

論文 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

川合 伸明*1・三澤 智史*2・篠原 保二*3・林 静雄*4

要旨: JR 福知山線の脱線による衝突事故や、東京都渋谷の温泉施設爆発事故などから、コンクリート造構造部材における耐衝撃性の検討が必要となっている。本研究では実物大の 1/10 スケールの柱を製作し、柱の軸力の有無、衝突飛翔体の速度などを変動要因とした実験を行い、鉄筋コンクリート造柱の衝撃破壊性状について調べた。無筋コンクリートでは衝突部分を中心に放射線状にひび割れが発生し、試験体中心部まで破壊が進展するのに対し、鉄筋コンクリートでは、かぶりコンクリートの剥落にとどまった。軸力の導入により、試験体裏面のひび割れが抑制されたが、衝突面における損傷への顕著な影響はみられなかった。

キーワード: コンクリート柱、飛翔体、高速衝突、軸力、ひび割れ幅、運動量

1. はじめに

高速衝突する飛翔体・飛来物に対するコンクリート構造物の耐衝撃問題は、当初、軍事的な必要性から研究が行われていたが、欧米における原子力発電所の建設に際して航空機の衝突に対する安全性検討の必要性から、高速衝突問題の研究が行われるようになった。米国では竜巻により巻き上げられた電柱などの飛来物あるいは航空機・破損による飛散した発電機のタービンプレードの原子力発電施設への衝突問題があり、ドイツ・フランス等ヨーロッパ諸国でも航空機の墜落事故を対象とした鉄筋コンクリート構造物の耐衝撃設計に関する研究が行われた。我が国においても、原子力発電所やその関連施設等の重要構造物は、従来行われている静的・動的な構造設計に加えて、航空機等外部からの飛来物による衝撃荷重を考慮した設計が必要とされている。また、JR 福知山線の脱線事故や、東京都渋谷の温泉施設爆発事故など、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、原子力発電所などの重要構造物に限らず、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ている。

以上の背景から、これまでにコンクリート造部材の衝撃試験が数多く行われてきた。しかしながら、その大部分は、鉄筋コンクリート造耐震壁の耐衝撃性の検討を目的とした、コンクリート板に対する実験^{1),2),3)}や、土木工学の分野における落石防護構造物のための梁を対象とした実験^{4),5)}であり、柱部材を対象とした衝撃実験の報告は非常に少ない。そこで、本研究では、鉄筋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、破壊性状を調べた。本実験では、爆破テロや爆発事故などで生じる高速飛散物を高速飛翔体として想定し、試験体として実物大の 1/10 スケールの柱を製作し、衝突飛翔体の速度・重量、柱内部の鉄筋の有無、粗骨材の有無、軸力の有無を実験パラメータとした。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図-1 に試験体形状、表-1 にコンクリートの力学的性状、表-2 に鋼材の力学的性状を示す。実験に使用する柱は、一般のプロティを有する階の柱を基に 1/10 スケ

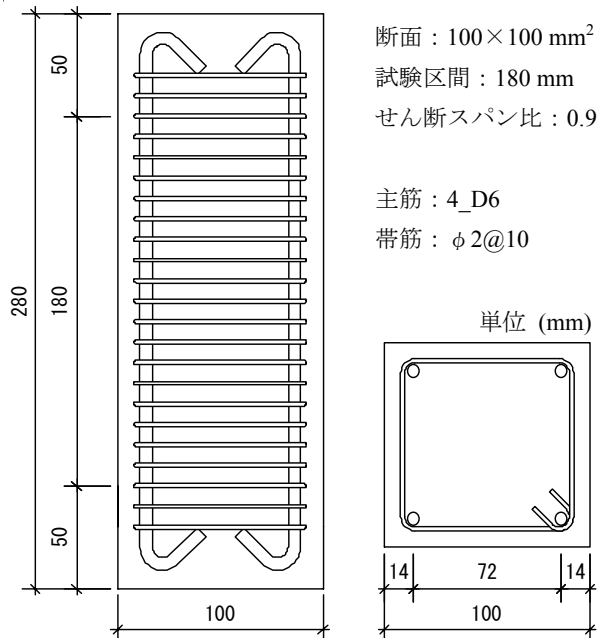


図 1 試験体形状

*1 東京工業大学 セキュアマテリアル研究センター 博(工) (正会員)

