

論文 FRP シート内面接着小型 RC 製アーチ版模型の耐衝撃性向上効果

川瀬良司*1・岸 徳光*2・岡田 慎哉*3・牛渡 裕二*4

要旨: 本研究では、実トンネル坑口部を想定した RC 製アーチ構造の内面に新素材繊維 (FRP) シートを接着した場合の耐衝撃性向上効果を検討することを目的に、小型 RC 製アーチ版模型の内面にアラミド繊維 (AFRP) シートを接着して重錘落下衝撃実験を実施した。検討の結果、1) AFRP シート補強を施しても、押し抜きせん断破壊性状を抑制するまでの効果は期待できない。2) AFRP シート補強を実施することで、局所的な損傷が大きい場合でも変位を抑制する効果が期待できる。3) AFRP シート補強を行うことで、コンクリートの剥落防止効果が期待できる。等が明らかになった。

キーワード: RC 製アーチ構造, 重錘落下衝撃実験, 押し抜きせん断破壊, AFRP シート接着補強

1. はじめに

日本の国土は、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、多くの道路交通網は海岸線や山岳部の急崖斜面に沿って敷設されており、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、耐衝撃性能評価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、この種の構造物におい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 製アーチ形式のトンネル坑口部における耐衝撃性評価と、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。しかしながら、RC 製アーチ構造の耐衝撃性評価に関する検討は、実施されていないのが実状であり、その耐衝撃性能はいまだ明らかになっていない。

著者らは、まず、小型 RC 製アーチ梁模型の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や静的解析¹⁾を実施した。その結果を踏まえ、小型の RC 製アーチ形式の梁や版模型を用いて重錘落下衝撃実験を実施し、RC 製アーチ構造の耐衝撃挙動および耐衝撃性能に関する検討²⁾³⁾を実施している。その結果、版形状に近い構造の場合は、静載荷実験および重錘落下衝撃実験結果ともに押し抜きせん断型の脆性的な破壊性状等を示すことが明らかになっている。さらに、小型 RC 製アーチ版模型の衝撃実験を対象に破壊エネルギー等価の概念を導入した三次元弾塑性衝撃応答解析⁴⁾を実施して、

実験結果を精度良く再現可能であることを明らかにしている。しかしながら、衝撃荷重を受ける RC 製アーチ構造に適用するための補強工法に関する検討はほとんど実施されておらず、合理的な補強設計が行える状況になっていないのが現状である。

本研究では、実トンネル坑口部を想定した RC 製アーチ構造の内面に新素材繊維 (FRP) シートを接着した場合の耐衝撃性向上効果を検討することを目的に、アーチ版模型 (以後、アーチ) の内面にアラミド繊維 (AFRP) シート接着補強を施し、重錘落下衝撃実験を実施した。本論文では、過去に実施した無補強試験体に関する実験結果と比較することにより検討を行うこととする。また、耐衝撃性に関する検討は、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に着目して行うこととした。なお、本実験は、室蘭工業大学が所有



写真-1 トンネル坑口部

*1 (株) 構研エンジニアリング 取締役 博(工) (正会員)

*2 室蘭工業大学大学院教授 工学研究科 くらし環境系領域 工博 (正会員)

*3 国土交通省 北海道開発局 博(工) (正会員)

*4 (株) 構研エンジニアリング 防災施設部 (非会員)

