

配筋状態の異なるRC板の衝撃挙動と耐衝撃性に関する実験的考察

ON IMPACT BEHAVIORS AND RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE SLABS
WITH DIFFERENT REBAR ARRANGEMENTS UNDER IMPACT LOADINGS

小暮幹太*, 鶴居正行**, 大野友則***, 安藤智啓****, 藤本一男*****

Kanta KOGURE, Masayuki UI, Tomonori OHNO, Tomohiro ANDOU and Kazuo FUJIMOTO

* 工修 防衛大学校研究員 土木工学科 (〒239 横須賀市走水1-10-20)

** 工修 防衛庁第4研究所 研究員 (〒229 相模原市淵野辺2-9-54)

*** 工博 防衛大学校教授 土木工学科 (〒239 横須賀市走水1-10-20)

**** 工修 防衛庁第4研究所 研究員 (〒229 相模原市淵野辺2-9-54)

***** 工博 防衛庁第4研究所 研究企画官 (同上)

This study is to examine the impact resistance of reinforced concrete slabs in preventing the local damage such as scabbing. In tests, three types of RC slabs with different rebar arrangements were employed and tested under impact loadings. This paper presents some test results from the drop weight impact test (weight:103kgf, impact speed:5,10 and 15m/s) to examine the difference of damage mode between three and from the high-speed loading test (loading speed:4m/s) to investigate the residual strength of slabs after impact tests. From test results, when the RC slab may designed to have a specified reinforcing ratio against flexural and/or shear strength, the impact resistance of RC slab, which a rebar of the small size in diameter would be arranged closely, can be improved.

Key Words : RC slab, drop weight impact test, high-speed loading test,
rebar arrangement, scabbing

1. はじめに

土木・建築に関連する衝撃問題は、構造物の種類や用途によって異なり、しかもその設計に対象とする衝撃の外力に応じて設計上の条件や評価基準も変わるため極めて広範囲にわたる。したがって、衝撃問題に関わる研究(実験・解析)も対象に応じてその手法や評価方法が異なってくる。

例えば、RC板に関する研究において、比較的低速(衝突速度 10^1m/s 以下)の衝突では、曲げやせん断といった弾塑性応答(全体応答)に対する検討が主要な問題となる^{1),2)}が、衝突速度が中速($10^1\sim 10^2\text{m/s}$ 以下)、あるいは高速(10^2m/s 以上)になると、全体応答より局部応答が問題となるため、貫通や裏面剥離の抑制についての検討が必要となる^{3),4)}。RC部材を対象とした既往の研究において、さまざまな外力条件に対してRC板の耐衝撃性を向上させるために、鉄筋に代わる新素材の利用^{4),5)}や、緩衝材など異種材料を組み合わせた複合・合成板の開発^{6),7)}なども検討されている。

著者らは、過去に、主として原子力発電関連施設など重要構造物に用いられるRC板部材の耐衝撃性を検討するため、小型飛来物を使用した衝突速度約 170m/s の

模型実験を行い、貫通や裏面剥離といった高速衝突時特有の破壊現象について調べてきた^{6),7)}。しかしながら、衝突速度が高速で、損傷が重度の裏面剥離や貫通破壊に至ってしまう場合は、実験を行っても従来の計測方法ではRC板の挙動を定量的に評価するための計測データを得ることが難しく、現在のところ、定性的な評価をせざるを得ない状況にある。

そこで、本研究では、局部損傷が生じるRC板の衝撃挙動を調べるため、既往の研究成果^{1),2),3),4)}と高速衝突時の計測上の問題点等を考慮した上で、実験の载荷条件および試験体の諸元を決定し、計測にあたって比較的精度の高いデータが得られやすい衝突速度が中速度程度($10\sim 20\text{m/s}$)の落錐衝撃実験を行った。実験に用いたRC板試験体は、鉄筋比をほぼ一定とし、通常、重要構造物等で使用されている太径の異形鉄筋、加工が容易で施工し易い細径の異形鉄筋、およびその中間的な径を有する異形鉄筋を想定した強度の等しい3種類の鉄筋をそれぞれ用いて配筋状態の異なる3タイプの試験体とした。本研究では、主として、RC板の耐衝撃性に及ぼす鉄筋径と配筋間隔の影響を検討した。さらに、衝撃荷重を受けた後のRC板の動力学特性について調べるため、高速载荷実験を行い、配筋状態の違いによる

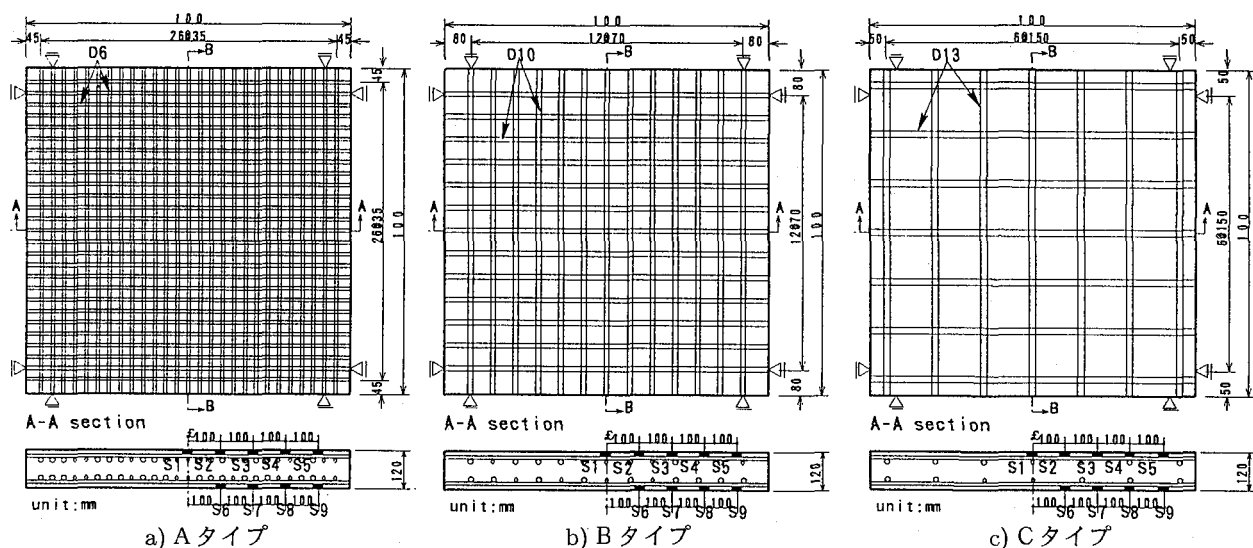


図-1 試験体の概要

表-1 試験体の諸元

単位:mm

呼び名	使用鉄筋	配筋間隔	有効高さ	鉄筋比(%)	かぶり厚さ
Aタイプ	D6	35	98	0.87	18.5
Bタイプ	D10	70	100	0.93	15.5
Cタイプ	D13	150	101	0.88	13.0

