# 先端形状が異なる衝突体の水平低速度衝突を受ける 鉄筋コンクリート版の局部損傷メカニズムと評価法

A study on the local damage in reinforced concrete slab due to the horizontal impact of steel body with different nose shapes

> 三輪幸治\*,別府万寿博\*\*,大野友則\*\*\* Koji Miwa, Masuhiro Beppu and Tomonori Ohno

\*修(工)防衛大学校理工学研究科後期課程学生(〒239-8686神奈川県横須賀市走水1-10-20) \*\*博(工)防衛大学校准教授,システム工学群建設環境工学科(〒239-8686神奈川県横須賀市走水1-10-20) \*\*\*工博防衛大学校教授,システム工学群建設環境工学科(〒239-8686神奈川県横須賀市走水1-10-20)

Horizontal impact tests are performed by the impact of a steel body with the mass of 100kg and different nose shapes (hemisphere, conical and flat). In tests, 1.1m square RC slabs are employed for test targets. The steel body is moved by the horizontal impact machine mechanized with rubber bars and controlled by their elongation. The extent of local damage and the damage mechanism in RC slabs due to the impact of rigid body with different nose shapes are investigated. To know the effects of nose shape, the impact force, acceleration and strain at the rear face are measured. The effect of nose shapes on the local damage is discussed using elastic contact theory.

Key Words: horizontal impact, reinforced concrete slab, local damage, nose shape, elastic contact theory キーワード:水平衝突, RC版,局部損傷,先端形状,弾性接触論

## 1. 序言

コンクリート構造物が衝突荷重を受けると、衝突条件の相違によって全体破壊または局部破壊が生じる<sup>1)</sup>.全体破壊は、落石などの質量が大きな(数100kg以上)物体が構造物に低・中速度(数10m/s以下)で衝突した場合に生じやすい、局部破壊は、物体が高速度(数100m/s~数1000m/s)で衝突した場合に生じる破壊モードであり、損傷の大きさによって表面破壊、裏面剥離、貫通に分類される<sup>1)</sup>.

低・中速度衝突の中でも、質量が大きな物体の衝突を 受ける薄い鉄筋コンクリート壁等の場合は局部的損傷 が生じることがあり、例えば、海岸構造物に敷設された 消波ブロックがケーソン壁に衝突して穴があくことが 報告されている<sup>2)</sup>.低・中速度の衝突を受けるコンクリ ート構造物を設計する場合は、動的倍率を用いて衝突荷 重を等価な静的荷重に置換した上で許容応力度法に基 づいて評価することが多い<sup>3)</sup>.例えば、落石による衝突 荷重の評価は、落石を便宜的に球体形状と仮定してHertz の弾性接触論を準用した設計式によって行われている<sup>4)</sup>. 影響に関する検討例は少ないが,土木学会の衝撃実験・ 解析法の標準化に関する研究小委員会によって実験的 検討が行われており,RC はりに対する重錘の低・中速 度の衝突に関して重錘の先端形状の相違が衝撃荷重や ひび割れ性状に大きく影響することが報告されている<sup>5</sup>. 弾性論では既に,球面,円錐型,平坦型の先端形状の剛 体が半無限弾性体に接触する問題について理論解が得 られている<sup>6,7)</sup>が,先端形状がコンクリート材料の衝撃挙 動に及ぼす影響について理論的検討を行った例はほと んどない.

著者らはこれまでに小型の飛翔体(質量 50g)が高速 度(速度 200m/s~500m/s)でコンクリート板に衝突した 際に生じる局部破壊のメカニズムについて検討し<sup>8,11)</sup>, 飛翔体の先端形状や衝突速度の相違がコンクリート板 の局部破壊に及ぼす影響について調べてきた.しかしな がら,質量が大きい(数 100kg 以上)物体の低速度衝突 に対するコンクリートの局部破壊メカニズムについて は,不明な点が多い.

本研究は、質量が大きく先端形状が異なる鋼製衝突体 が、鉄筋コンクリート版(以下, RC 版)に低速度衝突 した際に生じる局部損傷について実験的検討を行い、基



礎的な考察を行ったものである.まず,水平衝撃荷重載 荷装置を用いて,質量100kgの鋼製衝突体(先端形状は 半球型,円錐型,平坦型の3種類)を速度3m/s,5m/s および7m/sでRC版に衝突させる実験を行って,衝突体 の先端形状や速度がRC版の破壊状況に及ぼす影響について調べた.次に,先端形状の相違が,局部損傷に及ぼ す影響について理論的考察を行った.最後に,先端形状 の影響を評価する方法について検討した.

