

直接基礎橋脚の洗掘被災要因の数量化理論Ⅱ類による定量的分析

角田 富士夫 林 宏親 江川 拓也

1. はじめに

これまで北海道では台風や豪雨の経験が少なかったが、平成28年8月に観測史上初めて1週間に3つの台風が相次いで上陸した後、さらに別の台風の接近による豪雨や出水の影響を受け、道内各地で道路橋の橋台の背面地盤の侵食、洗掘、流失による落橋被害のほか、直接基礎形式の橋脚まわりの洗掘に起因する沈下被害が多発するなど、過去に経験したことのない災害が発生した¹⁾。また、近年の気候変動による短時間強雨の増加傾向は、橋梁の洗掘に対し悪影響を及ぼしかねなく、今後維持管理上の問題となることが考えられる。このことを踏まえ、筆者らは、要注意橋梁を簡易的にスクリーニングするため、北海道内における過去に洗掘により被災した直接基礎形式の橋脚を標本に、統計的手法である数量化理論Ⅱ類分析を行い、洗掘被災に影響を及ぼす有効要因の抽出を行ってきた²⁾。

これまで、既存の道路管理者資料や地理情報システムのデータで有効要因を抽出してきたが、近年、様々な分野で衛星の利活用が進んでいる中、橋梁の洗掘被災についてSAR衛星画像によって得られる情報を使って要因を評価することも一手法であると考えられる。

本研究では、国土交通省の国土数値情報から得られる河川ラインやSAR衛星画像から得られる正確な滲筋を用いることも重要であると考え、これらを用いて新たな要因を探りさらに精度の良い洗掘危険度評価手法を開発すること、また、実務における汎用性を確認することを目的に、橋脚と滲筋の交差角を追加して数量化理論Ⅱ類分析を行い、有効要因を定量的に抽出したことを報告する。

2. 洗掘危険度評価手法と対象地域

本研究では、北海道の異常出水で洗掘が急速に進行する橋梁被災を未然に防ぎ、要注意橋梁を簡易的にスクリーニングする危険度評価手法を開発することを目標にしている。洗掘被災に影響を及ぼす要因と特性情

報を本研究であらかじめ抽出し、その要因の特性情報を日常の管理業務で算出できれば、簡易的に要注意橋梁を見いだすことが可能となるという着想のもと、北海道内における過去に洗掘により被災した直接基礎形式の橋脚を標本とし、既存資料から得られる各要因をカテゴリー化した上で数量化理論Ⅱ類分析を行い、洗掘被災に影響を及ぼす有効要因の抽出を試みている。

分析の対象は、平成28年8月の3台風上陸後に北海道に接近し豪雨災害をもたらした台風10号により、直接基礎形式の橋脚まわりが洗掘を受け沈下・傾倒・倒壊した主に北海道十勝地方の国道と道道と町道の被災橋梁であるが、被災橋梁数が少ないため前後の時期の豪雨や融雪出水により被災を受けた同地域の橋梁も追加した。これらの橋梁は計16橋である。これに対し、被災無しの橋梁は、台風10号による豪雨の範囲を流域に持つ河川に架かる直接基礎形式の橋脚を保有する橋梁に加え、被災橋梁として取り上げた橋梁が架かる河川と同じ河川に架かっている直接基礎形式橋脚橋梁も含めた計98橋の国道橋梁である。図-1に対象橋梁位置図を示す。被災橋梁数の割合が少なければ抽出精度に影響を及ぼすと考えられるが、本研究では同じ水系で分析し評価することも重要であると考えた。



図-1 対象橋梁位置図

3. 洗掘に影響を及ぼす各種要因

洗掘に影響を及ぼす要因情報の抽出には、橋梁を維持管理する関係者が統計分析まで行わなくても水理学や河川工学や橋梁工学の一般的知識でもって机上の実務で扱っていきえるよう選び出すことを目指す。これまで、河川の特성에基づく河川の要因と、地形・地質的要因と、橋梁構造に基づく構造的要因に分類し14の要因情報を抽出し²⁾、橋梁台帳や橋梁点検調書、インターネット上のオープンデータや地理情報システム(GIS)も使用しながら、対象とする各橋梁に対してできる限り平成28年8月に近い各要因の特性情報を読み取って収集し、データベースを作成した。本研究では、追加できる有効要因を検討し要注意橋梁の選出精度を高めることを目的に、新たに河川の要因である橋脚と滯筋の交差角を追加した。表-1に対象とする15の要因情報を示す。

橋脚と滯筋の交差角は、水流に対する抵抗を表す目的から、図-2に示すように橋脚の長軸方向と滯筋の方向の正味の交差角を言う。GISを利用して国土地理院の標準地図に航空写真や国土交通省国土数値情報のダウンロードサイト³⁾が公開している河川ラインを重ねるほか、橋梁台帳や橋梁点検調書の一般図に記載がある橋脚の斜角も参照して交差角を求めた。