*2 東京工業大学大学院 総合理工学研究科環境理工学創造専攻

*3 東京工業大学 建築物理研究センター准教授 工博 (正会員)

*4 東京工業大学 セキュアマテリアル研究センター教授 工博 (正会員)

表-1 コンクリートの力学的性状

コンクリート	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
	55.1	3.13	2.62×10 ⁴

表-2 鋼材の力学的性状

鋼材	降伏応力度 (N/mm ²)	最大応力度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
主筋 D6	444	521	1.51×10 ⁵
せん断補強筋 φ2	881	953	1.71×10 ⁵

表-3 無筋コンクリート柱の実験パラメータ

両端固定の有無	なし			あり		
軸力比	0			0	0.1	0.3
粗骨材最大粒径 (mm)	なし (モルタル)		20	なし (モルタル)		
飛翔体質量 (g)	8.5	17	8.5	8.5		
飛翔体速度 (m/s)	300~1000	300~500	300~700	300~1000		

表-4 鉄筋コンクリート柱の実験パラメータ

両端固定の有無	なし	あり		
軸力比	0	0	0.1	0.3
粗骨材最大粒径 (mm)	なし (モルタル)			
飛翔体質量 (g)	8.5			
飛翔体速度 (m/s)	500~1000			

ールのもとした。無筋コンクリート柱、鉄筋コンクリート柱共に、全ての試験体の寸法およびコンクリート強度は同じものとした。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φ2の鉄筋を補強筋間隔10mmで配筋した。

表-3に無筋コンクリート柱の実験パラメータ、表-4に鉄筋コンクリート柱の実験パラメータを示す。無筋コンクリートを対象とした実験では、柱の損傷における飛翔体の運動量の効果と、運動エネルギーによる効果を確認するため、重量の異なる飛翔体を用いて実験を行った。また、無筋コンクリート柱に含まれる粗骨材の有無による破壊性状への影響を調べた。両端固定による曲げ拘束の有無、軸力の有無、軸力比の大きさを変動要因とした実験は、無筋コンクリートと鉄筋コンクリートの両試験体で行った。

2.2 実験方法

本研究では、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、衝撃実験を行った。図-2に一段式火薬銃の概要を示す。一段式火薬銃は、火薬チャンバーで燃焼させた無煙火薬の燃焼ガスの膨張を推進力として利用し、飛翔体を加速する装置である。飛翔体速度の計測は、試験体衝突面の直前にある速度計測器により測定した。速度計測器は、等間隔に配置された三体のレーザーセンサーで構成されており、飛翔体がレーザー光を横切る時間差を計測することにより飛翔体速度を求める仕組みとなっている。

図-3に飛翔体の形状を示す。飛翔体は、直径20mmの円筒形のものであり、衝突面はSUS304製の金属板、尾部は高密度ポリエチレンで作られている。飛翔体の全質量は、先端の金属板の厚さを変えることにより調整した。本研究では厚さ1mmと4.5mmの金属板を使用し、それぞれ8.5gと17gの飛翔体として使用した。

2.3 測定項目

高速飛翔体の衝突による破壊性状の評価するために、ひび割れ幅、試験体の衝突面における貫入深さ、試験体の衝突面における剥落面積を測定した。ひび割れ幅の計測は、最小目盛0.01mmの精度で計測できるマイクロスコープ(写真-1)を用いて行った。貫入深さの測定は、最小目盛0.02mmの精度で計測できる測定器具(写真-2)を用いて行った。



