

2 重錘衝突時の衝突局部的コンクリート供試体の挙動

The behavior of concrete specimen which is placed between two weights during collision making

白石博文*, 梶田幸秀**, 香月智***

Hirobumi SHIRAISHI, Yukihide KAJITA, Satoshi KATSUKI

*修士(工学) 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)

**博士(工学) 防衛大学校助手 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 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

キーワード：空気浮上重錘衝突実験装置，損失エネルギー，エネルギー保存，コンクリート供試体
(Air floating collision test device, dissipated energy, energy consumption, concrete specimen)

1. 緒言

瞬時にひずみが増加するコンクリートの応答を調べる方法として、静的なコンクリート圧縮実験と同様な仕組みで載荷速度を速めた高速載荷実験^{1)~5)}や、図-1のような衝突物体を供試体に直接衝突させる実験法^{6)~8)}が行われてきた。これらの実験では載荷速度の影響により、最大耐力が増加するいわゆるひずみ速度効果が得られると報告されている。

ここで、衝突荷重を受ける鉄筋コンクリート構造応答を図-1のようにモデル化してみると、破線のように局部と全体とに明確な境界部の設定はできないものの、応答領域は局部応答領域と全体応答領域に分離して考えられる。一般的に局部領域では損傷や破壊を含む大きなひずみが瞬時に発生するのに対し、全体応答は相対的にゆっくりとした動的応答となる。図のような実験結果を解析する場合、衝突局部要素に既往の研究で得られたひずみ速度効果を考慮したモデルを用いることが多い⁹⁾が、この境界面は衝撃応答中に移動しており、実験室など固定条件下で得られた構成則を適用することは必ずしも実構造物中の応力状態に等しいとは言い難い。また、実験条件の難易性からもその種の境界条件に着目したコンクリートの衝突荷重に対する挙動に関する研究例もほとんど無い。そのようなコンクリートの荷重～変形関係を得るためには、衝突体と被衝突体間における衝突前後の運動量の移行を正しく推

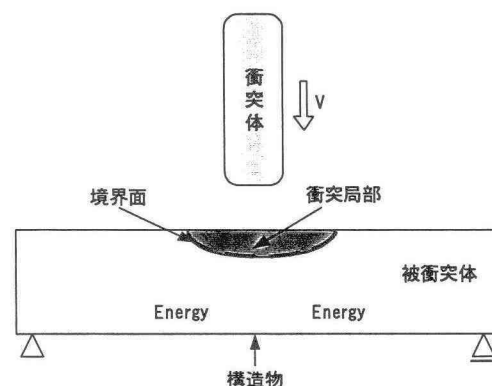


図-1 衝撃実験

定できる状態で実験を行う必要がある。

そこで、本研究は、衝突前後の衝突および被衝突体の運動エネルギーおよび運動量が計測可能な空気浮上式重錘衝突実験装置を用いて、2つの重錘間にコンクリート供試体を設置し、被衝突体の境界面が移動する条件下でその荷重～変形関係を計測したものである。その際、コンクリートのエネルギー伝達について考察したうえで、信頼性のあるデータを選択し、従来行われている静的実験や高速載荷実験と比較したものである。