4. 数量化理論Ⅱ類分析

本研究における数量化理論Ⅱ類分析は、各橋梁にて得られた要因情報を説明変数とし、各橋梁の被災の有無を目的変数とした被災を予測する判別分析である。説明変数を量的な値とせずカテゴリーに分けて0と1のみの質的な値とすることが、通常の判別分析と違う方法となる。表-2に各種要因のカテゴリー分類表を示す。本研究では、分析で得られた予測関数の係数を評

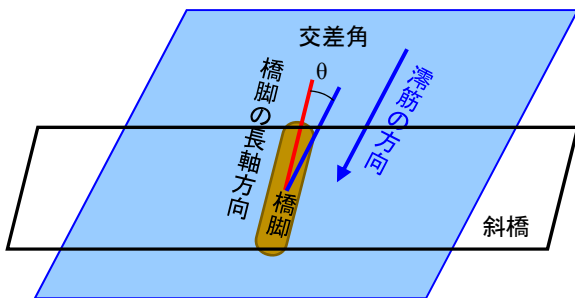


図-2 橋脚と滯筋の交差角

価して各種説明変数の中から重要な説明変数を選び出すことで被災に影響を及ぼす有効要因を抽出する。

4. 1 平成28年8月の災害事象を標本とした分析

4. 1. 1 分析方法

被災有りの橋梁計16橋および被災無しの橋梁計98橋を対象とした分析にあたり、目的変数との相関が低い説明変数をあらかじめ見定めて削除する目的から、カテゴリーデータを基にして15要因の独立係数を求め相関調査を行った。独立係数とはカテゴリー分類における説明変数と目的変数の相関の強さを表し、1に近いと相関が高い。表-3に独立係数による相関調査結果を示す。高い相関がある要因は上位から、落差工との距離、示方書適用年、河床勾配、橋長であることがわかる。通常は0.25より大きな要因を分析に選択するが、0.20以上でもやや弱い相関ではあるが低くはなく、被災に影響を及ぼす有効要因を広範に抽出する目的から採用することとした。また、既往研究²⁾では0.15以上としていたが精度を高める目的からも0.20以上とし

表-1 対象とする要因情報

| | 既往の研究 ²⁾ より | 追加した要因 |
|----------|---|-----------|
| 河川の要因 | 曲率半径川幅比, 落差工との距離 砂州の変化 | 橋脚と滯筋の交差角 |
| 地形・地質的要因 | 河床勾配, 表層地質 | - |
| 構造的要因 | 橋長, 示方書適用年 下部構造形式, 角の形状 径間数, 流路内位置比 橋脚と水際線の距離 河積阻害率, 根入れ長 | - |

表-2 要因のカテゴリー分類表

| 要因 | 分類 | カテゴリー | 要因 | 分類 | カテゴリー |
|----------------------|--------------|-------|----------|--------------|-------|
| 橋脚と滯筋の交差角(°) | ~10 | 1 | 示方書適用年 | ~1959 | 1 |
| | 10~20 | 2 | | 1960~1969 | 2 |
| | 20~30 | 3 | | 1970~1979 | 3 |
| | 30~ | 4 | | 1980~1989 | 4 |
| | 無し(円柱) | 5 | | 1990~ | 5 |
| 曲率半径川幅比 | ~14 | 1 | 下部構造形式 | 壁式橋脚 | 1 |
| | 15~29 | 2 | | T型橋脚柱内柱 | 2 |
| | 30~44 | 3 | | T型橋脚柱小判型 | 3 |
| | 45~59 | 4 | | ラーメン橋脚 | 4 |
| | 60~ | 5 | | 円(円柱・小判型) | 1 |
| 落差工との距離(±上流, -下流)(m) | 250~499 | 1 | 角形状 | 三角 | 2 |
| | 0~249 | 2 | | 四角 | 3 |
| | -250~-1 | 3 | | 径間数 | ~3 |
| | -500~-251 | 4 | 4~5 | | 2 |
| | 無し | 5 | 6~7 | 3 | |
| 砂州の変化 | 有 | 1 | 8~ | 4 | |
| | 無し | 2 | 流路内位置比 | ~0.54 | 1 |
| 河床勾配(%) | ~0.4 | 1 | | 0.55~0.64 | 2 |
| | 0.5~0.9 | 2 | | 0.65~0.74 | 3 |
| | 1.0~1.4 | 3 | | 0.75~ | 4 |
| | 1.5~1.9 | 4 | | 橋脚と水際線の距離(m) | 0 |
| | 2.0~ | 5 | 0~4 | | 2 |
| 表層地質 | 礫・砂・粘土および火山灰 | 1 | 5~9 | 3 | |
| | 泥岩・砂岩 | 2 | 10~ | 4 | |
| | 凝灰岩 | 3 | 河積阻害率(%) | ~2.4 | 1 |
| | その他岩石 | 4 | | 2.5~4.9 | 2 |
| 橋長(m) | ~59 | 1 | 5.0~7.4 | 3 | |
| | 60~119 | 2 | 7.5~9.9 | 4 | |
| | 120~179 | 3 | 10.0~ | 5 | |
| | 180~239 | 4 | 根入れ長(m) | ~-0.1 | 1 |
| | 240~ | 5 | | 0.0~1.9 | 2 |
| | | | 2.0~3.9 | 3 | |
| | | | 4.0~5.9 | 4 | |
| | | | 6.0~ | 5 | |