表-2 使用鉄筋の材料特性

呼び名	規格	0.2%強度(kgf/cm ²)	引張強さ(kgf/cm ²)	伸び(%)
D6	SD295A	3834	5537	23.8
D10	SD295A	3763	5374	28.0
D13	SD295A	3660	5241	28.9

板部材の耐衝撃性と損傷過程について考察した。

2. 重錘落下衝撃実験の概要

2.1 落錘式衝撃実験装置

実験で使用した実験装置は、真空加速式高速度破壊装置⁸⁾である。本装置は、発射管の中を重錘が自由落下または加速されて落下し衝撃力を与える方式の载荷装置で、最高18mの落下高さでは自由落下時で最大約19m/sの速度が得られる。また、発射管内におかれた重錘下部(管の下端は薄膜で遮蔽してある)を真空にすることにより重錘を加速でき、30kgfの重錘の場合は、真空加速で最大約70m/sの速度が得られる。重錘は、30~300kgfまで変化させることができる。

2.2 試験体の概要

3タイプの試験体の概要および貼付したひずみゲージの位置を図-1に示す。試験体の寸法はいずれも、厚さ:12cm、縦×横:100×100cmである。表-1に試験体の諸元を示す。Aタイプは、細径の鉄筋(D6)を35mm間隔で密に、Cタイプは、太径の鉄筋(D13)を150mm間隔

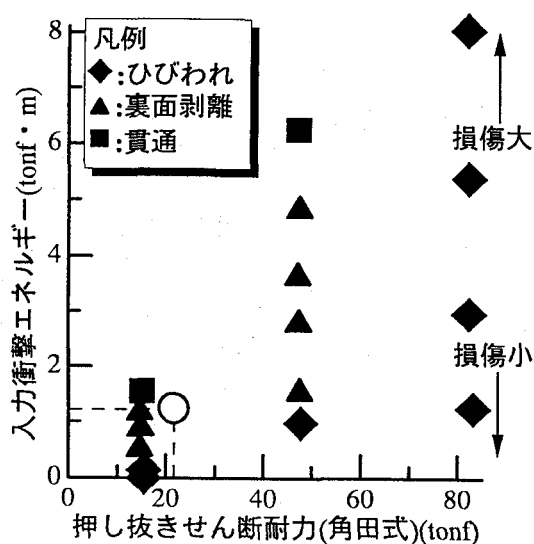


図-2 RC板の押し抜きせん断耐力と衝撃エネルギーおよび破壊性状の関係³⁾

で粗に配筋し、Bタイプはその中間的(使用鉄筋径D10、間隔70mm)な配筋とした。鉄筋は表-2に示す径の異なる3種類の鉄筋を用い、静的な押し抜きせん断耐力⁹⁾を等しくするため有効高さがほぼ一定となるように配筋した。試験体は、後で述べる高速载荷実験による処女载荷時の動力学特性を調べる試験体を含めて合計12体製作した。なお、試験時のコンクリートの静的圧縮強度は平均527kgf/cm²であった。

2.3 载荷条件と種類

重錘の衝突によって生じるRC板の破壊の程度は、衝突体と被衝突体との剛性の相互関係や、応力波の発生などさまざまな影響を受けるため、予測することが極めて困難である。そこで、RC板に裏面剥離が生じる程度の応答性状を限られた試験体数で効率的に計測するため、伊藤ら³⁾の研究成果に基づいて局部損傷の破壊の程度を予測し、载荷条件を決定した。図-2は、伊藤らの

表-3 実験の種類

番号	試験体の種類	実験名	重錘重量(kg)	衝突速度(m/s)	衝撃エネルギー(kgf・m)
1	Aタイプ	A-5	103.0	5	131.37
2	Bタイプ	B-5	103.0	5	131.37
3	Aタイプ	A-10	103.0	10	525.5
4	Bタイプ	B-10	103.0	10	525.5
5	Cタイプ	C-10	103.0	10	525.5
6	Aタイプ	A-15	103.0	15	1182
7	Bタイプ	B-15	103.0	15	1182
8	Cタイプ	C-15	103.0	15	1182

