中の原点は変位～時間関係と同じである。これより、衝

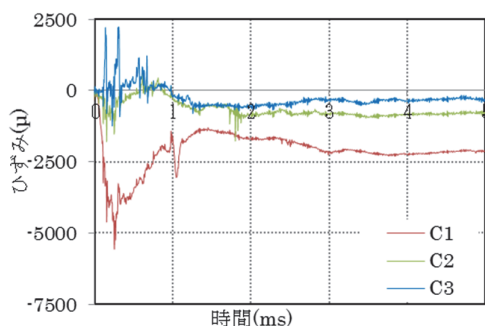


図 10 C シリーズのひずみ～時間関係
Fig.10 Strain time history of C series

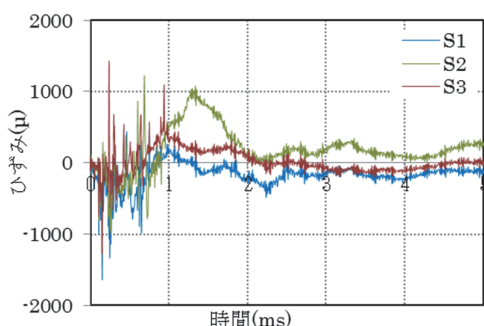


図 11 S シリーズのひずみ～時間関係
Fig.11 Strain time history of S series

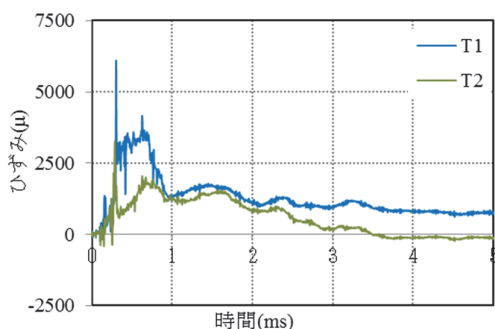


図 12 T シリーズのひずみ～時間関係
Fig.12 Strain time history of T series

突約 1ms 後に荷重が瞬時に立ち上がり、約 100kN を示している。支点反力の立ち上がりは衝突荷重よりも遅れるのは、衝突によって発生した応力波がロードセル位置まで到達する時間差があるためと考えられる。支点反力はその後増加して時刻約 2.2ms で最大荷重 200kN を示している。時刻 4ms において支点反力はゼロを示し、それ以降は振動しながらいくつかの山なりの曲線を描いている。図 8(c) に示した衝突荷重と比較すると、支点反力の最大値は最大衝突力の半分以下

であり、また主たる支点反力の継続時間は約 3～4ms と衝突荷重の継続時間の 3 倍以上となっている。衝突速度が 10m/s 以下の低速度衝突を受ける鉄筋コンクリート版に関する研究でも、同様の特徴が報告されていることから、中速度衝突を受けるコンクリート板の荷重や支点反力は、低速度衝突時の鉄筋コンクリート版の挙動と類似していることがわかる。

図 10 に、飛翔体の衝突方向に設置したひずみゲージ C シリーズのひずみ～時間関係を示す。これより、衝突直後に表面に近い C1 に 5,000 μ を超える大きな圧縮ひずみが発生している。これは、飛翔体の衝突によって発生した応力波に起因したものであると考えられる。板高さ中央部の C2 には、C1 と比べて大きさが 1/3 程度の圧縮ひずみが発生した。一方、裏面に近い C3 には、時刻 0～1ms において引張ひずみが発生した。これは、表面から入射された圧縮の応力波が裏面で自由端反射したため、入射波と反射波の重複波が引張ひずみとして検知されたものと考えられる。これらの波動は、時刻 1ms 以降になると大きく減衰あるいは残留する傾向を示している。

図 11 に、衝突位置から 30° 斜め方向に設置した S シリーズのひずみ～時間関係を示す。著者らが行った高速衝突実験¹³⁾では、衝突部位から斜めひび割れの方に沿って圧縮と引張ひずみが伝播することがわかっている。S シリーズは、この圧縮ひずみに対応するデータである。図から、衝突によって入射された応力波の影響で時刻 1ms までに高周波成分とともに最大 1,000～2,000 μ もの圧縮ひずみが記録されている。

