

コンクリート円柱供試体の急速破壊実験における飛散片に関する実験的検討

防衛大学校 学生会員○ 藤井 大樹 正会員 香月 智
学生会員 原 大輔

1. 緒言

コンクリート構造物が衝突や爆発などの衝撃荷重を受ける場合、構造破壊に至る前段階として、表面剥離、裏面剥離、衝突物の貫通・貫入などのコンクリート片の飛散現象をともなう破壊形態が生じる。このような破片によって構造物近辺あるいは内部にある設備や人命の安全性を脅かす2次被害の可能性もある。また衝撃荷重を受けるコンクリート構造物の全体挙動に関する研究は多くあるが、飛散片に着目した研究は少ない。そこで本研究は、強度と粗骨材寸法の異なる標準供試体の急速載荷実験を行い、破壊によって生じた飛散片の性状や飛散速度について基礎的な検討を行ったものである。

2. 実験の概要

本研究では、図-1に示すサーボ制御式急速載荷装置を用いて、直径10cm、高さ20cmのコンクリート円柱供試体を急速(2m/sec)で載荷し、破壊によって生じた破砕片の飛散速度、質量、粒径を計測した。以下に実験ケース、計測要領について述べる。

2.1 実験ケース

強度および粗骨材最大寸法の違いによる影響を検討するため、配合のみを実験パラメータとした。水セメント比4種類、粗骨材最大寸法3種類、これらの組み合わせ12種類の供試体を作成した。各ケースの配合およびケース名を表-1に示す。なお本実験では各ケース3回ずつ実験を行った。

2.2 計測要領

図-2に供試体の設置状況を示す。供試体に作用する荷重は上下に取り付けたロードセルにより計測した。ひずみは左右対称に上下2ヶ所、合計4ヶ所の表面ゲージにより計測するとともに、渦電流式変位計を用いて供試体の上下端面の変位差を計測することにより、供試体の変形量を求めた。

破砕片の飛散速度は高速ビデオカメラを用いて以下の要領で計測した。図-3に示すように、供試体から約2m離れた位置で破砕片の飛散を撮影した。次に、図-4は高速ビデオカメラによって撮影された画像の一例であるが、時間ごとに水平方向座標、鉛直方向座標をプロットし、画面上の速度を求める。また画面上の速度は平面への写像であるから、実速度は次式により求められる。

$$v_x = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_{i+1} - x_i}{t_{i+1} - t_i} \right)^2 \right\}^{1/2} \cos \alpha \quad (\cos \alpha = a / \sqrt{a^2 + b^2}) \quad (1)$$

$$v_z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{z_{i+1} - z_i}{t_{i+1} - t_i} \right) \quad (2)$$