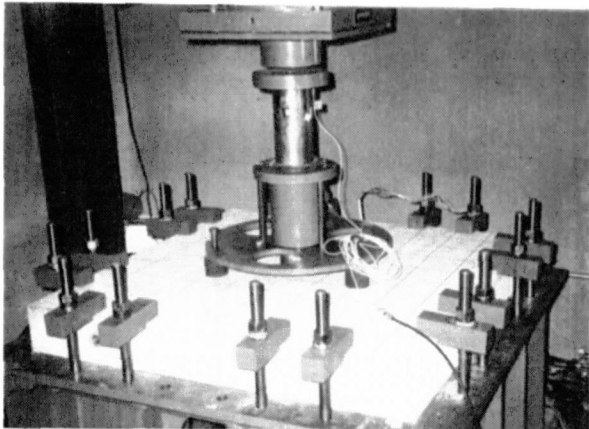


写真-1 載荷棒および試験体の設置状況

実験結果に対し、角田式⁹⁾から求められる押し抜きせん断耐力との関係で整理したものである。図-2から、押し抜きせん断耐力が14.6tonf（板厚10cm）の場合では、およそ1.17tonf・mの衝撃エネルギー（衝突時の重錘の持つ運動エネルギー）が加わるとRC板に重度の裏面剥離が生じることになる。本実験に用いた材料特性（コンクリートの圧縮強度および鉄筋の降伏強度）、試験体の諸元（表-1）、および載荷に用いた鋼製載荷棒（l50cm, φ10cm, 材質:SCM435）の周長などの条件から3タイプの試験体の押し抜きせん断耐力を求めると、いずれもおおよそ22.0tonfとなる。よって図-2より、計測可能な、軽度の裏面剥離が生じるように設定した場合の衝撃エネルギーは1.2tonf・m程度と推定される（図中○印）。そこで、載荷条件および実験の種類を表-3のように定めた。すなわち、衝突時の運動エネルギーが1.2tonf・mの場合、重錘重量が103kgfなので衝突速度は15m/sとなる。この条件を基準として、衝突速度が2/3の10m/sと1/3の5m/sの場合を比較のための載荷条件とした。写真-1に、実験時の試験体および載荷棒の設置状況を示す。

2.4 衝撃応答の計測

試験体に生じる応答現象の計測は、衝突裏面の各部に生じる加速度および変位応答、コンクリートひずみ、

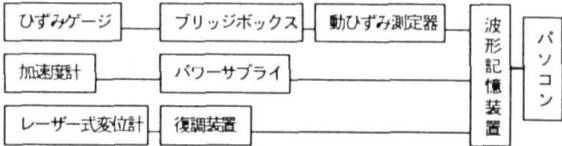


図-3 計測システム

表-4 計測器の性能・諸元

種類	型名	計測範囲	仕様	備考
レーザー式変位計	LB-300	±100 mm	周波数応答約 1kHz	KEYENCE 製
加速度計	305A03	±10000G	固有振動数 45kHz	PCB 社製
動ひずみ測定器	CDV-230C		応答周波数 0～200kHz	共和電業社製
波形記憶装置	DM-7100	サンプリング 5 μ sec		岩通

試験体内に配筋した上下端の鉄筋のひずみについて行った。また本実験では、試験体の設置などの制約のため、衝撃荷重の計測に必要な大容量のロードセルの設置および重錘への加速度計の取り付けができないため、衝撃荷重の評価については、便宜的に載荷棒の上端より15cmの位置に生じる動ひずみ（対称に4枚貼付したひずみゲージの出力平均）に静的圧縮試験で求めた載荷棒の初期弾性係数と断面積を掛けたものを換算衝撃荷重として評価した。本実験で用いた計測器の性能・諸元を表-4に、計測システムを図-3に示す。データのサンプリング間隔は5μsecとした。

3. 重錘落下衝撃実験の結果および考察

衝突速度が異なる（5, 10, 15m/s）場合について、配筋状態が異なるRC板の衝撃応答と局部損傷の相違について調べた。なお、試験体の弾性挙動について、落下高さh = 5cm, 衝突速度約1m/s（= √2gh）時のひずみ応答（鉄筋および裏面コンクリート）を調べた。その結果、配筋状態の違いによる影響はほとんど認められないことを確認した。

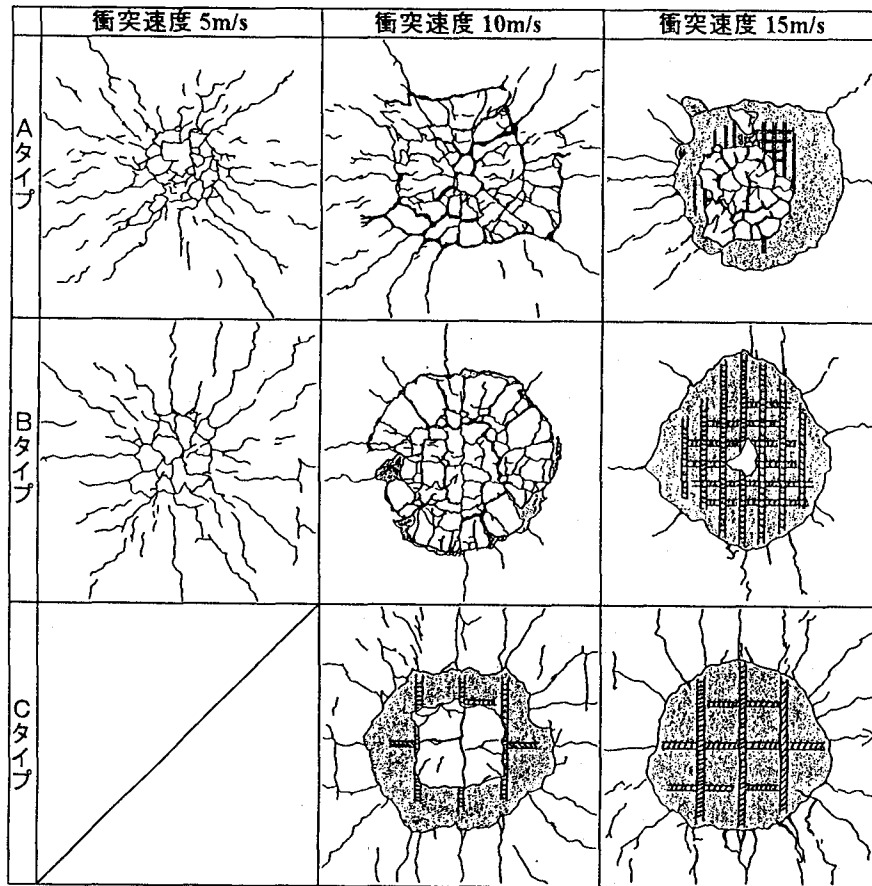


図-5 破壊性状（試験体裏面）

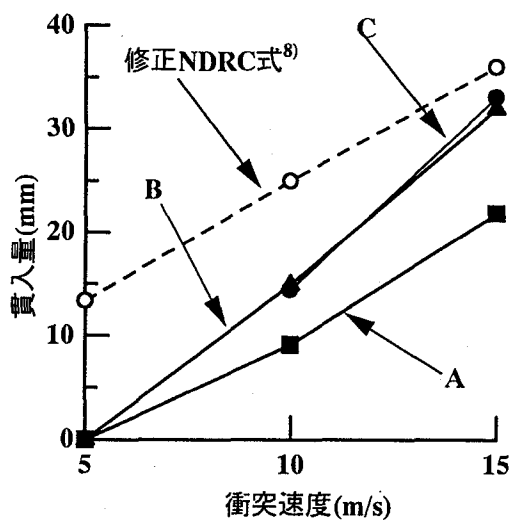


図-4 衝突面の貫入量と衝突速度の関係

3.1 試験体の破壊性状

載荷面側には、衝突速度5m/sの場合を除いて、いずれの試験体にも載荷棒と同径の貫入破壊が生じた。図-4は、貫入量と衝突速度の関係を表している。マッシュなコンクリートに対する飛翔体の貫入量は、被衝突物に用いているコンクリートの圧縮強度を除けば、衝突速度