図 12 に、衝突位置から 30° 斜め方向に設置した T シリーズのひずみ～時間関係を示す。図から、T シリーズも応力波の影響が卓越している時刻 1ms の間に大きな引張ひずみが生じていることがわかる。それ以降は支点反力の影響によると考えられる引張ひずみが生じている。以上に示した衝突荷重、支点反力、コンクリート板内部のひずみ応答を比較すると、以下のような変形メカニズムが考えられる。飛翔体の中速度衝突によって、時間 1ms 程度で衝突現象は終了する。この間、コンクリート板試験体の内部には衝突によって生じた応力波によって比較的大きなひずみが生じる。またその後、試験体全体の振動も励起され過渡的な振動状態となる。この振動によって、支点反力が発生したのと考えられる。すなわち、衝突速度がより速い条件では、高速衝突現象と同様な局部的破壊が卓越し、一方衝突速度が低い場合には、低速度衝突現象に近い全体的な曲げ・せん断破壊モードが卓越すると考えられる。

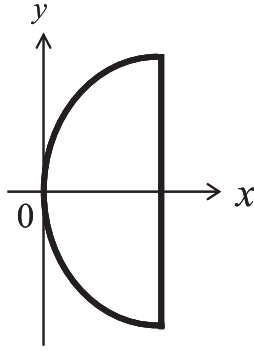


図 13 飛翔体モデル (半球型)

Fig.13 Model of projectile (hemisphere)

3. 衝突荷重および裏面剥離の評価に関する検討

これまでに、低速および高速衝突を受ける鉄筋コンクリート部材の耐衝撃設計法に関する研究は行われているが、検討すべき課題も多く残されている。また、中速度衝突現象においては、実験があまり行われていないこと、また破壊メカニズムも解明されていないため、設計法に関する知見は非常に少ないのが現状である。本章では、衝突荷重および破壊の予測手法に関する基礎的段階として、過去に提案された高速衝突を受けるコンクリートの破壊評価手法（以下、解析的判定法という）を適用することを試みる。

3.1 解析的判定法の概要

三輪らは、高速衝突を受けるコンクリート板の破壊を評価する解析的判定法を提案している¹³⁾。この手法は、理論的方法^{14)~16)}に基づいて飛翔体による衝突荷重を評価するものである。また、コンクリートの裏面剥離耐力としては、コンクリート板の破壊を押し抜きせん断破壊と仮定して、既往の押し抜きせん断耐力式を修正した式を適用して裏面剥離耐力を算定している。最大衝突荷重と裏面剥離耐力を比較することで、裏面剥離の発生を判定することができる。

以下に、衝突荷重の算定方法について説明する。図 13 に、先端が円形状である半球型の剛飛翔体モデルを示す。図 14 に、先端部分が無限厚さのコンクリート中に深さ a だけ貫入したときの表面上の任意点に作用する応力を示す。このとき、コンクリートとの接触面 ($x=a$) には、法線方向の圧縮応力 σ_n と接線方向の応力が生じるものとする。法線方向の圧縮応力 σ_n は、次式で与えられる。

$$\sigma_n = A\sigma_y + B\rho V_a^2 \sin^2 \theta \quad (1)$$

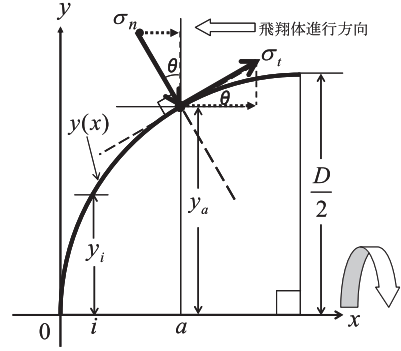


図 14 接線・法線方向の応力

Fig.14 Stress of tangent and normal direction

ここに、 σ_y は降伏応力、 ρ は密度、 V_a は飛翔体速度、 θ は法線方向の圧縮応力 σ_n の y 軸方向に対する角度、 A 、 B は無次元の係数を示す。

