

小型 RC 製アーチ模型の耐衝撃挙動に関する実験的研究

Experimental study on impact resistant behavior of small scale RC arch-type model

川瀬 良司*, 岸 徳光**, 今野 久志***, 岡田 慎哉****, 鈴木 健太郎*****

Ryoji Kawase, Norimitsu Kishi, Hisashi Konno, Shin-ya Okada and Kentaro Suzuki

* 博 (工) (株) 構研エンジニアリング 取締役 (〒065-8510 札幌市東区北 18 条東 17 丁目 1-1)

** 工博 室蘭工業大学 教授 建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

*** 博 (工) 寒地土木研究所 主任研究員 寒地構造チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3)

**** 修 (工) 寒地土木研究所 研究員 寒地構造チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3)

***** 修 (工) (株) 構研エンジニアリング 防災施設部 (〒065-8510 札幌市東区北 18 条東 17 丁目 1-1)

In order to investigate the impact resistant behavior of an arch-type structure, static and falling-weight impact tests for a small scale RC arch-type model were conducted taking arch width as variable. Total eight specimens were used for this study, in which four specimens are for 200 mm width and the other four specimens are for 800 mm width. Here, impact load was surcharged using a 300 kg falling heavy weight. The results obtained from this study are as follows: 1) in spite of loading way, specimens with a 200 mm width were failed with a flexural failure mode and specimens with a 800 mm width were failed with a punching shear failure mode; 2) it was confirmed that arch effects were not remarkable in case accompanying with punching shear failure.

Key Words : arch-type structure, impact loading test, impact resistant behavior, punching shear failure

キーワード : アーチ構造, 重錘落下衝撃実験, 耐衝撃挙動, 押し抜きせん断破壊

1. はじめに

我が国の国土は、狭く細長い上に脊梁に山脈が縦断する急峻な地形を呈する。そのため、道路は海岸線や山岳部の急崖斜面に沿って敷設されている箇所が多く、トンネルが多く建設されている。また、そのトンネル坑口部は一般的に斜面を背負っている。これらのトンネル坑口部において、斜面からの落石対策が施されていない箇所も多く残されているため、鉄筋コンクリート製（以後、RC 製）アーチ構造形式のトンネル坑口部は、落石による衝撃力を受けることが想定される。しかしながら、現実には耐衝撃性能の検討が行われていないのが現状である。写真-1 にトンネル坑口部の例を示す。

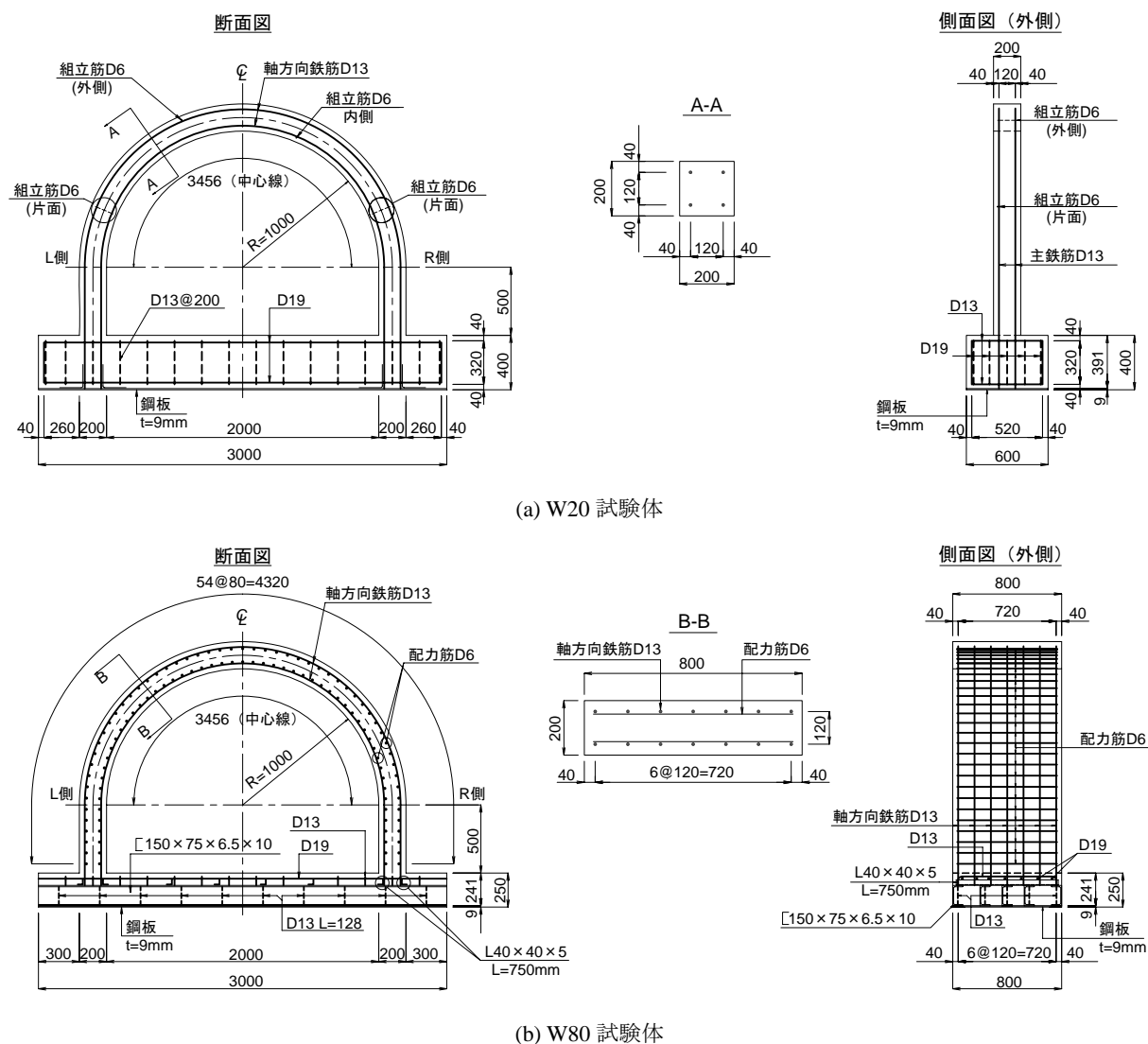
これより、この種の構造物に関して落石から人命を守りかつ交通網を確保するためには、RC 製アーチ構造形式のトンネル坑口部における耐衝撃性の確認と、耐衝撃性が十分でない場合には適切な耐衝撃性向上のための対策を講ずることが必要不可欠であるものと判断される。

著者らは、これまでにトンネル坑口部の落石対策の緩衝構造として敷砂や三層緩衝構造¹⁾を設置した場合の数値解析²⁾を実施し、RC 製アーチ形式の衝撃応

答特性や緩衝効果について検討を行っている。その結果、応答性状は矩形断面形状を有する落石覆工と大きく異なること、アーチ形状を有する覆工構造物においても三層緩衝構造が優れた緩衝効果を発揮すること等を明らかにしている。また、室内衝撃実験用小型 RC 製アーチ梁模型に関する衝撃応答解析³⁾を行い、その挙動性状に関する数値解析的な検討も行っている。



