

(29) 鉄筋コンクリートはりの衝撃弾塑性挙動

THE ELASTO-PLASTIC BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BEAM UNDER IMPACT

森嶋芳大^{*}, 熊谷貴秀^{**}, 中田吉彦^{***}, 榎谷浩^{****}

Yoshihiro MORISHIMA, Takahide KUMAGAI, Yoshihiko NAKATA and Hiroshi MASUYA

^{*}金沢大学大学院 (〒920 金沢市小立野2-40-20)

^{**}金沢大学 工学部土木建設工学科 (〒920 金沢市小立野2-40-20)

^{***}工修 小松市役所 都市整備部 (〒923 小松市小馬出町91)

^{****}工博 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科 (〒920 金沢市小立野2-40-20)

キーワード：衝撃実験，鉄筋コンクリートはり，応答特性，破壊状況
(impact test, reinforced concrete beam, dynamic characteristic, failure mode)

1. まえがき

衝撃現象下でのコンクリート構造物の挙動は静的な場合と大きく異なることが知られており，その研究は盛んに行われているが¹⁾，不明な点が多いのが現状である。

そこで本研究では，まず，各種衝撃力を受ける鉄筋コンクリート（以下RCと呼ぶ）はりの基本的な応答性状を実験的に調べるとともに，その実験結果を解析手法の検証に反映できるデータの収集を目的として，RCはりの静的載荷実験と重錘落下衝突による衝撃実験を行った。次に，衝撃挙動解析に個別要素法を適用し，本解析方法により，実際のRCはりの衝撃挙動を再現することが可能であることを示す。最後に，実験と解析から，衝撃力や挙動特性に関し得られた知見を示す。

2. 鉄筋コンクリートはりの衝撃実験

実験で用いた一供試体の諸元を図-1に示す。

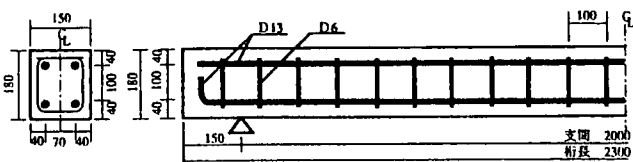


図-1 供試体諸元

衝撃実験で用いた装置を図-2に示す。これは，鉄板を重ね合わせロードセルと一体化した重錘を磁石を用いて所定の高さまで吊り上げ，自由落下させるいわゆる自由落下式の実験装置である。はりの支点部では，はりの跳ね上がりを防ぐため鋼製の治具により上下方向を固定するようになっている。

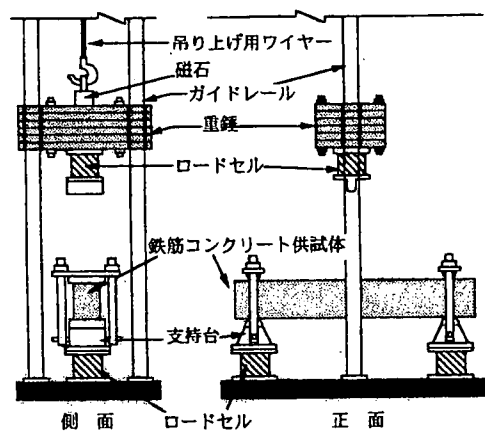


図-2 実験装置図

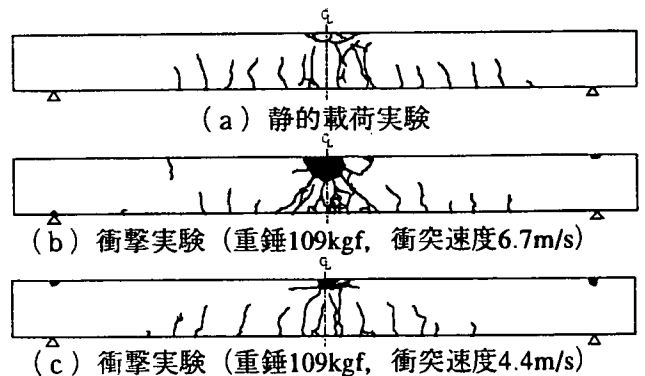


図-3 ひび割れ状況

実験終了後のひび割れ状況の一例を図-3に示す。静的載荷では，曲げによる破壊が生じている。衝撃実験では，載荷点であるはり中央で押し抜きせん断破壊が確認でき，はり中央上面での圧壊，剥離も見られた。また，はり上面からのひびわれも確認で

