

論文 鉄筋コンクリート造柱部材における飛翔体衝突による損傷評価に関する研究

佐野 洋介*1・林 静雄*2・阿藤 敏行*3・片山 雅英*4

要旨: コンクリート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 RC 柱を製作し、飛翔体の運動エネルギー、柱部材内の鉄筋量や部材寸法を変動要因とした実験及び解析を行い、鉄筋コンクリート造柱の損傷評価について考察した。飛翔体の残留ひずみ、試験体残留重量割合及び貫入深さは、鉄筋量が同じならば運動エネルギーと比例の関係にある。寸法効果による破壊性状の違いは見られなかった。また解析より、損傷はかぶりコンクリートが受ける割合が大きいことが分かった。

キーワード: 鉄筋コンクリート柱部材, 飛翔体, 高速衝突, 鉄筋量, 寸法効果

1. はじめに

近年, JR 福知山線の脱線事故や東京都渋谷区の温泉施設爆発事故など, 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構造体の損傷・破壊を理解することが重要となってきた。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おり, 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飛翔体衝突実験¹⁾²⁾や, 土木工学の分野における落石防護のための梁(ロックシェッド)を対象とし, 重錘を使用した衝撃破壊実験³⁾が行われてきた。しかしながら, 柱部材を対象とした報告は非常に少なく⁴⁾, 耐衝撃性の検討をするために, 本研究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縮小スケールの柱を製作し, 飛翔体の運動エネルギー, 柱部材内部の主筋量及びせん断補強筋量, 部材寸法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 に基準の試験体性状, 表-1 に試験体諸元を示す。実験に使用した柱は 1 階にピロティを有する建物の柱を基に 1/10 スケールのものとし, これを基準に断面と高さ, 飛翔体の直径を合わせた 1/5 スケールのものと 1/20 のものを製作した。実験装置の関係上 1/5 スケールの試験体は高さを 1/10 スケールの試験体と同じにした。

1/10 スケールの試験体は, 主筋に D4 の鉄筋を使用し本数を変えることで全主筋比を変えた。またせん断補強

筋に D1 を使用し, 配筋ピッチを変えることでせん断補強筋比を変えた。コンクリート強度は一定を狙い, 鉄筋のピッチが最小 6mm と非常に小さくなるため, 1/10 及び 1/5 スケールの試験体は通常の調合をした後に, 粗骨材最大寸法が 5mm となるようにふるいを通した。1/20 スケール試験体に関してはモルタルを使用した。表-3 にコンクリートの力学的特性を, 表-4 に鉄筋の力学的特性を示す。表-5 にコンクリートの調合計画を示す。

2.2 飛翔体概要

表-2 に飛翔体諸元を示す。飛翔体は球体の金属とし, 直径 20mm の高密度ポリエチレン及びポリカーボネートをくり抜き, 飛翔体を接着剤で固定した。衝突前にサボキャッチャーで先端と末尾を分離し, 金属部分のみを衝突させた。1/5 スケールの試験体のみ実験装置の関係上, 飛翔体末尾を有りとした。写真-1 に発射前の飛翔体の写真を示す。飛翔体の速度及び No.10 に関しては材質を変えることで, 飛翔体の運動エネルギーを変化させた。

2.3 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 2 対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。

2.4 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,

*1 相模原市役所 修士(工学) (正会員)

*2 東京工業大学 応用セラミックス研究所セキュアマテリアル研究センター教授 工学博士 (正会員)

*3 東京工業大学 応用セラミックス研究所セキュアマテリアル研究センター准教授 工学博士

*4 伊藤忠テクノソリューションズ(株) 博士(工学)

表-1 試験体諸元

No.	試験体名	試験体形状			コンクリート	主筋			せん断補強筋				
		想定スケール	b (mm)	D (mm)	L (mm)	F_c (N/mm ²)	配筋	σ_y (N/mm ²)	P_g (%)	配筋	$w\sigma_y$ (N/mm ²)	P_w (%)	
No.1	ST500	1/10	100	100	280	40	4-D4	295	0.56	D1@10	295	0.15	
No.2	ST700												
No.3	ST900												
No.4	ST1100												
No.5	ST1700												
No.6	PG084												
No.7	PG112						6-D4	0.84					
No.8	PG140						8-D4	1.12					
No.9	PW026						10-D4	1.40					
No.10	PW026AL						4-D4	0.56	D1@6	295	0.26		
No.11	PW057											D1.9@10	0.57
No.12	PW008											D1@20	0.08
No.13	PW005											D1@30	0.05
No.14	SU500	1/5	200	200	280	4-D8	785	0.49	D1.9@20	295	0.14		
No.15	SU900												
No.16	SU1100												
No.17	SD500	1/20	50	50	140	40(モルタル)	4-D1.9	295	0.45	D0.5@5	295	0.15	
No.18	SD900												
No.19	SD1100												