た。このことから曲率半径川幅比、落差工との距離、河床勾配、橋長、示方書適用年、角の形状、径間数、流路内位置比、河積阻害率の9要因を説明変数に選択した。なお、曲率半径川幅比および流路内位置比については、参考文献²⁾に詳しい。

次に、選択した要因から数量化理論Ⅱ類分析を行い、得られる予測関数の係数を使って各要因中から被災に影響を及ぼす有効要因とカテゴリーを評価した。具体的にはカテゴリーウェイトとウェイト範囲を求め洗掘被災への影響度評価を行った。カテゴリーウェイトとは各要因中の各カテゴリーの影響度の大きさを表し、正であれば安全の判別に影響を与え負であれば被災の判別に影響を与える傾向を示す。また、ウェイト範囲は各要因におけるカテゴリーウェイト値の範囲の大きさを示し、大きければ要因自体が他の要因よりも重要であることがわかる。

4. 1. 2 分析結果

表-4に要因の影響度評価結果を示す。灰色に着色した部分は独立係数が0.25より大きな要因を示しており、これらのウェイト範囲は独立係数が0.25より小さな要因に比べ大きな値を示すことがわかる。

独立係数が0.25より大きな要因の中でウェイト範囲が一番大きい示方書適用年では、1970年～1979年の分類でカテゴリーウェイトが負の値であり被災有りに影響を与え、1970年以前の分類でも負の値を示す。これは1976年に制定された河川管理施設等構造令に橋脚の根入れ長が規定され、この年代以前の適用年では所定の根入れが少なく影響を受け易かったことが考えられ

る。次にウェイト範囲が大きい橋長では、比較的長大橋である180m～239mの分類とそれよりも大きい分類でカテゴリーウェイトの負値が大きい。近年は上部工の技術の進歩により長径間で建設できるが⁴⁾、古い建設年度の長大橋は近年と比較すると短径間で径間数が多い設計上の特長がある。また、径間数のカテゴリーウェイトにおいて径間数が多いほど被災に寄与している結果とも調和的であることから、被災に寄与していた橋長180mよりも大きい分類では径間数が多いことが影響していると考えられる。落差工との距離では、上流500mから下流500mの範囲に含まれる落差工の数が分析対象橋梁の18%と少ないが、ウェイト範囲が大きく、上流0m～249mの分類でカテゴリーウェイトが負の値で大きく、被災有り橋梁に影響を与えている。ただし、落差工の有りや無しが何らかに影響を与えていることについては現時点で不明瞭なため、今後詳細な知見を加えることや被災事例の収集など更なる検討の余地があるものと考えられる。河床勾配では2%より大きな分類で、被災有りに影響を与えていることがわかり、河床勾配が大きくなれば流速が増し洗掘発生の可能性も高くなることは妥当である。

これらのほかに独立係数が0.25より小さい要因を見ていくと、独立係数が比較的高かった曲率半径川幅比（曲率半径/川幅）では、45～59の分類で被災に寄与している。同様に独立係数が高かった橋脚の流水方向端部の角の形状では、ウェイト範囲が比較的大きく、三角の分類でカテゴリーウェイトが負の値で大きく被災に寄与している。ただし、三角の形状をした橋梁数は

表-3 独立係数による相関調査（被災有16橋、被災無98橋）

| 橋脚と漂筋の交差角 | 曲率半径川幅比 | 落差工との距離 | 砂州の変化 | 河床勾配 | 表層地質 | 橋長 | 示方書適用年 |
|-----------|---------|---------|--------|-----------|-------|-------|--------|
| 0.166 | 0.245 | 0.401 | 0.130 | 0.278 | 0.109 | 0.269 | 0.344 |
| 下部構造形式 | 角形状 | 径間数 | 流路内位置比 | 橋脚と水際線の距離 | 河積阻害率 | 根入れ長 | |
| 0.077 | 0.247 | 0.206 | 0.217 | 0.127 | 0.212 | 0.191 | |