2. 実験の概要

2.1 空気浮上重錘衝突実験装置

写真-1 に空気浮上重錘実験装置の外観および図-2

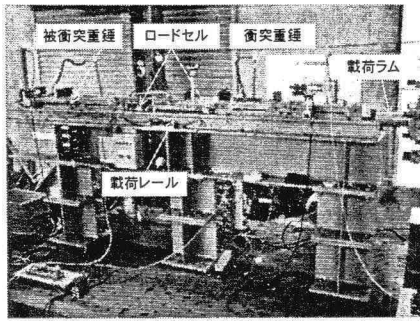


写真-1 空気浮上重錘衝突実験装置

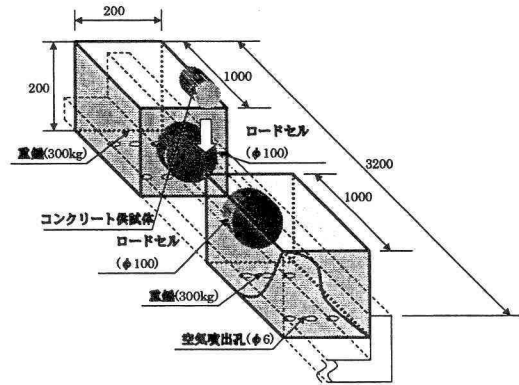


図-2 空気浮上重錘衝突実験装置

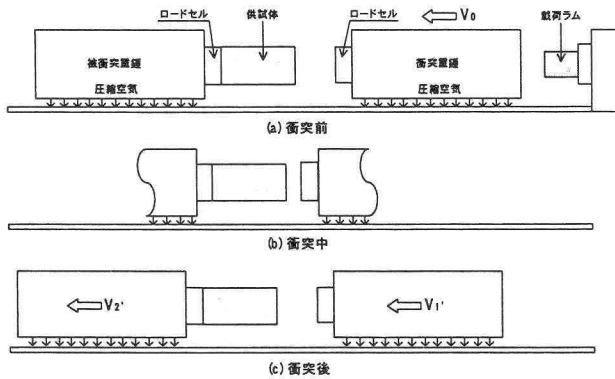


図-3 空気浮上重錘衝突実験装置

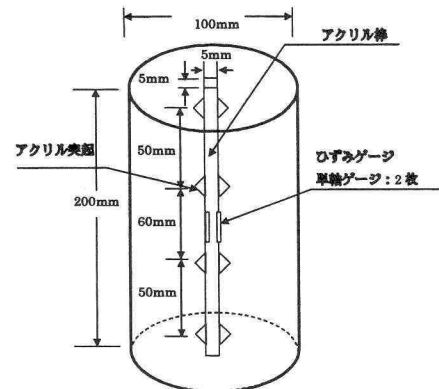


図-4 供試体

に本体部の主要諸元を示す。空気浮上重錘衝突実験装置は重錘を底面からの圧縮空気を噴出して浮上させ、載荷レールとの間にほとんど摩擦が生じない状態で重錘を運動させることができる装置¹⁰⁾である。これに水平高速載荷装置を組み合わせて、離間した二つの浮上重錘の片方を押し出し、他方の静止した重錘に衝突させるものである。本研究では、押し出された重錘を衝突重錘、静止している重錘を被衝突重錘と呼ぶ。実験は図-3に示すように浮上して静止した被衝突重錘にコンクリート端部を接触させた状態で静止させ、衝突重錘を載荷ラムにより設定速度に加速・コンクリート面に衝突させることで供試体は変形または破壊する。

2.2 供試体

供試体は図-4に示すような直径約100mm高さ200mmのものであり、コンクリート供試体の変形量計測のため、図に示すような異形加工したアクリル棒にひずみゲージ(ゲージ長2mm)を2枚貼付したものを埋め込んである。アクリル棒の弾性係数は、 3.3×10^3 (N/mm²)でありコンクリートと比較して1/10程度と小さく、コンクリートの変形を拘束することがない。そのうえで、貼付されたひずみゲージから得られた計測値の平均に供試体長を乗じて供試体の全体変形を計測する方法を採用した。また、コンクリートは低強度

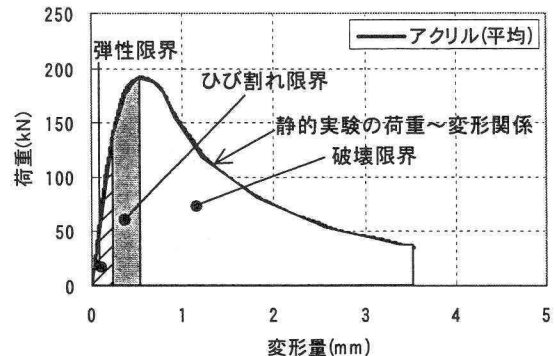


図-5 衝突速度の決め方

(25N/mm², 28日強度)、普通強度(25N/mm², 28日強度)の2種類とした。

2.3 衝突速度の決定および実験ケース

重錘衝突実験の初速度設定は、静的実験から得られた荷重～変形関係における3つの限界点に対応して決定した。すなわち、図-5に示すように弾性的な線形関係にあり外観にひび割れが生じない領域を弾性限界、ひび割れが確実に生じる最大荷重までの領域をひび割れ限界、確実に原形をとどめない破壊に至る領域を破壊限界と定義したうえで、各領域の荷重～変形関係が