きる。これら押し抜きせん断破壊やはり上面からのひび割れは静的載荷では見られない衝撃荷重下特有のものである。

供試体名と載荷方法の一覧を表-1に示す。

表-1 供試体名および載荷方法の一覧

No.	供試体					載荷方法			
	供試体名	供試体種類	計測位置	スパン (cm)	せん断補強筋比 (%)	載荷点	重錘重量 (kgf)	高さ (cm)	衝突速度 (m/sec)
静的載荷	1	sta2301	TYPE-A	CASE-1sta	200	0.38	スパン中央	-	-
	2	sta2302	TYPE-A	CASE-2sta	200	0.38	スパン3/10点	-	-
	3	sta2303	TYPE-A	CASE-3sta	200	0.38	スパン2/10点	-	-
	4	sta140	TYPE-B	CASE-1sta	110	0.38	スパン中央	-	-
	5	sta9010	TYPE-C	CASE-4sta	70	0.38	スパン中央	-	-
	6	sta9005	TYPE-D	CASE-4sta	70	0.84	スパン中央	-	-
	7	sta9000	TYPE-E	CASE-4sta	70	0	スパン中央	-	-
衝撃実験 (線一落下)	8	F23011							
	9	F23012	TYPE-A	CASE-1	200	0.38	スパン中央	194	128
	10	F23021							
	11	F23022	TYPE-A	CASE-2	200	0.38	スパン3/10点	194	128
	12	F23031							
	13	F23032	TYPE-A	CASE-3	200	0.38	スパン2/10点	194	128
	14	M109M1							
	15	M109M2	TYPE-A	CASE-1	200	0.38	スパン中央	109	100
	16	M109E1							
	17	M109E2	TYPE-A	CASE-1	200	0.38	スパン中央	109	227
	18	F1401							
	19	F1402	TYPE-B	CASE-1	110	0.38	スパン中央	194	128
	20	F901031							
	21	F901032	TYPE-C	CASE-4	70	0.38	スパン中央	194	128
22	F901031								
23	F901032	TYPE-C	CASE-4	70	0.38	スパン中央	194	46	
24	F90051								
25	F90052	TYPE-D	CASE-4	70	0.84	スパン中央	194	46	
26	F90001								
27	F90002	TYPE-E	CASE-4	70	0	スパン中央	194	46	
衝撃実験 (陸送落下)	28	C230	TYPE-A	CASE-1	200	0.38	スパン中央	194	32
	29	C140	TYPE-A	CASE-1	110	0.38	スパン中央	194	32
	30	C90	TYPE-A	CASE-4	70	0.38	スパン中央	194	32

衝突速度の相違による荷重応答の比較例を図-4に示す。衝突速度5.0m/sの場合の方が、2.5m/sの場合に比べて荷重最大値は約2.5倍大きく、荷重継続時間は、約1.5倍大きいことがわかる。