$$\sigma_y = \sqrt{f'_c f'_t - (f'_c - f'_t) I_1} \quad (2)$$

ここに、 f'_c 、 f'_t はコンクリートの一軸圧縮および引張強度 (N/mm^2)、 I_1 は応力の 1 次不変量 (N/mm^2) である

また、式(2)の一軸圧縮および引張強度にひずみ速度を考慮するため、藤掛らの式¹⁷⁾および Ross らの式¹⁸⁾を用いた。

法線方向の応力 σ_n と接線方向の応力 σ_t の関係は、動摩擦係数 μ_m を用いて次のように表される。

$$\sigma_t = \mu_m \sigma_n \quad (3)$$

式(1)および式(3)を $x=0 \sim a$ について積分すると、深さ a だけ貫入しているときに飛翔体を受ける抵抗力 F_a は、コンクリートの降伏応力による静圧と、動圧を考慮した次式で表される。

$$F_a = \pi y_a^2 (A\sigma_y (N_1)_a + B\rho V^2 (N_2)_a) \quad (4)$$

ここに、 y_a は深さ a での接触面の半径、 $(N_1)_a$ 、 $(N_2)_a$ はそれぞれの項の無次元値を整理したもので、次のように表される。

$$(N_1)_a = 1 + \frac{2\mu_m}{y_a^2} \int_0^a y_x dx \quad (5a)$$

$$(N_2)_a = \frac{2}{y_a^2} \int_0^a \left(\frac{y_x y_x'^3}{1 + y_x'^2} + \mu_m \frac{y_x y_x'^2}{1 + y_x'^2} \right) dx \quad (5b)$$

ここに、 y_x は先端部分の形状を表す式である。

本手法は、以下の手順により、貫入深さも算定することができる。まず、全体の貫入深さ x を微小量 Δx で n 個に分割し、運動エネルギーと仕事の関係を適用

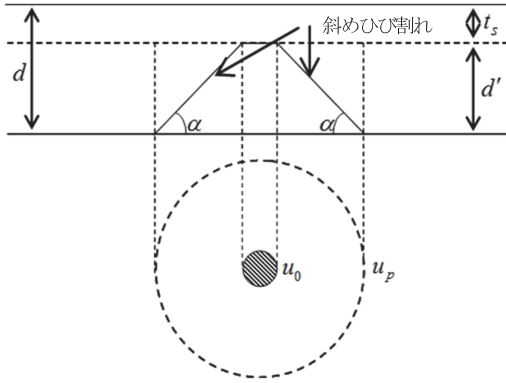


図 15 押抜きせん断破壊モデル

Fig.15 Punching shear failure model

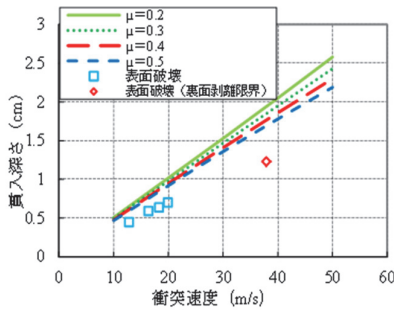


図 16 動摩擦係数が貫入深さに与える影響

Fig.16 Effects of dynamic friction coefficient on the penetration depth

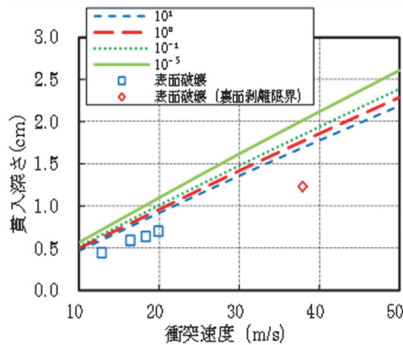


図 17 ひずみ速度が貫入深さに与える影響

Fig.17 Effects of strain rate on the penetration depth

する。ステップ i における抵抗力 F_i に対する増分仕事 ΔE_i と飛翔体の運動エネルギーの減少量 ΔE_{ke} を等置して貫入深さを求める。すなわち、ステップ i における貫入深さ x_i は、次式で与える。