表-2 飛翔体諸元

No.	試験体名	材質	形状	質量 (g)	球の直径 (mm)	実際の速度 (m/s)	運動エネルギー (N・m)	
No.1	ST500	SUS304	球体	3.516	9.54	533	499	
No.2	ST700					682	818	
No.3	ST900					855	1285	
No.4	ST1100					1105	2147	
No.5	ST1700					1765	5477	
No.6	PG084					826	1199	
No.7	PG112					901	1427	
No.8	PG140					873	1340	
No.9	PW026					935	1537	
No.10	PW026AL	AL2024	球体	1.413	10	1389	1363	
No.11	PW056	SUS304	球体	3.516	9.54	840	1240	
No.12	PW008					901	1427	
No.13	PW005					847	1261	
No.14	SU500					28.13	494	3432
No.15	SU900					(+5.07)	772	8383
No.16	SU1100					1156	18796	
No.17	SD500					0.44	512	58
No.18	SD900					752	124	
No.19	SD1100					1031	234	

ST:基準シリーズ PG:主筋シリーズ PW:せん断筋シリーズ SU:拡大シリーズ SD:縮小シリーズ

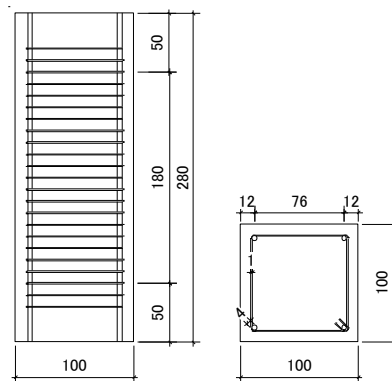


図-1 試験体形状(mm)

(No.1~No.5)



写真-1 飛翔体写真(直径 9.54mm)

表-3 コンクリートの力学的特性

	圧縮強度 σ_B (N/mm ²)	引張強度 σ_t (N/mm ²)	ヤング係数 E_C (10 ⁴ N/mm ²)
コンクリート	38.5	2.07	2.16
モルタル	41.7	1.84	2.14

※ヤング係数は 1/3 割線弾性係数

表-4 鉄筋の力学的特性

	公称断面積 A_S (mm ²)	降伏応力 σ_y (N/mm ²)	最大応力度 σ_{max} (N/mm ²)	弾性係数 E_S (10 ⁵ N/mm ²)
D8	49.51	1028	1267	2.04
D4	14.05	369	548	1.64
D1.9	2.825	347	431	1.38
D1.0	0.765	295	353	0.94
D0.5	0.193	331	414	0.74

※降伏応力は 0.2% オフセット耐力による降伏点の応力

表-5 調合計画

	調合強度 (N/mm ²)	水セメント比 (%)	粗骨材の最大寸法 (mm)	単位水量 (kg/m ³)	絶対容積 (l/m ³)			質量(kg/m ³)			A E 減水剤 (kg/m ³)	スランプ (cm)
					セメント	細骨材	粗骨材	セメント	細骨材	粗骨材		
コンクリート	33	59	5	193	109	306	392	327	807	1039	なし	18
モルタル	33	59		317	179	503		537	1292		なし	18

試験体の衝突面における貫入深さの幅方向の分布を測定した。また裏面の破壊モード確認のために、裏面中央に発生するひび割れの最大の幅を測定した。さらにコンクリートの剥離量を比較するために試験体の実験前後の重量を測定した。そして衝突後の飛翔体のひずみと、超音波による内部損傷状態も測定した。ひび割れ幅の計測は、最小目盛 0.01 mm の精度で計測できるマイクログラフを用いて行った。貫入深さ及び飛翔体のひずみの測定は、最少目盛 0.01mm の精度で計測できるデジタルノギスを用いて行った。