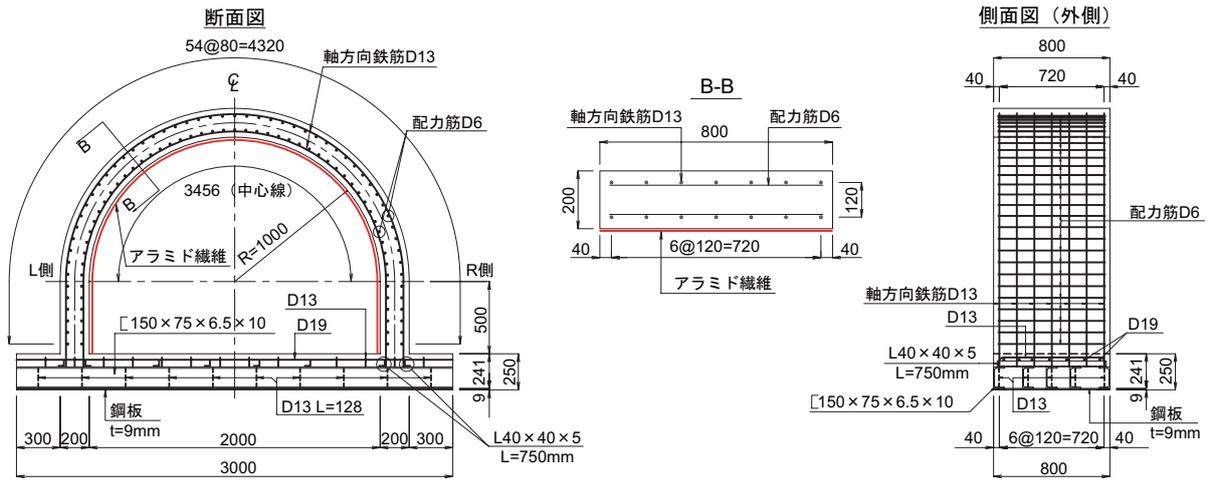


図-1 形状寸法，配筋状況および補強概要

表-1 実験ケース（試験体）一覧

実験ケース	シート補強の有無	衝突速度 V(m/s)
N-8	無し	8
S-8	有り	8
S-9	有り	9

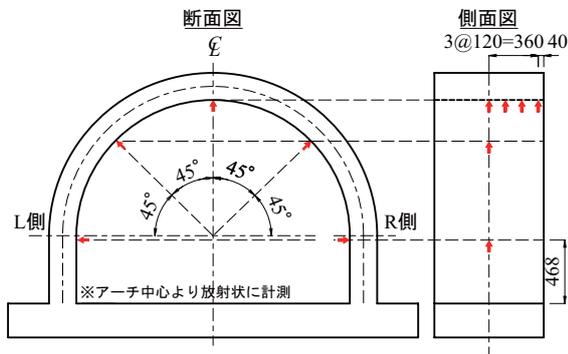


図-2 変位計測位置図

す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

図-1には、試験体の形状寸法および配筋状況を示している。試験体は、実際のトンネル坑口部の1/4程度の縮尺模型とした。すなわち、アーチの厚さを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。アーチ部の主鉄筋には、実トンネル坑口部と同程度の鉄筋比（0.8%）となるように鉄筋量を調整し、D13を120 mm間隔で配筋している。なお、芯かぶり（コンクリート保護層）は40 mmとしている。配筋筋には、主鉄筋との鉄筋量および鉄筋間隔のバランスを考慮してD6を用い、主鉄筋量の1/3以上となるように断面中心線上で80 mm間隔で配筋している。