表-1 実験ケース

		载荷速度 (m/s)	本数
静的载荷	低強度	5.0×10^{-3}	3
	普通強度	5.0×10^{-3}	3
高速载荷	低強度	4.0	3
	普通強度	4.0	3
空気浮上 衝突実験	低強度	1.0	3
		1.7	3
		2.4	3
	普通強度	1.2	3
		2.0	3
		2.4	3

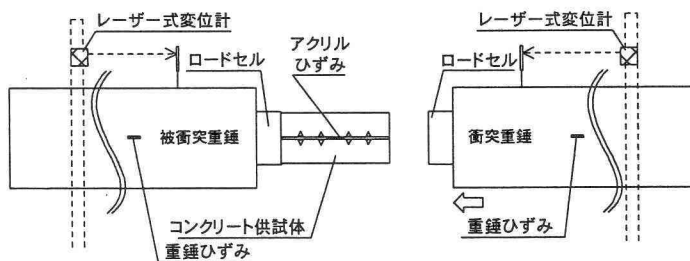
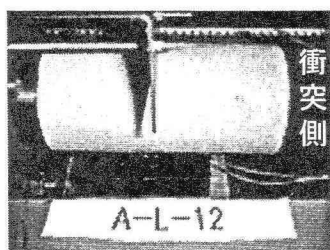
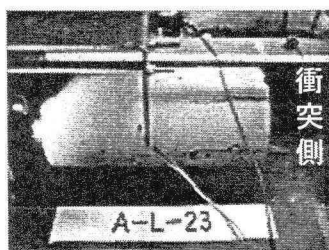


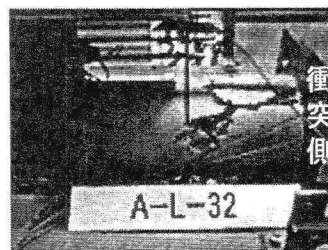
図-6 計測要領



(a) 弾性限界速度($V_0 \div 1.0\text{m/s}$)

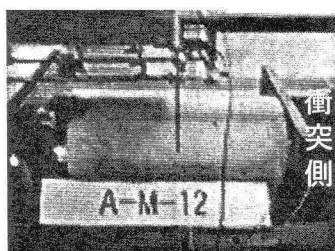


(b) ひび割れ限界速度($V_0 \div 1.8\text{m/s}$)

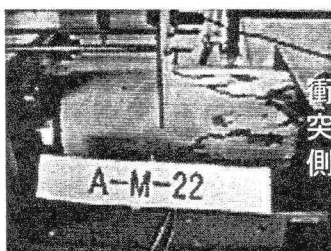


(c) 破壊限界速度($V_0 \div 2.2\text{m/s}$)

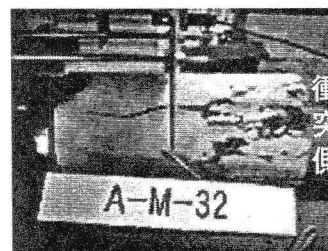
写真-2 低強度供試体の破壊性状



(a) 弾性限界速度($V_0 \div 1.2\text{m/s}$)



(b) ひび割れ限界速度($V_0 \div 2.0\text{m/s}$)



(c) 破壊限界速度($V_0 \div 2.4\text{m/s}$)

写真-3 普通強度供試体の破壊性状

ら得られる吸収エネルギーと等価な運動エネルギーとなる初速度を設定した。表-1に実験ケースを示す。衝突実験においては各衝突速度3体ずつ行い、実験結果の比較のため高速载荷実験も行った。

2.4 計測項目

本実験での計測要領を図-6に示す。計測項目は、コンクリート供試体に作用する衝突および被衝突荷重、供試体内部に埋設した2枚のひずみゲージによる軸方向ひずみ、衝突重錘・被衝突重錘のひずみおよび衝突前後の速度とした。なお、速度は両重錘の衝突前後の変位を図-6の要領で計測し、得られた変位を時間で微分することにより算定した。