3. 実験結果及び破壊性状

3.1 破壊性状

損傷例として、図-3に No.2 と No.4 と No.5 の破壊性状、写真-2に損傷状況を示す。灰色部分はコンクリートが剥落した部分で、グリッドが抜けている部分は貫通により吹き飛んだ部分である。No.2 と No.4 と No.5 を含むすべての試験体で衝突点に飛翔体とほぼ同じ大きさのクレーターが発生し、放射状にひび割れが入りかぶりコンクリートが剥落した。すべての試験体で衝突点近傍のせん断補強筋が破断した。また、衝突点に主筋を配した試験体は衝突点の主筋が破断した。これより使用した鉄筋のヤング係数の高低は影響していないと考えられる。

各シリーズとも飛翔体の速度が上昇するに伴い、試験体の損傷が大きくなった。No.4 に関しては裏面にスポール破壊のひび割れが発生した。また、No.5 は試験体を飛翔体が貫通し、衝突点付近のコアコンクリートが吹き飛び、主筋だけが残った。

3.2 貫入深さ

図-4に基準シリーズ No.1~No.4 の衝突面における、貫入深さの幅方向の分布を示す。運動エネルギーの増加とともに貫入深さが増加する。特に No.4 ではクレーター壁の広がり確認できた。これは No.4 では衝突面のせん断補強筋が多く破断していたことから、コアコンクリートの拘束力が低下したことが原因と考えられる。図-5に主筋シリーズ No.3, No.6~No.8 の貫入深さ分布図を示す。No.7 は衝突点が右にずれ、中心から右の貫入が深くなった。全主筋比による貫入抑制効果は確認できなかった。図-6にせん断筋シリーズ No.3, No.9~No.12 の貫入深さ分布図を示す。せん断補強筋比による貫入深さの影響は確認できなかった。また、飛翔体の材質がステンレスの No.9 とアルミニウムの No.10 を比べると、ほぼ同じ運動エネルギーを入力しているにもかかわらず貫入深さが異なる。これは飛翔体の材質によって破壊性状が異なる可能性を示している。図-7に奥行に対する最大貫入深さの割合を示す。基準シリーズに試験体スケールを合わせるため、運動エネルギーを縮小シリーズは 8 倍、

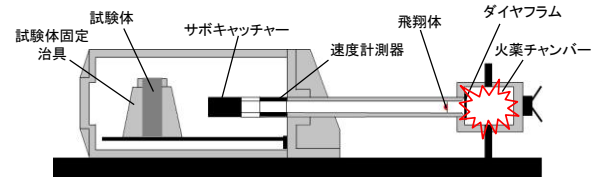
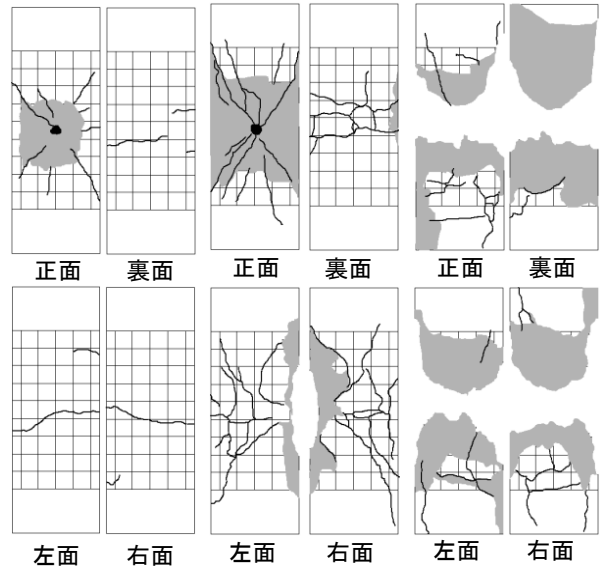


図-2 一段式火薬銃の概要



No. 2 速度 682m/s No. 4 速度 1105m/s No. 5 速度 1765m/s

図-3 破壊性状



写真-2 損傷状況

(左から No. 2 No. 4 No. 5)

