

平成 21 年 5 月 29 日現在

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19760487
 研究課題名 (和文) コンクリート材料の衝撃応答ダイナミクスおよび
 衝撃破壊プロセスの解明
 研究課題名 (英文) Dynamic response and fracture of concrete under shock-loading

研究代表者
 川合 伸明 (KAWAI NOBUAKI)
 東京工業大学・応用セラミックス研究所・研究員
 研究者番号：60431988

研究成果の概要：

本研究では、最も基本的な構造材料であるコンクリートに関して、高強度な衝撃に対する衝撃応答・破壊特性を明らかにすることを目的に、衝撃荷重下におけるコンクリートの内部応力状態測定および、鉄筋コンクリート柱部材への高速衝突破壊実験を行った。その結果、動的材料強度モデル構築に必要なコンクリート強度の歪速度・圧力依存性の取得に成功した。また、鉄筋や柱軸力による拘束効果が、高速衝突による損傷面から構造体内部への破壊進展の抑制に大きな効果を示すことなどが明らかとなり、コンクリート構造物の耐衝撃性を検討する上での重要な知見を得ることに成功した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,700,000	0	1,700,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,600,000	270,000	2,870,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学 構造・機能材料

キーワード：衝撃破壊、衝撃応答、コンクリート、衝撃強度、高速衝突

1. 研究開始当初の背景

JR 福知山線脱線事故(2005)や、渋谷温泉施設爆発事故(2007)、また、世界各国で頻発している爆破テロなど、近年の人災・天災に伴う爆発・衝突事故は、対象となる人工物の巨大性と相まって深刻な被害を誘引しており、衝撃・衝突荷重によるコンクリート造構造体の損傷・破壊を理解することが重要となってきた。しかしながら、我が国では、先進諸外国と比較して、衝撃破壊や爆発安全に対する研究者層は十分でなく、戦後一貫して軍

事関連研究を避けてきた影響もあって、衝撃破壊に関する研究データの蓄積は諸外国と比べ著しく劣っているといえる。その結果、衝突速度の速い衝撃に対するコンクリートの応答・破壊特性に関する基礎データの収集は未だ不十分であり、社会安全上早急に解決されなければならない問題となっている。

2. 研究の目的

以上の背景から、本研究ではコンクリート造柱部材の耐衝撃性の検討を目的に、コンク

リート柱を対象とした高速飛翔体の衝突による衝撃実験を行い、その破壊特性を調べた。また、実構造物の衝撃破壊の推測は、実験スケールの問題上、数値シミュレーションに頼らざるを得ず、そのためには、衝撃により発生する高圧・高圧縮・高歪速度の極限環境下における物性表現において必要となる、状態方程式パラメータ、材料物性値、構成則、破壊モデルが確立されていなければならない。そこで本研究では、衝撃荷重に対するコンクリートの強度特性および応答特性を評価することを目的に、衝撃負荷時におけるコンクリート内部応力状態測定を行った。

3. 研究の方法

(1)高速飛翔体衝突実験

試験体として実物大の 1/10 スケールの柱を製作し、飛翔体の衝突速度、柱内部の鉄筋の有無、軸力の有無を実験パラメータとした。無筋コンクリート柱、鉄筋コンクリート柱共に静的圧縮強度 55 MPa のコンクリートを使用し、試験体スケールの関係から骨材には直径 5 mm 以下の細骨材のみを使用した。鉄筋コンクリート柱では、主筋に D6 の鉄筋を 4 本、せん断補強筋に $\phi 2$ の鉄筋を補強筋間隔 10 mm で配筋した。

高速衝突実験は、一段式火薬銃により加速された高速飛翔体を試験体に衝突させることにより行った。用いた飛翔体は、直径 20 mm、全長 20 mm の円筒形で、衝突面が SUS304 製の金属板、本体が高密度ポリエチレンで構成されており、質量は 8.5 g である。試験体は、軸力導入装置により試験装置に固定されており、両端部固定条件のもとで実験を行った。

