

(11) RC アーチ梁の衝撃応答特性に関する数値解析的検討

A NUMERICAL ANALYSIS ON IMPACT RESPONSE OF RC ARCH BEAMS

西弘明*, 川瀬良司**, 岸徳光***, 今野久志****, 岡田慎哉*****

*博(工) 寒地土木研究所 総括主任研究員 寒地構造チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

**博(工) 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条3丁目1-34)

*****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条3丁目1-34)

キーワード：RC製アーチ構造形式，衝撃応答特性，帯鉄筋，三次元弾塑性有限要素解析
(RC arch-type structure, impact response, lateral tie, three-dimensional elasto-plastic finite element method)

1. はじめに

我が国の道路は、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いことから、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）の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実状である。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、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。

このような観点より、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、今後実施予定である小型RCアーチ梁模型（以後、アーチ梁）に関する重錘落下衝撃実験および静載荷実験を対象とした三次元弾塑性衝撃応答解析および三次元静的解析を実施した。本研究では、アーチ梁に衝突させる重錘の载荷位置や衝突速度および帯鉄筋の有無が衝撃応答特性に与える影響について検討を行うとともに、別途実施した静的解析との比較により衝撃耐力に関する検討を行うこととする。衝撃応答解析に関する検討は、各種応答波形（重錘衝撃力、アーチ基部断面の応答軸力、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。なお、弾塑性衝撃応答解析には、陽解法に基づく非線形動的構造

解析用汎用コードLS-DYNA¹⁾を、静的解析には構造解析用汎用コードDIANAを用いている。

2. 数値解析の概要

2.1 アーチ梁の概要および解析ケース

図-1には、帯鉄筋を有する場合のアーチ梁の形状寸法を示している。実験用アーチ梁は、実トンネル断面形状の1/4程度の縮尺模型とした。すなわち、アーチ梁の断面は200×200mmの正方形とし、アーチ部の内半径を1,000mm、側壁部の高さを500mm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4本用い、芯かぶ

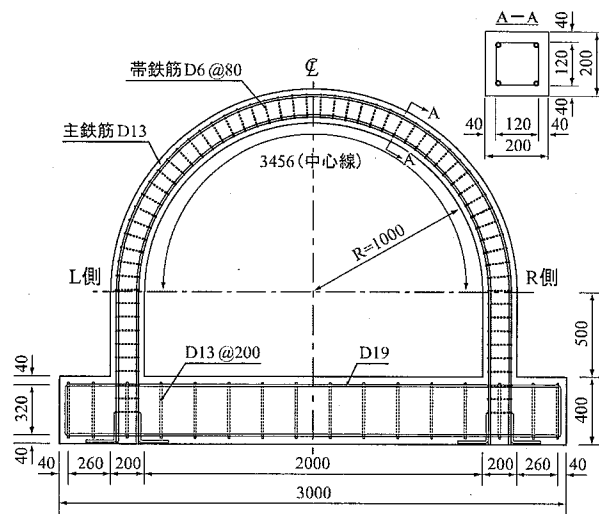


図-1 アーチ梁の形状寸法（帯鉄筋：有）

表-1 数値解析ケース一覧

解析ケース名	帯鉄筋の有無	荷重位置	重錘衝突速度 (m/s)
N-P	無	90°	3, 4, 5, 6, 7, 8, 9
N-I		45°	4, 6, 8
S-P	有	90°	3, 4, 5, 6, 7, 8, 9
S-I		45°	4, 6, 8

表-2 解析に用いた物性値一覧

材料	密度 ρ (ton/m ³)	弾性係数 E (GPa)	ポアソン比 ν
コンクリート	2.35	23.5	0.167
鉄筋	7.85	206	0.3
重錘	10.39	206	0.3