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_z^2} \quad (3)$$

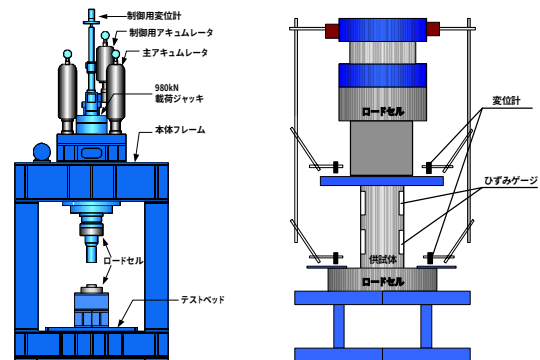


図-1 急速載荷装置の概要 図-2 供試体設置要領

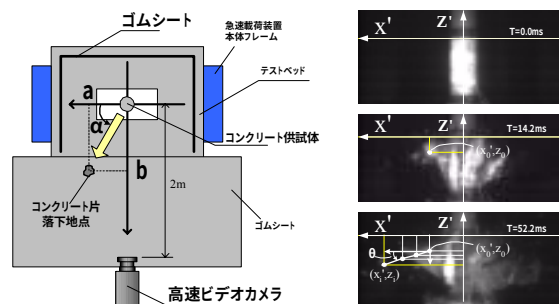


図-3 破砕片計測要領 図-4 飛散片速度計測要領

表-1 コンクリート配合表

供試体名	粗骨材最大寸法 (mm)	空気量 (%)	水セメント比 W (%)	細骨材率 S/a (%)	単位量 (kg/m³)				7日強度 (N/mm²)	28日強度 (N/mm²)
					水 W	セメント C	粗骨材 S	粗骨材 G		
C20-G10	10	8	66.7	40.6	185	277.5	734.4	1018.6	17.8	26.9
C25-G10	10	8	57.1	40.1	185	323.8	710.7	1003.4	21.6	29.4
C30-G10	10	8	50.0	39.8	185	370.0	689.5	986.0	31.0	40.3
C40-G10	10	8	40.0	39.3	185	462.5	651.3	946.9	34.2	44.9
C20-G20	20	6	66.7	45.6	165	247.5	859.4	1004.3	15.9	21.9
C25-G20	20	6	57.1	45.1	165	288.8	835.3	994.0	21.7	32.0
C30-G20	20	6	50.0	44.8	165	330.0	813.6	981.3	30.1	36.3
C40-G20	20	6	40.0	44.3	165	412.5	774.9	951.5	45.0	51.4
C20-G25	25	5	66.7	43.6	160	240.0	829.9	1067.2	12.7	18.1
C25-G25	25	5	57.1	43.1	160	280.0	806.8	1057.0	18.3	25.6
C30-G25	25	5	50.0	42.8	160	320.0	786.2	1044.4	22.6	32.3
C40-G25	25	5	40.0	42.3	160	400.0	749.6	1014.7	34.5	44.9

ここで、 v_x ：水平方向の実速度、 v_z ：鉛直方向の実速度、 x_i ： i 回目にプロットした点の x 座標、 z_i ： i 回目にプロットした点の z 座標、 t_i ： i 回目の時間、 n ：プロットした回数、 v ：破砕片の実速度、 α ：撮影平面と破砕片の飛散方向がなす角度、 a, b ：破砕片の落下位置。

3. 実験結果と考察

3.1 応力～ひずみ関係および吸収エネルギー

図-5にはケースC20-G10の急速載荷における応力～ひずみ関係を示す。図中の点線はひずみゲージから得られたひずみ、実線は渦電流式変位計から得られた変位をひずみに変換したものを示している。このように

キーワード コンクリート飛散片、急速載荷実験、飛散エネルギー

連絡先 〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20 防衛大学校 TEL046-841-3810 E-mail: s51515@ed.nda.ac.jp

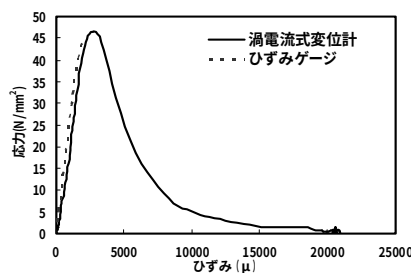


図-5 応力～ひずみ関係(C20-G10)

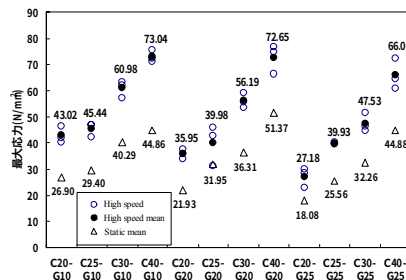


図-6 最大応力

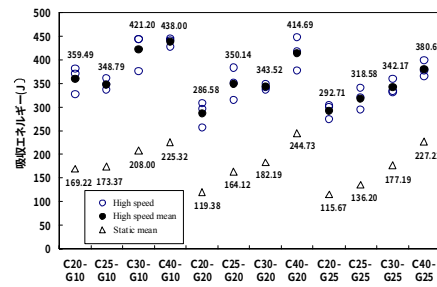


図-7 吸収エネルギー

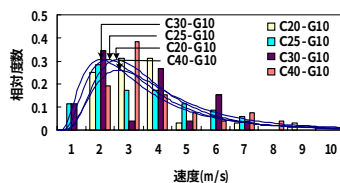
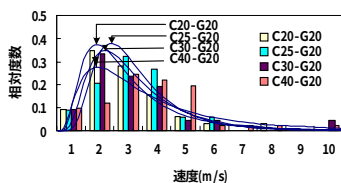
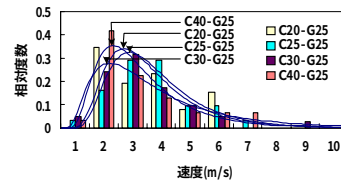
(a) $G_{\max}=10\text{mm}$ (b) $G_{\max}=20\text{mm}$ (c) $G_{\max}=25\text{mm}$