表-4 要因の影響度評価（被災有16橋、被災無98橋）

| 要因 | 分類 | カテゴリーウェイト | ウェイト範囲 | 独立係数 | 要因 | 分類 | カテゴリーウェイト | ウェイト範囲 | 独立係数 |
|------------------------------|-----------|-----------|--------|-------|--------|-----------|-----------|--------|-------|
| 曲率半径川幅比 | ～14 | 0.612 | 3.910 | 0.245 | 示方書適用年 | ～1959 | -0.191 | 10.750 | 0.344 |
| | 15～29 | 0.648 | | | | 1960～1969 | -0.721 | | |
| | 30～44 | 0.544 | | | | 1970～1979 | -5.592 | | |
| | 45～59 | -3.263 | | | | 1980～1989 | 2.107 | | |
| | 60～ | -2.096 | | | | 1990～ | 5.158 | | |
| 落差工との距離 (+上流, -下流) (m) | 250～499 | -1.614 | 6.052 | 0.401 | 角形状 | 円(円柱・小判型) | 0.113 | 5.600 | 0.247 |
| | 0～249 | -4.943 | | | | 三角 | -4.394 | | |
| | -250～-1 | 0.203 | | | | 四角 | 1.206 | | |
| | -500～-251 | -0.667 | | | | ～3 | 1.246 | | |
| | 無し | 1.109 | | | | 4～5 | -1.577 | | |
| 河床勾配 (%) | ～0.4 | 1.444 | 3.543 | 0.278 | 径間数 | 6～7 | -1.318 | 4.143 | 0.206 |
| | 0.5～0.9 | 0.403 | | | | 8～ | -2.896 | | |
| | 1.0～1.4 | -0.618 | | | | ～0.54 | 1.390 | | |
| | 1.5～1.9 | 0.185 | | | | 0.55～0.64 | 3.094 | | |
| | 2.0～ | -2.099 | | | | 0.65～0.74 | -1.225 | | |
| 橋長 (m) | ～59 | 0.488 | 6.585 | 0.269 | 流路内位置比 | 0.75～ | -0.059 | 4.318 | 0.217 |
| | 60～119 | 1.135 | | | | ～2.4 | -1.487 | | |
| | 120～179 | 2.430 | | | | 2.5～4.9 | -0.496 | | |
| | 180～239 | -4.155 | | | | 5.0～7.4 | 1.878 | | |
| | 240～ | -1.359 | | | | 7.5～9.9 | 1.812 | | |
| 河積阻害率 (%) | | | | | 河積阻害率 | 10.0～ | -0.963 | 3.365 | 0.212 |
| | | | | | | 2.5～4.9 | -0.496 | | |
| | | | | | | 5.0～7.4 | 1.878 | | |

1であった(被災橋梁に該当)ため、有効な要因として評価しなかった。また、径間数では、ウェイト範囲が平均的であり径間数が多いほど被災に寄与していることがわかる。これは橋長の要因で述べたように長大橋は古い年代ほど径間数が多い傾向にあり、橋長の要因で代表することができると考えられる。流路内位置比²⁾では、0.65~0.74の分類とそれよりも大きい分類で被災に寄与している。これは、水衝部側の橋脚が被災を受け易いことを示しており想定と一致する。最後に河積阻害率に関しては、2.4%より小さな分類で被災に寄与している。一方、10.0%より大きな分類も同様である。ここで、各分類の橋梁の被災率を参考として示すが、2.4%より小さな分類で0.125、2.5%~4.9%の分類で0.208、5.0%~7.4%の分類で0.033、7.5%~9.9%の分類で0.091、10.0%より大きな分類で0.167であった。これらより、2.4%より小さな分類に加え10.0%より大きな分類も被災率が高く、被災率は先述の被災の寄与と概ね整合する。よって、今回検討の対象とした橋梁の河積阻害率では明確な判断ができなかったことから、有効な要因として抽出しなかった。なお、判別の正答率は93%であった。よって、示方書適用年では1979年より以前の分類、橋長では180mよりも大きい分類、落差工との距離では上流0m~249mの分類、河床勾配では2%より大きな分類に加え、曲率半径川幅比では45~59の分類、および流路内位置比では0.65よりも大きい分類が洗掘に対して影響度が高い結果となった。