写真-1 トンネル坑口部の例



図－１ 形状寸法および配筋状況

表－１ 実験ケース（試験体）一覧

実験 ケース	アーチ幅 W(cm)	载荷方法	衝突速度 V(m/s)
W20-S	20	静的	—
W20-II		衝撃 (繰り返し)	1,2,3
W20-IS-3		衝撃 (単一)	3
W20-IS-4			4
W80-S	80	静的	—
W80-II		衝撃 (繰り返し)	1,2,3,4,5
W80-IS-6		衝撃 (単一)	6
W80-IS-7			7

本研究では、これらの RC 製アーチ構造に関する耐衝撃挙動を把握することを目的に、小型 RC 製アーチ模型（以後、アーチ）に関する静载荷実験および重錘落下衝撃実験を実施することとした。衝撃実験は、アーチの奥行方向の幅（以後、単に幅）を変化させ、

梁形状の場合と版形状に近い場合のそれぞれの試験体に関して重錘の衝突速度を漸増させた繰り返し载荷と単一载荷実験を行った。衝撃応答特性に関する検討は、各種応答波形（重錘衝撃力、载荷点における応答変位）およびひび割れ分布性状に着目して行うこととした。また、衝撃実験と同一の試験体を用いた静载荷実験も行い、衝撃実験結果と静载荷実験結果を比較することで、衝撃耐力に関する検討も行っている。本実験は、室蘭工業大学における構造物耐衝撃耐荷力評価試験装置を用いて実施した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要および実験ケース

実験に用いた試験体は、アーチ形状を同一とし、衝撃挙動の把握が比較的容易である梁状構造（矩形断面）でアーチ幅が 200 mm の場合（W20 試験体）と、よりトンネル抗口部に近似させるために、実験室の吊

表－２ コンクリートおよび鋼材の力学的特性値

実験ケース	コンクリート			鋼材			
	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポア ソン比	降伏強度 (MPa)		弾性係数 (GPa)	ポア ソン比
				SD345(D13)	SD295(D6)		
W20-S	27.9	24.1	0.23	393	338	206	0.3
W20-II	29.3	25.1	0.23				
W20-IS-3							
W20-IS-4	27.1	21.7	0.24				
W80-S	22.9	22.6	0.23	398			
W80-II							
W80-IS-6	20.6	22.5	0.22				
W80-IS-7							

り上げ能力の限界重量となるアーチ幅が 800 mm の場合 (W80 試験体) の 2 種類の断面形状を基本とした。なお、W20 試験体の場合は通常の断面設計時に仮定する梁状構造を想定しており、W80 試験体の場合は実構造が落石による衝撃を受ける場合を想定したものである。図－1(a) は W20 試験体、図－1(b) は W80 試験体の形状寸法および配筋状況を示している。試験体の断面形状は、実トンネル断面形状の 1/4 程度の縮尺モデルとした。すなわち、アーチの桁高さを 200 mm、アーチ部の内半径を 1,000 mm、側壁部の高さを 500 mm としている。アーチ部軸方向鉄筋には、実トンネルと同程度の主鉄筋比となるように D13 を 120 mm 間隔で配筋し、芯かぶりは 40 mm としている。W80 試験体における配筋筋には、異形鉄筋の最小径である D6 を用い、主鉄筋量の 1/3 以上となるように断面中心線において 80 mm 間隔で配筋している。フーチング形状については、可能なかぎり剛構造にしてアーチ基部の固定条件が保持されるようにすることを前提に考えた。すなわち、W20 試験体におけるフーチングは、トンネルの断面 (幅員) 方向長さ 3,000 mm、トンネルの軸方向幅 600 mm、高さ 400 mm とする矩形体とし、トンネル断面方向に D19、帯鉄筋には D13 を配筋している。W80 試験体の場合には、実験室の吊り上げ能力の限界重量からトンネルの断面方向長さ 3,000 mm、トンネルの軸方向幅 800 mm、高さ 250 mm とする矩形体とし、鋼製のアングルを埋設して W20 試験体のフーチングと同様な剛性の確保に努めている。なお、いずれの試験体においてもフーチング下面には厚さ 9 mm の鋼板を配置している。

表－1 には、本実験に用いた試験体の一覧を示している。試験体数は、アーチ幅および載荷方法を変化させた全 8 体である。表中の試験体名のうち、第一項目の W に付随する数値はアーチ幅 (cm) を示している。第二項目は載荷方法を示しており、S は静載荷、II および IS はそれぞれ衝撃荷重の漸増繰り返し載荷およ

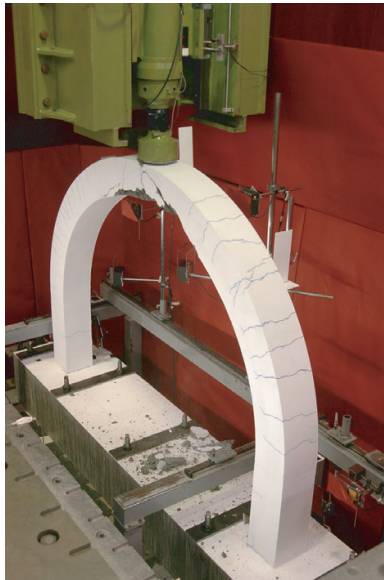
び単一載荷により実験を行ったことを示している。なお、単一載荷の場合には、試験体名の末尾に衝突速度 V (m/s) を付している。表－2 には、各試験体のコンクリートおよび鋼材の力学的特性値を示している。

2.2 衝撃実験と静載荷実験の概要

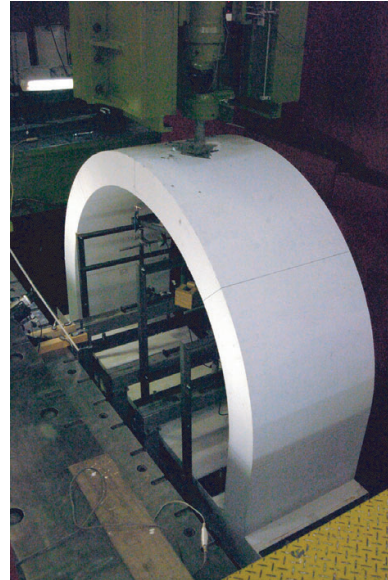
写真－2 には衝撃実験状況を示し、写真－3 には静載荷実験に用いた治具を示している。衝撃実験は、跳ね上がり防止用治具を用いてフーチング部を固定し、W20、W80 試験体ともアーチ部中央点に所定の高さから質量 300 kg の鋼製重錘を自由落下させることにより行っている。なお、重錘は、衝突速度の検定試験を実施の後、設定衝突速度に対応する高さから落下させることとした。衝撃荷重載荷に関しては、前述のように 2 種類の載荷方法を採用することとした。すなわち、初速度および増分速度を 1 m/s と設定して、終局に至るまで繰り返し重錘を落下させる漸増繰り返し載荷法 (以後、繰り返し載荷) および所定の衝突速度で一度だけ載荷する単一載荷方法である。なお、繰り返し載荷実験の場合には、試験体が損傷しコンクリート片が落下した時点もしくは明瞭な押し抜きせん断破壊が生じた時点を終局状態と定義し実験を終了している。