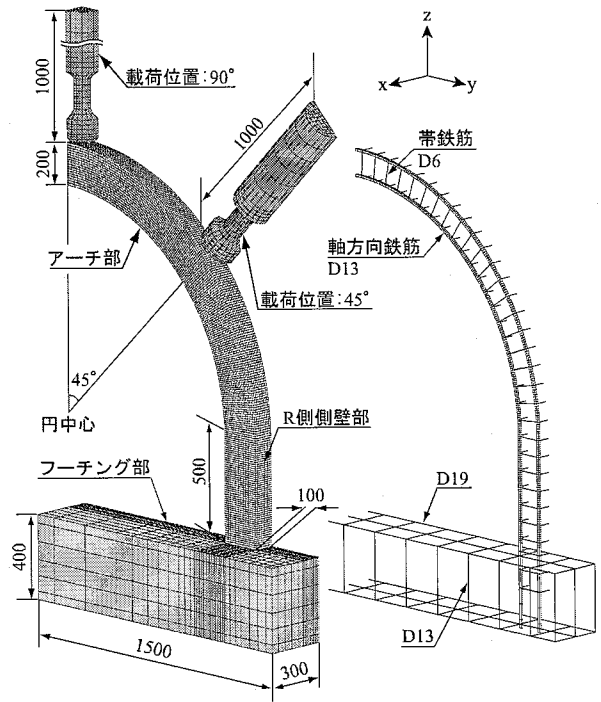
りは 40 mm としている。帯鉄筋には異形鉄筋の最小径である D6 を使い、断面中心線において断面有効高さの 1/2 である 80 mm 間隔で配筋している。フーチング形状については、可能なかぎり剛構造にしてアーチ基部の固定条件が保持されるようにすることを前提に考え、トンネル断面方向長さ 3,000 mm、トンネル軸方向幅 600 mm、高さ 400 mm とする矩形体とした。フーチングの配筋は、トンネル断面方向に D19、帯鉄筋には D13 を用いている。荷重方向は、アーチ円中心に対して鉛直方向の場合と斜め 45 度方向の場合の 2 種類とした。

表-1 には、本数値解析における解析ケース一覧を示している。表中、解析ケース名の第一項目は帯鉄筋の有無 (N:無し, S:有り) を、第二項目はアーチの円中心に対する荷重方向 (P:鉛直, I:斜め 45 度) を示している。数値解析で用いた重錘衝突速度は、鉛直荷重の場合が、 $V = 3.0 \text{ m/s}$ から 1.0 m/s ごとに増加させ 9.0 m/s までとし、アーチ円中心に対して斜め 45 度荷重の場合には、 $V = 4.0, 6.0, 8.0 \text{ m/s}$ とした。

2.2 数値解析モデルおよび解析条件

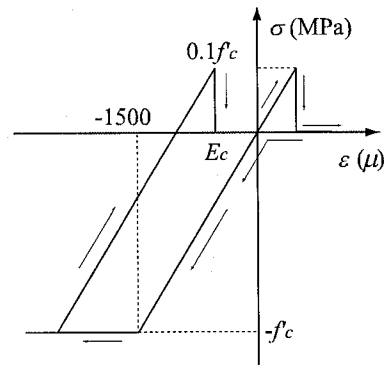
図-2 には、本数値解析で用いた鉛直荷重時における要素分割モデルに斜め 45 度荷重の重錘位置と形状を付加し示している。また、配筋モデルも併せて示している。

アーチ部の要素分割に関しては、ひび割れ分布性状の検討をより精度よく行うために要素の 1 辺が約 10 mm になるように分割している。各要素は、コンクリート、重錘および軸方向鉄筋には 8 節点の三次元固体要素を、それ以外の鉄筋要素には梁要素を用いてモデル化している。積分点に関しては 1 点積分を基本としているが、軸方向鉄筋は断面方向に 1 要素でモデル化しているため、解析精度を考慮し 8 点積分として