写真-1 マイクロスコープ

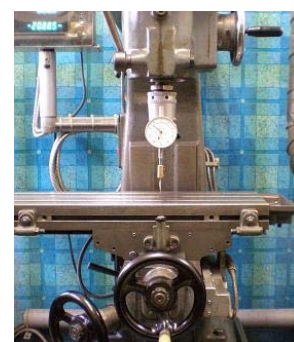


写真-2 貫入深さ測定器具

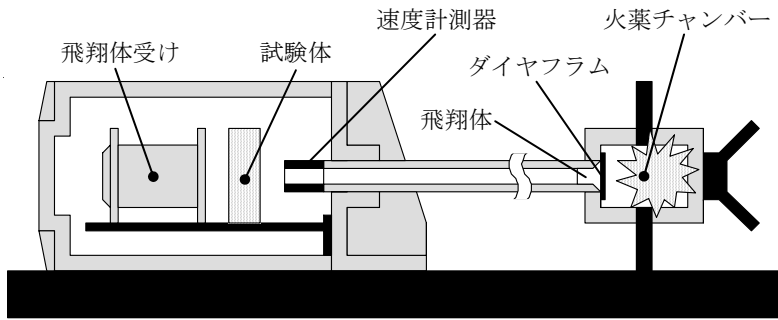


図-2 一段式火薬銃の概要

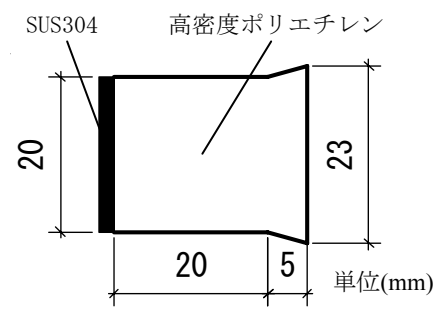
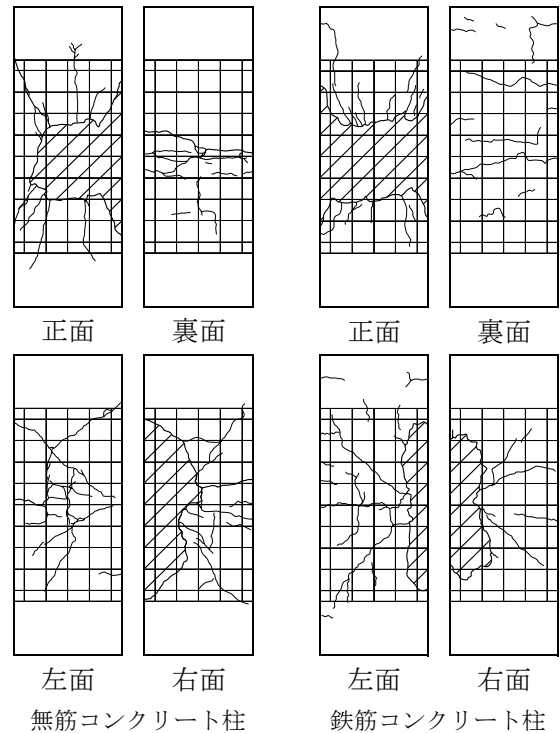


図-3 飛翔体の形状

3. 実験結果および破壊性状

3.1 破壊性状

典型的な損傷例として、図-4に両端固定なし、飛翔体の重さ 8.5 g、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。また、写真-3に同条件での無筋コンクリート柱と鉄筋コンクリート柱の正面の損傷状況を示す。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入りコンクリートが剥落した。鉄筋コンクリート柱では、かぶりコンクリートが剥落しているものの、せん断補強筋によって囲まれた中心部分においては、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。鉄筋コンクリート柱の方が全体的にひび割れの数は多いように見えるが、ひび割れ幅は抑制されていた。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観測された。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。



実験条件：両端固定なし 軸力比 0
飛翔体重量 8.5 g 飛翔体速度 700 m/s

図-4 破壊性状の比較

3.2 飛翔体の運動量と運動エネルギーによる比較

図-5は、飛翔体の衝突条件の違いによる、無筋コンクリート柱衝突面の損傷を比較したものであり、右から左へ順に損傷量（＝飛散したコンクリート量）が大きくなるように5つの試験体を並べたものである。損傷量の拡大傾向と各実験条件における飛翔体の運動量および運動エネルギーを比較したところ、運動量の増加と試験体損傷量の間には単純な正の相関があるのに対し、運動エネルギーの増加と試験体損傷量の増加の間には単純な正の相関がみられなかった。このことから、高速衝突によるコンクリート柱衝突面の損傷量に関しては運動量が支配的であると考えられる。