$$x_i = i\Delta x \quad (6)$$

ステップ i における抵抗力 F_i に対する各ステップ間の

増分仕事 ΔE_i と、飛翔体の速度低下による運動エネルギーの減少は等しくなることを用いて、飛翔体の速度 V_i について解くと、以下の式が得られる。

$$V_i = \sqrt{\frac{MV_{i-1}^2 - \Delta x [\pi_i^2 A(N_i)_{i\Delta x} \sigma_y^2 + \pi_{i-1}^2 A(N_i)_{i-1\Delta x} \sigma_y^2 + \pi_{i-1}^2 B(N_i)_{i-1\Delta x} \rho V_{i-1}^2]}{\pi_i^2 B(N_i)_{i\Delta x} \rho \Delta x + M}} \quad (7)$$

ここに、 M は飛翔体の質量 (kg) を示す。

ステップ k のとき、飛翔体の速度 $V_k = 0$ になるとすると、全貫入深さは、 $x = k\Delta x$ となる。

3.2 裏面剥離耐力

コンクリート板の裏面剥離耐力は、裏面剥離が押し抜きせん断的に発生すると仮定し、押し抜きせん断耐力を用いて評価する。コンクリート板の押し抜きせん断耐力の算定には、以下に示す土木学会コンクリート標準示方書式¹⁹⁾ (以後、標準示方書式という) を用いた。

$$V_{pc} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_y \cdot f'_{pcd} \cdot u_p d' / \gamma_b \quad (8a)$$

$$f'_{pcd} = 0.20 \sqrt{f'_c} \quad (8b)$$

$$u_p = u_0 + 2\pi \cdot d' / 2 \quad (8c)$$

ここに、 $\beta_d = \sqrt[4]{1000 / d'}$ ($\beta_d > 1.5$ の場合は 1.5 とする)、 $\beta_p = \sqrt[3]{100 p}$ ($\beta_p > 1.5$ の場合は 1.5 とする)、 $p = (p_x + p_y) / 2$ 、 $\beta_y = 1 + 1 / (1 + 0.25 u_0 / d')$ 、 γ_b は一般に 1.3、 $f'_{pcd} \leq 1.2 (\text{N/mm}^2)$ 、 u_0 は載荷面の周長 (mm)、 u_p は仮想断面の周長 (mm)、 d' は有効板厚 (mm)、 p は 2 方向の平均鉄筋比、 p_x 、 p_y は各方向の鉄筋比である。

また、コンクリート板はプレーンコンクリートであるので、有効板厚はコンクリート板厚 $d = d'$ とし、有効板厚に鉄筋の影響はないものとする。安全係数 γ_b は 1.0 を用いた。裏面剥離耐力の算定には、衝突によって生じる表面破壊によって、板厚が減少することを考慮するため、図 15 に示すように板厚 d から貫入深さ t_s を差し引いた。

3.3 解析的判定法による評価

解析的判定法では、ひずみ速度効果や動摩擦係数を設定する必要がある。ここでは、妥当な値の範囲でパラメーターチューニングを行った。既往の研究^{20,21)}によると、コンクリートと鋼材の間の動摩擦係数は約 0.3~0.5 になることが報告されている。動摩擦係数が貫入深さに与える影響を考察するため、動摩擦係数を 0.2 から 0.5 の範囲で変化させた。図 16 に、解析結果を示す。これより、衝突速度 30m/s 以下では動摩擦係数の影響は小さいが、動摩擦係数が 0.5 の場合に解析値は実験結果と最もよく適合することがわかる。よって、以降の計算では動摩擦係数を 0.5 とする。