拡大シリーズは 1/8 倍している。運動エネルギーと奥行に対する貫入深さの割合は比例関係にあることが確認できた。

3.3 試験体重量

図-8に試験体の実験前後の残留重量割合を示す。大破した No.5 と No.16 は除いている。試験体配筋をパラメータとした主筋・せん断筋シリーズは飛翔体の運動エネルギーと試験体残留重量に相関が確認できないが、飛翔体の運動エネルギーをパラメータとした基準・縮小・拡大シリーズは、運動エネルギーの増加と共に剥落したコンクリートが増加する傾向を示す。基準・縮小シリーズでの減少率に対して拡大シリーズの減少率が大きいのは

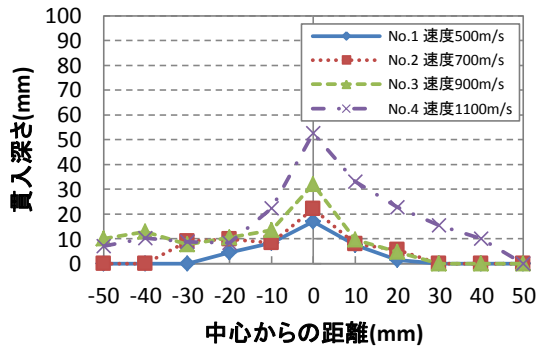


図-4 貫入深さ分布図(基準シリーズ)

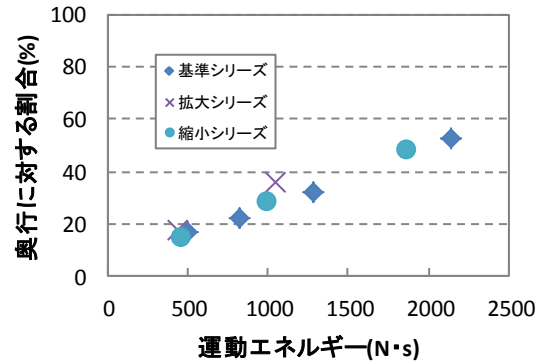


図-7 奥行に対する最大貫入深さの割合

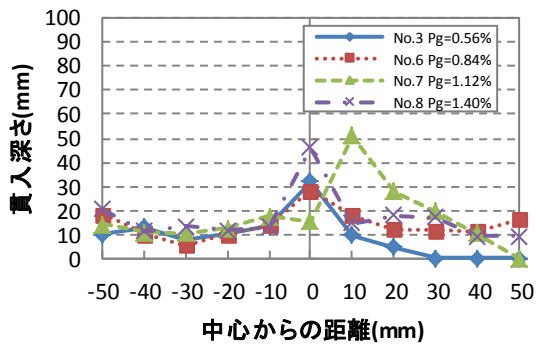


図-5 貫入深さ分布図(主筋シリーズ)

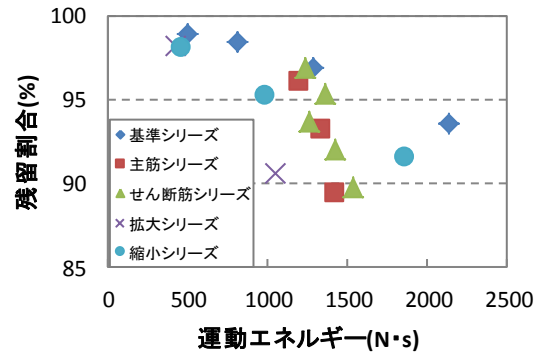


図-8 実験前後の試験体残留重量割合

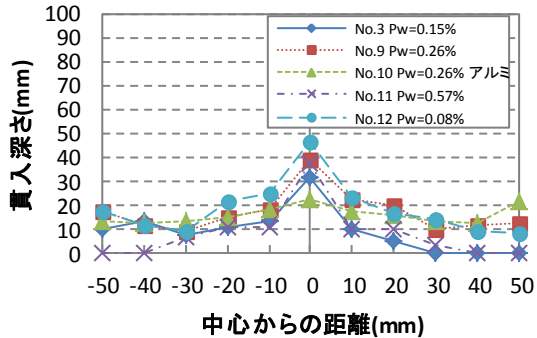


図-6 貫入深さ分布図(せん断筋シリーズ)