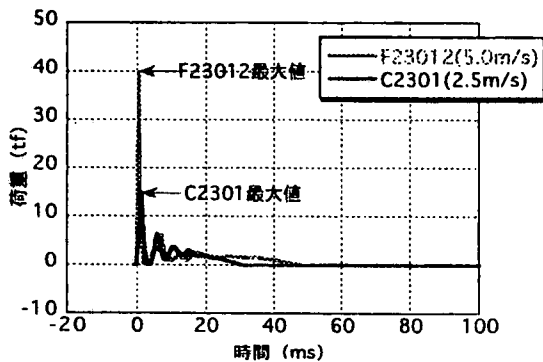


図-4 衝突速度の相違による荷重応答の比較

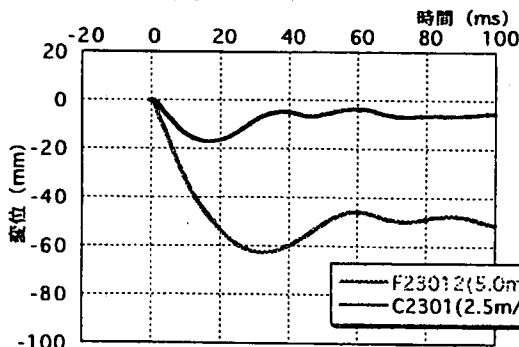


図-5 衝突速度の相違による変位応答の比較

衝突速度の相違による載荷点変位の比較例を図-5に示す。載荷点変位最大値についても、衝突速度5.0m/sの場合の方が2.5m/sの場合に比べ、4倍程度大きいことがわかる。これらの現象に関し、他の供試体の比較においても同様な傾向がみられた。

重錘重量の相違による荷重応答の比較例を図-6に示す。重錘重量194kgfの場合の方が、109kgfの場合に比べて荷重最大値は約1.3倍大きく、荷重継続時間は、約1.8倍大きいことがわかる。

重錘重量の相違による載荷点変位の比較例を図-7に示す。載荷点変位最大値についても、衝突速度5.0m/sの場合の方が2.5m/sの場合に比べ、約2.4倍大きいことがわかる。これらの現象に関し、他の供試体の比較においても同様な傾向がみられた。