3. 実験結果と考察

3.1 破壊性状

写真-2, 3に低強度および普通強度供試体の衝突実験後の破壊性状を示す。なお、写真の右側が衝突重錘の衝突面である。両強度供試体とも、弾性限界速度では目視で確認できる明瞭なひび割れは発生せず、ひび割れ限界速度では、普通強度において衝突面側の半分の領域に斜めせん断ひび割れが生じている。また、破壊限界速度の場合、低強度では衝突面側半分に破壊に相当する割れ目が発生し、普通強度では被衝突重錘側にまで縦ひび割れが生じ供試体を貫通している。このように、衝突速度の増大に伴って破壊が衝突面側に集中するのは、静的実験のように供試体内部での応力状態に衝突側と被衝突側とで対称性が保たれていないためと思われる。

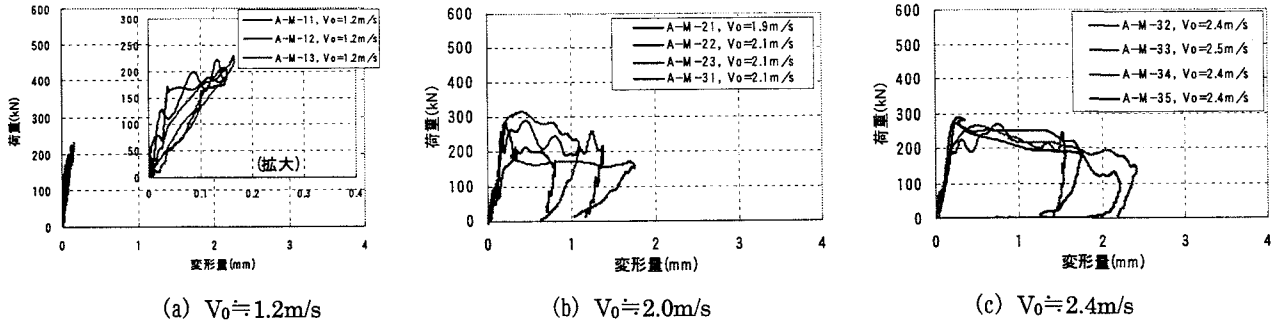


図-7 普通強度供試体の荷重～変形関係

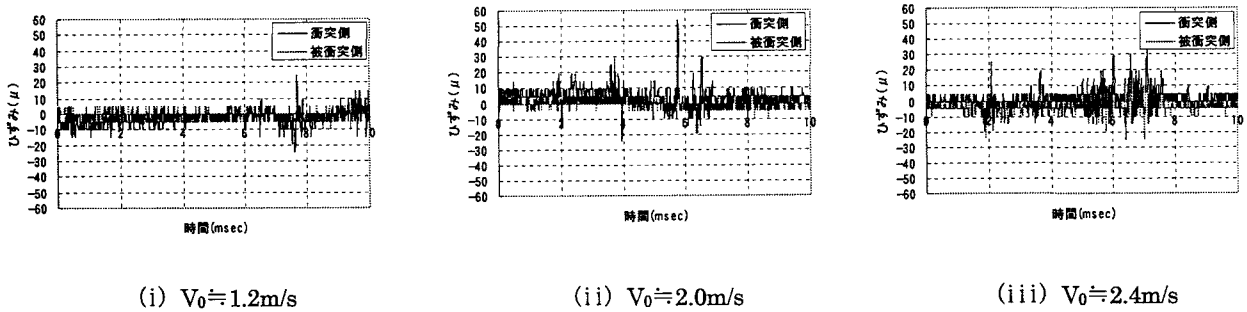


図-8 重錘内部への伝播ひずみ(普通強度)