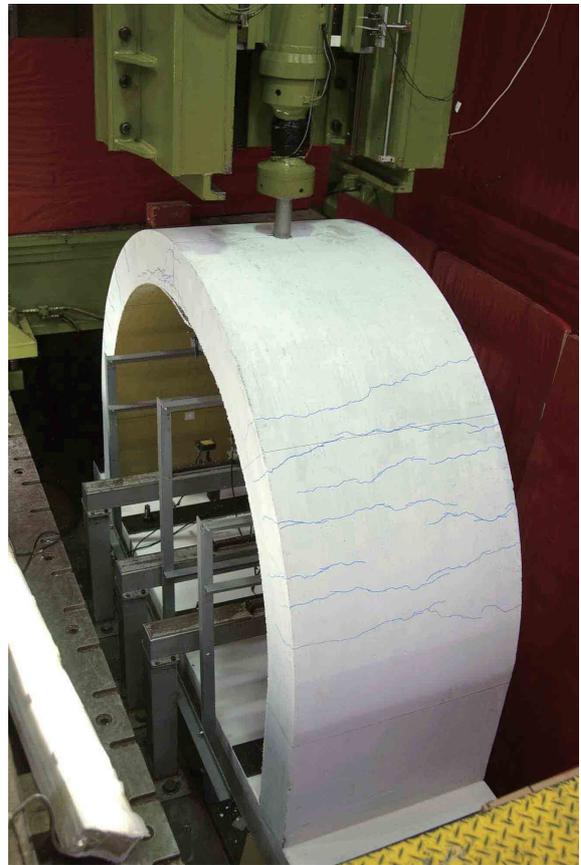


写真-2 衝撃実験状況

補強に用いるAFRPシートには、直梁とする場合の曲げ耐力が1.2倍程度向上する量である目付量650 gの2方向シートを用いることとした。

フーチングの形状寸法は、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、巻き出し工の断面方向長さが3,000 mm、巻き出し工の軸方向幅が800 mm、高さが250 mmとなる矩形体とし、鋼製アンクル材を配置して剛性の確保に努めている。また、フーチング下面に

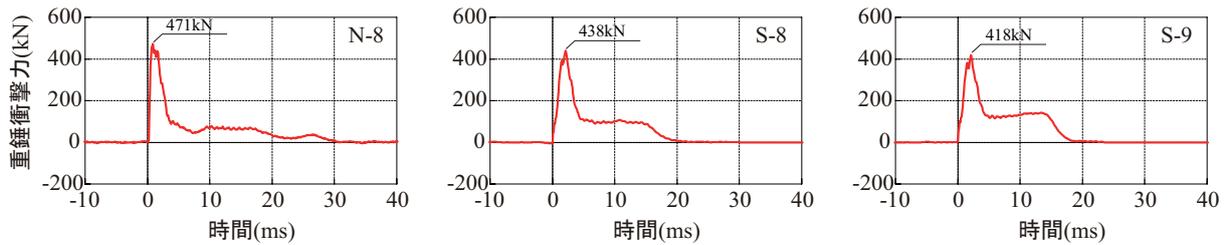


図-3 重錘衝撃力波形

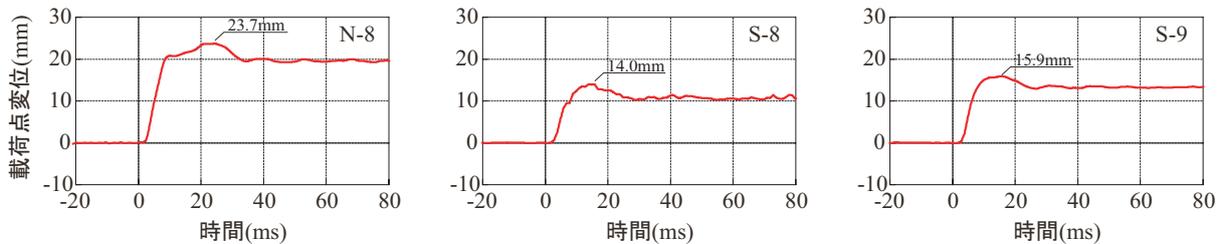


図-4 載荷点変位波形

は設置面の平滑度の精度を向上させるために、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。本検討で対象とする試験体数は、無補強の状態で押し抜きせん断破壊が生じた衝突速度 $V = 8 \text{ m/s}$ と同速度とした補強試験体と衝突速度を 1 m/s 増加させた補強試験体の全 3 体である。表中の試験体名のうち、“N”は無補強試験体を、“S”は AFRP シート接着による内面補強を行った試験体を示している。なお、試験体名の末尾には衝突速度 $V \text{ (m/s)}$ を付している。実験時におけるコンクリートの圧縮強度は 19.7 MPa 、鉄筋の降伏強度は D6 (SD295)、D13 (SD345) でそれぞれ $353, 398 \text{ MPa}$ であった。