W20 試験体に用いた重錘形状は、載荷点部の直径が 150 mm の円柱状鋼製重錘で、その底部には衝突時の片当たりを防止するための高さ 2 mm のテーパが施されている。一方、W80 試験体の場合には、実構造を想定して重錘の載荷点の影響が自由辺まで波及しないようにするために、W20 試験体の重錘よりも小さい直径 60 mm の鋼製円柱を選定することとした。その底部には、W20 試験体に用いた重錘と同様に衝突時の片当たりを防止するために 2 mm のテーパが施されている。

静載荷実験は、W20、W80 試験体とも衝撃実験時と等しいフーチング固定治具を用いることとし、W20 試

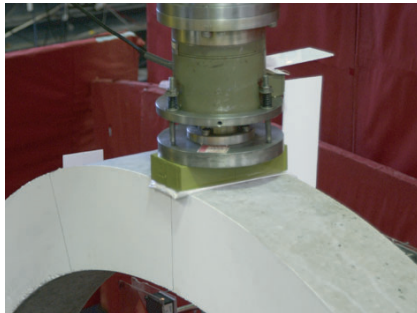


(a) W20-IS



(b) W80-IS

写真－２ 衝撃実験状況



(a) W20-S



(b) W80-S

写真－３ 静載荷実験に用いた治具

験体に関しては、幅方向に均等に載荷するために幅 10 cm の厚鋼版をアーチ部中央にセットし、油圧ジャッキにて加力する方法で行った。また、W80 試験体に関しては、衝撃実験で用いた重錘を用い油圧ジャッキにて加力する方法で行った。

計測項目は、重錘に内蔵された起歪柱型ロードセルによる重錘衝撃力と非接触式レーザ変位計による載荷点変位とした。ただし、載荷点変位は、W20 試験体の場合は載荷点端部アーチ内縁、W80 試験体の場合は載荷点中央部アーチ内縁の変位である。重錘衝撃力用ロードセルの容量と応答周波数は 1,470 kN、DC ～ 4.0 kHz であり、レーザ式変位計の容量と応答周波数は 500 mm、約 1 kHz である。また衝撃実験時の各種応答波形は、サンプリングタイム 0.1 ms でデジタルレコーダにて一括収録を行っている。

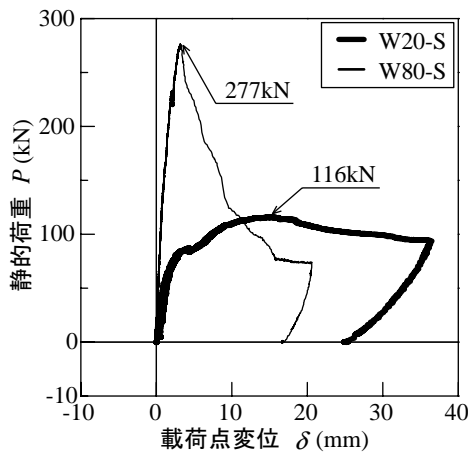
静荷重用のロードセルの容量は 500 kN であり、載荷点変位は、衝撃実験時と同様の変位計を用いて計測している。静載荷実験および衝撃荷重載荷実験終了後

にはアーチ側面部、W80 試験体ではアーチ内縁についてもひび割れをトレースし、ひび割れ分布図を作成している。

3. 静載荷実験結果

3.1 荷重－変位関係

図－２には、静載荷実験時の荷重－載荷点変位の関係を示している。図より、W20-S 試験体の場合には、荷重載荷直後急勾配で立ち上がり鉄筋が降伏に至る。その後、荷重は緩勾配で徐々に上昇してピーク値を迎え、緩やかに減少し終局に至る曲げ破壊型に類似した荷重－変位曲線を示している。一方、W80-S 試験体の場合には、載荷初期に W20-S 試験体よりも大きな剛性勾配を示して立ち上がり、その後急激に減少する押し抜きせん断破壊型の脆性的な破壊性状を示している。このことは、W20-S 試験体がアーチ状の梁構造であるのに対し、W80-S 試験体はアーチ状の版構造に近



図－2 荷重－変位曲線

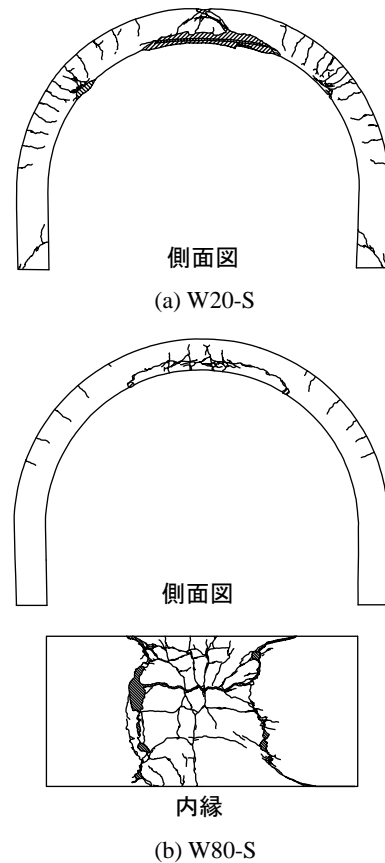
く、載荷面積が小さいことにより版の場合と同様に四方からの拘束効果が発揮されたためと考えられる。

静的最大荷重に着目すると、W20-S 試験体の場合には $P = 116 \text{ kN}$ 程度であるのに対し、W80-S 試験体の場合には $P = 277 \text{ kN}$ 程度の値を示している。すなわち、W80-S 試験体が W20-S 試験体と類似の破壊モードで終局に至るものと仮定する場合には、W20-S 試験体の 4 倍である 464 kN の耐力を示すことが考えられる。しかしながら、実験結果は押し抜きせん断破壊型の脆性的な破壊性状を示し、W20-S 試験体の 2.4 倍程度の静的耐力を有しているのみであることが分かる。

3.2 ひび割れ分布性状

図－3 には W20-S 試験体と W80-S 試験体の静載荷実験終了後のひび割れ分布性状を示している。W20-S 試験体の場合には、載荷点近傍領域を除いたアーチ部の全領域において外縁からの曲げひび割れが発生しており、アーチの円中心点より 45° 上方内縁部では圧壊が生じている。また、載荷点部には斜めひび割れが発生し、かつ大きく開口しており、押し抜きせん断破壊に至っていることが確認できる。さらにアーチ中央内縁かぶり部は広い領域に渡って剥落している。これより、図－2 の荷重－変位曲線の分布は、荷重の増加とともにアーチ全体に曲げひび割れが発生し、その後載荷点部が押し抜きせん断破壊に至るものの、主鉄筋の剛性によりある程度荷重を保持した状態で徐々に変形が進行したものと推察される。

一方、W80-S 試験体の場合には、側面に発生する曲げひび割れ分布が W20-S 試験体の場合に比して著しく減少していることが分かる。これは、載荷盤が直径 150 mm から 60 mm に減少したことによって、模型がより 3 次元的に挙動していることが推察される。



図－3 ひび割れ分布性状（静載荷実験終了後）

また、載荷点近傍の下縁かぶり部が広く剥離剥落する傾向を示している。これは、押し抜きせん断コーンの形成とともにアーチ内縁主鉄筋のダボ作用によって主鉄筋に沿って割裂ひび割れが発生したことによるものと推察される。また、アーチ内縁に発生したひび割れ分布を見ると、押し抜きせん断破壊に起因した載荷点中心を囲むようなひび割れから、幅方向全体の曲げひび割れの発生に推移していることが推察される。ただし、曲げひび割れはせん断コーンが形成されて除荷状態に至り、変位が進行した状態下で発生したものと推察される。