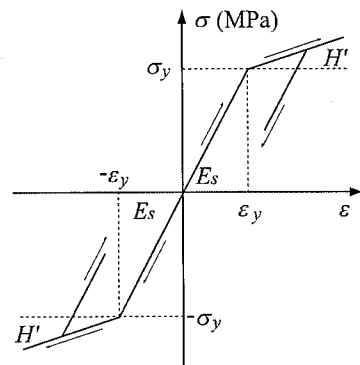


(a) 要素分割モデル (b) 配筋モデル

図-2 要素分割モデルおよび配筋モデル



(a) コンクリート



(b) 鉄筋

図-3 各材料の応力-ひずみ関係

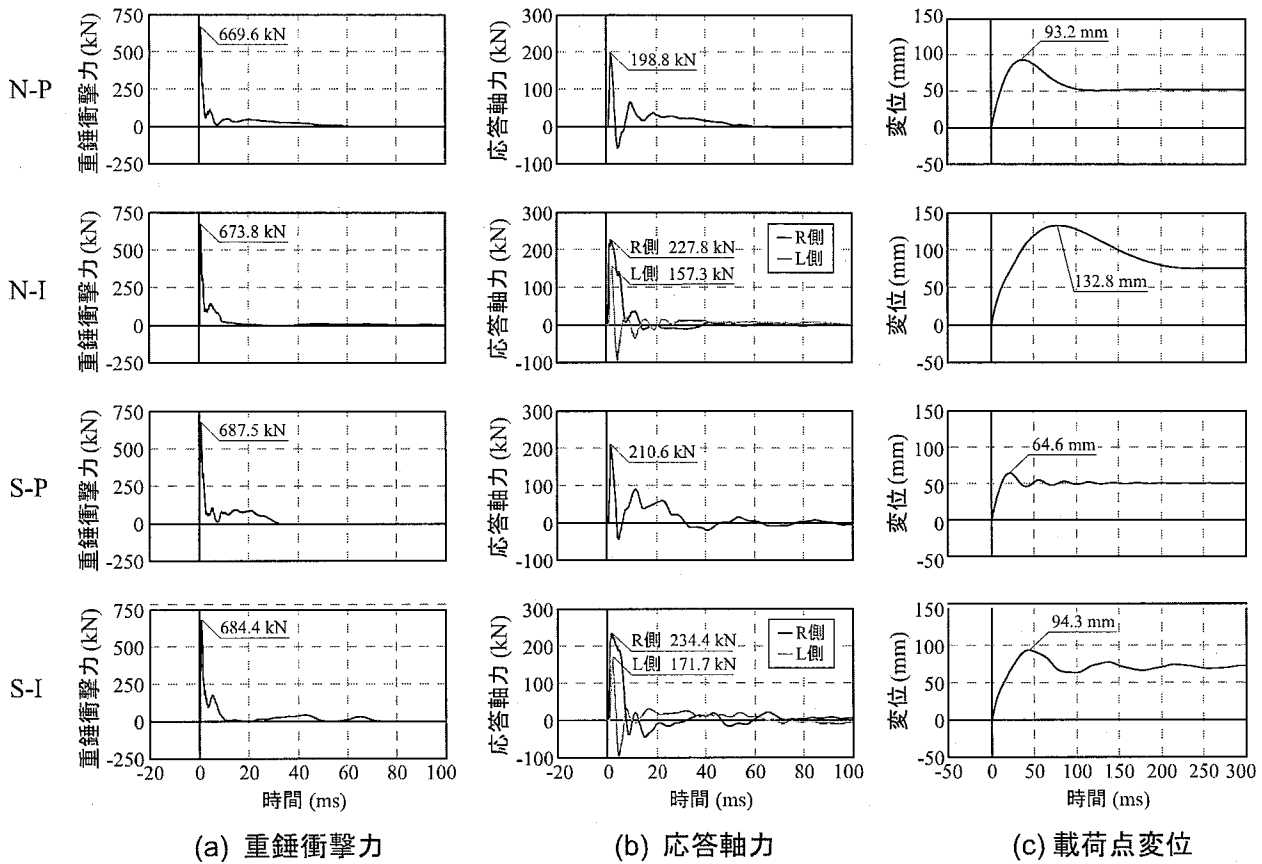


図-4 各種応答波形分布 (V = 8 m/s)