#### 2. 水平衝撃荷重載荷装置による衝突実験

#### 2.1 実験の概要

図-1に、水平衝撃荷重載荷装置を示す、本装置は、本 体フレーム、ゴム棒、油圧ユニット、反力壁および衝突 体から構成されている. 衝突体は、ゴム棒を油圧ジャッ キによって所定の長さだけ伸張させ、ゴム棒の弾性エネ ルギーを利用して速度を得るものである. ゴム棒を最大 150cm 伸張させた場合, 質量約 150kg の衝突体を最大約 20m/s で水平に加速させることができる. 衝突体の速度 は、装置のガイド上に設置されているレーザー式速度セ ンサによって測定される. RC 版は, 反力壁に固定した 支持梁にクランプを用いて4辺を固定し、回転や浮き上 がりが生じないように設置した. 図-2に、衝突体の概要 を示す. 衝突体には上下8個のベアリングローラーが付 属しており、装置の4本のガイドに沿って移動して所定 の位置に正確に衝突させることができる。衝突体の先端 部分は交換可能である.写真-1に,実験に用いた衝突体の 先端部分を示す. 先端形状は、半球型、円錐型(先端の 長さ 5cm, 角度 90°), 平坦型の3 種類であり, すべて 直径 10cm, 鋼製 (S45C) である. 図-3 に, RC 版試験 体の概要を示す. RC 版の寸法は,縦 110cm×横 110cm× 厚さ7cmである. 試験時におけるコンクリートの圧縮強 度は 33.5N/mm<sup>2</sup> であり, 粗骨材の最大寸法は 20mm であ る. また, 直径が 3.2mm で断面形状が円形型の普通鉄線



<b>表-1</b> 実験ケース							
実験 ケース名	実験 ケース 数	衝突体		RC版			
		先端形状	衝突速度 (m/s)	压縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	板厚(cm)		
sphe-v3	1		3				
sphe-v5	2	半球型	5				
sphe-v7	1		7				
cone-v3	1		3				
cone-v5	4	円錐型	5	33.5	7		
cone-v7	1		7				
flat-v3	1		3				
flat-v5	2	平坦型	5				
flat-v7	1		7				

(JIS 3532 SWM-B, 引張強度: 540~1130N/mm<sup>2</sup>)<sup>12)</sup>を間 隔 5cm で配線した.鉄筋比は 0.25%, コンクリートのか ぶり厚さは 1.5cm である.また,衝突時における RC 版 裏面のひずみ応答を調べるために,図-4 に示すように, RC 版の裏面の中央から 5cm, 15cm の位置にひずみゲー ジを貼付した.ひずみゲージの長さは 84mm である.版 裏面の中心から 5cm の位置のひずみゲージをひずみゲー ジ1,3,中心から 15cm の位置のひずみゲージをひずみ ゲージ 2,4 とした.衝突体には,図-2 に示す位置に加 速度センサ(圧電素子型:1000G)を設置して,加速度 を計測した.加速度センサのサンプリング周波数は 50kHz である.

表-1 に、実験ケースを示す.実験では、先端形状の相違によって RC 版の裏面に生じる局部損傷に変化が生じる速度を設定する必要がある.すなわち、衝突体の先端形状を半球型、円錐型、平坦型の3種類に対してそれぞれ速度3、5、7m/s で RC 版の中央に衝突させる.また、衝突の瞬間を可視化するために、RC 版の衝突部分を真横から撮影できるように高速度ビデオカメラを設置した(図-1 に示す破線部の範囲).なお、カメラの撮影速度は、5,000(コマ/秒)とした.

衝突速度	3m/s	5r	n/s	7r	m/s	
RC版 先端形状	表面 (衝突部分詳細)	表面 (衝突部分詳細)	裏面	表面 (衝突部分詳細)	裏面	
半球型	-+-	- <del>(}</del>	利能領域	507 B PE		
円錐型	10-	10.5 1(0.0 2 3 5 0 0	No.		R	
平坦型		0				

図-5 局部破壊の状況(写真の撮影範囲:表面:縦14cm×横14cm,裏面:縦40cm×横40cm)

# 2.2 実験結果

# (1) 局部損傷の状況

図-5 に、衝突によって生じた RC 版の破壊状況につい て示す. 破壊モードは, RC 版の損傷状況に応じて分類 した. すなわち、「表面破壊」は、版の表面側のコンク リートのみが損傷する状態、「押抜きせん断破壊」は、 RC 版の裏面に円形状のひび割れや剥離が発生し、押抜 きせん断面が形成されている破壊状態、「貫通」は、RC 版に貫通孔が形成される破壊状態、として分類した.速 度 3m/s の場合は、半球および円錐型では版表面の衝突位 置にそれぞれの先端形状と同じ形の凹み変形が生じた. 平坦型では凹み変形は生じなかった. なお、写真の円形 跡は衝突によって衝突体の塗料が付着したものである. 図には示していないが、いずれの先端形状の場合も版の 裏面側に放射状のひび割れが生じた. ただし, 先端形状 の相違によるひび割れ性状の差異は認められなかった. したがって、破壊モードは半球および円錐型では表面破 壊, 平坦型では破壊なし, と判定した. 速度 5m/s の場合 は、版の表面側において、半球型では深さ 1.2cm、円錐 型では深さ 3.5cm の凹み変形が生じた. 平坦型の場合は、 衝突部分のコンクリートが陥没した. また, 版の裏面側 においては、半球型では剥離は生じていないが、直径約 30cm の円形状のひび割れが生じていたため、押抜きせ ん断破壊と判定した.円錐型および平坦型の場合は,円 形状のひび割れによって囲まれた領域が剥離しており, 押抜きせん断破壊と判定した.速度7m/sでは、半球およ び円錐型では衝突部分に凹み変形および孔が生じてお り、裏面ではそれぞれコンクリートの剥離が生じており、 押抜きせん断破壊と判定した. 平坦型では衝突体が RC