3.3 骨材粒径による影響

図-6にモルタルと粗骨材最大粒径 20 mm の試験体



写真-3 無筋コンクリート柱と鉄筋コンクリート柱の損傷状況

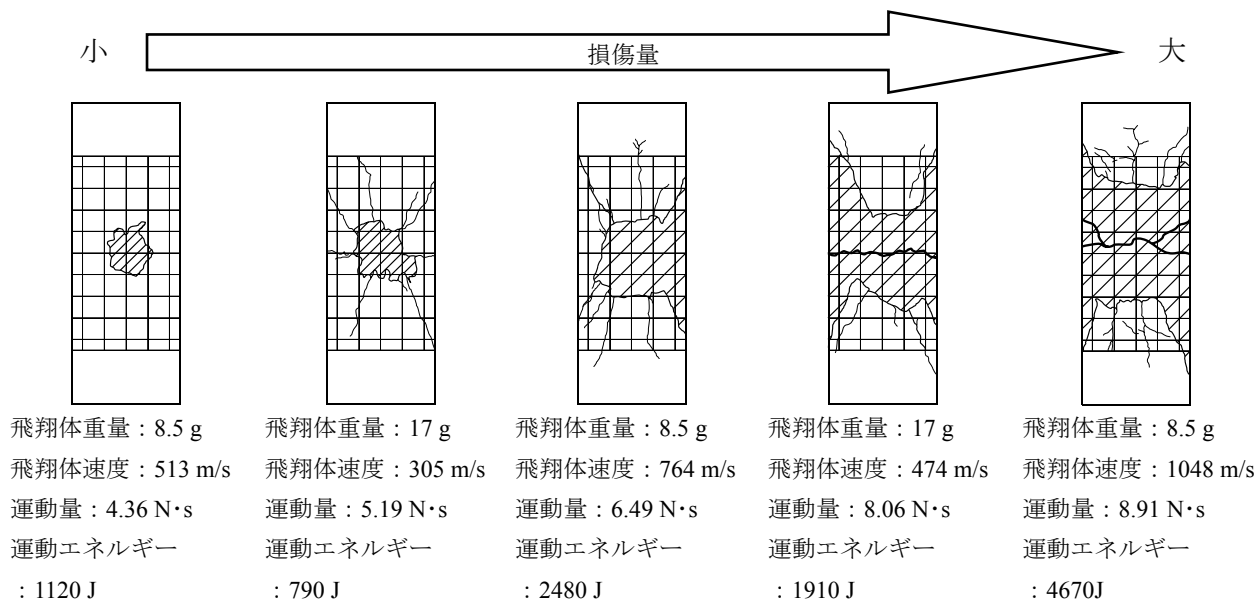


図-5 飛翔体の運動量および運動エネルギーによる破壊性状の比較

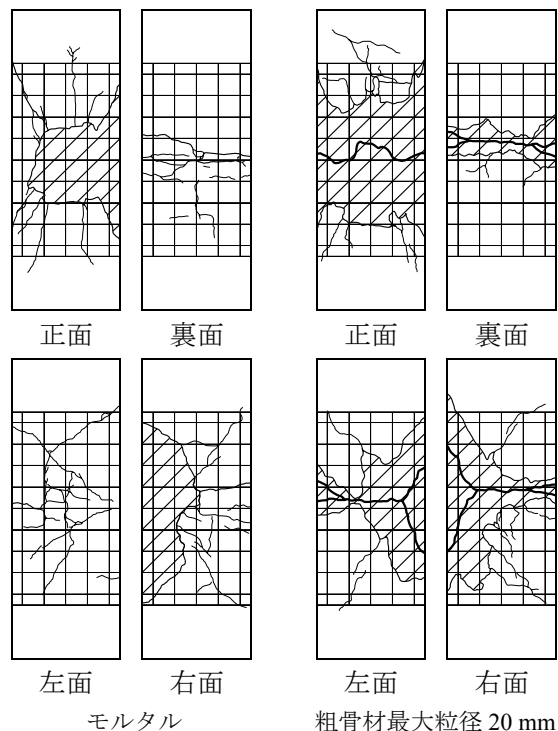
における損傷の違い、写真-4に粗骨材最大粒径 20 mm の試験体の損傷状況を示す。モルタルの試験体では飛翔体速度 700 m/s の条件においては上下方向への割裂破壊には達しなかったが、粗骨材最大粒径 20 mm の試験体では、同条件において上下方向への割裂破壊に達した。ひび割れは、粗骨材の表面に沿うように進展しており、破壊面の粗骨材が剥がれ落ちるような破壊となった。また、粗骨材自体の破壊は殆ど見られなかった。本実験では粗骨材の大きさと飛翔体の大きさが同程度であることから、粗骨材全体の衝撃破壊により試験体破壊が生じるのではなく、局所的な衝撃荷重による局所変形によって試験体の破壊が引き起こされたと考えられる。つまり、局所変形にともなう亀裂の進展が粗骨材-セメント界面で生じ、亀裂が容易に試験体を貫くことが可能となり、大きな損傷を引き起こしたと考えられる。