4. 2 平成28年8月の災害事象および橋梁点検・防災点検を標本とした分析

4. 2. 1 分析方法

過去の事例から見て橋梁洗掘被災は頻繁に起きる事象ではなく、限られた地域であれば少ない標本を基に分析しなければならないという課題がある。このことへの対処として、橋梁点検や防災点検で洗掘判定に挙げられている橋梁を、潜在的に洗掘の危険性がある橋梁として標本に追加して分析を行う。ここでは、前章の分析で取り上げた被災無し橋梁98橋の中から平成28年8月以降の橋梁点検結果において橋脚の洗掘に関する損傷程度の評価がc(洗掘)以上である橋梁および防災点検カルテにおいて橋脚の洗掘に挙げられている橋梁を選び、被災は起きていない11橋を被災数に加えた。

4. 1. 1と同様にカテゴリデータを基にして15要因の独立係数を求め相関調査を行った。表-5に独立係数による相関調査結果を示す。高い相関がある要

因は上位から、示方書適用年、河床勾配、落差工との距離であることがわかる。ここでは同様に0.20以上の独立係数を採用し、橋脚と滯筋の交差角、落差工との距離、河床勾配、橋長、示方書適用年、流路内位置比、河積阻害率、根入れ長の8要因を説明変数に選択した。

次に、選択した8要因を対象に数量化理論Ⅱ類分析によって洗掘被災への影響度評価を行った。

4. 2. 2 分析結果

表-6に要因の影響度評価結果を示す。灰色に着色した部分は独立係数が0.25より大きな要因を示しており、この中でウェイト範囲が一番大きい示方書適用年では、1970年~1979年と1960年~1969年の分類でカテゴリウェイトが負の値を示し被災に影響を与えており、表-4と比較しても1959年より以前の分類が正の値を示した違いはあるが、1979年より以前の分類が被災に影響を与える傾向は同じである。次にウェイト範囲が大きい落差工との距離では、ウェイト範囲は独立係数が0.25より小さな他の要因と比較して小さく、重要度はそれほど高くないものの、上流0m~249mの分類が被災に影響を与えている。河床勾配では、同様にウェイト範囲は大きくないが2%より大きな分類が被災に影響を与えている。

これらのほかに独立係数が0.25より小さい要因を見ていくと、独立係数が比較的高かった流路内位置比ではウェイト範囲が大きく、0.65~0.74の分類とそれよりも大きい分類が被災に寄与している。同様に独立係数が高かった河積阻害率では、2.4%より小さな分類で被災に寄与しているが、4. 1. 2で述べた理由から同様に有効な要因として抽出しなかった。また、橋脚と滯筋の交差角では20°より大きい角度が被災に寄与する傾向にあり、無しが最も大きい。ここで無しとは橋脚断面が円形で角度が定まらないことを意味している。設計当時に河川の主方向が定まらなかったため円形にしている場合が多く、河道内の滯筋の移動が大きいことを表している可能性がある。橋長ではウェイト範囲が大きく、180m~239mの分類で被災に寄与し、表-4と比較するとカテゴリウェイトが大きい負の値ではない。また、240mより大きい分類では正の値に転じている。最後に根入れ長ではウェイト範囲が大きく、6mより大きい分類で被災に寄与している。しかし、6mより大きい橋梁数は2であり被災橋梁は0と少なかったため、有効な要因として抽出しなかった。なお、判別の正答率は87.7%であった。よって、平成28年8月に被災を受けなかったものの橋梁点検や防災点検にて潜在的に洗掘の恐れのある橋梁を追加した結

表-5 独立係数による相関調査（被災有27橋、被災無87橋）

| | | | | | | | |
|-----------|---------|---------|--------|-----------|-------|-------|--------|
| 橋脚と滯筋の交差角 | 曲率半径川幅比 | 落差工との距離 | 砂州の変化 | 河床勾配 | 表層地質 | 橋長 | 示方書適用年 |
| 0.212 | 0.105 | 0.266 | 0.074 | 0.270 | 0.137 | 0.205 | 0.302 |
| 下部構造形式 | 角形状 | 径間数 | 流路内位置比 | 橋脚と水際線の距離 | 河積阻害率 | 根入れ長 | |
| 0.156 | 0.170 | 0.148 | 0.235 | 0.087 | 0.234 | 0.202 | |