2.2 衝撃実験概要

写真-2 には、実験の状況を示している。実験はフーチング部を跳ね上がり防止用治具により固定し、アーチクラウン中央点に所定の高さから 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、重錘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重錘を落下させることとした。衝撃荷重の載荷方法には、重錘を所定の衝突速度により一度だけ載荷する単一載荷を採用している。本実験では、載荷点部における押し抜きせん断破壊が予想されることから、載荷点の影響が自由辺まで波及しないようにするため、載荷盤直径を小さくすることとし、直径 60 mm の鋼製円柱を採用した。

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レーザ式非接触型変位計による載荷点変位とした。図-2 には、変位計設置位置を示している。重錘衝撃力測定用ロードセルの容量および応答周波数はそれぞれ $1,470 \text{ kN}$ 、 $DC-4.0 \text{ kHz}$ であり、レーザ式変位計

の測定可能距離および応答周波数はそれぞれ 500 mm 、約 1 kHz である。また、衝撃実験時の各種応答波形は、 1 kHz のサンプリングタイムにてデジタルレコーダに一括収録を行っている。

なお、衝撃実験に適用する相似則⁵⁾を参考に、本試験体の実験規模を実トンネル坑口部の落石規模に換算すると、長さの相似比を S とした場合の質量および速度の相似比は、それぞれ S^2 (重力の影響考慮)、 $S^{1/2}$ となる。ここで、 $S=4$ とすると、落石質量 $M = 300 \times 4^2 = 4,800 \text{ kg}$ 、衝突速度 $V = 8 \times 4^{1/2} = 16 \text{ m/s}$ となり、衝突エネルギーは $E = 600 \text{ kJ}$ 程度となる。

3. 実験結果

3.1 重錘衝撃力

図-3 には、重錘衝撃力波形を示している。なお、図は重錘衝突時刻を原点として整理している。図より、波形性状は、N-8、S-8、S-9 試験体ともに類似の傾向を示し、重錘衝突とともに励起する周期が短く振幅の大きい正弦半波状の第 1 波と、その後周期が長く振幅の小さい第 2 波から構成されていることが分かる。

シート補強無しの N-8 試験体とシート補強有りの S-8、S-9 試験体との差異に着目すると、シート補強を実施することにより最大重錘衝撃力が若干低下し、さらに波動継続時間も 10 ms 程度短くなる傾向が見られる。シート補強の S-8、S-9 試験体に関する結果を比較すると、衝突速度が増加しても最大重錘衝撃力が増加していないことが分かる。これは、載荷点部に著しい損傷が生じていることによるものと考えられる。一方、第 2 波の応答値は増加している。これは、載荷点部に著しい損傷が生じた後、AFRP シートに衝突エネルギーが伝達し AFRP シート