(2)コンクリート内部の衝撃応力測定実験

衝撃実験は 200 mm 口径火薬銃を用いて、直径 200 mm、重さ 4.8 kg の 2024Al 製飛翔体を衝突させることにより行った。コンクリートは、調合時における水とセメントとの混合比により静的圧縮強度が大きく変化する。そこで、圧縮強度の違いが衝撃応答に与える影響を調べるために、水セメント比 0.6、圧縮強度 35 MPa、骨材径 5 mm 以下、密度 2.16 Mg/m³ の普通強度モルタルと、水セメント比 0.2、圧縮強度 120 MPa、骨材径 5 mm 以下、密度 2.29 Mg/m³ の高強度モルタルを使用した。尚、モルタルとは骨材径 5mm 以下の細骨材のみを使用したコンクリートの名称である。試験体のサイズは高さ 245 mm、幅 140 mm、厚さ 100 mm である。衝撃による応力波(衝撃波)は試験体中をコンクリートの音速(約 2km/s)で通過するため、衝撃応力測定用の高速応答センサーである polyvinylidene fluoride (PVDF) 応力ゲージを用いて衝撃応力を測定した。PVDF ゲージの厚さは 0.078 mm

であり、分割したモルタル試験体ブロックの間にゲージを挟み込むことにより、モルタル内部の応力を測定することができる。PVDF ゲージの感面サイズは 6.35×6.35 mm と骨材径より十分大きいものを使用し、骨材とセメントを含めた平均的な応力状態を取得した。飛翔体衝突面から 10, 20, 30 mm の位置に応力波進行方向の応力測定ゲージを配置し、飛翔体衝突面から 10 mm の位置に衝突方向に対して値直方向の応力測定ゲージを配置し、衝撃圧縮下におけるコンクリート内部の応力状態および応力伝播過程の測定を行った。

4. 研究成果

(1)高速飛翔体衝突実験

典型的な損傷例として、Fig.1 に軸力比 0、飛翔体速度 700 m/s の条件での無筋コンクリート柱と鉄筋コンクリート柱の破壊性状を示す。ここで、軸力比とはコンクリートの圧縮強度に対する導入軸力の比であり、軸力の程度を示す値である。無筋コンクリート柱では、飛翔体の衝突面を中心に放射状にひび割れが進展し、コンクリートの剥落破壊が生じた。鉄筋コンクリート柱では、かぶりコンクリートの剥落破壊が顕著であるが、せん断補強筋によって囲まれたコア部分においては、補強筋の拘束効果により、無筋コンクリート柱よりも損傷が少なかった。無筋コンクリート柱と鉄筋コンクリート柱の共通の特徴として、衝突裏面の中央部に水平方向のひび割れが生じた。無筋コンクリート柱では飛翔体の速度上昇に伴い、裏面の水平方向ひび割れが拡大し、最終的にコンクリート柱が上下方向に割裂破壊する結果となった。一方、鉄筋コンクリート柱では、本研究における実験条件の範囲においては上下方向の割裂破壊に達することはなかった。

Fig.2 に試験体衝突面における表面損傷深さ、Fig.3 に試験体裏面における水平ひび割れ最大幅の飛翔体衝突速度依存性を示す。無筋コンクリート柱、鉄筋コンクリート柱ともに、



Fig. 1 コンクリート柱の高速衝突破壊性状

表面損傷深さ、裏面最大ひび割れ幅が、飛翔体速度の増加とともに増加する傾向を示した。表面損傷深さに関して、無筋コンクリート柱、鉄筋コンクリート柱ともに、軸力の大きさの影響は見られなかった。このことから、衝突表面における損傷は、軸力や試験体拘束条件などの外部応力場の影響を受けるものではなく、飛翔体衝突による局所的な衝撃応力場が支配的な破壊機構により生じていることが明らかになった。裏面ひび割れ幅に関して、無筋コンクリート柱では、軸力なしの試験体と比較して、軸力比 0.1 と軸力比 0.3 の試験体のひび割れ幅が大幅に抑制されていることが分かった。このことから、軸力などの外部応力場は、表面損傷からのひび割れ進展の抑制に大きな効果があることが明らかになった。一方、鉄筋コンクリート柱では、軸力の大きさの影響はあまり見られなかった。このことは、主筋や補強筋の拘束力が、軸力と同様、ひび割れの試験体内部への進展を抑制したことによると考えられる。