版を完全に貫通したため、貫通と判定した.

図-6に、全実験結果の破壊モードについて示す.図から、半球型および円錐型の場合は、衝突速度 3m/s では表面破壊、衝突速度 5m/s および 7m/s では押抜きせん断破壊が生じている.平坦型の場合は、衝突速度 3m/s では損傷はほとんど生じなかったが、速度 5m/s で押抜きせん断破壊、速度 7m/s では貫通が生じており、破壊モードの進展状況が半球および円錐型とは異なっている.

図-7は、貫入深さと衝突速度の関係を示している。貫入深さとは、衝突部分に生じた凹み変形の深さ、と定義する。貫入深さは、半球および円錐型では衝突速度の増加とともに大きくなり、円錐型の方が半球型に比べて1.2 ~4.4 倍程度大きいことがわかる。平坦型の場合、速度3m/s では凹み変形が全く生じていないが、速度5m/s 以上では凹み変形ではなく、裏面の損傷が大きいために衝突部分のコンクリートに陥没が生じたため図示していない。すなわち、先端形状の相違によって貫入深さも増加する、貫入深さの増加が衝突部分に生じるひび割れの進展や裏面の損傷に影響を及ぼしていることが考えられる。以上より、先端形状の相違によってRC版の局部損傷の程度は異なっており、平坦型の場合の破壊が最も進展したといえる。

## (2) 衝突荷重および裏面のひずみ応答の特徴

ここでは、衝突速度 3m/s, 5m/s のケースにおける衝突 荷重および裏面のひずみ応答の特徴について考察する. 図-8 に衝突荷重の応答を、図-9 に裏面のひずみ応答に ついてそれぞれ示す.衝突荷重は、加速度センサによっ て計測した加速度に衝突体の質量 100kg を乗じた値を用 いている.時刻 t=0ms は、衝突体先端が RC 版に接触し



た瞬間とした. なお,加速度値から換算した衝突荷重に は高周波成分が多く含まれるため,先端形状による荷重 特性の相違が不明瞭となってしまう. このため,計測さ れた数値データに対して 10 区間の移動平均で平滑化処 理した波形についても示している.以後,荷重波形の考 察は,移動平均処理波形について行う. なお,図中に示 されていないひずみデータは計測不良であったケース である.

図-8(a)に示す,衝突速度 3m/s の場合をみると,半球型の場合は t=2.0ms で最大荷重約 110kN に達し, t=3.0ms で約 20kN に低下した後,再び約 70kN に上昇して, t= 10ms で 0kN となっている. このとき図-9(a)から,裏面のひずみは衝突後 t=0.5ms~1.0ms で各ひずみゲージでは

約 100µ~140µ の圧縮ひずみが生じた後,引張ひずみに 転じている.円錐型の場合は衝突荷重が徐々に増加し, t=2.5ms で最大荷重約 80kN となるまでの間に裏面ではひ ずみゲージ1,3 において約 80µ の引張ひずみが生じて おり,その後,圧縮ひずみに転じた.ひずみゲージ1,3, 4 では t=4.0ms まで圧縮ひずみが生じている.平坦型の場 合は,最大荷重約 220kN となった.裏面では衝突直後に 約 180~250µ の圧縮ひずみが生じた後,ひずみゲージ1 は引張ひずみに転じて破断した.

図-8(b)に示す衝突速度 5m/s では、半球型の場合は、 最大荷重が約 180kN であり、速度 3m/s の場合より大き い.t=2.5ms 以降に荷重が一定となる間は約 60kN であり、 速度 3m/s の場合とあまり変化がないが、荷重継続時間は