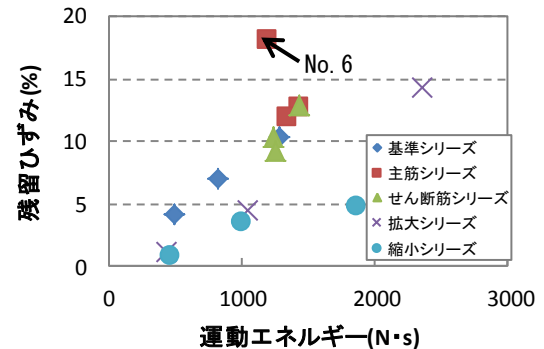


図-9 飛翔体の残留ひずみ

本実験で使用した試験体の高さが低く、試験体全体に破壊が及んだからであると考えられる。これより、寸法効果への影響は無かったと言える。

3.4 飛翔体の残留ひずみ

図-9に飛翔体の実験前後の残留ひずみを示す。図-7と同様、運動エネルギーは試験体スケールに合わせている。No.5とNo.10は飛翔体自体が粉砕し、No.9は実験後の飛翔体を回収できなかった。主筋シリーズの残留ひずみが一番大きいものはNo.6で、衝突点に配していた主筋に衝突し、主筋が破断した影響が大きいと考えられる。主筋・せん断筋シリーズを除いて、運動エネルギーの増加と共に飛翔体の残留ひずみが大きくなる傾向がある。

3.5 裏面ひび割れ最大幅

図-10に裏面中央の水平方向に発生するひび割れ最大幅を示す。図-7と同様にスケールは合わせている。基準・拡大・縮小シリーズは運動エネルギーが1500N・sを下回る範囲ではひび割れ幅が小さい。また図-11にせん断筋シリーズの裏面ひび割れ最大幅を示す。せん断補強筋比が0.1%を下回る範囲でひび割れ幅が大きく出ている。これはせん断補強筋によるひび割れ抑制効果には限界があると考えられる。主筋シリーズには相関関係が見られなかった。

3.6 超音波による内部損傷測定

内部損傷状況を非破壊試験により把握するために、超音波試験を行った。図-12に測定方法を示す。超音波

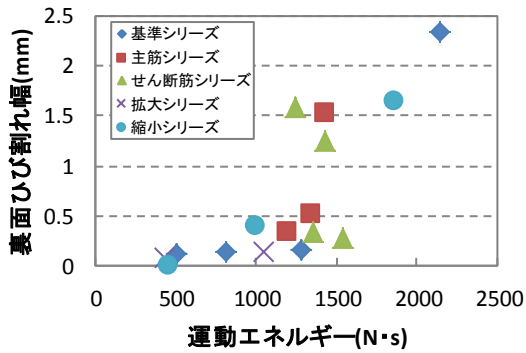


図-10 裏面ひび割れ最大幅

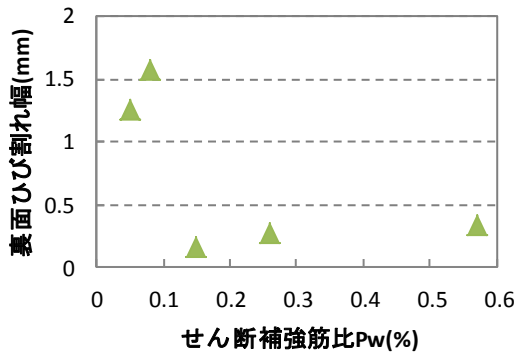


図-11 裏面ひび割れ最大幅(せん断筋シリーズ)

を柱の1面から送信し、コンクリート中を伝搬した超音波を、送信した面の対面で受信する方法である。コンクリート中に超音波の伝搬を阻害するもの(割れなど)がある場合、受信する超音波の振幅が小さくなる。これを利用し、受信した超音波の振幅により内部の損傷を測定した。衝撃を加えた面から試験区間のメッシュに合わせて、長手方向にAからJまでの番号を付け、衝撃を加えた面から深さ方向に1から5まで番号を付けた。