いる。解析に用いた要素分割数に関しては、鉛直荷荷の場合には対称性を考慮して1/4モデルを用いることとした。総節点数は46,815であり、総要素数はN試験体とS試験体でそれぞれ39,954、40,698である。また、斜め45度荷荷の場合には、荷重が偏心荷荷状態となるため軸方向のみの対称性を考慮して1/2モデルを用いることとした。総節点数は93,185であり、総要素数はN試験体とS試験体でそれぞれ79,908、81,398である。境界条件として、フーチング底面は完全固定、モデルの対称境界は全て面対称を考慮している。

コンクリートと重錘の要素間には面と面との接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義しており、衝撃力は衝突位置に配置した重錘に初速度を入力することにより与えている。なお、重錘の質量は300 kgとしている。

質量に比例する粘性減衰定数は、既往の研究²⁾と同様に、アーチ梁の最低次固有振動数に対して0.5%と設定した。なお、本数値解析は、重錘がアーチ頂部に衝突した時点をも0 msとし、アーチ試験体の挙動が定常状態に至るまでの300 ms間について実施した。

2.3 材料物性モデル

図-3(a)には、コンクリートに関する等価1軸応

力-ひずみ特性を示している。圧縮側に関しては、相当ひずみが1,500 μ に達した状態でコンクリートが降伏するものと仮定し、完全弾塑性体のバイリニア型にモデル化した。本研究では圧縮強度 f'_c を降伏応力とし、 $f'_c = 21$ MPaを用いている。引張側に関しては、応力が引張強度に達した段階で引張応力を伝達しないカットオフを仮定している。なお、引張強度は既往の研究²⁾の場合と同様に圧縮強度の1/10と仮定している。

図-3(b)には、鉄筋に関する等価1軸応力-ひずみ特性を示している。アーチ部の軸方向鉄筋および帯鉄筋に用いた物性モデルは、降伏後の塑性硬化係数 H' を弾性係数 E_s の1%とする等方弾塑性体モデルとした。降伏応力 σ_y に関しては、軸方向鉄筋、帯鉄筋でそれぞれ $\sigma_y = 345$ MPa、295 MPaを用いた。また、弾性係数 E_s およびポアソン比 ν_s には、表-2に示されている値を採用している。なお、コンクリートおよび鉄筋要素の降伏判定は、von Misesの条件式に従うこととした。

フーチング部のコンクリートおよび鉄筋に関しては、応答最大応力が弾性範囲内であるものと推察されることより表-2の物性値を用い、解析時間を短縮させるために弾性体と仮定して解析を行った。