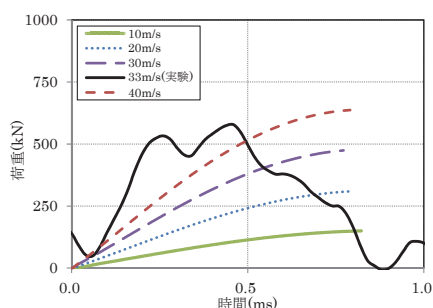


図 18 衝撃荷重～時間関係

Fig.18 Impact load time history

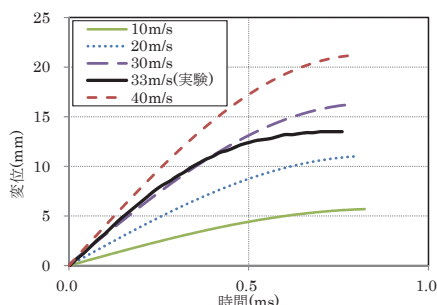


図 19 変位～時間関係

Fig.19 Displacement time history

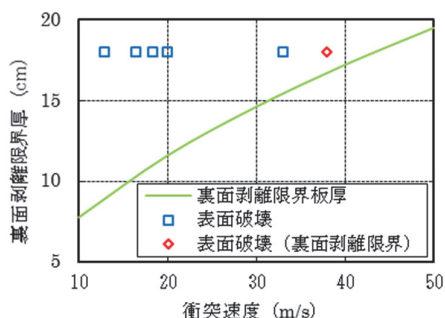


図 20 裏面剥離限界板厚～衝突速度関係

Fig.20 Relationship between scabbing limit of plate thickness and velocity

次に、ひずみ速度が貫入深さに与える影響を調べる。過去に、高速衝突実験に対して同様の検討¹³⁾を行っており、本研究ではこのひずみ速度を参考にして 10^{-5} ～ $10^1(1/s)$ の範囲で検討した。図 17 に、ひずみ速度 10^{-5} および 10^{-1} ～ $10^1(1/s)$ における貫入深さを示す。ひずみ速度が大きくなるほど貫入深さは小さくなり実験値と近づくことがわかる。よって、ひずみ速度は $10^1(1/s)$ と設定した。

上記の設定値を用いて計算した、衝突速度 10m/s～40m/s の場合の衝突荷重時刻歴を図 18 に示す。これより、いずれの速度においても、荷重は衝突後に徐々

に上昇し最大荷重を示す。荷重継続時間は $t = 0.78 \sim 0.82ms$ の範囲となりほぼ同等であった。図中には、衝突速度 33m/s 時の荷重～時間関係を比較して示している。計算値は、荷重継続時間については良好に再現しているものの、最大荷重および波形が異なっていることがわかる。この原因として、実験で得られた変位データのサンプリング数が少ないことが考えられるため、今後、データの妥当性を検証する必要がある。

図 19 に、衝突速度 33m/s の実験で得られた変位～時間関係について、解析値と実験値を比較して示す。これより、変位の時刻歴については、貫入量がやや小さいものの、実験値を比較的良好に再現できていることがわかる。

図 20 に、解析的方法で求めた裏面剥離限界板厚と実験結果を比較して示す。これより、実験で裏面剥離が生じた速度 38m/s に対する裏面剥離限界板厚は約 17cm となる。したがって、解析的判定法による裏面剥離限界板厚は実験結果に比べて 1cm 程度薄くなり、実験をやや安全側に評価していることがわかる。しかし、実験結果とある程度良好に整合していると言える。ただし、実験データ数が少ないため、今後継続して実験を行い、本手法の適用性を検討する予定である。

4. 結言

本研究は、中速度衝突に対するコンクリート板の耐衝撃性に関する基礎的な研究を行ったものである。本研究の成果を以下に要約する。

(1) 質量 8.3kg の鋼製飛翔体を数十 m/s の中速度で衝突させる飛翔体発射装置を開発した。中速度衝突実験装置を用いて、板厚 18cm のプレーンコンクリート板に対する衝突実験を行い、試験体の破壊性状を確認した。裏面剥離に対応する衝突速度は約 38m/s であった。

(2) 中速度衝突を受けるプレーンコンクリート板の衝撃応答の特徴を調べるため、荷重、支点反力およびコンクリート板内部のひずみ応答を計測した。荷重とひずみの応答を比較したところ、中速度衝突の場合にも、高速衝突実験と同じように、応力波によって大きなひずみが生じることがわかった。さらに、試験体に入力された衝突エネルギーによって板全体の振動が生じて支点反力や変形が生じることが確認された。