約5ms長くなった.これは、衝突速度の増加によって貫 入量が 1.0cm 増加したために、荷重継続時間が長くなっ たと考えられる. また, 図-9(b)から, ひずみゲージ2, 4 では約400µの圧縮ひずみが生じており、速度3m/sのと きよりも大きくなった.円錐型の場合は、最大衝突荷重 が 88kN であり、速度の増加によってあまり変化してい ないが、荷重継続時間は約5ms長くなった.これは、貫 入量が 2.7cm 増加したため、と考えられる. また、最大 荷重は半球型や平坦型に比べて小さく、貫入抵抗力が小 さいといえる. 裏面では、衝突直後にひずみゲージ1、3 で最大約200uの引張ひずみが生じた.平坦型の場合は、 最大荷重約 200kN であり、速度 3m/s のときに比べてや や低下している. これは、衝突速度の増加によって衝突 直後に生じる版の損傷が大きくなったためであると考 えられる.また,速度3m/sの場合に比べて荷重継続時間 が 10ms 以上長くなったのは、コンクリートに陥没が生 じて衝突体が跳ね返らなかったためである. ひずみゲー ジ2 では 400µの圧縮ひずみが生じた後, 引張ひずみに 転じて,破断せずに最大引張ひずみ300μに達している. これは、平坦型の場合に、瞬間的にコンクリートが極め て大きな衝突荷重を受けたため,ひずみ速度効果 <sup>13)</sup>によ って,引張強度時のひずみが増加したものと考えられる. 以上より, 衝突速度が増加すると, 次のような特徴があ る. すなわち、半球型では最大荷重および衝突直後に生 じる圧縮ひずみが増加する. 円錐型では最大荷重はほと んど変化しないが、衝突直後に生じる引張ひずみが増加 する. 平坦型では衝突直後の局部損傷が大きくなるため, 最大荷重がやや低下するが, 裏面に生じる引張ひずみは 大きくなる. なお, 衝突速度 7m/s の場合の荷重特性およ

び裏面のひずみ応答は、衝突速度 5m/s の場合と同様の傾向となった.

## (3) 最大衝突荷重および力積

表-2 に、全実験結果の一覧を示す.図-10 は、全実験 ケースの最大衝突荷重と衝突速度の関係を示している. 半球型および円錐型の場合は、衝突速度 5m/s 以上では押 抜きせん断破壊が生じているが、最大衝突荷重は衝突速 度の増加とともに大きくなっていることがわかる.また、 衝突速度の増加に伴う最大衝突荷重の増加の割合は半 球型の方が円錐型よりも大きいことがわかる.一方、平 坦型では、衝突速度が増加すると最大衝突荷重はやや低 下している.これは、平坦型の場合は速度 5m/s では衝突 部分のコンクリートが陥没し、速度 7m/s では貫通孔が生 じたためであると考えられる.

図-11 に、衝突荷重~時間関係から算定した力積と初 期運動量の関係を示す.衝突速度 3m/s の場合,各形状と も初期運動量は 324N・s~330 N・s とほぼ等しい.また, 力積は半球型 424N・s~448N・s であり,形状の相違に よらずほぼ同じ値である.すなわち,力積と初期運動量 の差から、衝突体は力積を受けてそれぞれほぼ等しい速 度(1.2~1.4m/s)で跳ね返ったものと考えられる.衝突 速度 5m/s 以上では,各先端形状の初期運動量はほぼ等し いが,力積については半球型と円錐型はほぼ等しく,平 坦型は小さくなった.すなわち,同じ破壊モードでも先 端形状によって力積は変化することがわかる.

以上の結果から、半球型および円錐型の場合は、衝突 速度 5m/s 以上で RC 版には押抜きせん断破壊が生じるが、 速度 7m/s では最大衝突荷重および力積が増大しており、 貫通に対する抵抗力を有しているといえる.

					叩水亦成	最大衝突荷重			
実験ケース名	先端形状	衝突速度	初期運動量	破壊モード	貫入深さ	の直径	最大衝突荷重	10区間 移動平均	力積
		(m/s)	(N • s)		(cm)	(cm)	(kN)	)	(N • s)
sph-v3	半球型	3.3	330	表面破壊	0.2	2.8	130	110	424
sph-v5(1)		4.9	488	押抜きせん断破壊	1.2	6.5	392	181	646
sph-v5(2)		5.4	536	押抜きせん断破壊	0.7	5.1	-	-	-
sph-v7		7.4	740	押抜きせん断破壊	3.0	9.2	880	242	829
con-v3	-	3.3	332	表面破壊	0.7	1.4	101	81	442
con-v5(1)		5.0	496	押抜きせん断破壊	2.7	5.4	114	79	615
con-v5(2)	田雄田	5.0	500	押抜きせん断破壊	3.5	7.0	124	77	636
con-v5(3)	円難型	5.1	514	押抜きせん断破壊	3.5	7.0	100	88	644
con-v5(4)		5.3	534	押抜きせん断破壊	2.0	4.0	-	-	-
con-v7		6.9	694	押抜きせん断破壊	3.5	7.0	164	113	913
flat-v3	平坦型	3.2	324	破壊なし	0.0	-	654	217	448
flat-v5(1)		5.0	496	押抜きせん断破壊	3.6	10.0	648	195	500
flat-v5(2)		5.4	540	押抜きせん断破壊	1.2	10.0	-	-	-
flat-v7		7.3	728	貫通	7.0	10.0	1000	176	142