表-6 要因の影響度評価（被災有27橋、被災無87橋）

| 要因 | 分類 | カテゴリウエイト | ウエイト範囲 | 独立係数 | 要因 | 分類 | カテゴリウエイト | ウエイト範囲 | 独立係数 |
|------------------------------|-----------|----------|--------|-------|--------------|-----------|----------|--------|-------|
| 橋脚と滯筋の交差角 (°) | ~10 | 1.600 | 3.692 | 0.212 | 示方書適用年 | ~1959 | 0.266 | 6.188 | 0.302 |
| | 10~20 | 0.919 | | | | 1960~1969 | -1.088 | | |
| | 20~30 | -0.494 | | | | 1970~1979 | -3.416 | | |
| | 30~ | -1.014 | | | | 1980~1989 | 1.166 | | |
| | 無し(円柱) | -2.092 | | | | 1990~ | 2.773 | | |
| 落差工との距離 (+上流, -下流) (m) | 250~499 | -1.065 | 2.857 | 0.266 | 流路内位置比 | ~0.54 | 1.926 | 5.503 | 0.235 |
| | 0~249 | -2.433 | | | | 0.55~0.64 | 4.048 | | |
| | -250~-1 | -0.951 | | | | 0.65~0.74 | -1.119 | | |
| | -500~-251 | 0.408 | | | | 0.75~ | -1.455 | | |
| | 無し | 0.424 | | | | | | | |
| 河床勾配 (%) | ~0.4 | 0.874 | 2.770 | 0.270 | 河積阻害率 (%) | ~2.4 | -2.530 | 4.009 | 0.234 |
| | 0.5~0.9 | -0.457 | | | | 2.5~4.9 | -0.124 | | |
| | 1.0~1.4 | 0.341 | | | | 5.0~7.4 | 1.479 | | |
| | 1.5~1.9 | 1.332 | | | | 7.5~9.9 | 0.733 | | |
| | 2.0~ | -1.438 | | | | 10.0~ | -1.175 | | |
| 橋長 (m) | ~59 | -1.208 | 5.229 | 0.205 | 根入れ長 (m) | ~-0.1 | -0.810 | 5.723 | 0.202 |
| | 60~119 | 1.255 | | | | 0.0~1.9 | -0.766 | | |
| | 120~179 | 2.398 | | | | 2.0~3.9 | 1.105 | | |
| | 180~239 | -2.831 | | | | 4.0~5.9 | -0.720 | | |
| | 240~ | 0.178 | | | | 6.0~ | -4.618 | | |

果、示方書適用年では1960年～1979年の分類、落差工との距離では上流0m～249mの分類、河床勾配では2%より大きな分類に加え、流路内位置比では0.65より大きな分類、橋脚と滯筋の交差角では20°より大きいまたは無しの分類、橋長では180m～239mの分類が洗掘に対して影響度が高い結果となった。4. 1. 2の分析結果と比較しても曲率半径川幅比以外は同じ要因であり、新たに橋脚と滯筋の交差角が抽出された。橋脚と滯筋の交差角では、橋梁点検や防災点検で洗掘判定に挙げられた11の橋梁の中に円柱橋脚が多く見られ、被災有り16橋に11橋を加える分析で橋脚と滯筋の交差角の分類と被災の関連性がより強くなったことが、抽出された原因と考える。限られた被災橋梁数に対し、橋梁点検や防災点検で洗掘判定に挙げられている橋梁を被災に付加する手法では、新たな有効要因の抽出につながった。被災の少ない他の地域でも同様な分析を進めて行けば、潜在的に洗掘の危険性がある橋梁としての有効要因を見いだせる可能性がある。

5. 橋脚とSAR画像の滯筋との交差角による分析

橋脚と滯筋の交差角を有効な要因として抽出できたが、実際の滯筋は分岐する場合があります、先述の橋脚と滯筋の交差角で使用した国土数値情報の1本線に集約された河川ラインのように単純ではないことが考えられた。また、滯筋が固定化しない場合もあり、航空写真や平成21年頃作成している国土数値情報の河川ラインからは平成28年8月30日被災前の交差角を正確に算出できていない可能性もある。そのため、橋脚に最も

接近した分岐や、できる限り被災前に近い常時の状況を反映させておく目的から、陸域観測技術衛星2号「だいち2号」(ALOS-2)の合成開口レーダ(SAR)の後方散乱強度画像を利用してより正確な滯筋を求め橋脚との交差角を算出し、同様な数量化理論Ⅱ類分析を試みた。なお、SARの他の手法を使うことを検討したが、本研究ではSARの後方散乱強度画像のみの利用とした。

5. 1 橋脚とSAR画像の滯筋との交差角の収集方法

ALOS-2が搭載するLバンドマイクロ波レーダの特長は、雲を透過し昼夜・天候によらず観測できることと、撮影頻度が高く本稿で取り上げている平成28年8月の台風10号接近前の近い時期も撮影していることが挙げられる。また、地表で反射して戻ってきたマイクロ波が格納されており、合成開口(SAR)の技術が使われて地表の状況を3mの高分解能で撮影したSAR画像を得ることができる。さらに、SAR画像を画像解析することで後方散乱強度を得ることができる。図-3に示すように滑らかな表面である水面があれば入射波は反対方向に鏡面反射し反射波が戻りにくくSAR画像はその部分だけが一定して暗くなり、後方散乱強度も一定して弱くなって、水面と陸域を区別することができる。今回は、さらに、GISの二値化処理において閾値を決定し、後方散乱強度画像の水面と陸域を二つの色に分解したあと、水面を目視判別して滯筋を抽出した。国土数値情報の河川ラインと、SAR画像と二値化処理で抽出した滯筋を比較した事例を図-4に示す。この事例では、黒色の筋状の滯筋とそれに隣接し