4. 衝撃実験結果

4.1 各種応答波形

図－4 には、W20 試験体の重錘衝撃力波形、載荷点変位波形を示している。重錘衝撃力波形は、載荷方法や衝突速度に関わらずほぼ同様な性状であり、衝撃初期の振幅が大きく継続時間の短い第 1 波と、振幅が小さく継続時間がより長い第 2 波から構成された性状を示していることが分かる。最大重錘衝撃力に着目すると、衝突速度が増加するに従って重錘衝撃力も増加する傾向にあることが分かる。

変位波形の性状は、全ての実験ケースにおいて減衰

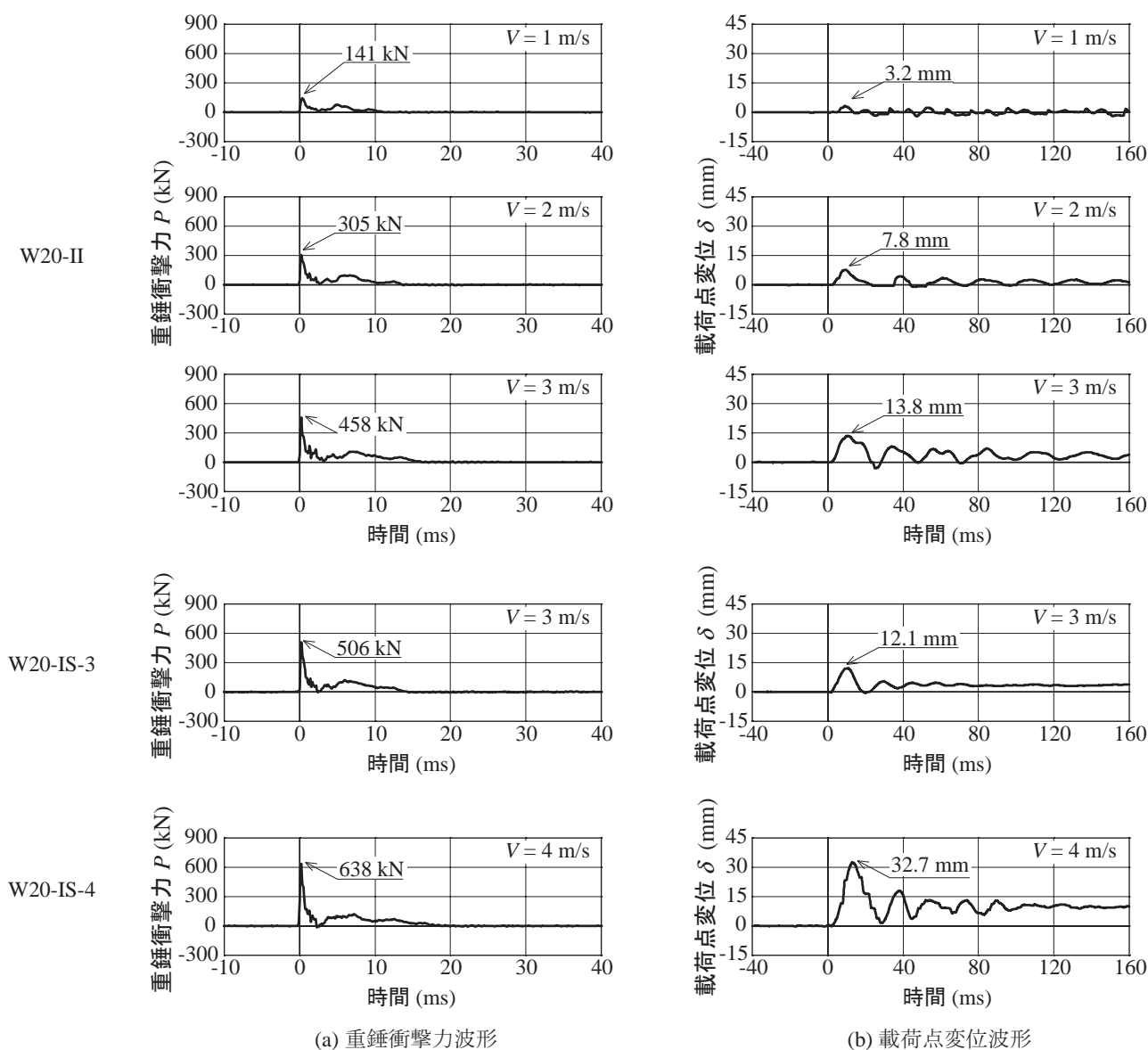


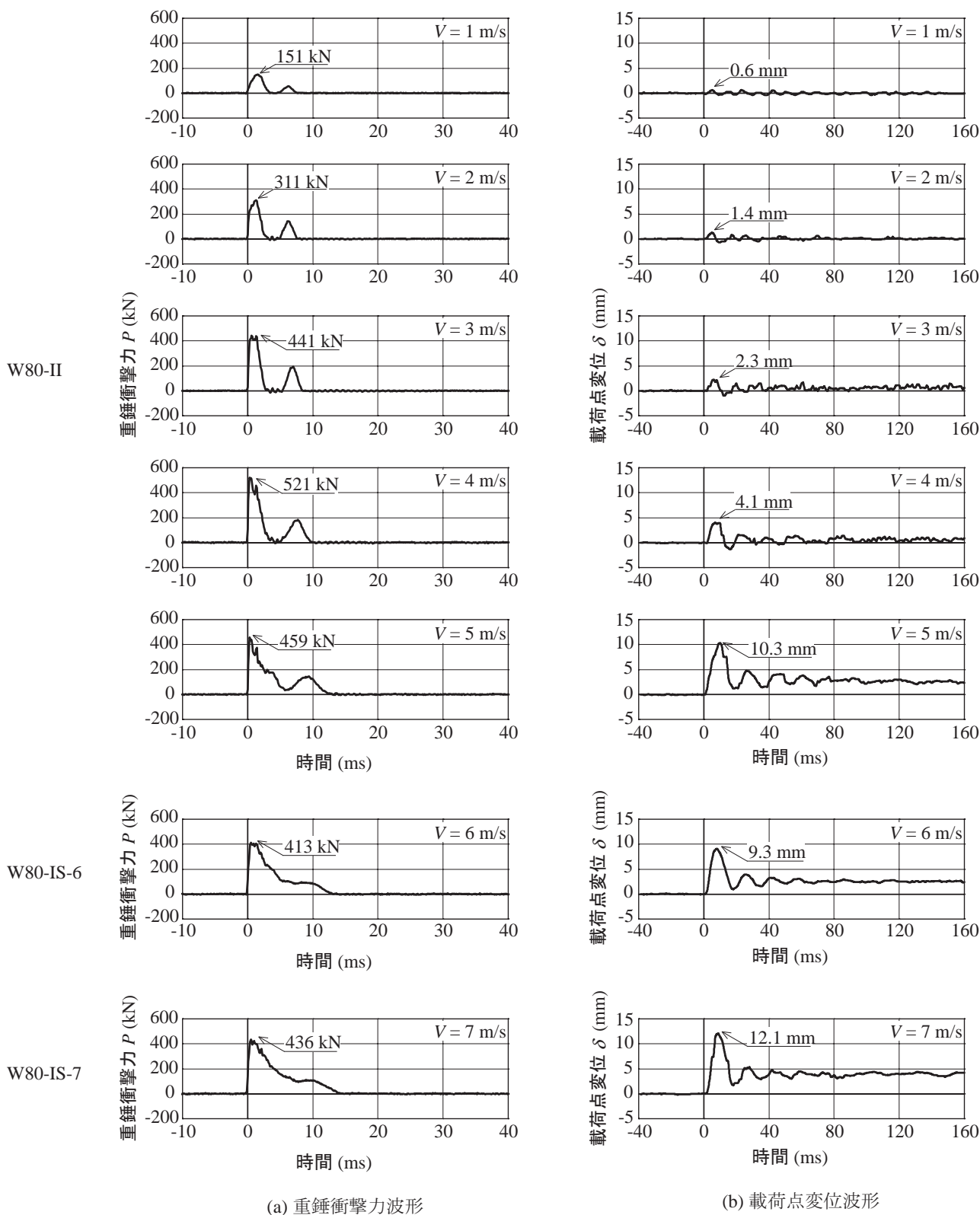
図-4 各種応答波形 (W20)