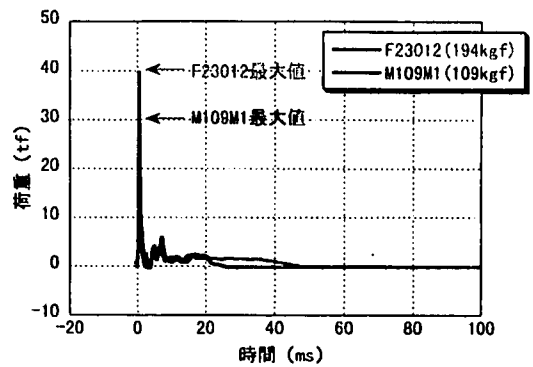


図-6 重錘重量の相違による荷重応答の比較

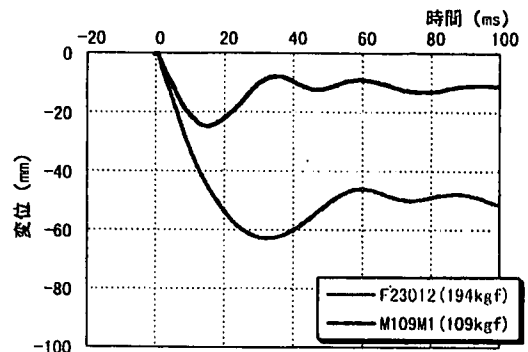


図-7 重錘重量の相違による変位応答の比較

また、本実験では、せん断補強筋比の異なる供試体を用いて実験を行っており、次にせん断補強筋比の相違による応答の比較を行う。

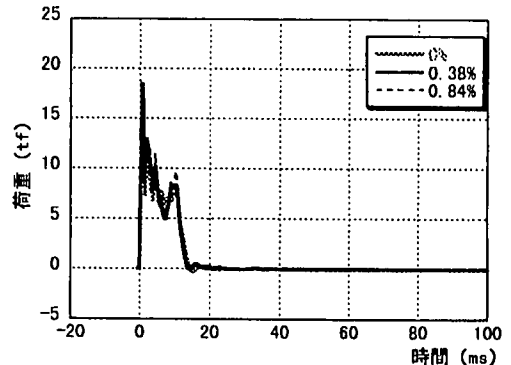


図-8 せん断補強筋比の相違による荷重応答比較
せん断補強筋比の相違による荷重応答の比較例を

図-8に、載荷点変位の比較例を図-9に示す。

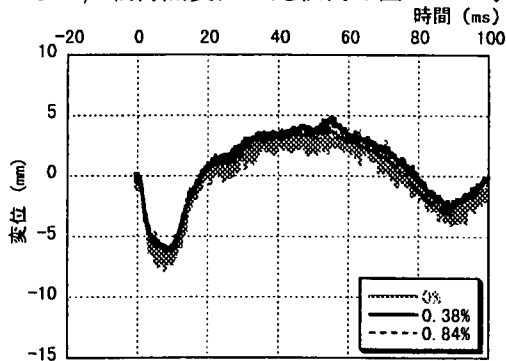


図-9 セン断補強筋比の相違による変位応答比較

せん断補強筋比0.84%と0.38%の比較では、荷重応答、変位応答ともにはほぼ一致しており、せん断補強筋比の相違による明確な差異は認められなかった。

また、せん断補強筋の有無で比較すると、せん断補強筋のない場合には、荷重応答波形において2つ目の大きな波は見られず、荷重・変位の最大値は、せん断補強筋のある場合に比べ、若干大きな値となった。

次に、吸収エネルギーについて考察する。ここで示す吸収エネルギーは、荷重-変位曲線を積分して得られたものであり、はりの変形に費やされるエネルギーである。なお、ここでは、落下前の重錘の位置エネルギーから重錘の跳ね返りに費やされるエネルギーを差し引いた、第一打撃目にもみ働くエネルギーで考察することとする。

重錘の跳ね返りに費やされるエネルギーについては、荷重応答のグラフより第一打撃応答から第二打撃応答までの時間を調べ、跳ね返り高さを計算することで、跳ね返りに費やされるエネルギーを求めた。跳ね返り高さの計算については、高速ビデオによって撮影された衝撃実験の映像により、その妥当性を確認している。

スパンの2%の変形量(載荷点)に対するエネルギー吸収量を表-2に示す。なお、表-2の()内の数値は静的載荷実験を基準とした値である。

表-2 エネルギー吸収量

供試体名	スパンの2%の変形量に対する 吸収エネルギー (tf・mm)
sta2301	111.4 (1.00)
F23011	130.0 (1.17)
F23012	124.0 (1.11)
sta140	112.8 (1.00)
F1401	118.4 (1.05)
F1402	160.8 (1.43)