3.4 試験体拘束条件による影響

図-7に無筋コンクリート柱正面の貫入深さ、図-8に鉄筋コンクリート柱正面の貫入深さ、図-9に無筋コンクリート柱の剥落面積、図-10に鉄筋コンクリート柱の剥落面積、図-11に無筋コンクリート柱の裏面ひび割れ幅、図-12に鉄筋コンクリート柱の裏面ひび割れ幅、それぞれの飛翔体衝突速度依存性を示す。ここでの比較に用いた試験体は全て粗骨材なしのモルタルである。貫入深さは、飛翔体衝突部分でのコンクリートが剥落した深さを計測した。剥落面積は飛翔体衝突部分の表面が剥落した面積を計測した。裏面のひび割れ幅は、裏面中央部における水平方向ひび割れの最大ひび割れ幅を計測した。

(1) 貫入深さ

飛翔体速度の増加とともに貫入深さは増加する傾向を示す。しかし、鉄筋コンクリート柱においては補強筋



実験条件 : 両端固定 なし 軸力比 0
飛翔体重量 8.5 g 飛翔体速度 700 m/s

図-6 骨材粒径による比較



写真-4 粗骨材最大粒径 20 mm の試験体の損傷状況

の存在により、かぶり厚さ以上の貫入は起こらなかった。
無筋コンクリート柱、鉄筋コンクリート柱共に両端固定
による影響は見られなかった。

(2) 剥落面積

貫入深さ同様、飛翔体速度の増加とともに増加する傾
向を示す。無筋コンクリートと鉄筋コンクリートとの間
に大きな違いは見られなかった。また剥落面積における

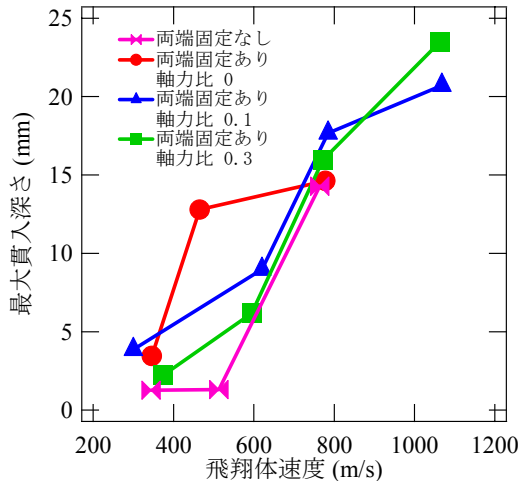


図-7 貫入深さ(無筋コンクリート柱)

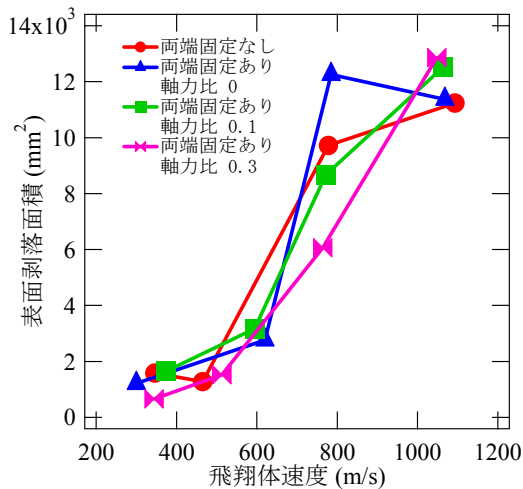


図-9 表面剥落面積(無筋コンクリート柱)