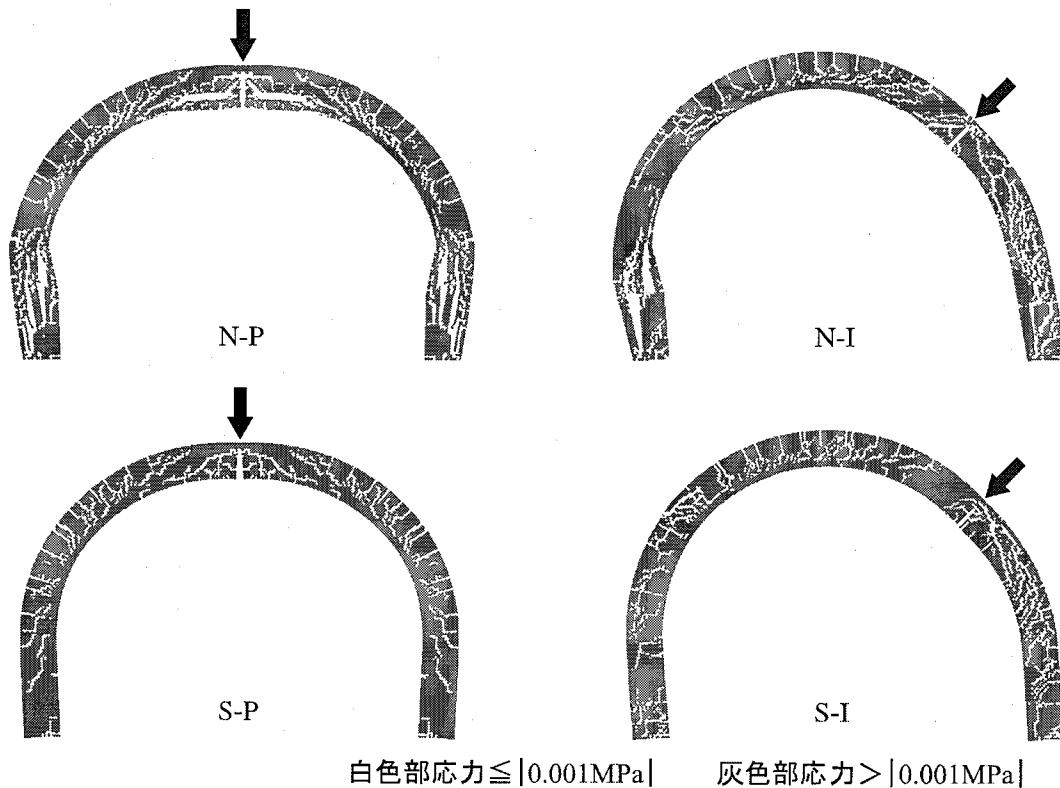


図-5 最大変位時における第一主応力分布 ($V = 8 \text{ m/s}$)

3. 数値解析結果

3.1 各種応答波形

図-4には、衝突速度が $V = 8.0 \text{ m/s}$ の場合における各種応答波形分布を示している。図-4(a)には重錘とアーチ部コンクリートの要素間における接触反力を用いた重錘衝撃力波形分布を、図-4(b)にはアーチ基部断面の要素毎に発生する z 方向応力を集積して評価した応答軸力波形分布を、図-4(c)にはアーチ梁の重錘衝突位置における荷重方向の変位波形分布を示している。なお、図中、各波形とも正荷重時の値を正として整理している。また、重錘衝撃力および応答軸力に関しては 100 ms 間を拡大して示している。

図-4(a)より、重錘衝撃力の波形性状は、解析ケースにかかわらず重錘衝突初期に最大値を示し、その後の振幅が小さく継続時間の長い波形性状を示している。最大重錘衝撃力について比較すると、N-P/I は S-P/I に比べ僅かに小さな値を示しているが、荷重方向の違いによる顕著な差は生じていない。

図-4(b)より、応答軸力の波形性状は、重錘衝撃力波形と同様に、いずれのケースも重錘衝突初期に正弦波状の波形を示し、その後三角波状の波動と若干周波数の高い減衰波動成分から構成された分布を示している。波形継続時間に着目すると、N-P/I は重錘衝突直

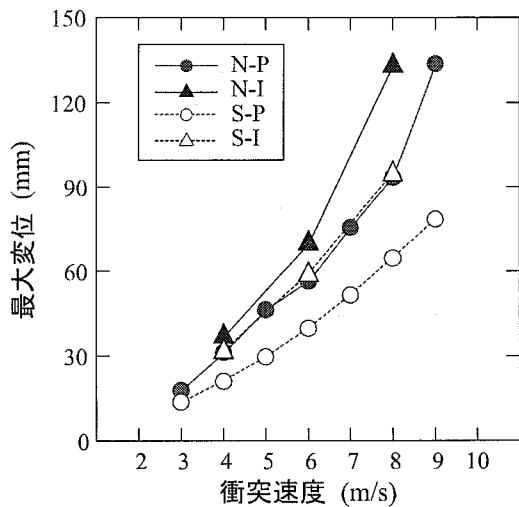
後から 60 ms 程度で波動が収束するのに対し、S-P/I は微少な振幅が 100 ms 程度まで継続して発生している。最大応答軸力に着目すると、N-P は S-P に比べ若干小さな値を示している。また、N/S-I の図-1に示すL側とR側の応答値の差は、N-I が S-I より大きい。これは、帯鉄筋が配筋されていない場合には帯鉄筋を配筋する場合に比べて荷重点近傍の損傷が著しくなることから、衝撃エネルギーがその損傷部で大きく吸収され、応力波の減衰もより大きくなるためと推察される。