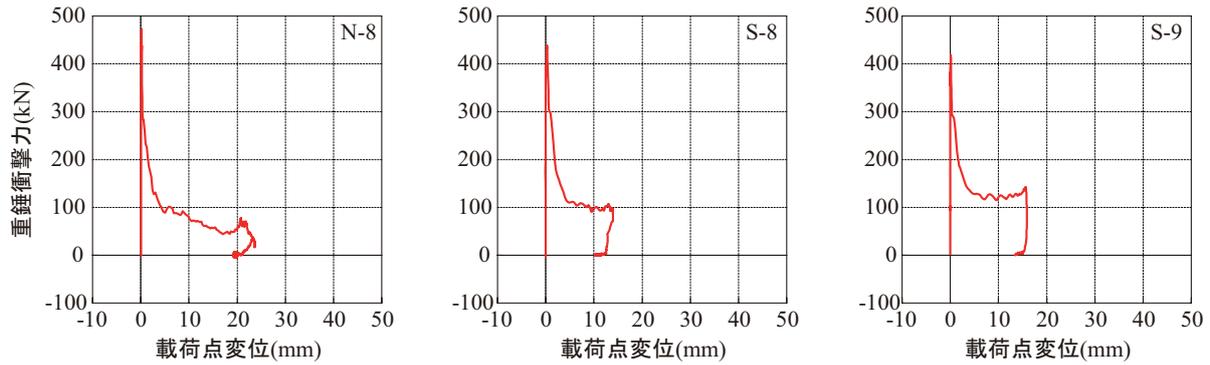


図-5 荷重-変位関係

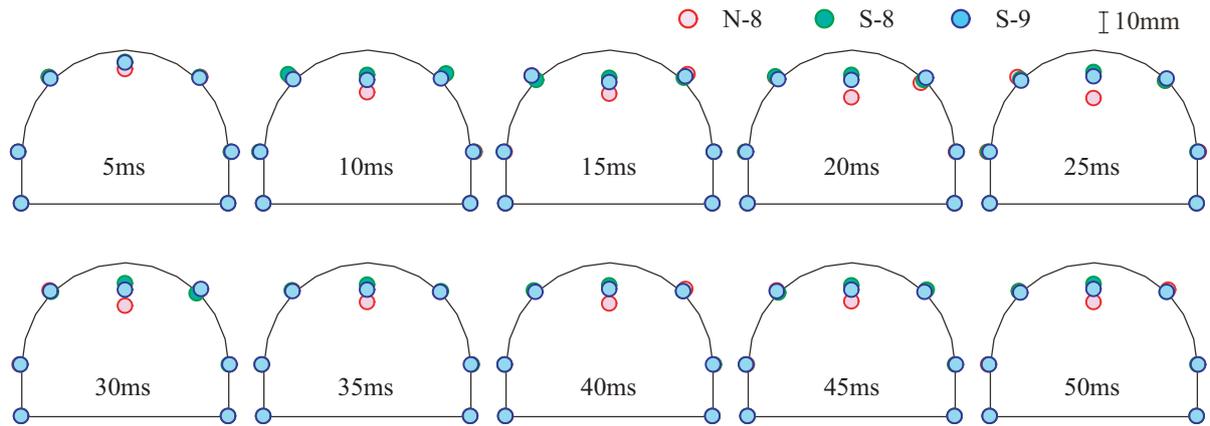


図-6 載荷点位置における断面方向変位分布図 (変形倍率 20 倍)

が抵抗したことによるものと推察される。

3.2 載荷点変位

図-4には、載荷点変位波形を示している。図より、波形性状は、重錘衝撃力と同様に、N-8、S-8、S-9試験体ともに類似の傾向を示していることが分かる。具体的には、変位波形は重錘衝突時点から若干遅れて励起し、第1波目から第2波目に移行する際に最大応答を示している。その後、振動はほとんど励起されず、10～20mm程度の大きな残留変位が生じている。これより、全ての試験体において載荷点近傍部で損傷が顕在化し、局所的に終局に至っているものと推察される。

シート補強無しのN-8試験体とシート補強有りのS-8、S-9試験体との差異に着目すると、シート補強を実施することにより、最大変位、残留変位はシート補強無しの場合の1/1.5～1/2程度に抑制されている。これより、シート補強を実施することで、局所的に損傷が著しい場合においても変位を抑制する効果が期待できることが分かる。

3.3 重錘衝撃力-載荷点変位曲線

図-5には、縦軸に重錘衝撃力、横軸に載荷点変位を取って荷重-変位関係を示している。図より、その分布性状は、N-8、S-8、S-9試験体ともに類似の傾向を示しており、押し抜きせん断破壊による特徴的な三角形の分

布性状を示している。これより、3試験体ともに押し抜きせん断により損傷しているものと推察される。このことから、内面にシート補強を施した場合においても、破壊性状を押し抜きせん断破壊型から曲げ破壊型等へ移行させるまでの効果は期待できないことが推察される。しかしながら、荷重-変位関係のループ面積は、シート補強無しのN-8試験体の場合がシート補強有りのS-8試験体より10%程度大きい値を示している。これは、衝突エネルギーが同等であることから、載荷点部のコンクリートが押し抜きせん断破壊に至っている場合においても、AFRPシートが衝撃荷重に抵抗していることを意味している。