た白色の陸域は明確に区別できており、青色の河川ラインの線形と黒色の滯筋の線形は違うことがわかる。ただし、樹林に覆われた小河川や衛星のレーダ照射角度と地形の関係等によって明確に滯筋と陸域を区別できないこともあり、SAR画像を利用した判別ができない場合は国土数値情報の河川ラインを利用し、可能な場合はSAR画像を利用して判別した滯筋によって正確な交差角を求めた。交差角は、橋軸方向の直線と、滯筋の目視により描いた接線との交差角を算出し、さらに橋軸と橋脚の長軸方向の角度も考慮し正味の交差角を求めた。なお、SAR画像より正確な交差角を求めることができた橋梁数は、被災有り16橋のうち7橋、被災無し98橋のうち32橋である。

5. 2 平成28年8月の災害事象および橋梁点検・防災点検を標本とした分析での検証

橋脚と滯筋の交差角を有効要因として抽出できた、平成28年8月の災害事象および橋梁点検・防災点検を標本とした分析にSAR画像を利用したより正確と考えられる滯筋の分析を加えたデータセットと、汎用的な国土数値情報の河川ラインのみを利用した4. 2の分析との有効性の比較検証を行った。

SAR画像を利用した分析の独立係数を求め相関調査を行った結果、橋脚と滯筋の交差角については0.215となり、表-5の結果の0.212と比較しても高い相関を示した。よって0.20以上であることから分析対象として選択し、数量化理論Ⅱ類分析で要因の影響度評価を行った結果を表-7に示す。橋脚と滯筋の交差角は表-6の結果と比較すると、カテゴリウエイトとウエイト範囲の値に若干の差異が認められたが、概ね近似した。この若干の差異は、SAR画像による判別が可能な滯筋はそれを利用して求めたことによるものである。また、いずれも20°より大きいまたは無しの

分類が被災に影響を与えており、被災へ寄与する分類は一致した。従って、抽出結果が変わらないことから、国土数値情報の河川ラインの利用でも、正確では無いものの机上の実務では十分対応可能であることがわかった。一方、SAR画像を利用した橋梁では、正確かつ最新の橋脚と滯筋の交差角を得ることができ、より精度よく要注意橋梁を抽出できる可能性がある。今後、