()内は静的載荷実験を基準とした値

純スパンの2%の変形量に対するエネルギー吸収量は、衝撃実験では、静的載荷実験に比べて約1.1~1.5倍大きくなっているのが確認できる。

衝突速度と吸収エネルギーの関係を図-10に、エネルギー吸収率との関係を図-11に示す。

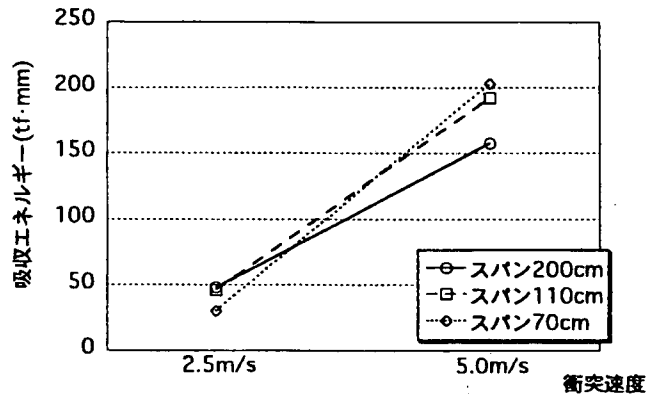


図-10 吸収エネルギーと衝突速度の関係

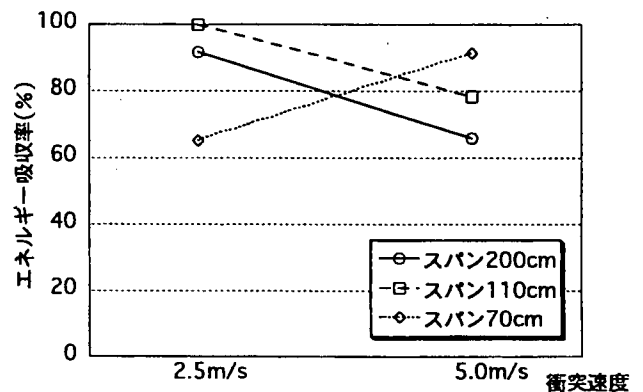


図-11 エネルギー吸収率と衝突速度の関係

スパンが110cmと200cmの場合では、衝突速度5.0m/sの場合の方が、衝突速度2.5m/sの場合に比べてエネルギー吸収率は0.7~0.8倍になっており、衝突速度が大きくなるとエネルギー吸収率が小さくなる傾向がみられた。これは、スパンが110cmと200cmの場合では、衝突速度が大きいほど、はりの変形以外に衝突点での圧壊、剥離にエネルギーが多く消費されるためであると考えられる。

3. 個別要素法解析

個別要素法解析では、コンクリートのある一定の半径を持つ要素の集合体と仮定し、要素間の法線方向および接線方向にばねとダッシュポットを挿入することで、弾性および非弾性的性質を表現する²⁾。

解析で用いたばねの破壊基準について説明する。コンクリートに対しては法線方向ばねが圧縮破壊すると初期ばね定数の1/6で軟化し圧縮強度の1/4まで達するとその強度で維持するとし、引張方向はテンションカットオフとした。せん断滑り開始条件にはMohr-Coulombの破壊条件を用いた。鉄筋やスターラップの鋼材は降伏強度に達するとその強度で抗力を維