表-2 実験結果一覧



図-10 最大衝突荷重と衝突速度の関係



## 3. 先端形状が局部損傷に及ぼす影響に関する考察

先端形状の相違が RC 版の局部損傷に及ぼす影響について理論的考察を行う.まず,衝突体先端とコンクリート面の接触状況がコンクリートの応力や荷重に及ぼす影響について弾性論による比較を行う.次に,先端形状の相違が RC 版の局部損傷プロセスに及ぼす影響について,実験結果および理論から考察する.ただし,弾性論



図-11 力積と初期運動量の関係

ではコンクリート版を半無限厚さの弾性体と仮定して 取扱うため、有限厚さの RC 版の裏面の損傷について考 察することは困難である.このため、理論は衝突体先端 部分と版表面側におけるコンクリートの接触面近傍の 状況だけに限定して検討を行っている.

図-12 は、半球、円錐および平坦型の剛体の衝突体と 半無限弾性体平面の接触状態を示している<sup>の,7)</sup>. r=aの 位置は、最大接触半径の位置を示している.また、**表**-3 に、2次元軸対称座標における各形状の静的荷重 F と貫 入量 $\delta$ の関係および接触部分における垂直方向(z 軸) および平面方向(r 軸方向)の応力分布に関する式<sup>7)</sup>の 一覧を示す.ここで、 $E_c$ はコンクリートの縦弾性係数、  $v_c$ はコンクリートのポアソン比、Rは半球状衝突体の 半径、 $p_m$ は平均圧力、aは接触半径、rは平面方向の距 離、を示している.

図-13 は、表-3 の応力式による接触面における平均圧 力 $p_m$ に対する垂直・平面方向の応力について示している。 図-13(a)から、半球型の場合の接触面に生じる垂直応力 は球面状に分布しており、接触面の端部(r=a)では0 であり、中心(r=0)で最大圧縮応力を示す。円錐型 の場合、垂直応力は接触面の端部では0で先端部分の頂

<b>衣う</b> 前的何里~貝八里房休及の按照面にわける垂直方向わよの千面方向の応力式一見								
先端形状	荷重~貫入量関係	応力 ( <i>r &lt; a</i> )	応力(r≥a)	平均压力 pm				
半球型	$F = \frac{4}{3} \frac{E_c R^{0.5}}{1 - v_c^2} \delta^{1.5}$	垂直方向: $\frac{\sigma_z}{p_m} = -\frac{3}{2} \left( 1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{1/2}$ 平面方向: $\frac{\sigma_r}{p_m} = \frac{1 - 2\nu}{2} \frac{a^2}{r^2} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{3/2} \right] - \frac{3}{2} \left( 1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{1/2}$	垂直古向 .	$p_m = \frac{F}{\pi a^2}$				
円錐型	$F = \frac{2}{\pi} \frac{E_c}{1 - v_c^2} \tan \theta \cdot \delta^2$	垂直方向: $\frac{\sigma_z}{p_m} = -\ln\left(\frac{a}{r} + \sqrt{\left(\frac{a}{r}\right)^2 - 1}\right)$ 平面方向 $\frac{\sigma_r}{p_m} = -\cosh^{-1}\frac{a}{r} + (1 - 2\nu)\frac{a}{r}\left(\frac{a}{2r}\left[1 - \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^{1/2} + \frac{r^2}{a^2}\ln\frac{1 + \left(1 + r^2/a^2\right)^{1/2}}{r/a}\right]\right)$	垂直方向: $\frac{\sigma_z}{p_m} = 0$ 平面方向: $\frac{\sigma_r}{p} = \frac{(1-2\nu)}{2} \frac{a^2}{r^2}$	$p_m = \frac{E\cot\theta}{2(1-\upsilon^2)}$				
平坦型	$F = 2a \frac{E_c}{1 - v_c^2} \delta$	垂直方向: $\frac{\sigma_z}{p_m} = -\frac{1}{2} \left( 1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{-1/2}$ 平面方向: $\frac{\sigma_r}{p_m} = \frac{1 - 2\nu}{2} \frac{a^2}{r^2} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{1/2} \right] - \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{-1/2}$	rm 2 1	$p_m = \frac{F}{\pi a^2}$				

表-3 静的荷重~貫入量関係及び接触面における垂直方向および平面方向の応力式一覧





図-14 は、弾性論に基づいて計算した各先端形状の荷 重~貫入深さの関係について比較したものである. 図か ら、いずれの形状の場合とも貫入量が増加すると荷重が 大きくなることがわかる.荷重は同じ貫入深さの場合に は、平坦型、半球型、円錐型の順に大きいことがわかる. とくに平坦型の場合は、貫入抵抗力が大きいために貫入 量がわずかに増加すると荷重は急激に増大している.ま た、各形状の荷重の理論値は貫入深さがわずか 0.1cm~ 0.3cm で数 100kN に達しており、実験結果の最大荷重に 比べて過大である.これは、実験では衝突部分に凹み変 形(塑性変形)が生じることや版裏面に損傷が発生する ことによって荷重が低下するためである.すなわち、衝 突荷重を理論的に評価するためにはコンクリート材料 の塑性変形や破壊によるエネルギーの損失、ひずみ速度、 慣性力の影響についても考慮する必要がある<sup>14)</sup>.