振動を示している。衝突速度 $V = 2 \text{ m/s}$ までは、残留変位がほとんど生じていないことが分かる。しかしながら、 $V = 3 \text{ m/s}$ 以上の場合には、荷重方法によらず最大変位が増加し、残留変位も大きくなる傾向を示している。このことは、アーチ構造の損傷が進行していることを暗示している。

図-5には、W80試験体の重錘衝撃力波形、荷重点変位波形を示している。重錘衝撃力波形は、全ての実験ケースにおいて大小2つの卓越した波から構成されていることが分かる。第2波目は、重錘が第1波目の衝突によって著しく減速した状態下において、第1波目の衝突によって局所的に損傷を受けているアーチ梁と再衝突することにより生じたものと推察される。 $V = 5 \text{ m/s}$ 以降では、第1波と第2波が繋がった波形を示しており、また単一荷重における $V = 6, 7 \text{ m/s}$ で

は第2波のピークが消失していることが分かる。ここで、単一荷重における $V = 6, 7 \text{ m/s}$ では、重錘のアーチ部の衝突面の損傷が顕在化することにより荷重点部の復元力が著しく低下したことによるものと推察される。衝撃初期の最大重錘衝撃力は、繰り返し荷重における $V = 4 \text{ m/s}$ までは増加する傾向にあるものの、 $V = 5 \text{ m/s}$ では減少している。単一荷重における $V = 6, 7 \text{ m/s}$ においても繰り返し荷重における $V = 4 \text{ m/s}$ の値よりも小さく示されていることが分かる。このことは、押し抜きせん断破壊に至るまでは繰り返し荷重による損傷の蓄積効果が小さいことを示唆している。

変位波形は、いずれもW20試験体と同様な正弦波状の波形性状が卓越し、 $V = 4 \text{ m/s}$ までは減衰自由振動状態を呈し、残留変位がほとんど生じていないことが分かる。しかしながら、 $V = 5 \text{ m/s}$ 以上の場合には



図－5 各種応答波形 (W80)

最大変位は増加し残留変位も生じていることより、損傷が進行していることを示唆している。

W80 試験体と W20 試験体の最大応答値に着目すると、最大重錘衝撃力は $V = 3 \text{ m/s}$ まではほぼ速度に比

例して増加していることが分かる。また、 $V = 3 \text{ m/s}$ における最大変位は、W20 試験体が $\delta = 13.8 \text{ mm}$ であるのに対して W80 試験体が $\delta = 2.3 \text{ mm}$ と 1/6 程度の値を示している。これは、W20 試験体の場合には梁

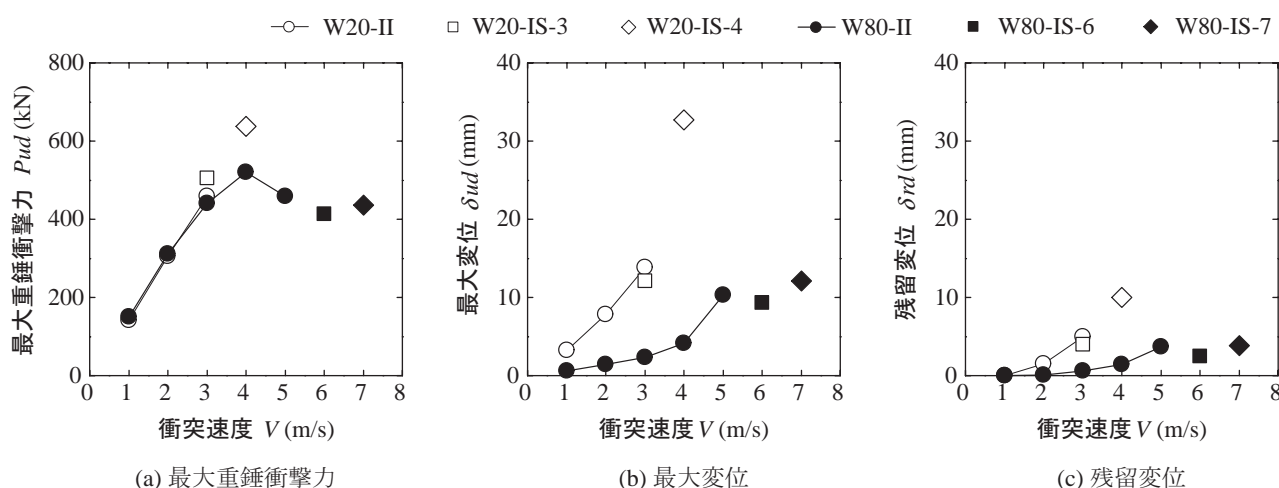


図-6 各種応答値と衝突速度の関係

構造としての曲げ破壊型の性状を示しているのに対して、W80 試験体の場合は W20 試験体の場合の 4 倍の曲げ剛性を有していることに加え、W80 試験体の場合における重錘の荷重部直径が 60 mm と W20 試験体の場合の 1/2 以下であることにより、版の押し抜きせん断破壊的な挙動を示すことによるものと推察される。

4.2 各種応答値と衝突速度の関係

図-6 には、W20 試験体、W80 試験体それぞれの (a) 最大重錘衝撃力 P_{ud} 、(b) 最大変位 δ_{ud} および (c) 残留変位 δ_{rd} と衝突速度 V との関係を示している。ただし、繰り返し荷重実験結果に関しては初期荷重時からの累積残留変位を示している。(a) 図の最大重錘衝撃力分布より、W20 試験体の最大重錘衝撃力は、本実験の終局限界まで荷重方法に関わらず衝突速度 V の増加に伴ってほぼ線形に増大している。一方、W80 試験体では繰り返し荷重における $V = 4$ m/s が最も大きく、繰り返し荷重における $V = 5$ m/s と単一荷重における $V = 6, 7$ m/s とは、ほぼ同程度の値を示している。このことは、W20 試験体の場合に衝突速度が大きくなった場合においても衝撃力が軸圧縮力に変換されるアーチ効果が発揮され最大重錘衝撃力が増加することに対して、W80 試験体の場合には荷重面積が小さいことにより荷重点近傍の 3 次元応力状態に起因して押し抜きせん断面が形成され、脆性的な破壊が生じることによりアーチ効果が十分発揮されず、ほぼ同程度の最大重錘衝撃力を示したものと考えられる。