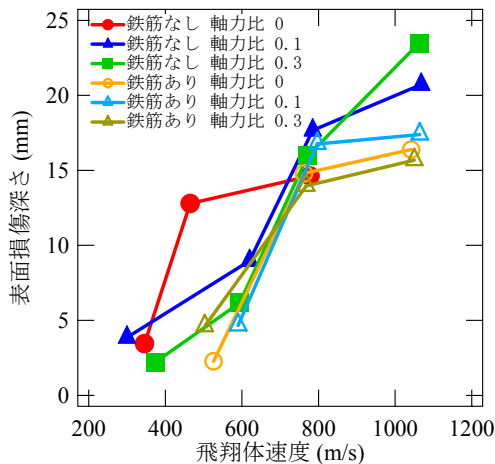


Fig.2 表面損傷深さの衝突速度依存性

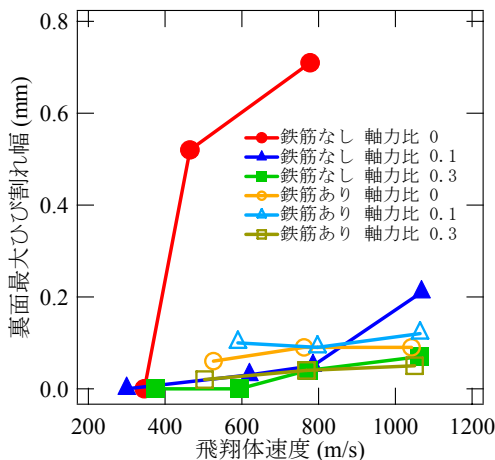


Fig.3 裏面最大ひび割れ幅の衝突速度依存性

(2)コンクリート内部の衝撃応力測定実験

Fig.4 に、典型的な測定例として、衝突速度 278 m/s の条件での高強度モルタルにおける測定結果を示す。グラフ横軸の時間は飛翔体が試料表面に衝突した時間を基準としている。衝撃波伝播方向の応力測定において、2 段構造の応力波伝播プロファイルが観測された。通常、2 波構造の応力波は、その伝播過程において、構造相転移などの急激な密度変化が生じることにより形成される。本研究では、モルタル内の空孔が衝撃圧により圧壊することにより、圧縮下で急激な密度変化が生じ、2 波構造の応力波が形成されたと結論付けた。この応力プロファイルの変曲点から決定される動的圧縮強度は、静的圧縮強度の約 5 倍の値を示し、コンクリートの圧縮強度が載荷速度に大きく依存することが明らかとなった。

測定結果から得られた応力波の位相速度と、応力波伝播の基礎方程式を用いることにより、本実験条件における圧縮経路を計算した。Fig.5 に粒子速度－応力平面における計算された圧縮経路を示す。図より、普通強度モルタルと高強度モルタルの圧縮経路に大きな違いがあることが分かる。本実験領域はコンクリートの静的圧縮強度に比べ、遥かに高い応力域であるが、1 GPa 程度の衝撃応力域においては、コンクリートの静的圧縮強度の

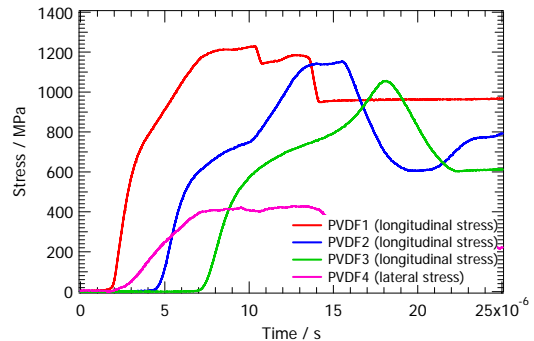


Fig.4 コンクリート内部の応力波形状

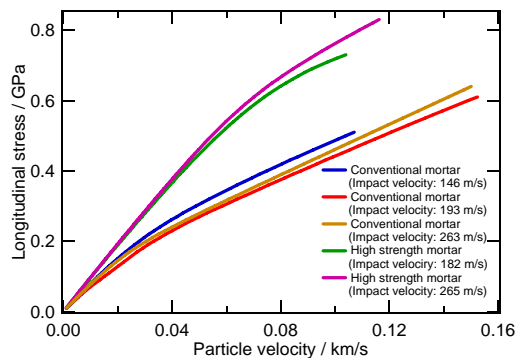


Fig.5 粒子速度－応力平面における圧縮経路

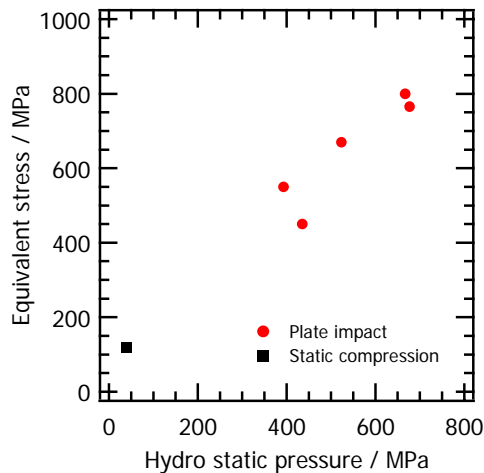


Fig.6 相当応力-静水圧関係

違いがその衝撃応答特性に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。

本実験条件が平面衝突実験であることから、衝撃波進行方向に対して、2次元軸対象の1軸歪状態と考えられる。すると、本実験で測定された衝撃波進行方向の応力 σ_x と垂直方向の応力 σ_y はそれぞれ、主応力 $\sigma_1=\sigma_x$ 、 $\sigma_2=\sigma_3=\sigma_y$ となる。したがって測定された σ_x と σ_y を用いることにより、次式から衝撃圧縮下における相当応力 σ_{eq} および静水圧成分 p を求めることができる。