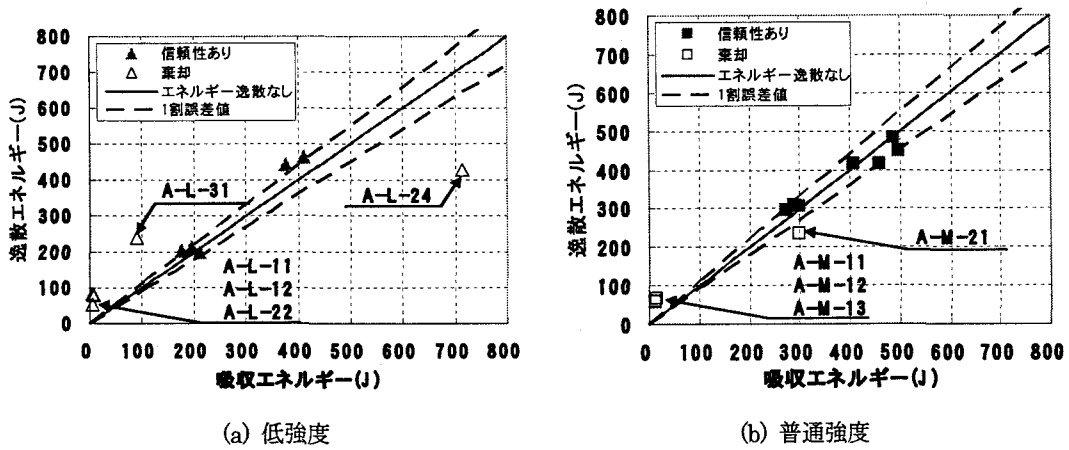


図-9 エネルギー収支関係

3.2 コンクリート供試体の荷重～変形関係

図-7 に衝突実験の結果得られた普通強度コンクリート供試体の荷重～変形関係を示す。図より、衝突速度 $V_0 \doteq 1.2\text{m/s}$ では、最大荷重 220kN まで荷重～変形関係はほぼ線形的である。ただし、拡大してみると載荷時と除荷時に差があり吸収エネルギーが生じている。衝突速度 $V_0 \doteq 2.0\text{m/s}$ では、最大荷重や最大変形量にばらつきが大きい。これは、3 体の破壊状況が一方はほぼ健全であったり、他方は完全に破壊したりしたことと対応している。ただし、衝突速度 $V_0 \doteq 2.4\text{m/s}$ の場合は、概ね 4 体の試験結果はよく一致している。

3.3 エネルギー収支と棄却検定

一般に衝突問題では、運動量は保存されるが運動エネルギーは保存されない。これは、衝突後のエネルギー損失分が、物体内部に残存しているひずみエネルギーや衝突時の熱エネルギー、音(空気の振動)エネルギーなどに変換されるためである。そこで、本衝突実験での被衝突重錘の軸方向ひずみを計測したところ、図-8 に示すようにどの衝突速度でも概ね 15μ 程度の振幅であり、重錘に蓄積している弾性エネルギーは微小との結果が得られた。そこで、本研究では、式(1)に示す衝突実験後の逸散エネルギーが式(2)の荷重～変形関係から得られる吸収エネルギーに等価であると仮定し、エネルギー収支の検定を行った。