(b) 図の最大変位分布より、W20 試験体の最大変位は、 $V = 3$ m/s まではほぼ線形に増大しているものの、 $V = 4$ m/s では急激に増加していることが分かる。これは、単一荷重における $V = 4$ m/s では後述するひび割れ分布性状からも明らかなように、荷重点近傍部を除いたアーチ部の全領域において曲げひび割れが発生

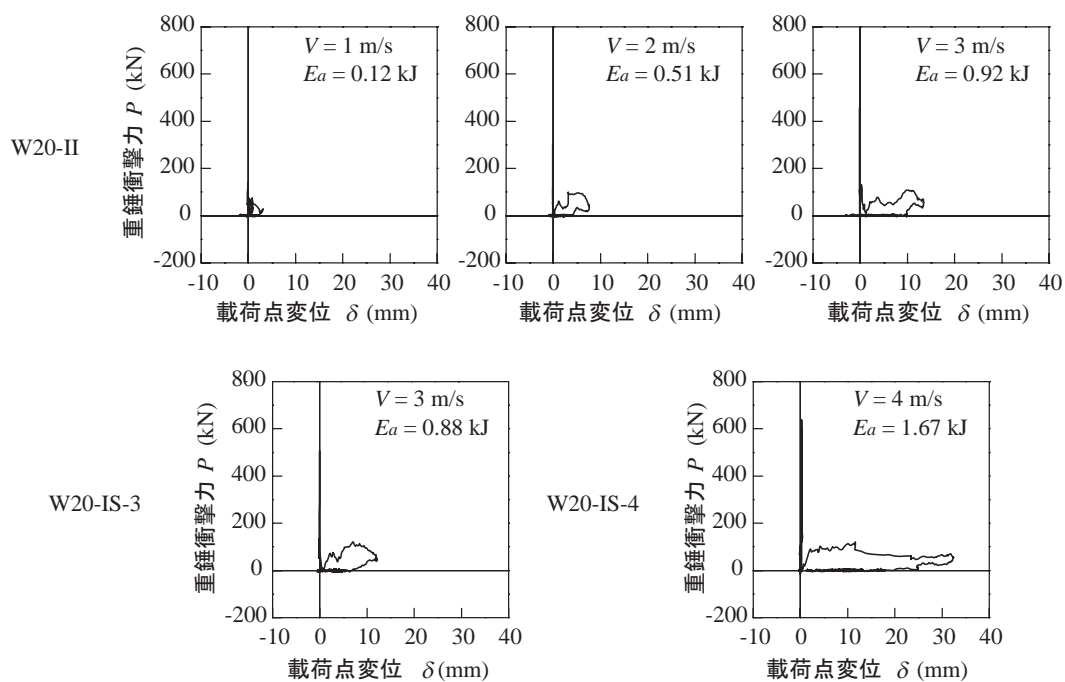
し、荷重点直下の内側かぶりコンクリートも剥落していることにより、大きな変位が発生したものと考えられる。一方、W80 試験体の場合には、繰り返し荷重の最終衝突速度 $V = 5$ m/s において最大変位の急激な増加が見受けられるものの、単一荷重における $V = 6, 7$ m/s では繰り返し荷重における $V = 1 \sim 4$ m/s の延長線にあることが分かる。

(c) 図の残留変位分布より、残留変位と衝突速度の関係は (b) 図とほぼ同様な性状を示している。また、W20 試験体における繰り返し荷重の最終衝突速度 $V = 4$ m/s の残留変位は、 $\delta_{rd} = 10$ mm 程度と大きな値を示しているが、それ以外の W20 試験体および W80 試験体の場合には $\delta_{rd} = 5$ mm 程度以下の値となっている。

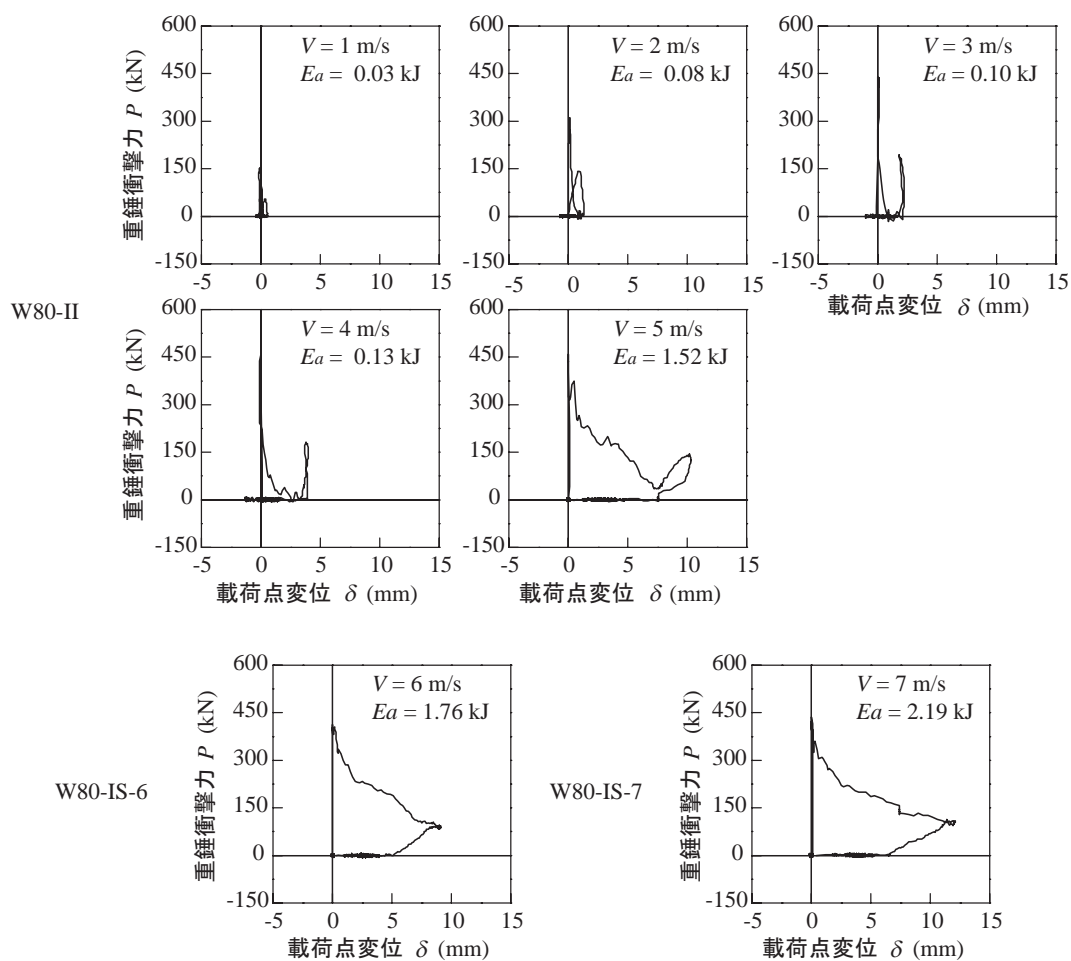
これらのことから、W20 試験体では $V = 4$ m/s で終局に至っているものと判断可能である。また、W80 試験体では $V = 7$ m/s においても残留変位の急増は見受けられないものの、後述するひび割れ分布性状からも明らかなように、押し抜きせん断面が形成され脆性的な破壊が生ずる傾向にあるものと推察される。