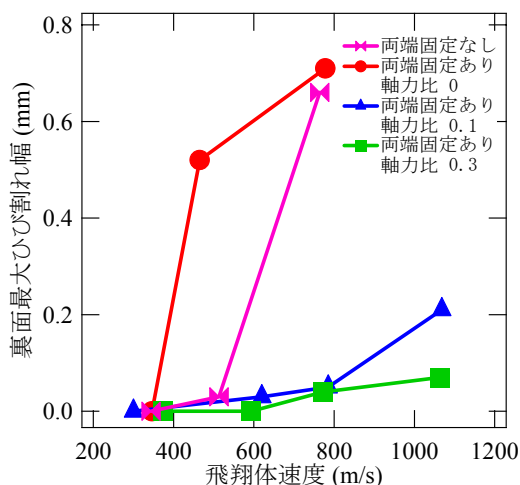


図-11 裏面ひび割れ幅(無筋コンクリート柱)

両端固定の有無の影響も見られなかった。

(3) 裏面ひび割れ幅

無筋コンクリート柱では、飛翔体速度の増加とともに
ひび割れ幅が著しく増加する傾向が得られたのに対し、
鉄筋コンクリート柱では飛翔体速度増加による影響は
大きくなかった。このことは、飛翔体衝突による衝撃荷
重が局所的なものであるため、主筋の拘束力によりひ

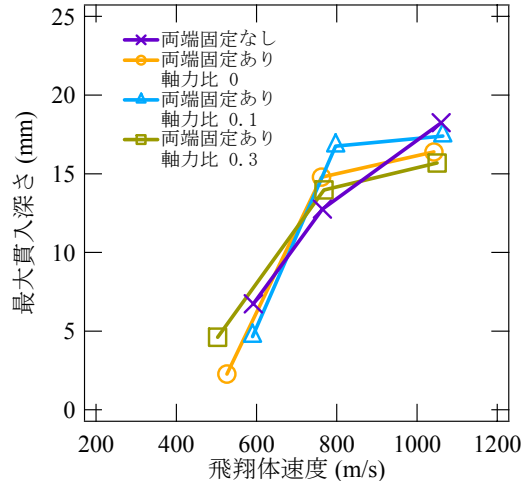


図-8 貫入深さ(鉄筋コンクリート柱)

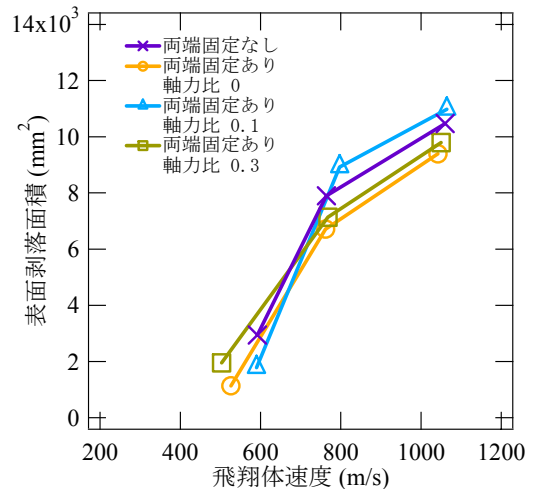


図-10 表面剥落面積(鉄筋コンクリート柱)

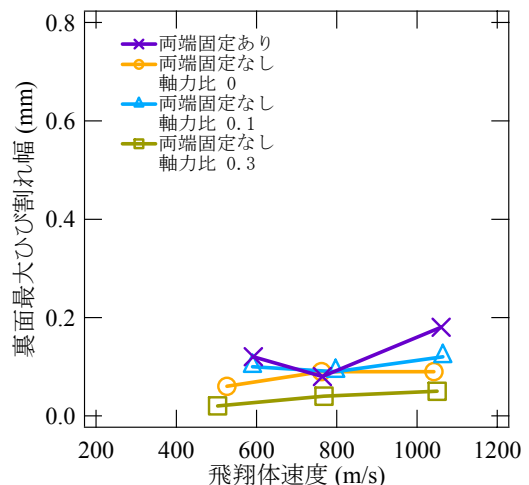


図-12 裏面ひび割れ幅(鉄筋コンクリート柱)