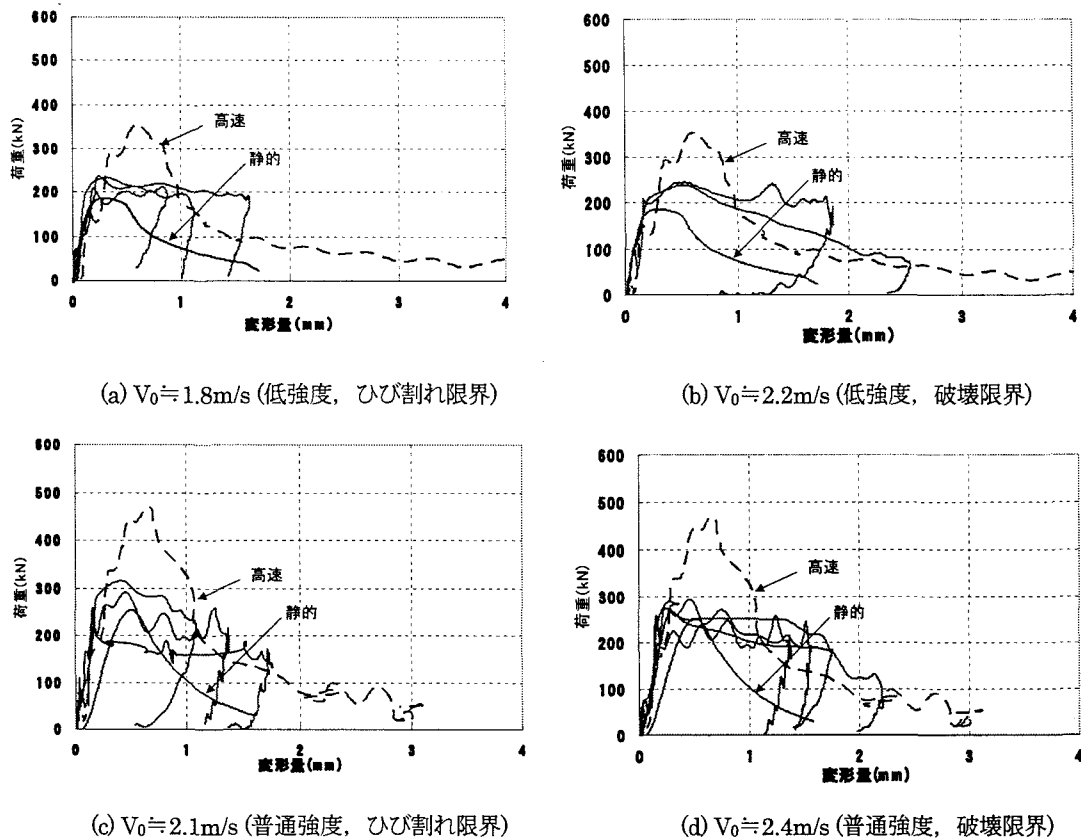


図-10 荷重～変形関係(空気浮上重錘衝突実験, 棄却検定後)

$$E_d = \frac{1}{2} m_1 V_0^2 - \frac{1}{2} (m_1 V_1^2 + m_2 V_2^2) \quad (1)$$

ここで, E_d : 逸散エネルギー, m_1, m_2 : それぞれ衝突重錘および被衝突重錘の質量, V_0, V_1 : 衝突重錘の衝突前後の速度, V_2 : 被衝突重錘の衝突後の速度

また, 同時に衝突点における荷重 p と, 供試体の変形量 δ より供試体の変形によって吸収されたエネルギーも算定できる.

$$E_a = \int_0^{\delta_e} p d\delta \quad (2)$$

ここで, E_a : 供試体の変形による吸収エネルギー, p : 供試体の衝突荷重, δ : 供試体の変形量, δ_e : 荷重が 0 に戻る時の終局変形量.

$$E_a = E_d \quad (3)$$

図-9 に縦軸に逸散エネルギー, 横軸に吸収エネルギーをとり両者の相関関係を示す. 実線はエネルギー収支が完全に成立することを意味し, 破線は 10% 誤差範囲を示す. ここでは, 破線内に収まればエネルギー収支は成立するものとする. 図より, 両強度とも弾性限界速度では, 強度にかかわらずコンクリート供試体の吸収エネルギーに比して逸散エネルギーが極端に大きくなり一致しない. 一方, ひび割れおよび破壊限界速

度では多くの実験ケースで概ね 2 つのエネルギーはほぼ一致していることがわかる. 以上の検定から, 図中に白抜きで示したケースは, E_a と E_d の差が 10% 以上あるため信頼性が無いと考え, 以後の考察から棄却した.

3.4 荷重～変形関係の静的および高速載荷実験結果との比較

図-10 にはエネルギー収支検定による棄却後の荷重～変形関係を示す. 図中には, 比較のため静的および高速載荷実験の荷重～変形関係も示す. まず, 初期剛性については, 全般的に空気浮上重錘衝突実験と高速載荷実験は概ね一致している. また, 最大荷重以降のコンクリート供試体の挙動は静的, 高速載荷時とは異なり, 荷重が少しずつ除荷されながら変形が大きくなっていく傾向があり, じん性のある挙動となった. また, 除荷過程については, ほとんどの実験で初期剛性とほぼ同じ勾配で戻っているのがわかる. 次に, 最大強度に着目すると低強度供試体の場合, ひび割れ限界および破壊限界において静的と高速の間に位置し, やや静的最大強度に近い結果を得た. また, 普通強度供試体ではひび割れ限界で最大強度のばらつきが確認されるが, 破壊限界では静的載荷時の最大強度とほぼ同