や衝突物の先端形状といった外力の条件から求められる¹⁰⁾。図-4には、既往の貫入量評価式の一つである修正NDRC式による算定値も参考のため図示している。図より、板部材に生じる貫入量は速度が小さくなるにつれて、評価式による値より小さくなることがわかる。Aタイプの貫入量はB、Cタイプの貫入量に比べて小さくなっており、同一の鉄筋比であれば、細径の鉄筋を密に配置することで衝突物の貫入破壊を抑制できることがわかる。

図-5は、実験で得られた試験体裏面の破壊状況を示したものである。衝突速度が5m/sの場合は、Aタイプ、Bタイプともに衝突面への貫入は生じなかった。裏面には、衝突点直下に亀甲状のひびわれが生じた。細径の鉄筋を密に配筋したAタイプのひびわれはBタイプに比べて細かくなっているが、その広がり範囲は小さい。

衝突速度が増加すると、配筋の相違による破壊性状に、顕著な違いが確認できる。衝突速度10m/sに対する裏面の破壊状態を比較すると、Cタイプには裏面剥離が生じ、載荷点を中心に内径約30cmと外径約60cmで囲まれたドーナツ状の範囲のコンクリートが剥離した。欠落しない中心付近のコンクリート部分は、鉄筋の変形に伴って周辺より2cm程度浮き上がっている。また、中心を交差する縦横の鉄筋に沿って、鉄筋の曲げ変形に伴う縦ひびわれ(幅2mm程度)も生じている。剥離範囲の外側には、試験体全体に広がる放射状のひびわれも認めら

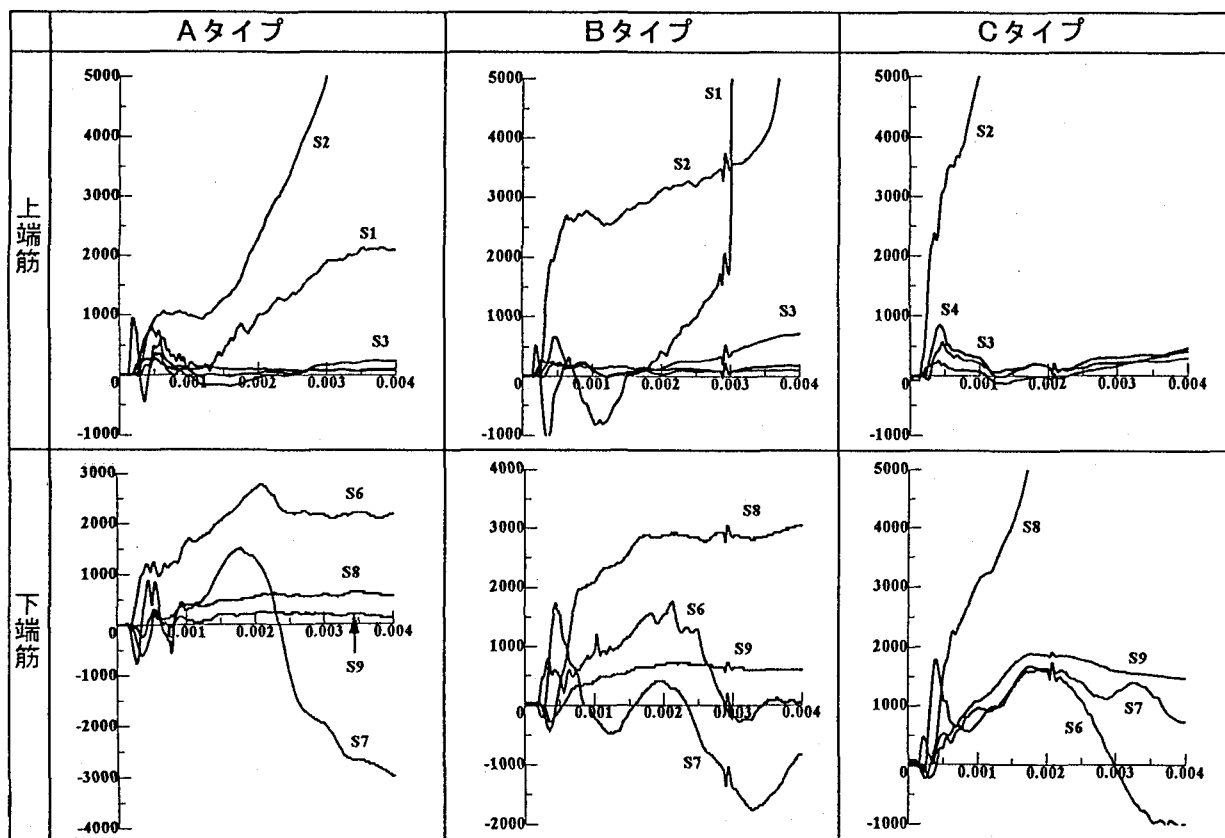


図-6 鉄筋のひずみ応答 (衝突速度10m/s) [縦軸：ひずみ(μ), 横軸：時間(sec)]

れる。Bタイプでは、載荷点を中心に半径約30cmの範囲でコンクリートが膨らみ変形して、周辺よりわずかに浮き上がっている。浮き上がったコンクリートの外縁では剥離も認められる。膨らみ変形の範囲内では亀甲状のひびわれが生じているが、周辺に広がる曲げひびわれは少なく、ひびわれ性状を見る限りCタイプより破壊が局所的になっている。一方Aタイプでは、半径約20cmの範囲内の亀甲状のひびわれと周辺に向かう曲げひびわれが認められるが、CおよびBタイプのようなコンクリートの膨らみ変形や裏面剥離は生じていない。