3.4 変位分布性状

図-6には、アーチ部断面方向内面の変位分布を変形倍率を20倍にして時系列で示している。図にはN-8、S-8、S-9試験体に関する結果を載荷直後から5ms毎に $t=50$ msまで重ねて示している。図より、衝突初期から3試験体ともに載荷点のみに変位が集中し、20～25ms経過後に最大変位に達し、その後、若干減少し残留変位に移行する類似の傾向を示している。しかしながら、最大変位や残留変位は、シート補強無しのN-8試験体の場合がシート補強有りのS-8、S-9試験体の場合に比べ1.5～2.0倍程度大きい値を示している。

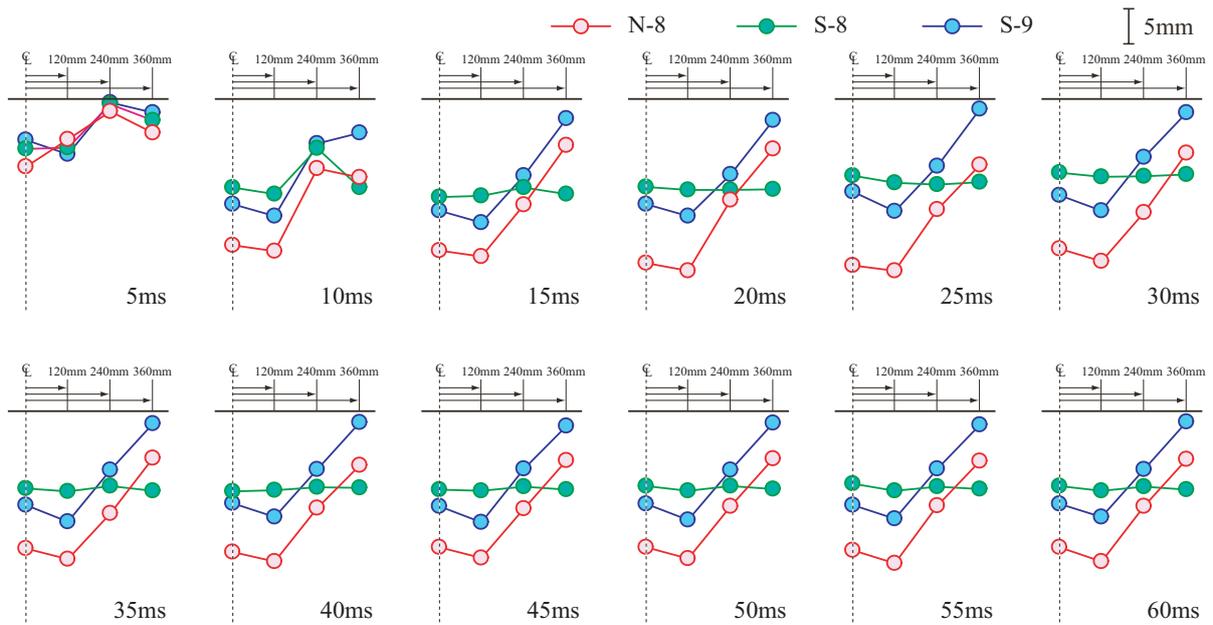


図-7 載荷点位置における横断方向変位分布図 (変形倍率 20 倍)