4.3 重錘衝撃力-荷重点変位履歴曲線

図-7 には、W20 試験体、W80 試験体それぞれの重錘衝撃力-荷重点変位履歴曲線を示している。W20 試験体、W80 試験体ともに衝突速度 $V = 1$ m/s の場合は弾性的な挙動を示しており、エネルギーがほとんど吸収されていないことが分かる。W20 試験体では、衝突速度の増加に対応してループの面積も増加し、より大きなエネルギーを吸収していることが分かる。また、W80 試験体では、W20 試験体と同様に衝突速度が大きくなるに従いループ面積が増大していることが分かる。しかしながら、W80 試験体は W20 試験体と異なり、衝突速度 $V = 5$ m/s 以上においてせん断破壊

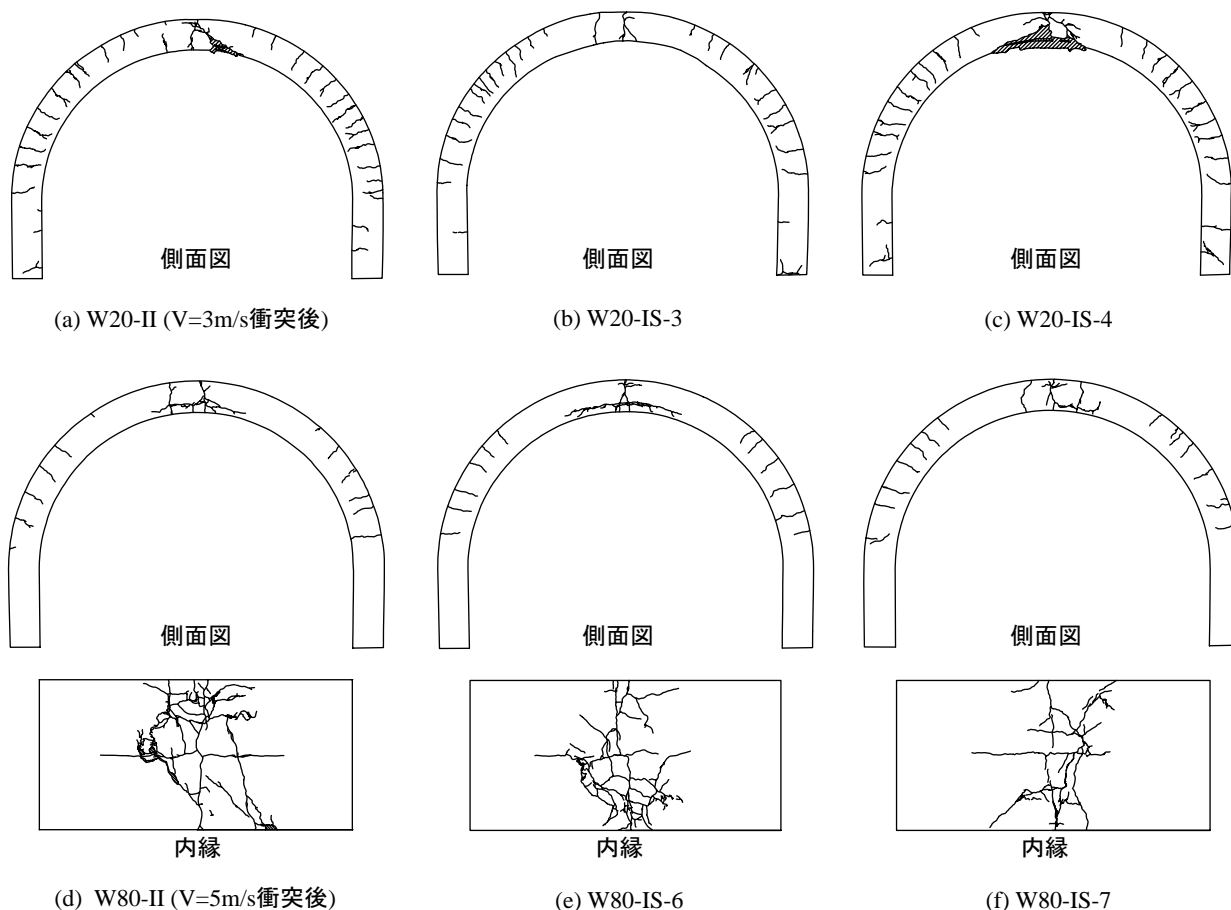


(a) W20 試験体

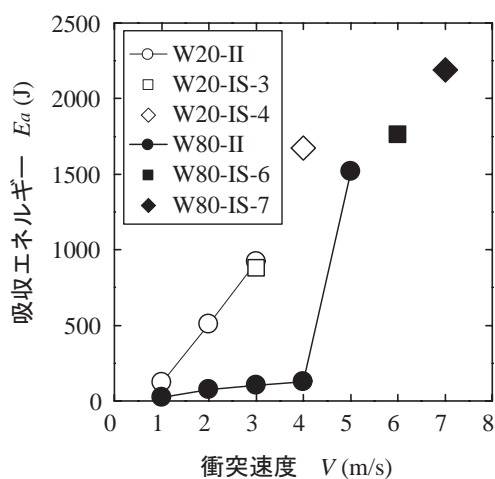


(b) W80 試験体

図-7 重錘衝擊力-載荷点変位履歴曲線



図－9 ひび割れ分布性状（衝撃実験終了後）



図－8 吸収エネルギーと衝突速度の関係

型特有の三角形の履歴曲線を示していることが分かる。

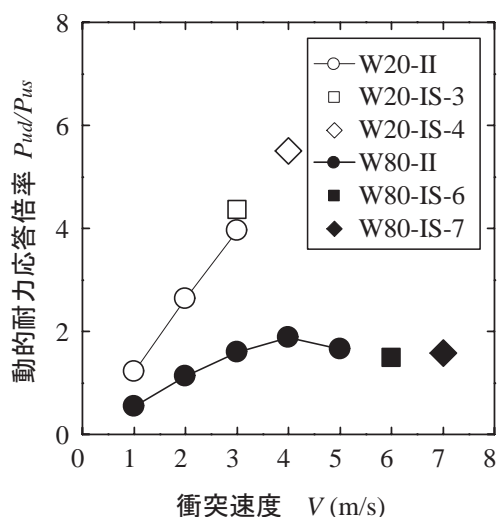
図－8 には、W20 試験体、W80 試験体それぞれの重錘衝撃力－荷点変位履歴曲線を積分して求められる吸収エネルギーと衝突速度の関係を示している。図より、W20 試験体では荷点方法に関わらず、衝突速度の増加に伴い吸収エネルギーも増加していることが分かる。また、単一荷点における $V = 4 \text{ m/s}$ における