持し、接線方向はVon Misesの条件を用いた。

要素分割は実験の対称性を考慮して半分の領域で行い、重錘要素をはりの中央上部に配置し、この重錘要素に衝突速度を与えて解析を行った。図-12に解析モデルを示す。

なお、本解析では材料のひずみ速度効果を考慮し、コンクリートと鉄筋双方の材料強度を増加させている。

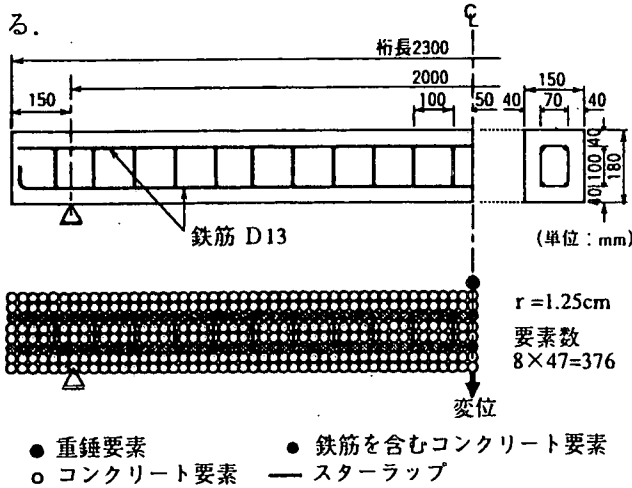


図-12 解析モデル

個別要素法による解析で得られた荷重、変位の時刻歴変化を図-13、図-14に示す。

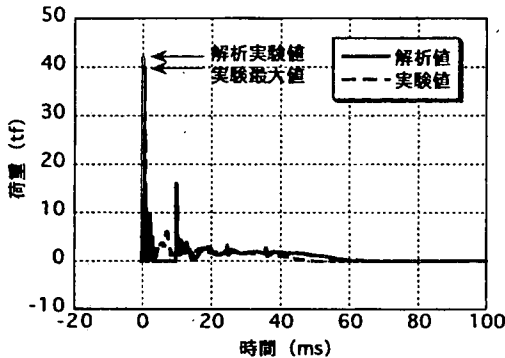


図-13 荷重の時刻歴変化

荷重最大値、荷重継続時間ともに解析値の方がやや大きくなっている。しかし、波形形状は、解析と実験ともに、最初に時間的に短い大きな波が発生したあと比較的平坦な小さい波が継続する、というほぼ同じ形状を示しており、実験で得られた荷重応答を比較的良好に再現している。

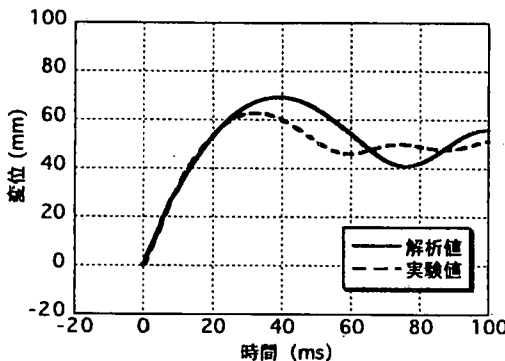


図-14 変位の時刻歴変化

載荷点の変位応答については、解析の方が実験より若干大きくなっているものの、立ち上がり部分の勾配からわかる変位速度は、解析と実験ともにほぼ同じであり、良い整合性を示している。

図-15に解析での破壊性状を示す。衝突後、時間の経過とともにひびがたわみ、ひびわれの入る様子がわかる。

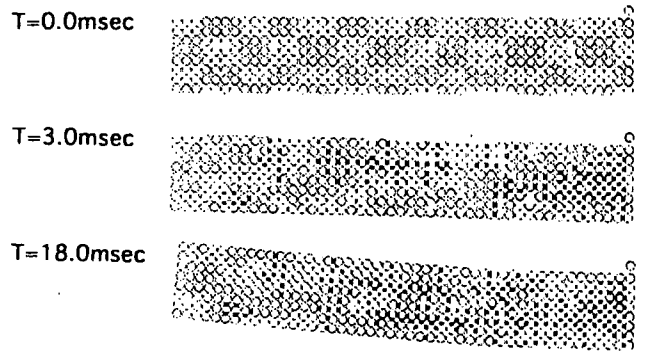


図-15 破壊性状

4. まとめ

以上より、本研究の成果をまとめると、

- 1) RCはりの衝撃実験より、はり上面からのひびわれや押し抜きせん断破壊など静的載荷では見られない衝撃荷重特有の破壊形態が確認できた。
- 2) 本実験においては、衝突速度の相違は荷重最大値に、重錘重量の相違は荷重継続時間に、大きな影響を及ぼした。
- 3) 本実験における程度のせん断補強筋比の相違は、載荷点の破壊性状や応答特性にほとんど影響を及ぼさなかった。
- 4) 同一変形量に対するエネルギー吸収量は、衝撃載荷時では、静的載荷時の1~5割増となっているのが確認できた。また、衝撃載荷時の衝突点破壊状況により、RCはりのエネルギー吸収量にかなり差異が生じることが確認できた。
- 5) 本解析法によれば、コンクリートと鉄筋双方のひずみ速度効果を考慮することにより、実験で得られた衝撃応答を比較的良好に再現できることを示した。

参考文献

- 1) 土木学会衝撃問題研究小委員会：構造物の衝撃挙動と設計法，土木学会，構造工学シリーズ6，1994,1
- 2) 中田吉彦，榎谷浩，梶川康男，森嶋芳大：個別要素法による鉄筋コンクリートはりの衝撃挙動解析，構造工学論文集，Vol.44A，1998,3