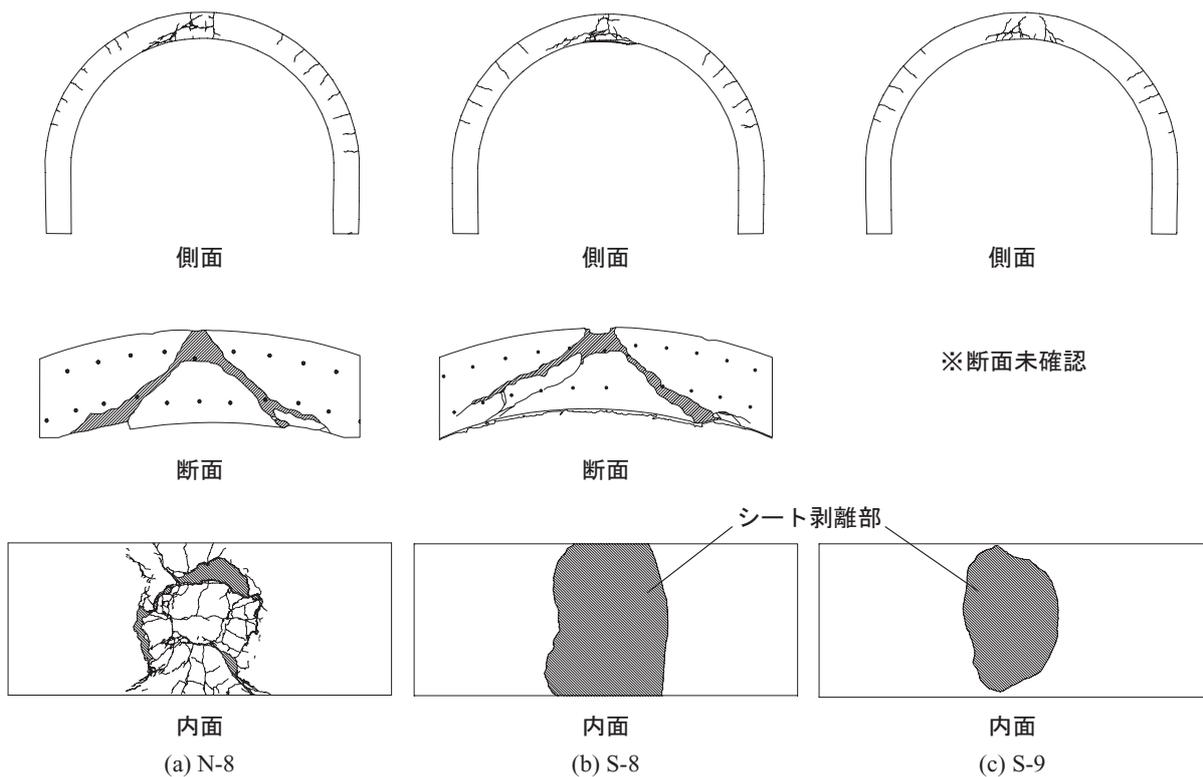


図-8 側面、内面および載荷点位置における横断面のひび割れ分布と FRP シートの剥離状況

図-7には、アーチ部横断方向内面の変位分布を変形倍率を20倍にして時系列で示している。図にはN-8, S-8, S-9試験体に関する結果を、アーチ部断面方向内面変位分布と同様に載荷直後から5ms毎に $t=60$ msまで、重ねて示している。図より、シート補強無しのN-8試験体では変位が載荷点近傍に集中し、端部の変位は小さくなっ

ている状況が分かる。これより、N-8試験体の場合には、押し抜きせん断破壊が生じ、せん断コーンが形成され押し抜かれていることが推察される。これに対して、シート補強有りのS-8試験体の場合には、載荷点から端部までほぼ一様の変位が発生しており、変位が集中する傾向は見られない。また、シート補強無しのN-8試験体に比

べて、最大変位および残留変位が1/2程度に減少している。これは、AFRPシート補強を施したことにより、押し抜きせん断破壊による押し抜けが多少なりとも抑制されていることによるものと推察される。一方、衝突速度を増加させたシート補強有りのS-9試験体の場合には、シート補強無しのN-8試験体の場合と同様に載荷点近傍に変位が集中しているが、端部の変位は小さい。これは、衝突速度が8 m/sから9 m/sに増加したことに伴い衝突エネルギーも3割程度増加するため、押し抜きせん断破壊面の角度が鋭角になったことによるものと推察される。しかしながら、最大変位および残留変位がシート補強無しのN-8試験体に比べ1/1.5程度に減少している。これは、シート補強有りのS-8試験体と同様にAFRPシート補強を施したことにより、押し抜きせん断破壊による押し抜けが抑制されていることを暗示している。