図-15 は、理論および実験から推定される半球型、円 錐型および平坦型の場合の初期ひび割れの概要を示し たものである. コンクリートに生じる初期のひび割れ発 生位置は、弾性論から以下のように説明される. 半球型 および円錐型では衝突時の接触半径r がかなり小さいの で、頂点付近で平面方向の引張応力が最大となり、この



引張応力がコンクリートの引張強度を越えるとひび割 れが生じる.また,孔の直径は小さくなる.一方,平坦 型の場合は,貫入抵抗力が大きく貫入しないが,衝突体 の直径の位置で引張応力が引張強度を越えてひび割れ が生じる,そのため,衝突体の直径と同じ大きさの陥没 孔が生じると考えられる.半球型および円錐型の場合は 衝突体がさらに貫入すると,最終的に押抜きせん断破壊 が生じるが,表面側の孔が小さいため貫通しづらい.一 方,平坦型の場合は押抜きせん断破壊が生じた場合,衝 突部分に生じる孔は衝突体の直径と同じ大きさなので 貫通しやすい,と考えられる.

#### 4. 先端形状が局部損傷に及ぼす影響の評価

衝突荷重は、衝突部分などの塑性変形や破壊、慣性力 およびコンクリート材料のひずみ速度の影響を受ける と考えられるが、現状ではそれぞれの影響を区分して考 慮することは困難である.ここでは、先端形状の相違が 局部損傷に及ぼす影響を評価するために、既往の評価法 を準用して、先端形状の影響を考慮する方法について検 討する.また、平坦型については、前章で検討した弾性 論を準用した評価法について検討する.

RC 版に生じる破壊状況は押抜きせん断型の破壊となるので、土木学会のコンクリート標準示方書の押抜きせん断耐力式<sup>3)</sup>を用いた評価を行う.以下に、押抜きせん断耐力式を示す.

$$V_{pc} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_{\gamma} \cdot f'_{pcd} \cdot u_p \cdot d$$
(1a)

$$f'_{ncd} = 0.20 \sqrt{f'_c} \quad \text{trtl}, \quad f'_{ncd} \leq 1.2 \text{N/mm}^2 \quad (1b)$$

$$u_p = u_0 + 2\pi \cdot d / 2 \tag{1c}$$

ここに、
$$\beta_d = \sqrt[4]{1000/d}$$
 ( $\beta_d > 1.5$ の場合は 1.5)、  
 $\beta_p = \sqrt[3]{100p}$  ( $\beta_p > 1.5$ の場合は 1.5)、 $p = (p_x + p_y)/2$ 、  
 $\beta_\gamma = 1 + 1/(1 + 0.25u_0/d)$ 、 $f'_c$  コンクリートの設計圧縮



強度(N/mm<sup>2</sup>),  $u_0$ :載荷面の周長(mm),  $u_p$ :仮想断面の 周長(mm), d:有効板厚(mm), p:2方向の平均鉄筋比,  $p_x$ ,  $p_y$ :各方向の鉄筋比, である.

押抜きせん断耐力の算定に先端形状の影響を考慮する ために、載荷面の周長u<sub>0</sub>を修正する.すなわち、半球お よび円錐型の場合は、表-2に示す凹み変形の直径を載荷 面の直径と仮定して、式(1c)を用いて載荷面周長を計算 した.鉄線の影響は、鉄筋比を 0.25%、有効板厚*d* を 55mm として計算した.