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

Fig.6に本研究で測定された、高強度モルタルにおける σ_{eq} と p の関係を、静的1軸圧縮強度試験の結果とあわせて示す。静的圧縮と比較して、衝撃圧縮下における σ_{eq} が約4倍以上の値を示している。この衝撃圧縮における σ_{eq} の増加は、衝撃圧縮下での1軸歪状態による拘束効果と、歪速度の効果によって生じたと考えられる。また本研究結果は、 σ_{eq} が p の増加にともない上昇することを示している。金属材料では p の大きさに関わらず σ_{eq} は一定の値を示すが、コンクリートでは p の増加による拘束効果が材料強度に強く影響していることが明らかになった。衝撃圧縮下における σ_{eq} の振る舞いは、圧縮下で保持できるせん断強度と関連付けられることから、材料の動的強度モデルの構築に加え、動的破壊プロセス解明の上で最も重要な情報の一つである。したがって、本研究により、衝撃圧縮下におけるコンクリートの σ_{eq} の測定が可能となったことは、コンクリートの衝撃強度モデルを構築する上で非常に重要な成果

である。

本研究により取得されたコンクリートの衝撃応答・破壊特性に関する基礎データや、本研究において確立された実験手法は、コンクリートの耐衝撃性を検討するうえで非常に重要な知見を与えるものであり、今後の社会安全に大きく貢献できるものと考えている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

①川合伸明, 三澤智史, 篠原保二, 林静雄, 高速飛翔体の衝突による鉄筋コンクリート造柱部材の破壊に関する研究, コンクリート工学年次論文集 **30**, 889-894, 2008.

査読有

②N. Kawai, K. Inoue, S. Misawa, W. Riedel, K. Tanaka, S. Hayashi, and K. Kondo, The Dynamic Behavior of Mortar under Impact-Loading, AIP Conference Proceedings **955 Shock Compression of Condensed Matter-2007**, 549-552, 2007.

査読有

[学会発表] (計 8 件)

①川合伸明, 林静雄, 衝撃荷重下におけるコンクリートの動的強度特性と動的圧縮特性、平成 20 年度衝撃波シンポジウム、2009.3.18、名古屋・名古屋大学

②川合伸明, 林静雄, 普通強度および高強度コンクリートの衝撃応答特性、第 9 回材料の衝撃問題シンポジウム、2008.12.19、京都・京大大会館

③川合伸明, 林静雄, コンクリートの衝撃波伝播特性と衝撃圧縮特性、第 49 回高压討論会、2008.11.12、姫路・姫路商工会議所

④川合伸明, 三澤智史, 篠原保二, 林静雄, 高速飛翔体衝突に対する RC 柱部材の衝撃破壊特性、日本建築学会 2008 年度大会、2008.9.20、東広島・広島大学

⑤川合伸明, 三澤智史, 篠原保二, 林静雄, 高速飛翔体の衝突による鉄筋コンクリート造柱部材の破壊に関する研究、コンクリート工学年次大会 2008、2008.7.10、福岡・福岡国際会議場

⑥川合伸明, 林静雄, 三澤智史, 高速飛翔体衝突によるコンクリート造柱部材の局所破壊、平成 19 年度衝撃波シンポジウム、2008.3.17、東京・東京工業大学

⑦川合伸明、三澤智史、阿藤敏行、林静雄、普通強度および高強度モルタルの衝撃応答特性、第48回高圧討論会、2007.11.22、倉吉・倉吉パークスクエア

⑧N. Kawai, K. Inoue, S. Misawa, W. Riedel, K. Tanaka, S. Hayashi, and K. Kondo, The Dynamic Behavior of Mortar under Impact-Loading, 2007 American Physical Society, Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter, 2007.6.28, Hawai'i, USA

6. 研究組織

(1)研究代表者

川合 伸明 (KAWAI NOBUAKI)

東京工業大学・応用セラミックス研究所・研究員

研究者番号：60431988

(2)研究代表者

なし

(3)研究代表者

なし