吸収エネルギーが急増していることから、この時点で終局に至っているものと推察される。W80 試験体では、繰り返し荷点の $V = 1 \sim 4 \text{ m/s}$ までは、吸収エネルギーは小さいもののほぼ線形的に推移していることが分かる。しかしながら、 $V = 5 \text{ m/s}$ 以降において吸収エネルギー量が急激に増加している。これは、押し抜きせん断面の形成によるものと考えられる。

ここで、W80 試験体の $V = 5 \sim 7 \text{ m/s}$ の場合に注目すると、衝突速度の増加に伴い吸収エネルギーが急激に増加していることが分かる。しかしながら、図－6 からも明らかのように、 $V = 5 \text{ m/s}$ 以降では、最大変位、残留変位ともにほぼ同程度の値を示している状況下での吸収エネルギーの急激な増加は、押し抜きせん断面の形成を示唆している。このことから、版状に近い構造の場合には、ある衝突速度以上では重錘衝撃力や残留変位の増加が見られず、せん断破壊面が形成され脆性的な破壊が発生するものと推察される。

4.4 ひび割れ分布性状

図－9 には、衝撃実験終了後におけるひび割れ分布性状を示している。ただし、繰り返し荷点試験体（W20-II、W80-II）については、最終衝突速度による実



図－10 動的耐力応答倍率と衝突速度の関係

験終了後のひび割れ分布性状を示している。図より、W20 試験体の (a)～(c) に着目すると、全ての試験体において、載荷点近傍領域を除いたアーチ部分外周面に法線方向のひび割れが発生している。また、W20-II-3 および W20-IS-4 において基部近傍に斜めひび割れが発生している。また、静載荷実験ではアーチの円中心点から 45° 上方内縁部で圧壊が生じているのに対し、衝撃実験終了後はこの種の圧壊は見受けられない。さらに、ひび割れの発生範囲は静載荷実験の場合に比較して広範囲に分散しており損傷の程度も小さい。

W80 試験体の (d)～(f) に着目すると、載荷点近傍の左右 45° の領域を除いたアーチ部の外周面には法線方向のひび割れが発生しているものの、W20 試験体に比較するとひび割れの数が少ないことが分かる。これは、W20 試験体に比べアーチ幅が広いことから、押し抜きせん断型の破壊性状が卓越したことに起因するものと考えられる。また、W80 試験体のアーチ内縁ひび割れ状況に着目すると、載荷点を中心とした円状の押し抜きせん断面が形成されており、静載荷実験終了後のひび割れ状況と類似している。しかしながら、ひび割れ状況は静載荷実験結果とは異なり広範囲に分布していない。また、アーチ幅方向の大きなひび割れも発生していない。

以上のことから、W20 試験体の場合には静載荷時に比較してひび割れが広範囲に分布しており損傷の程度も小さい。一方、W80 試験体の場合にはひび割れが W20 試験体と同様に広範囲に分布しているものの、最終的には載荷点部の押し抜きせん断破壊で終局に至るものと推察される。

5. 衝撃実験結果と静載荷実験結果との比較

図－10 には、動的耐力応答倍率と衝突速度の関係

を示している。なお、ここで、動的耐力応答倍率は、各試験体の衝撃実験における最大重錘衝撃力 P_{ud} を静載荷実験における最大荷重 P_{us} で除した値として定義した。

図より、W20 試験体に着目すると、載荷方法に関わらず衝突速度の増大に伴い、動的耐力応答倍率も増大し、単一載荷における $V = 4 \text{ m/s}$ では 5.5 倍程度の値を示している。また、W80 試験体に着目すると、 $V = 4 \text{ m/s}$ までは衝突速度の増大に伴い動的耐力応答倍率も増加しているが、 $V = 4 \text{ m/s}$ 以降は類似の 1.5 倍程度の値を示している。また、 $V = 4 \text{ m/s}$ において、W20 試験体に比較すると、W80 試験体の動的耐力応答倍率は 30 % 程度まで減少している。このことは、W80 試験体のように押し抜きせん断型の破壊性状を示す場合にはアーチ効果が発現しない可能性を示唆している。

6. まとめ

本研究では、RC 製アーチ構造に関する耐衝撃挙動を把握することを目的に、小型 RC 製アーチ模型に関する重錘落下衝撃実験および静載荷実験を実施した。衝撃実験は、アーチの奥行方向の幅を変化させ、それぞれの試験体に関して重錘の衝突速度を漸増させた繰り返し載荷と単一載荷実験を行った。衝撃応答特性に関する検討は、各種応答波形（重錘衝撃力、載荷点における応答変位）およびひび割れ分布性状に着目して行った。また、衝撃実験と同一の試験体を用いた静載荷実験も行い、衝撃実験結果と静載荷実験結果を比較することで、衝撃耐力に関する検討も行った。検討結果を整理すると、以下のように示される。

- (1) アーチ構造の梁形状の場合には、静載荷実験結果では載荷点部斜めせん断ひび割れが発生するものの、アーチの円中心点より 45° 上方内縁部が圧壊し曲げ破壊が卓越して終局を迎える。一方、版形状に近い場合には静載荷実験および衝撃荷重載荷実験結果ともに押し抜きせん断型の脆性的な破壊性状を示す。
- (2) 版状に近い構造の場合には、ある衝突速度以上では重錘衝撃力や残留変位の増加が見られず、載荷点近傍に押し抜きせん断破壊面が形成され脆性的な破壊が発生する。
- (3) また、衝撃実験では静載荷実験に比較して、ひび割れが広範囲に分散して発生しているが、最終的には載荷点近傍の局所的な領域に損傷が集中して押し抜きせん断破壊型で終局に至る。
- (4) 実構造のようにアーチ幅が 6～8 m 程度と十分に大きい状態で落石径のように載荷点部直径が 1 m 程度と仮定する場合には、押し抜きせん断破

壊が卓越して終局に至る傾向を示すものと考えられる。

本実験により、トンネル坑口部等の RC アーチの版構造は、落石衝撃力を受ける場合には押し抜きせん断型の破壊モードを示し、アーチ効果が十分に発揮されない可能性のあることが明らかとなった。これより、この種の構造物に関して落石から人命を守りかつ道路交通網を確保するためには、RC 製アーチ構造形式のトンネル坑口部における耐衝撃性の確認と、耐衝撃性が十分でない場合には適切な耐衝撃性向上のための対策を講ずることが必要であるものと考えられる。今後は、トンネルの内面補強法や落石衝撃力を緩和する緩衝構造の開発、それらの設計法の確立に向け研究を推進したいと考えている。

謝辞：本論文をまとめるに当たり、室蘭工業大学大学

院建設システム工学専攻構造力学研究室の伊勢谷真樹君に多大なるご支援を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，2000.6
- 2) 川瀬良司，今野久志，牛渡祐二，岸 徳光：各種緩衝材を設置した場合のトンネル坑口部の落石衝撃挙動解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.2，pp.871-876，2003.6
- 3) 川瀬良司，岸 徳光，今野久志，岡田慎哉：小型 RC アーチ梁模型の衝撃応答特性に関する数値解析的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，pp.847-852，2006.6

(2006 年 9 月 11 日受付)