(3) 解析的判定法を中速度衝突を受けるプレーンコンクリート板の損傷評価へ適用した。衝突荷重については、波形や最大値が実験とやや異なるが、実験結果をある程度良好に再現した。また、裏面剥離の判定については、実験結果を安全側に評価することがわかった。

謝辞

本研究は、第1著者が平成24年度に受賞した山崎奨励賞に関する内容を発展させたものです。一連の研究に関して、多くの方々にご支援、ご指導をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。また、本研究において、実験を行うにあたり本科第58期最上舜久君にご助力頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 気象庁：竜巻の突風データベース (<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/index.html>)
- 2) 東京工芸大学：竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究，平成21-22年度原子力安全基盤調査研究報告書，2011.
- 3) 原子力発電所の竜巻影響評価ガイド(案)及び解説，独立行政法人原子力安全基盤機構，2013.
- 4) 丸山敬：飛散物に対する外装材の耐衝撃性能の評価方法について，日本風工学会誌，Vol.35, No.122, 2010.
- 5) 土木学会構造工学委員会：構造工学シリーズ6 構造物の衝撃挙動と設計法，1994.
- 6) 岸徳光，三上浩，栗橋祐介：低速度衝撃を受ける四辺支持RC版の耐衝撃設計法に関する一提案，構造工学論文集，Vol. 55A, pp.1327-1338, 2009.
- 7) 岸徳光，三上浩，栗橋祐介：支持条件の異なるRC版の静的および衝撃荷重載荷実験，構造工学論文集，Vol. 56A, pp.1160-1168, 2012.
- 8) 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.
- 9) Chang, W.S.: Impact of solid missiles on concrete barriers, Journal of the Structure Division, Proceedings of ASCE, Vol.107, No.ST2, pp. 257-271, 1981.
- 10) 電力中央研究所：飛来物の衝突に対するコンクリート構造物の耐衝撃設計手法，電力中央研究所報告 U24, 1991.
- 11) Itoh, M., Katayama, M. and R. Rainsberger : Computer simulation of an F-4 Phantom crashing into a reinforced concrete wall, Computational Ballistics, pp.207-217, 2005.
- 12) 別府万寿博，三輪幸治，高橋順：高速衝突を受けるコンクリート板の裏面剥離発生メカニズムと連続繊維シート補強の効果，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol.68, No.2, pp.398-412, 2012.
- 13) 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.
- 14) Li, Q. M. and Chen, X. W. : Dimensionless formulae for penetration depth of concrete target impacted by a non-deformable projectile, International Journal of Impact Engineering, Vol.28, No.1, pp.93-116, 2003.
- 15) Li, Q. M. and Tong, D. J. : Perforation thickness and ballistic limit of concrete target subjected to rigid projectile impact, ASCE, Journal of Engineering Mechanics, Vol.129, No.9, pp.1083-1091, 2003.
- 16) Li, Q.M., Weng, H.J., Chen, X. W. : A modified model for the penetration into moderately thick plates by a rigid, sharp-nosed projectile, International Journal of Impact Engineering, Vol.30, No.2, pp.193-204, 2004.
- 17) 藤掛一典，上林勝敏，大野友則，水野淳，鈴木篤：ひずみ速度を考慮した三軸応力下におけるコンクリートの直交異方性構成モデルの定式化，土木学会論文集，No.669/V-50, pp.109-123, 2001.
- 18) Ross, C.A.: Thompson, P.Y. and Tedesco, J.W. : Split-Hopkinson pressure-bar tests on concrete and mortar in tension and compression, ACI Material Journal, Vol.86, pp.475-481, 1989.
- 19) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書（設計編），丸善，2007.
- 20) Baltay, P. and Gjelsvik, A. : Coefficient of friction for steel on concrete at high normal stress, ASCE, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.1, No.1, pp. 46-49, 1998.
- 21) Chen, E. P.: Penetration into dry porous rock : A numerical study on sliding friction simulation, U. S. Department of Energy, Technical report, SAND-88-2485, 1988.