衝突速度が15m/sの場合は、いずれのタイプにも裏面剥離が生じた。剥離は、衝突点を中心として半径約30cmの範囲に及んでいる。衝突速度10m/sの場合と同様に、Cタイプには、試験体全体に広がる放射状のひびわれが生じた。また、コンクリートが剥離した範囲にある鉄筋は曲げ変形しており、その変形量はBタイプより大きい。Aタイプにも裏面剥離が生じたが、図で示した中心付近のかぶりコンクリートは鉄筋との付着が強固で、剥落していない。

以上のような破壊性状の違いが生じた理由として、①Aタイプは、他の試験体よりコンクリートと鉄筋の付着性能が発揮され、ひびわれたコンクリートの剥離が抑制されたこと、②単位幅当りの鉄筋の本数が少ない(Cタイプ)場合は、鉄筋部分に変形が集中するなど、かぶり厚さと鉄筋間隔の大小が影響していると考えられる。

3.2 鉄筋ひずみの応答

図-6に、衝突速度が10m/sの場合の上下端の鉄筋ひ

ずみの応答を示す。上端筋のひずみ応答(S1～S5)はいずれのタイプも載荷点直下とその周辺に限られており、特にS2はいずれも3000 μ を越えて降伏している。下端筋で最大の応答ひずみが生じるのは、Aタイプが中心から20cm(S7)、B、Cタイプが中心から30cm(S8)の計測点で、これはちょうどひびわれ範囲の外縁(Aタイプ)または、裏面剥離の外縁(B、Cタイプ)に相当する計測点である。下端筋の応答は、衝突直後に圧縮側に応答し、その後最大ひずみが生じる外縁点では急激に引張側に移行する(B、Cタイプ)。ひびわれや裏面剥離の範囲内ではやや複雑な挙動を示すが、損傷の範囲外(S9)では比較的緩やかに引張側に移行する。応答時間が経過すると、Cタイプでは、広い範囲で比較的大きな引張ひずみが生じているが、Aタイプの応答は局部的である。すなわち、応答時間の経過とともに、衝撃応答が局部応答(1次応答)から全体応答(2次応答)へ移行してもAタイプでは、広い範囲に及ぶ鉄筋の曲げ変形が拘束されることがこれらの応答値から確認できる。

4. 高速載荷実験による試験体の衝撃損傷評価

一般に、衝突実験と高速載荷実験は、前者が部材の衝撃応答を確認するため、後者が部材の動力学特性および終局限界性能を確認するための実験で、その目的と耐衝撃性の指標が異なるため、それぞれ別個に行われる。本研究では、配筋間隔の大小がRC板の耐衝撃性能に及ぼす影響を調べることに、落錘衝突実験でのRC板の破壊性状をより定量的に考察するため、衝突実験を

行った後の試験体に対する高速載荷実験を行った。

衝突実験による部材の耐衝撃性能については、パラメータの数が多いことや試験体の数に制限を受けるため、破壊性状や各種計測結果から定性的に評価せざるを得ず、定量的に評価するためには膨大な数の実験や解析的検討が必要となる。すなわち、衝突実験が衝突体と被衝突体との相互作用によるものであり、衝突後の破壊性状や計測データからではこれらに影響するさまざまな要因を分離して考察することは極めて困難である。

高速載荷実験の特徴は、衝突実験と異なり、衝突物の慣性力や応力波の影響を考慮することなく、速度効果のみに着目した試験体の動力学特性を調べることができる¹¹⁾ことにある。ここでは、重錘の衝突によるRC板の損傷過程を本実験で得られるRC板の残留エネルギー吸収容量などの動力学特性の変化（低下傾向）から考察する。

4.1 実験装置および実験概要

写真-2に、高速載荷実験における試験体の設置状況を示す。本装置は、最大容量100tonf、最大載荷速度5m/sの能力を有する。重錘の衝突による衝撃荷重を受けた後のRC板を落錘実験と同一条件で載荷するため、落錘実験に用いた載荷棒をそのまま使用した。なお、載荷速度は載荷点直下の鉄筋に生じるひずみ速度がほぼ等しくなるように4m/sとし、載荷のストロークは載荷棒を試験体に接触させた状態から損傷の程度に関わらず100mmに設定した。

4.2 実験結果および考察

(1) 耐荷力

図-7に、高速載荷実験で得られたすべての載荷点荷重～変位関係を示す。a)の処女載荷とは、落下衝撃荷重を受けていないRC板に対する載荷実験の結果を、b)、c)およびd)はそれぞれ5m/s、10m/sおよび15m/sの衝突速度で重錘落下衝撃荷重を受けたRC板に対する高速載荷実験の結果を示している。なお、波形はいずれも300Hz（変曲点周波数¹²⁾と考えられる）のローパスフィルターで処理したものである。

RC板の静的な押し抜きせん断耐力は鉄筋比や有効高さに基づいて算定されている⁹⁾。よって、本実験で用いたA、B、Cタイプの試験体の諸元はほぼ等しいので、静的押し抜きせん断耐力は同程度と考えられる。ところで、図-7a)に示す処女載荷の場合の動的な耐荷力を比較すると、Aタイプが最も大きく(46.3tonf)、Bタイプの1.17倍、Cタイプの約1.3倍であり、鉄筋間隔が密な方が動的耐荷力は向上することがわかる。処女載荷の場合、最大耐力は変位量が5mm前後で生じる。その後、載荷変位の増大にともなって、載荷棒は直下の上端筋とコンクリートを押し抜き、下端筋が下に引き下げられてRC板は徐々に耐力を失う。載荷後、鉄筋間隔の大小に関わらず、裏面コンクリートは載荷点を中心にφ80cmの範囲で剥落し、鉄筋の曲げ変形はφ50cmの範囲で生じている。配筋間隔が大きいCタイプでは、載荷面から、鉄筋が曲げ変形する約φ50cmの円状の範囲を底面