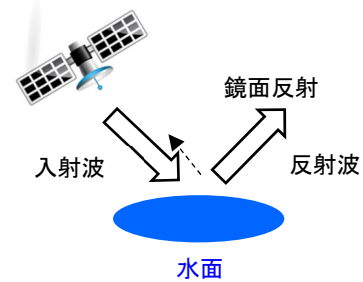


図-3 Lバンドマイクロ波の反射特性

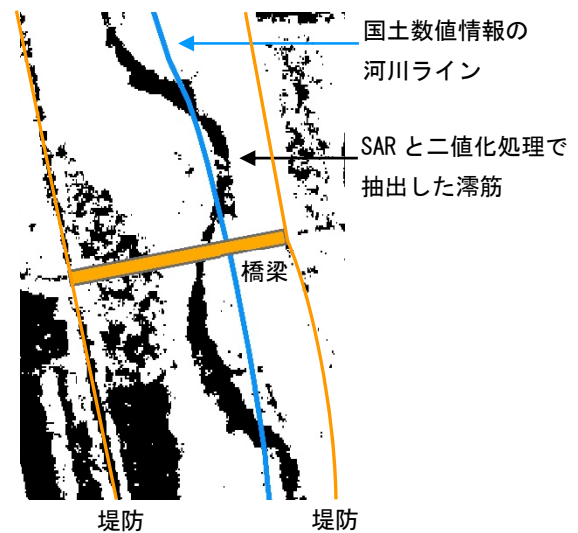


図-4 SAR画像と二値化処理で抽出した滯筋

表-7 要因の影響度評価（被災有27橋、被災無87橋、SARによる滯筋を考慮）

| 要因 | 分類 | カテゴリウエイト | ウエイト範囲 | 独立係数 | 要因 | 分類 | カテゴリウエイト | ウエイト範囲 | 独立係数 |
|------------------------|-----------|----------|--------|-------|-----------|-----------|----------|--------|-------|
| 橋脚と滯筋の交差角 (°) | ~10 | 1.152 | 3.853 | 0.215 | 示方書適用年 | ~1959 | 0.163 | 6.178 | 0.302 |
| | 10~20 | 1.679 | | | | 1960~1969 | -0.985 | | |
| | 20~30 | -0.959 | | | | 1970~1979 | -3.340 | | |
| | 30~ | -0.947 | | | | 1980~1989 | 1.173 | | |
| | 無し(田村) | -2.175 | | | | 1990~ | 2.838 | | |
| 落差工との距離 (+上流, -下流) (m) | 250~499 | -1.127 | 3.090 | 0.266 | 流路内位置比 | ~0.54 | 2.012 | 5.478 | 0.235 |
| | 0~249 | -2.483 | | | | 0.55~0.64 | 3.867 | | |
| | -250~-1 | -1.172 | | | | 0.65~0.74 | -1.094 | | |
| | -500~-251 | 0.607 | | | | 0.75~ | -1.610 | | |
| | 無し | 0.451 | | | | ~2.4 | -2.256 | | |
| 河床勾配 (%) | ~0.4 | 0.854 | 3.057 | 0.270 | 河積阻害率 (%) | 2.5~4.9 | -0.240 | 3.706 | 0.234 |
| | 0.5~0.9 | -0.510 | | | | 5.0~7.4 | 1.450 | | |
| | 1.0~1.4 | 0.321 | | | | 7.5~9.9 | 0.552 | | |
| | 1.5~1.9 | 1.637 | | | | 10.0~ | -0.709 | | |
| | 2.0~ | -1.420 | | | | ~ -0.1 | -0.711 | | |
| 橋長 (m) | ~59 | -1.245 | 5.286 | 0.205 | 根入れ長 (m) | 0.0~1.9 | -0.632 | 5.252 | 0.202 |
| | 60~119 | 1.222 | | | | 2.0~3.9 | 0.953 | | |
| | 120~179 | 2.635 | | | | 4.0~5.9 | -0.689 | | |
| | 180~239 | -2.651 | | | | 6.0~ | -4.299 | | |
| | 240~ | -0.099 | | | | | | | |

アーカイブされているSAR画像を汎用的に扱って有効活用していくことも期待される。

6. まとめ

北海道内の過去の洗掘に起因した直接基礎形式被災橋脚を標本にして、橋脚と濡筋の交差角を加えさらにその算出の一部にSAR衛星の後方散乱強度画像を取り入れ、数量化理論Ⅱ類分析により洗掘被災に影響を及ぼす有効要因を定量的に抽出した。その結果、示方書適用年、落差工との距離、河床勾配に加え、流路内位置比、橋脚と濡筋の交差角、橋長が要注意橋梁判定の拠り所あるいは着目点になり得るものと考えられる。橋脚と濡筋の交差角の算出においては国土数値情報の河川ラインのみの使用でも十分だが、SAR衛星の後方散乱強度画像を利用する手法では最新の濡筋を把握できる。今後は他の地域でも洗掘被災要因の定量的分析を行っていききたい。

謝辞：当該解析に使用したALOS-2の原初データは、寒地土木研究所と宇宙航空研究開発機構（JAXA）とのALOS-2観測データ提供に関する協定に基づきJAXAよりご提供をいただきました。また、橋梁関係

資料は、国土交通省北海道開発局よりご提供いただきました。分析にあたっては、北海道土木技術会土質基礎研究委員会基礎構造分科会より助言をいただきました。ここに御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 西田秀明、西藤淳、諏訪義雄、武内慶了、西村雄喬、西弘明、佐藤孝司、井上卓也：平成28年（2016年）台風10号等に伴う豪雨による北海道地方被災橋梁等調査報告、国土技術政策総合研究所資料、第1069号、土木研究所資料、第4384号、pp.1-45、2019.
- 2) 角田富士夫、林宏親、江川拓也：直接基礎橋脚の洗掘危険度評価に関する被災要因の判別分析、地盤工学会北海道支部技術報告集、No.62、pp.193-200、2022.
- 3) 国土交通省：国土数値情報ダウンロードサイト、<https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/index.html>（2022年9月1日確認）
- 4) 多田宏行：保全技術者のための橋梁構造の基礎知識、鹿島出版会、pp.1-273、2015.



角田 富士夫
TSUNODA Fujio

寒地土木研究所
寒地基礎技術研究グループ
寒地地盤チーム
研究員
技術士（建設）



林 宏親
HAYASHI Hirochika

寒地土木研究所
寒地基礎技術研究グループ
寒地地盤チーム
上席研究員
博士（工学）
技術士（建設・総合技術監理）
APECエンジニア（Civil）



江川 拓也
EGAWA Takuya

寒地土木研究所
寒地基礎技術研究グループ
寒地地盤チーム
主任研究員
博士（工学）
技術士（建設）