図-4(c)より、荷重点変位の波形性状は、N試験体の場合には、除荷後振動状態に至らず過減衰的な傾向を示しており、剛性が著しく低下している状態が推察される。これに対して、S試験体の場合には、除荷後も正弦減衰型の振動性状を示しており、N試験体に比較して損傷度がより小さいことが分かる。

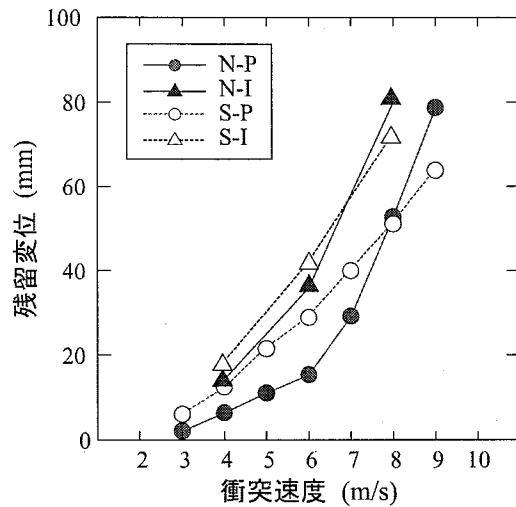
最大応答変位に着目すると、S-P/I は N-P/I に比べ $30 \sim 40 \%$ 程度低減されていることが分かる。

3.2 ひび割れ分布性状

図-5には、全ケースの衝突速度 $V = 8.0 \text{ m/s}$ の荷重点最大変位時におけるアーチ部の第一主応力分布図を示している。コンクリートに対して仮定した材料構成則に従えば、図中の白色領域(コンクリート要素の第一主応力が $-0.001 \sim 0.001 \text{ MPa}$ の範囲)はひび割れ



(a) 最大変位-衝突速度関係



(b) 残留変位-衝突速度関係

図-6 最大変位, 残留変位-衝突速度の関係

が発生しているか応力零近傍の要素であることを示しており、最大応答時点ではひび割れが発生しているものとして評価可能である。

図-5より、いずれの解析ケースにおいても、載荷点より45°の範囲のアーチ外面において法線方向の明瞭なひび割れが発生していることが分かる。N-P/IとS-P/Iを比較すると、N-P/Iの場合には、載荷点裏面における著しい剥離および側壁部の割裂ひび割れが顕在化しているのに対して、S-P/Iの場合には、帯鉄筋の効果によりこれらの損傷が大きく抑制されていることが分かる。これより、アーチ梁の場合には、帯鉄筋を配置することにより、載荷点部の裏面剥離、側壁部の割裂等を効果的に抑制可能であり、アーチ構造の構造特性を発揮するためには無視できない重要な構造要素であることが明らかとなった。

3.3 最大変位, 残留変位-衝突速度の関係

図-6には載荷点における最大変位および残留変位を縦軸に、衝突速度を横軸にとって整理している。また、残留変位に関しては、帯鉄筋を用いないN-P/Iの場合には解析終了後における変位を、帯鉄筋を用いる解析ケースS-P/Iの場合には衝撃荷重除去後の自由振動状態における振動中心軸の変位を用いて評価している。

図-6より、最大変位は帯鉄筋の配筋の有無にかかわらず、衝突速度の増加に伴い2次曲線的に増加する傾向にあることが分かる。また、最大変位はS-P/IよりもN-P/Iの場合に大きく示されている。これは、帯鉄筋を配筋しない場合には、載荷点の裏面剥離および側壁部の割裂が顕在化することより断面剛性が著しく低下することによるものと推察される。