図-8 速度分布

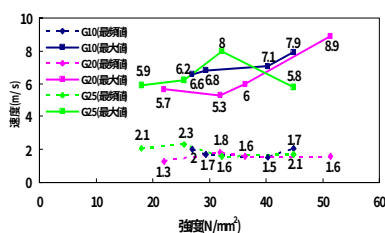


図-9 強度と飛散速度の最大値および最頻値の関係

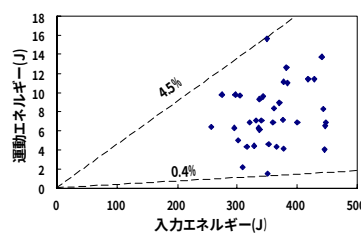


図-10 運動エネルギー～入力エネルギー関係

双方のひずみは概ね一致しており、供試体の吸収エネルギーを求める際には渦電流式変位計から得られたひずみを用いることとした。図-6、図-7には各ケースの最大応力および吸収エネルギーを示す。図中の○は急速载荷におけるケースごとの最大応力、●はその平均値、△は静的载荷時の最大応力の平均値を表している。図-6の最大応力は、各骨材寸法ごと、水セメント比が小さくなると一様に最大応力が大きくなっていることがわかる。また、図-7の吸収エネルギーも水セメント比が小さくなると、大きくなる傾向があるが、逆転している場合も見受けられる。

3.2 飛散速度

図-8に骨材寸法ごとの速度分布を示す。また各ケースの飛散速度の頻度分布と対応する対数正規分布曲線も合わせて示す。各ケースの強度とその飛散速度の最頻値および最大値の関係を図-9に示す。骨材寸法ごと比較すると、強度が大きいほど最大速度が大きくなる傾向があることがわかる。また、飛散速度の最頻値は1.3～2.3 (m/s)、载荷速度(端面変形速度)の2.0(m/s)程度である。最大速度は5.3～8.9(m/s)で载荷速度の2.7～4.5倍である。

3.3 飛散エネルギー

コンクリート供試体が吸収したエネルギーすなわち供試体に入力されたエネルギーのうちどの程度のエネルギーが、破砕片の運動エネルギーに変換されたのかを求める。各ケースで計測された破砕片の有するエネルギーの質量平均と、破砕片全体の質量平均が同じと仮定して、破砕片全体のエネルギーを推定した。さらに、破砕片におけるコーンについては、質量平均に与える影響の大きさを考慮し、個別に運動エネルギーを計算し運動エネルギーに加算することとした。すなわ

ち、

$$E = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} m_i v_i^2 (M - M_{\text{corn}}) + \frac{1}{2} M_{\text{corn}} v_{\text{corn}}^2 \quad (4)$$

ここで、 E ：供試体全体の運動エネルギー、 n ：速度を計測した破片の個数(コーンを除く)、 m_i, v_i ：信頼できる速度を計測できた破片の質量とその速度(コーンを除く)、 M ：供試体全体の質量、 M_{corn} ：コーンの質量、 v_{corn} ：コーンの速度。

図-10に入力エネルギーと運動エネルギーの関係について示す。また全エネルギーの0.4%および4.5%ラインを点線で示した。これよりエネルギー変換率は0.4%～4.5%の間に分布していることがわかる。

4. 結言

本研究は、コンクリート円柱供試体を用いて急速破壊実験を行い、破壊によって生じた破片の特性について基礎的な検討を行ったものである。以下に本研究で得られた成果を示す。

- (1) 供試体の強度が大きくなると破砕片の最大速度は大きくなる傾向があり、载荷速度(端面変形速度)の2.7～4.5倍程度である。
- (2) 入力エネルギーから運動エネルギーへの変換率は0.4%～4.5%の間に分布している。

参考文献

- ・田中秀明, 森下政浩, 伊藤孝, 山口弘: 爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷に及ぼす爆発位置の影響, 土木学会論文集, No.675, V-55, pp297-312, 2001.4.