じ結果が得られた。

すなわち、空気浮上重錘衝突実験でエネルギー収支を満たす荷重～変形関係は、静的および高速のそれと比較してじん性のある挙動を示し、衝突速度が最大応力以降の軟化過程に及ぼす影響が大きい。また、最大強度については静的結果よりやや大きくなるものの衝突速度の影響は小さいことが実験より得られた。

4. 結 言

本研究は、空気浮上重錘衝突実験装置を用いて、2つの重錘間に設置したコンクリート供試体に対して衝突実験を行い、圧縮破壊挙動を調べたものである。本研究で得られた成果を以下に示す。

- (1) 空気浮上重錘衝突実験で得られたコンクリート供試体の荷重～変形関係に対しエネルギー収支検定を行い、信頼性のある実験結果を得ることができた。
- (2) 空気浮上重錘衝突実験によるコンクリート供試体の破壊形態は、衝突面側に破壊領域が偏在する傾向が強い。
- (3) 空気浮上重錘衝突実験でのコンクリート供試体の最大強度は、静的実験結果よりやや大きくなるが、強度増加の程度は高速載荷実験ほどではなく、衝突速度の影響は小さい。
- (4) 空気浮上重錘衝突実験で得られた荷重～変形関係は、最大強度後の抵抗力の低下が静的実験や高速載荷実験のものより緩やかなじん性の大きなものとなった。

参考文献

- 1) 白井孝治, 柳下拓也, 伊藤千浩: コンクリートの材料特性に及ぼすひずみ速度効果の評価式, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.1665~1672, 2001.3.
- 2) 藤掛一典, 篠崎敬一, 大野友則, 水野淳, 鈴木篤: 急速一軸圧縮載荷を受けるコンクリートのポストピーク挙動に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.627/V-44, pp.37-54, 1999.8.
- 3) 藤掛一典, 上林勝敏, 大野友則, 江守克彦: ひずみ速度の影響を考慮した三軸応力下におけるコンクリートの直交異方性構成モデルの定式化, 土木学会論文集, No.669/V-50, pp.109-123, 2001年2月.
- 4) 上林勝敏, 藤掛一典, 大野友則, 水野淳, 鈴木篤: 高ひずみ速度・三軸圧縮応力下におけるコンクリートの動的軟化特性とそのモデル化, 土木学会論文集, No.669, V-50, pp.135-148, 2001.2.
- 5) 山口 弘, 藤本一男, 野村設郎: 高圧3軸圧縮応力下におけるコンクリートの応力-ひずみ関係, 建築学会構造系論文報告集, Vol.396, pp.50~58, 1989.2.
- 6) 竹本憲介, 圓林栄喜, 香月智, 石川信隆: 重錘落下実験による PC はりの衝撃破壊挙動に関する一考察, 土木学会論文集, No.675/V-55, pp.273-286, 2001.4.
- 7) 香月 智, 黒木勇人, 石川信隆, 太田貞次: 高速載荷を受けるコンクリート充填鋼管はりの動的弾塑性挙動に関する一考察, 土木学会論文集, No.696/I-58, 61~76, 2002.1.
- 8) 鈴木真次, 香月智, 石川信隆, 石川芳治, 吉川浩平: 鋼球のコンクリート供試体への振り子式衝突実験による局部損失エネルギーとその評価モデルに関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.543/I-36, pp.91~105, 1996.7.
- 9) 竹本憲介, 上林勝敏, 香月智, 石川信隆: RBSM-FEM 混合型要素モデルによるコンクリート供試体の圧縮破壊解析, 土木学会論文集, No.696/I-58, pp.197~213, 2002.1.
- 10) 梶田幸秀, 北原武嗣, 西本安志, 香月智: エアーフローティング装置を用いたゴム製緩衝材の桁間衝突実験, 土木学会地震工学論文集, No.316, pp.1-8, 2003.12.

- 1) 白井孝治, 柳下拓也, 伊藤千浩: コンクリートの材料特性に及ぼすひずみ速度効果の評価式, 構造工学