図-16 に、各形状の載荷周長を考慮した押抜きせん断 耐力と実験の最大衝突荷重を比較して示す. 押抜きせん 断破壊および貫通の発生の判定は、最大衝突荷重が押抜 きせん断耐力を超える場合に発生する、と仮定する.図 から、半球型および円錐型の場合は、押抜きせん断耐力 が衝突速度の増加とともに大きくなっていることがわか る.これは、貫入量が増加すると載荷面周長が長くなる ためである. 衝突速度 3m/s のとき, 半球型, 円錐型, 平 坦型ともに実験ではそれぞれ押抜きせん断破壊は発生し ていないが、最大荷重は押抜きせん断耐力を超えるため、 押抜きせん断破壊発生と判定され、実験と適合していな い. 衝突速度 5m/s の場合, 半球および平坦型では, 衝突 荷重が押抜きせん断耐力よりも大きいため押抜せん断破 壊発生と判定され、実験結果と適合している.円錐型で は、最大衝突荷重は全ての実験ケースで押抜きせん断耐 力よりもわずかに小さいが、4 ケースの平均押抜きせん 断耐力は 89kN であり、最大衝突荷重と同程度の耐力で あるため、押抜きせん断破壊の発生限界耐力と考えられ る. 衝突速度 7m/s の場合,実験では半球型および円錐型 では押抜きせん断破壊,平坦型では貫通が発生しており, 各形状の衝突荷重が押抜きせん断耐力値を超えたため, 実験結果と適合しているといえる、以上より、各形状の 載荷周長を考慮した押抜きせん断耐力は、半球型および 平坦型の場合には、最大衝突荷重に比べてかなり小さく、 衝突速度 5,7m/sのときに実験と適合したものの、精度 には問題があるといえる.また、円錐型の場合は、実験 と適合したのは衝突速度 7m/s 場合のみであるが, 押抜き せん断耐力と最大衝突荷重はある程度近い値であり、 今 後の詳細な検討によって準用が可能であると考えられる. 既往の研究によると、衝突速度が数 m/s 程度の場合、



衝突荷重に対する RC 版の押抜きせん断耐力は静的状態 の約2倍程度の耐力と仮定すると比較的良好に評価でき ることが示されている<sup>15)</sup>. そこで押抜きせん断耐力式 (1a)で求められる耐力値を2倍して動的な耐力増加を考 慮する(以後,動的押抜きせん断耐力という). 図-16 に 示すように、半球型の場合、動的押抜きせん断耐力は実 験結果とよく適合している.円錐型の場合は、動的押抜 きせん断耐力が最大衝突荷重よりもかなり大きくなり, 実験結果と適合していない、この理由は、半球型の場合 は衝突速度の増加によって最大衝突荷重が増加するが, 円錐型の場合はあまり大きくならないため、押抜きせん 断耐力式(1a)をそのまま用いる方が比較的実験に整合す るものと考えられる. 平坦型の場合, 速度 3m/s のときに 最大衝突荷重は217kN,動的押抜きせん断耐力216kNと なり、両者はほぼ等しい値を示している. 衝突速度 5m/s 以上では,動的押抜きせん断耐力による計算では押抜き せん断破壊が生じないが、実験では衝突速度 5m/s で押抜 きせん断破壊, 衝突速度 7m/s で貫通が生じた. すなわち, 平坦型の場合は、押抜きせん断破壊や貫通が生じた際に 最大衝突荷重が低下するため,最大衝突荷重と押抜きせ ん断耐力との比較が困難であると考えられる.

そこで、平坦型の場合は、弾性論による平面方向の引 張応力がコンクリートの引張強度を超えた場合に破壊が 発生する、という判定方法の適用について試みる.まず、 コンクリート材料のひずみ速度効果を考慮するために、 次式に示す Ross<sup>10</sup>らが提案したひずみ速度効果によるコ ンクリートの一軸引張強度増加の評価式を用いる.

$$\frac{f_{td}'}{f_{ts}'} = \exp\left[0.00126\left(Log\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_s}\right)^{3.373}\right]$$
(2)

ここに、 $f'_{ts}$ は静的引張強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $f'_{td}$ は動的引張 強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $\dot{\epsilon}_s$ は静的載荷のひずみ速度(1.0×10<sup>7</sup>(1/s))、  $\dot{\epsilon}$ は動的載荷のひずみ速度(1/s)である.

衝突速度 10m/s 前後のひずみ速度は、一般に  $10^2 \sim 10^{\circ}(1/s)$ 程度と言われている <sup>14)</sup>. 一例として、衝突速度 5m/s の場合のひずみ速度を  $5 \times 10^{-1}(1/s)$ と設定すると、静

的引張強度が3.35N/mm<sup>2</sup>の場合のコンクリートの動的引 張強度は式(2)から7.23N/mm<sup>2</sup>となる. 衝突速度5m/sの 場合,実験では平坦型の最大荷重は195kNであり,この 荷重値を用いて平坦型の端部の位置における引張応力を 表-3中の式から計算すると7.45N/mm<sup>2</sup>となる.したがっ て,引張応力が動的引張強度よりも大きくなって引張破 壊が生じると判定されるので,このひび割れが貫通孔を 形成すると考えると理論と実験は適合するといえる.

以上より,半球型および円錐型の場合は,凹み変形の 直径を考慮した土木学会標準示方書による押抜きせん断 耐力と最大衝突荷重を比較することで,押抜きせん断破 壊の発生を判定できる.ただし,半球型の場合は,押抜 きせん断耐力に動的効果を考慮した方が実験と良好に整 合した.一方,平坦型の場合は,弾性論による平面方向 の引張応力とコンクリートの動的引張強度を比較する方 法によって貫通の発生を評価することができた.

# 5. 結言

本研究は、鋼製衝突体が RC 版に衝突する場合の、衝 突速度や先端形状の相違が局部損傷に及ぼす影響につ いて考察を行ったものである.本研究の成果を要約する と以下のとおりである.