一方、残留変位に着目すると、鉛直載荷の場合では

V = 7.0 m/s まではN-PがS-Pよりも小さくなる傾向を示しているものの、V = 8.0 m/s 以上ではN-PがS-Pよりも大きくなる傾向を示している。また、斜め45度載荷の場合でもV = 6.0 m/s まではN-PがS-Pよりも小さいが、V = 8.0 m/s 時ではN-PがS-Pよりも大きい。このような帯鉄筋配置の有無による衝突速度に対する残留変位分布の特性は、以下のように分析される。すなわち、1) 衝突速度が小さい場合には、帯鉄筋を配置していない場合において衝撃荷重載荷による損傷が局所的であるのに対して、帯鉄筋を配置している場合には構造全体で抵抗するため、損傷の範囲も大きくなる。2) そのため、後者の場合は前者に比して構造全体の復元力特性が小さくなること、3) 衝突速度が大きい場合には、図-5からも明らかのように、帯鉄筋を配置していない場合において衝撃荷重載荷による損傷が載荷点の裏面剥離のみならずアーチ基部のかぶりコンクリートの剥落等によって構造全体の剛性が著しく低下するのに対して、帯鉄筋を配置する場合には著しい裏面剥離やアーチ基部のかぶりコンクリートの剥落もない。4) そのため、後者は前者に比較して著しい剛性低下は見られないこと、等によるものと推察される。

3.4 荷重-変位関係

図-7には、鉛直荷重状態に限定して各数値解析における最大重錘衝撃力-最大変位関係を、別途実施した静的解析における荷重-変位曲線と併せて示している。静的解析は、衝撃解析と同じ数値解析モデルを用い、三次元弾塑性解析により実施している。図-7より、衝撃解析の全てのケースにおいて、変位が増加するに伴い最大重錘衝撃力も増加し、700 kN 程度で一様な値となっている。静的解析結果と比較すると、

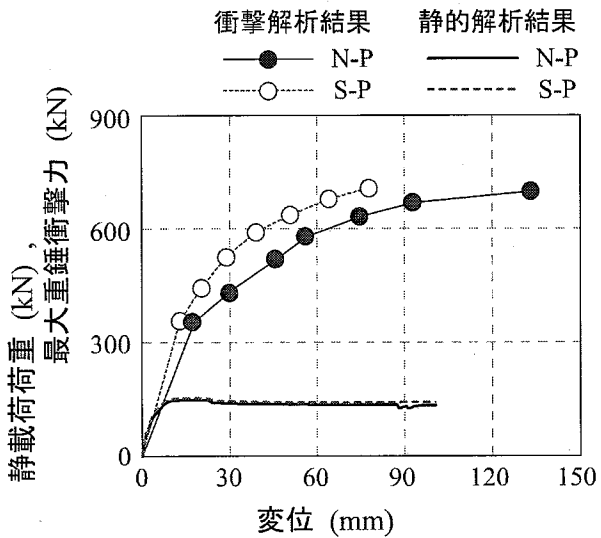


図-7 変位, 残留変位-衝突速度の関係

静載荷時の荷重は帯鉄筋の有無にかかわらず 140 kN 程度まで増加しその後一定値で推移している。これより、最大重錘衝撃力は静的耐力の 5 倍程度であることが分かる。

4. まとめ

本研究では、アーチ構造形式の耐衝撃性を検討することを目的に、アーチ梁に衝突させる重錘の载荷位置や衝突速度の変化および帯鉄筋の有無が衝撃応答特性に与える影響について検討を行った。検討結果を整理すると、以下のように示される。

帯鉄筋を配筋することにより、

- (1) 载荷点部の裏面剥離および側壁部の割裂等を効率的に抑制可能である。
- (2) 終局時近傍における断面剛性の低減が抑制される。
- (3) 衝突速度の増加に伴う塑性化の進行が小さくなる。

以上より、帯鉄筋の配筋は、アーチ構造の構造特性を発揮させるためには無視できない構造要素であることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 土木学会編：土木学会：連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修・補強指針，コンクリートライブラリー 101, 2000.