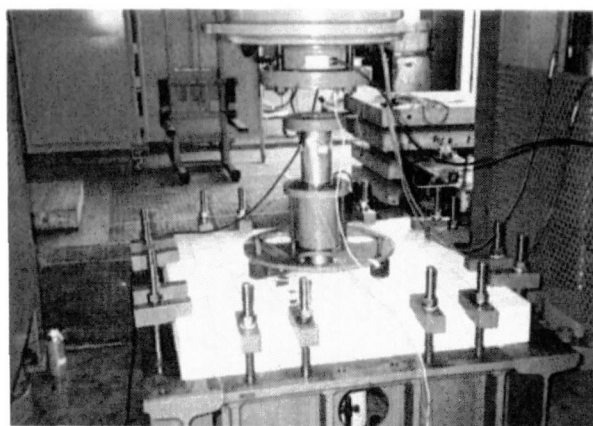


写真-2 高速載荷実験時の試験体の設置状況

とした円錐状のコンクリートが欠落したが、密に配筋したAタイプでは、下端筋の一部が破断したものの、コンクリートの欠落はほとんどなかった。

無損傷（処女載荷）および衝突速度が5m/sの場合に対する損傷が軽微な試験体では、試験体全体の曲げ変形により当初大きな耐力を示し、載荷面に押し抜きせん断による貫入破壊が生じて急激に耐力が減少する現象がみられる。衝突速度が10および15m/sの衝突実験により、衝突面に貫入、裏面には剥離が生じた試験体では、いずれのタイプも試験体全体による曲げ抵抗はなく、鉄筋だけによって耐力を保持している。

図-8は、各タイプの最大耐力（残留耐力）と、落錘実験時にRC板に加わる入力エネルギー（重錘の運動エネルギー）の関係を示したものである（図中破線は予測線）。グラフの傾向は、入力される衝撃エネルギーの増加に対して耐力がほぼ線形的に減少するI段階と、耐力の低下がほぼ横ばい状態になるII段階に分けられる。破壊性状と比較すると、I段階は、貫入などの圧縮破壊が先行する入力エネルギーレベルである。そのため、このような線形的な耐荷力の減少傾向は、RC板局部の有効高さの減少とそれにとまうコンクリートの圧縮・引張・せん断強度に対する負担率が減少することに起因するものと考えられる。

II段階になると、衝突によるRC板の圧縮破壊がさらに進行し、裏面剥離などの引張破壊も生じる。そのため、ここで計測される耐荷力は、試験体の変形にとまう下端筋の引張抵抗による負担力を示していると考えられ、図-7c)、d)のグラフの形状もその傾向を示している。

(2) 残留エネルギー吸収容量による耐衝撃性評価

部材のエネルギー吸収容量は、荷重～変位曲線における終局点までの積分値で求められる。しかし、図-7で見られるように、耐荷力が急激に低下するといった明確な終局点を定義できるのは数例に過ぎず、終局点を特定することは困難である。そこでここでは、エネルギー吸収容量を、部材の耐荷力がゼロになるまでの積分値で求めることとした。ただし、耐荷力がゼロにならない場合は、荷重～変位曲線の最も大きな変形までの積分