- (1)局部破壊の程度は先端形状の相違によって異なり、 衝突速度の増加にともなって破壊モードの進展の程度が異なる.本実験の範囲では衝突速度が増加する と平坦型の場合の破壊が最も進展する.
- (2)各先端形状の相違によって RC 版の局部破壊の程度 が異なる原因について弾性接触論による考察を行っ た.半球型および円錐型の場合は、衝突体が貫入す ると、衝突体の先端部分付近の位置からひび割れが 生じて最終的に押抜きせん断破壊となる、平坦型で は、表面の衝突体の接触面の直径の位置で初期ひび 割れが生じるため孔が衝突体の直径と同じ大きさと

なり、貫通しやすい、と考えられる.

- (3) 半球型および円錐型の場合は、押抜きせん断破壊が 生じた場合でも、最大衝突荷重や力積は衝突速度の 増加にともなって大きくなっており、貫通に対する 抵抗力を有していた.また、最大衝突荷重が増加す る割合は、半球型の方が円錐型よりも大きいことが わかった、平坦型の場合は押抜きせん断破壊が生じ ると、衝突部分の局部的損傷が大きいため、最大衝 突荷重や力積は低下した。
- (4) 半球型および円錐型の場合は、凹み変形の直径を考慮した土木学会標準示方書による押抜きせん断耐力と最大衝突荷重を比較することで、押抜きせん断破壊の発生を判定できた.ただし、半球型の場合は、押抜きせん断耐力に動的効果を考慮した方が実験と良好に整合した.平坦型の場合は、弾性論による平面方向の引張応力とコンクリートの動的引張強度を比較する方法を用いることにより破壊発生の評価ができた.

#### 謝辞

本研究の実験を行うにあたり,当時防衛大学校本科学生 宮司康行氏の協力を得た.ここに,深く感謝申し上げる.

# 参考文献

- Kennedy, R.P. : A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects, Nuclear Engineering and Design, 37, pp.183-203, 1976.
- 2)山口貴之,別府万寿博,大野友則:消波ブロックの繰返し衝突により防波堤ケーソン壁に生じる局部破壊と防護対策に関する実験的研究,土木学会論文集, No.759/I-67, pp.381-396, 2004.
- 3) 土木学会: 2002 年制定コンクリート標準示方書(構造 性能照査編),丸善(株),2002.
- 4) 土木学会構造工学委員会:構造工学シリーズ 8 ロッ クシェッドの耐衝撃設計,土木学会,1998.
- 5) 土木学会構造工学委員会:構造工学シリーズ15 衝撃 実験・解析の基礎と応用,土木学会,2004.

- Timoshenko, S., Goodier, J. N. : Theory of Elasticity, 2<sup>nd</sup> Ed., McGraw-Hill, NewYork, 1970.
- Fisher-Cripps, A.C.: Introduction to Contact Mechanics, 2<sup>nd</sup> Ed., Springer, U.S., 2007.
- E輪幸治,別府万寿博,大野友則:剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリート板の表面破壊深さに関する理論的検討,構造工学論文集, Vol. 52A, pp. 1209-1218, 2006.
- 9) 別府万寿博, 三輪幸治, 大野友則, 塩見昌紀: 鋼製剛 飛翔体の高速衝突を受けるコンクリート板の局部破壊 に関する実験的研究, 土木学会論文集, Vol.63, No.1, pp.178-191, 2007.
- 10)別府万寿博, 三輪幸治, 伊東雅晴, 片山雅英, 大野友 則: 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, pp. 1293-1304, 2007.
- 11)三輪幸治,別府万寿博,大野友則:剛飛翔体の高速衝突によって生じるコンクリート板の表面破壊に先端形状が及ぼす影響,構造工学論文集,Vol. 54A, pp. 989-998, 2008.
- 12)日本規格協会: JIS ハンドブック 鉄鋼 II-1995, 日本 規格協会, 1995.
- 13)藤掛一典,山根茂樹,大野友則,水野淳,鈴木篤: 急速一軸引張試験においてコンクリート円柱供試体 の高さ寸法の違いが引張特性に及ぼす影響,土木学会 論文集, Vol.39, No.592, pp.83-95, 1998.
- 14)土木学会衝撃問題研究小委員会:構造工学シリーズ 6 構造物の衝撃挙動と設計法,土木学会,1994.
- 15)岸徳光,三上浩,栗橋佑介:矩形 RC 版の衝撃耐荷挙 動に及ぼす重錘直径の影響,構造工学論文集, Vol.54A, pp.1034-1043, 2008.
- 16)Ross, C. A., Thompson, P.Y. and Tedesco, J.W. : Split-hopkinson pressure-bar tests on concrete and mortar in tension and compression, ACI *Materials Journal*, Vol.86, pp.475-481, 1989.

(2009年9月24日受付)