図-13に No.2 における実験前後の超音波の受信振幅割合の分布を示す。この試験体は実験前後に電圧 30V、周波数 30Hz、音速 4000m/s の超音波を使い、入力した超音波の振幅に対する受信した超音波の振幅の割合を測定した。実験前は全体的にまばらで、振幅の割合が 60~100%を示す水色と紫色の部分が大半を占めている。これに対して実験後は衝突面から裏面にかけてすり鉢状に 0~20%を示す青色の範囲が広がり、受信振幅割合が下がっている。これは奥行方向のひび割れが放射状には進まず、範囲が狭くなりながら進んでいくことが考えられる。また端部は実験前の水色や紫色の状態が残っている。これは鉄筋の拘束によりひび割れ進展が抑制されたと言える。以上より超音波測定は内部損傷の状況をよく表しており、有効であると言える。

3.7 数値シミュレーション

衝撃解析コード AUTODYN Ver.12.1 を用いて No.2 のシ

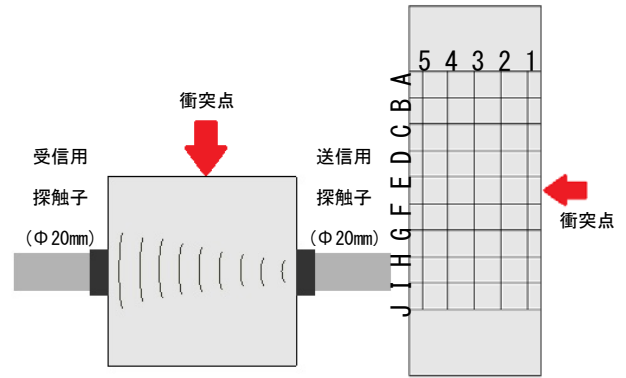


図-12 超音波測定計測方法

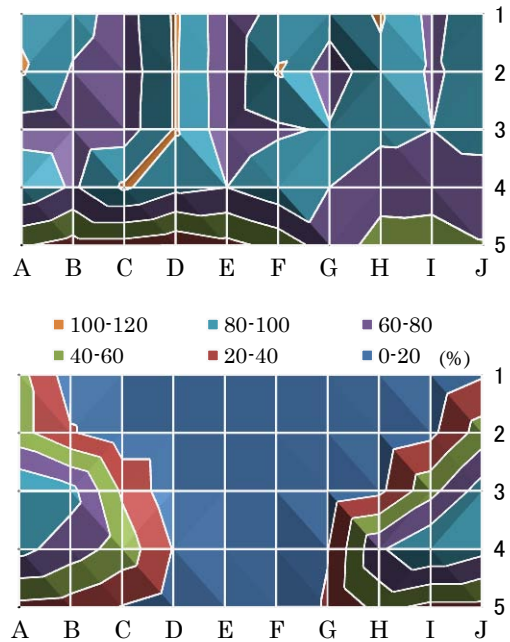


図-13 No.2 における超音波の受信振幅割合分布図 (上: 実験前 下: 実験後)

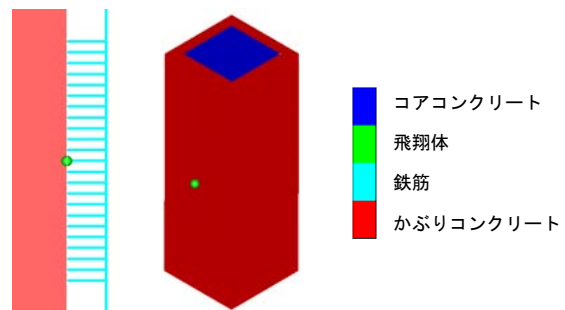


図-14 解析モデル

ミュレーションを行った。解析では3次元モデルを製作した。図-14に解析モデルを示す。解析時間を短縮するために、対称性を考慮して4分割したモデルを製作した。試験体の要素は2mmの立方体で87500要素に、飛翔体は2000要素に分割した。鉄筋は埋め込み要素で4mmずつ分割し、コンクリート内に埋め込んだ。コンクリー

トの材料モデルは Drucker-Prager, 想定ひずみ速度は予備解析から 10^4 1/s とし, ひずみ速度による圧縮強度・引張強度の増加については土木学会のコンクリート標準示方書⁵⁾の式に基づいて考慮した。ひずみ速度効果は要素位置に依存して変化するが, 本解析では計算を簡略化するために, すべての要素で一律強度を上げた。コアコンクリートには破壊後に圧力が減少し塑性域に戻ると, 応力も減少し塑性域に戻るよう設定し, 鉄筋は破壊に至るまで弾完全塑性体とした。