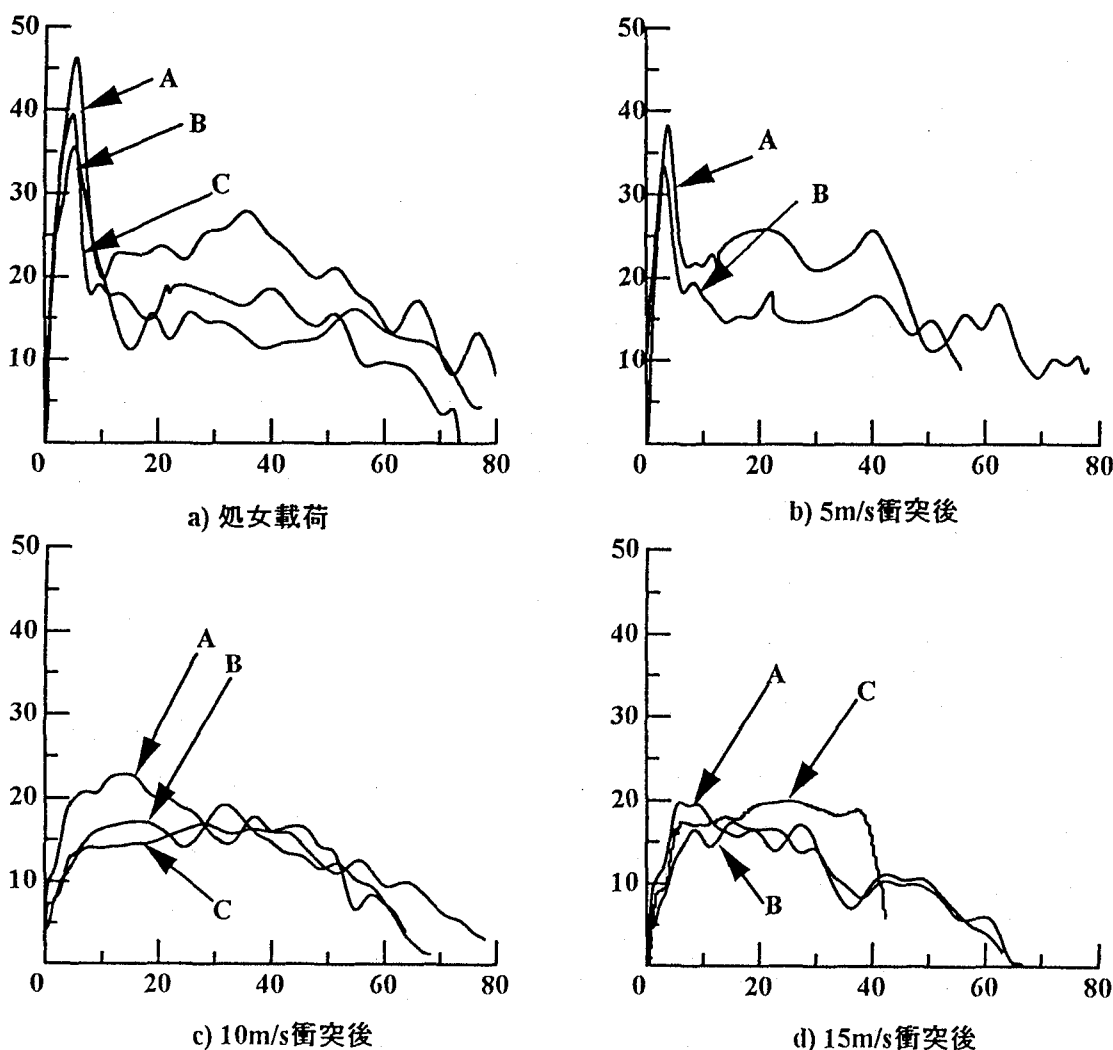


図-7 載荷点荷重～変形量関係〔縦軸:荷重(tonf), 横軸:変位(mm)〕

値で求めた。これは、設定した100mmの載荷ストロークでは、下端筋の破断までに至らなかった場合などで、処女載荷時のCタイプがその一例である。

図-9に、各ケースの残留エネルギー吸収容量と入力された衝撃エネルギーの関係を示す(図中破線は推定線)。RC板に入力される衝撃エネルギー(重錘の運動エネルギー)は、衝突時の音や熱などによるエネルギーの消散を除けば、RC板の全体(曲げ、せん断)損傷や局部(貫入、裏面剥離)損傷などに消費される。よって、衝撃による部材のエネルギー吸収容量の関係は次式のように考えることができる。

$$E_{INPUT} = E_{DAMAGE} + E_{OT} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} E_V &= E_L + E_O + E_A + E_R \\ &\doteq E_{DAMAGE} + E_R \quad (2) \end{aligned}$$

ここに、 E_{INPUT} :衝撃エネルギー(重錘の運動エネルギー)、 E_{DAMAGE} :試験体の損傷によって消費されるエネルギー量、 E_{OT} :衝突時に熱や音となって消散するエネルギー量、 E_V :無損傷(処女載荷)の部材のエネルギー吸収容量、 E_L :局部損傷(貫入、裏面剥離)に費

されるエネルギー量、 E_O :全体変形(曲げ、せん断)に費やされるエネルギー量、 E_A :直接損傷に関わらずに部材が吸収するエネルギー量(ひずみエネルギーなど)、 E_R :損傷後に部材が保有するエネルギー吸収容量(残留エネルギー吸収容量)である。一般に、(1)式の E_{OT} は計測することができないため、実験値によるエネルギー収支は必ずしも一致しない。また、全体変形と局部損傷が混在する破壊形態では、 E_L 、 E_O を区別して求めることが困難で、従来は、 E_V (主として全体変形によるエネルギー吸収容量)の大小関係から耐衝撃性を評価する手法が取られていた。しかし、被衝突物の諸元が異なると、衝突物と被衝突物の間のエネルギーの授受が異なることが予想され、無損傷時のエネルギー吸収容量の大小関係だけでは、損傷の進展に伴うエネルギー吸収のメカニズムの違いを知ることはできない。本研究では、実験より(2)式の E_R を求め、損傷に要するエネルギーの大小関係から部材の耐衝撃性を評価することとする。

図-9より、無損傷(衝撃エネルギー=0)時のエネルギー吸収容量 E_V は、Aタイプが最も大きく、B、Cタイプの約1.5倍である。入力される衝撃エネルギー E_{INPUT} が大きくなり、損傷が表面破壊から裏面剥離へと進行す

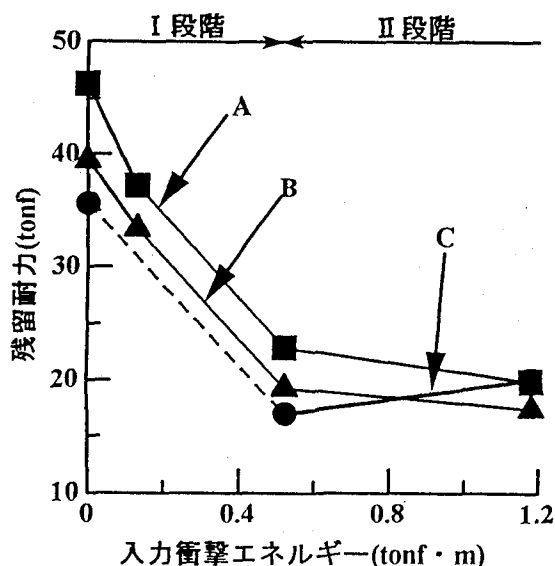


図-8 衝撃エネルギーと残留耐力

ると、 E_{DAMAGE} が増加するため部材の残留エネルギー吸収容量 E_R は少なくなる。本研究で設定した最大の衝撃エネルギー（ $1.182 \text{ tonf} \cdot \text{m}$ ）になると、いずれの試験体にも裏面剥離が生じ、残留エネルギー吸収容量は試験体のタイプに関わらずほぼ等しくなる。処女載荷時のエネルギー吸収容量と残留エネルギー吸収容量の差（ $E_V - E_R$ ），すなわち、裏面剥離が生じるまでに試験体が吸収するエネルギー量 E_{DAMAGE} は、Aタイプが約 $0.935 \text{ tonf} \cdot \text{m}$ 、B、Cタイプはおよそ $0.42 \text{ tonf} \cdot \text{m}$ で、同程度（裏面剥離）の損傷が生じるまでに、AタイプはB、Cタイプの約2.2倍のエネルギーを必要とする。また、残留エネルギー吸収容量の下降傾向を比較すると、Aタイプは損傷の進展に比例して段階的に減少しているのに対して、Bタイプではひびわれが生じた衝撃エネルギー $0.131 \text{ tonf} \cdot \text{m}$ （衝突速度 5 m/s ）以降の下降勾配が緩やかになる。これは、(2) 式の E_L 、 E_O 、および E_A のエネルギーの吸収割合（吸収のメカニズム）の違いによるものと考えられる。すなわち、鉄筋を密に配筋したAタイプでは、鉄筋のひずみエネルギーなどによる E_A の負担の割合が衝撃エネルギーに比例して増加する結果、損傷が抑制されているのに対して、B、Cタイプでは衝撃エネルギーがある程度大きくなると、 E_A の負担率が低下することにより、残留エネルギー吸収容量はあまり低下することなく、 E_L および E_O による部材の損傷が生じるものと考えられる。