び割れの広がりを抑制できたことによると考えられる。ここで測定対象としている水平方向のひび割れは曲げ変形によるものと考えられるため、曲げ拘束として働く両端固定の試験体と、固定なしの試験体とではひび割れ幅に違いが生じると思われた。しかし、裏面ひび割れ幅においても両端固定による影響は見られなかった。このことから、衝突面裏面の水平ひび割れは、衝突衝撃荷重による全体曲げによるものではなく、衝突衝撃によって生じる局所的な応力場による局所変形によるものであるとされる。

3.5 軸力の大きさによる影響

前節 3.4 と同様に図-7～図-12 から、両端固定での、軸力なし、軸力比 0.1、軸力比 0.3、の無筋コンクリート柱と鉄筋コンクリート柱における、貫入深さ、剥落面積、裏面ひび割れについて比較する。

(1) 貫入深さ・剥落面積

無筋コンクリート柱、鉄筋コンクリート柱ともに、貫入深さ、剥落面積における軸力の影響は見られなかった。このことは、衝突表面における損傷は、軸力や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、衝突によって生じる衝撃応力場によって決定されるものであることを示唆している。

(2) 裏面ひび割れ幅

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る。実際、軸力なしの無筋コンクリート柱試験体では、飛翔体速度 1000 m/s の実験において上下方向への割列破壊に達したのに対し、軸力を導入した試験体では同実験条件においても上下方向への割列破壊には至らず、柱として軸力を支持していた。このことから、軸力の存在は、衝突面における損傷への影響は少ないが、表面損傷からのひび割れの進展の抑制には大きな効果があることが示された。

鉄筋コンクリート柱では、前節で示したとおり主筋の拘束力によりひび割れの拡大が抑制されるため、軸力の大きさの影響はあまり見られなかった。

4. まとめ

本研究は、鉄筋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、衝突飛翔体の速度・重量、柱内部の鉄筋の有無、粗骨材の有無、軸力の有無、を変動要因として破壊性状への影響を調べたものである。本研究の結果を以下に要約する。

(1) 破壊性状について、無筋コンクリート柱では飛翔体の衝突部分を中心に放射状にひび割れが発生し、飛

翔体速度 1000 m/s の条件では上下方向に割裂破壊した。鉄筋コンクリート柱ではかぶりコンクリートが剥落するように破壊したが、せん断補強筋によって囲まれた中心部分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。また、鉄筋コンクリート柱では飛翔体速度 1000 m/s の条件においても、上下方向への割列破壊には達しなかった。

- (2) 飛翔体の衝突による柱衝突面の損傷量は、飛翔体の運動量が強く影響することが示された。
- (3) 柱内部に含まれる粗骨材最大粒径が大きい場合、衝撃損傷に伴うひび割れが、粗骨材の表面に沿って試験体内部まで進展しやすくなり、損傷が大きくなることを示された。
- (4) 貫入深さ、表面剥離破壊面性における、柱の両端固定および軸力の有無による影響は、無筋コンクリート柱、鉄筋コンクリート柱共に見られず、外部拘束条件が衝突面の損傷に与える影響が小さいことが示された。
- (5) 無筋コンクリート柱での軸力や、鉄筋コンクリート柱の主筋による拘束力は、表面損傷からのひび割れの進展の抑制に大きな効果があることが示された。

本研究は東京工業大学応用セラミック研究所共同利用研究の一環として行われたものであります。本研究を行うにあたり、多大な協力を賜った東京工業大学応用セラミクス研究所技術室の石井元氏、河島公夫氏、小屋畑洋平氏、高周波熱錬(株)、太平洋セメント(株)、BASF ポゾリス(株)に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 井上健二、田中享二ほか：飛翔体の高速衝突によるコンクリート材料の破壊性状、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.403-404、2006.9
- 2) 角善輝、瀧口克己ほか：高強度コンクリート及び高強度繊維補強コンクリートの耐衝撃性に関する研究(その2) 貫通限界評価式に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.963-964、2006.9
- 3) 別府万寿博、大野友則ほか：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発生メカニズムに関する数値解析的検討、構造工学論文集、Vol.53A、2007.3
- 4) 今野久志、岸徳光ほか：敷砂を設置した大型 RC 梁の重錘落下衝撃実験、コンクリート工学年次論文集、Vol.28、No.2、2006
- 5) 三上浩、岸徳光ほか：衝撃荷重時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の性能照査型耐衝撃設計法に関する一提案、構造工学論文集、Vol.53A、2007