3.5 ひび割れ分布性状

図-8には、実験終了時におけるN-8, S-8, S-9試験体の側面、内面のひび割れ分布性状を示している。また、N-8, S-8試験体に関しては、載荷点を中心に断面方向に切断し、載荷点位置における断面内のひび割れ分布を示している。なお、S-8, S-9試験体に関してはAFRPシート補強を施していることにより、ひび割れ状況が確認できないため、ここではシートの剥離状況を示している。ただし、AFRPシートの破断および損傷は発生していないことを確認している。載荷点を含む断面内ひび割れ分布図より、N-8, S-8試験体は、共に斜めひび割れが内縁まで到達し、せん断コーンが形成されていることが分かる。ただし、N-8試験体の場合には、せん断コーンが完全に押し抜かれているのに対して、S-8試験体の場合には押し抜かれる状態までには至っていない。また、衝突速度を増加させたS-9試験体の場合も同様に押し抜きせん断破壊により終局に至っているものと推察される。しかしながら、シート補強無しのN-8試験体とシート補強有りのS-8試験体におけるひび割れ分布を比較すると、S-8試験体の場合における斜めひび割れの角度は、N-8試験体より鈍角であり、シートによる補強効果が表れていることが分かる。

シート補強有りのS-8とS-9試験体のシートの剥離範囲を比べると、S-9試験体の場合の方が小さい。このことは、S-9試験体の場合には載荷速度が増加したことにより斜めひび割れの角度がS-8試験体より鋭角になったことを示唆している。また、N-8試験体の場合には、押し抜きせん断破壊によるせん断ひび割れの開口に伴い、内縁コンクリートの剥落が生じている。しかしながら、シート

補強有りのS-8, S-9試験体の場合には、押し抜きせん断ひび割れの開口は確認できるものの剥落は生じていない。これより、AFRPシート補強を行うことで同程度の損傷が発生した場合にもかぶりコンクリートの剥落抑制効果が期待できることが確認された。

4. まとめ

本研究では、RC製アーチ構造内面にFRPシート接着補強を施した場合における耐衝撃性向上効果を確認することを目的に、小型RC製アーチ模型の内面にAFRPシート接着補強を施して、重錘落下衝撃実験を行い、その耐衝撃性向上効果に関する検討を行った。本研究で得られた結果を整理すると、

- (1) AFRPシート補強を施しても、押し抜きせん断破壊を曲げ破壊等に移行させるまでの効果は期待できない。
- (2) AFRPシート補強を施することで、局所的な損傷が大きい場合でも変位を抑制する効果は期待できる。
- (3) AFRPシート補強を行うことで、内縁コンクリートの剥落を抑制する効果が期待できる。

今回明らかとなった補強効果を踏まえ、今後は実トンネル坑口部への補強工法への適用に関する評価手法や設計手法の確立に向けた検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 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
- 2) 川瀬良司, 岸 徳光, 今野久志, 岡田慎哉, 鈴木健太郎: 小型RCアーチ模型の耐衝撃挙動に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.1191-1202, 2007.4
- 3) 岡田慎哉, 岸 徳光, 川瀬良司, 西 弘明: RC巻き出し工模型に関する重錘落下衝撃挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.757-762, 2007.6
- 4) 川瀬良司, 岸 徳光, 岡田慎哉, 鈴木健太郎: 重錘落下衝撃荷重載荷時のRCアーチに関する弾塑性応答解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.901-906, 2008.7
- 5) 土木学会: 構造工学シリーズ15, 衝撃実験・解析の基礎と応用, 2004.1