5. まとめ

本研究は、局部損傷のうち裏面剥離が生じる程度の衝撃荷重載荷条件に対する板部材の耐衝撃性能を、より合理的に向上させるための基礎的段階として、その基本部材である通常のRC板を取り上げ、配筋間隔（同一鉄筋比）をパラメータとして行った実験研究である。本研究で得られた成果を要約すると、以下ようになる。

(1) 本研究で行った落錘衝突実験の範囲（重錘重量 103 kgf 、衝突速度 15 m/s 以下）では、RC試験体の鉄

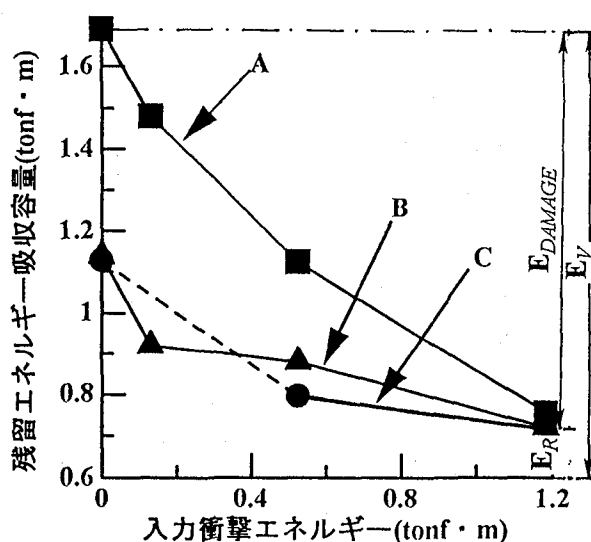


図-9 衝撃エネルギーと残留エネルギー吸収容量

筋比を一定とした場合、細径の鉄筋を密に配筋すると、太径の鉄筋を粗に配筋した場合より貫入や裏面剥離などの局部破壊を抑制できる。

(2) 重錘の落下による部分集中荷重を受ける載荷条件では、細径の鉄筋を配筋すると鉄筋は局部的に損傷が生じ、太径の鉄筋の場合では全体的に曲げ変形する。よって、太径の鉄筋を配筋した場合は、縦ひびわれが生じやすく、かぶり厚さが十分でないで衝突速度が 10 m/s 程度でも裏面コンクリートの剥落が広い範囲に及ぶ。

(3) 同一寸法のRC板部材で鉄筋比と有効高さが同一であれば、静的な耐力は等しいが、細径の鉄筋を用いて配筋を密にすることで、RC板の動的耐力およびエネルギー吸収容量は著しく向上する。

(4) 残留エネルギー吸収容量と、落錘実験による破壊性状との検討から、細径の鉄筋を密に配筋したRC板は、太径の鉄筋を粗に配筋した場合より破壊には大きなエネルギー量が必要である。言い換えれば、耐衝撃性が高いと言える。

一般に、部材の耐衝撃性をエネルギー基準で評価する場合、その収支の問題も含め、各種エネルギーを精度良く求めることは困難である⁵⁾。また、本研究の結果からわかるように、部材が吸収したエネルギーの大小が必ずしも破壊の程度を表すものではない。よって、合理的なRC板の耐衝撃性の向上をエネルギーの面から考察するには、部材の応答特性のみならず、破壊の進行過程と衝撃エネルギーの消散や吸収についてその特性を把握することが必要である。今後は、本研究の成果を踏まえ、合理的にRC板の耐衝撃性を向上させるため、さまざまなパラメータ、例えば、必要鉄筋比の検討や鋼・コンクリート合成板の検討を考えている。

参考文献

- 1) 岸，松岡，大沼，能町：四辺単純支持RC矩形板の重錘落下衝撃実験，構造工学論文集，Vol.38A，pp.1587-1596，1992。
- 2) 三上，三上，松岡，能町：重錘落下衝撃を受ける単鉄筋RC床板の耐衝撃挙動に関する実験的研究，

- 構造工学論文集, Vol.40A, pp.1619-1630, 1994.
- 3) 伊藤, 白井, 大沼: 剛飛来物の衝突に対する鉄筋コンクリート構造物の設計評価式, 土木学会論文集, No.507/I-30, pp.201-208, 1995.
- 4) 田村, 三上, 岸, 松岡: 鉄筋およびAFRPロッドで補強したRCスラブの耐衝撃挙動に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.39A, pp.1631-1644, 1993.
- 5) 三上, 田村, 岸, 松岡: コンクリート梁の耐衝撃性におよぼす緊張材の特性とプレストレスの影響, 構造工学論文集, Vol.41A, pp.1267-1275, 1995.
- 6) 小暮, 大野, 河西, 坪田, 内田: 鋼板で補強されたRC板の耐衝撃性と補強鋼板の等価コンクリート厚の推定, 構造工学論文集, Vol.39A, pp.1599-1608, 1993.
- 7) 岡本, 大野, 上林, 上田, 石川: 小型飛翔体の高速衝突に対する2層構造RC板の衝撃挙動と局部損傷の推定, 構造工学論文集, Vol.40A, pp.1567-1580, 1994.
- 8) 土木学会: 構造物の衝撃挙動と設計法, pp.37-38, 1994.1.
- 9) 角田, 井藤, 藤田: 鉄筋コンクリートスラブの押し抜きせん断耐力に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第229号, pp.105-115, 1974年9月.
- 10) Kennedy, R.P.: A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects, Nuclear Engineering and Design, Vol.37, pp.183-203, 1976.
- 11) 竹田, 立川, 藤本: コンクリートと衝撃, コンクリート工学, Vol.15, No.4, April 1977.
- 12) 小暮, 佐々木, 大野: 衝撃実験における計測データのフィルター処理, 土木学会第49回年次学術講演会概要集第I部, pp.1586-1587, 平成6年.

(1995年9月18日受付)