図-15に No.2 の破壊モードを示す。時刻は衝突から 0.114ms であり, 飛翔体が衝突し速度が 0 になった後十分に時間が経過し, 破壊が進行している時刻である。衝突した飛翔体が試験体に入り込み, 衝突点付近のコンクリートが破壊し, 飛び出ている。また, 底面を見てみると, 鉄筋の位置に沿ってコンクリートが破壊している。これはかぶりコンクリートが剥落し, コアコンクリートの損傷が抑制された実験結果と同じ傾向と言える。

図-16に飛翔体の衝突による材料ごとの塑性仕事の履歴を示す。解析は 1/4 モデルなので, エネルギーを4倍にして実験と値を合わせている。衝突から 0.1ms 時では, かぶりコンクリートが 467J(全体の 65%), コアコンクリートが 146J(全体の 20%), 飛翔体が 96J(全体の 13%) のエネルギーが塑性仕事に使われている。また鉄筋はほとんどエネルギーを吸収していない。これより, 柱部材の損傷はかぶりコンクリートが他の材料に比べて大きく負担していると言える。

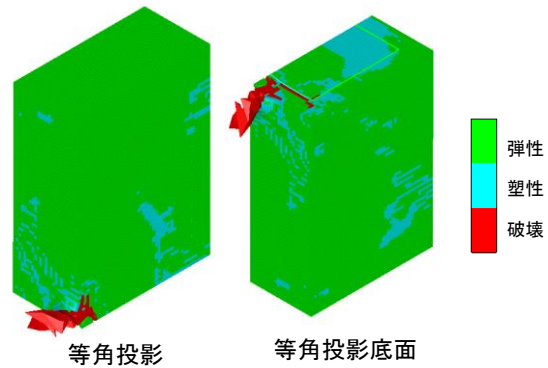


図-15 解析結果(時刻 t=0.114ms)

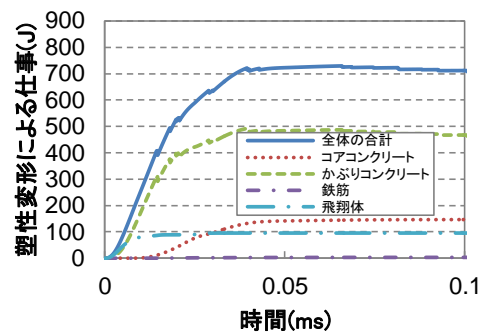


図-16 各材料の塑性変形による仕事の履歴

4. まとめ

本研究の成果を以下に要約する。

- (1) 柱部材において, 貫入深さは鉄筋量に影響せず, 飛翔体の材質によって異なる可能性がある。
- (2) 飛翔体の残留ひずみ, 試験体残留重量割合及び貫入深さは, 鉄筋量が同じならば運動エネルギーと比例の関係にある。
- (3) せん断補強筋による柱裏面ひび割れの抑制効果に限界がある可能性がある。
- (4) 本実験の範囲内では, 寸法効果による破壊性状への影響はない。
- (5) 超音波測定は柱部材内部の衝撃破壊による損傷状況を把握するのに有効である。
- (6) 適切なモデルを構築することにより, RC 柱の高速衝突による損傷をシミュレートできる。また損傷はかぶりコンクリートが受ける割合が大きい。

謝辞

本研究を行うにあたり, 多大な協力を賜った(株)アイ・シイの廣島明男様に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 長原大, 瀧口克己, 西村康志郎, 高橋彬: 飛翔体の衝突した RC 耐震壁と補修壁のせん断耐力に関する実験研究 その1(衝突実験), 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), pp.411-412, 2008.9
- 2) 三輪幸治, 別府万寿博ほか: 先端形状が異なる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数値シミュレーション, 構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, 第9回, pp.235-240, 2008.12
- 3) 中田吉彦, 榎谷浩, 西村洋平: 衝突体の運動エネルギーおよび運動量に着目した RC はりの衝撃特性に関する研究, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.1493-1503, 2008
- 4) 川合信明, 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, Vol.30, No.3, pp.889-894, 2008
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書(設計編), 1996.3