

鉄道橋の固有振動数に着目した 洪水時の安全管理システム

関 雅樹¹・田中宏昌²・堤 要二²・山下 和敏²・中野 聡³・西村 昭彦⁴

¹フェロ-会員 工修 東海旅客鉄道株式会社 (〒450-6101 愛知県名古屋市中村区名駅1-1-4JRセントラルタワーズ)

²正会員 東海旅客鉄道株式会社 (〒103-8828 東京都中央区八重洲1-6-6八重洲センタービル)

³正会員 株式会社 福山コンサルタント (〒136-0071 東京都江東区亀戸2-25-14立花アネックスビル)

⁴正会員 工博 株式会社 テス (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

本論文では、東海道新幹線のような基幹鉄道橋りょうの洪水時における安全性確保にあたり運転を規制する方法と規制値等を定めるための新しい手法を提案する。一般的に、洪水時の運転規制は、水位と橋脚幅から推定される洗掘深さから算出される危険水位等を観測して実施されている。しかし、橋脚の安定には基礎耐力が重要である。洗掘により基礎耐力が低下すると橋脚の固有振動数が低下することに着目し、橋脚の洗掘深さと固有振動数の関係を数値解析により把握し、衝撃振動試験による実測固有振動数から橋脚の安定性を評価する手法を提案した。評価手法も含めた洪水時の安全管理システムは、新幹線富士川橋りょうにおいて実効性と信頼性を確認したが、道路橋においても適用可能である。

Key Words : operation control, stability analysis of pier, natural frequency, dynamic percussion test, scour

1. はじめに

鉄道事業者は河川橋りょうの橋脚等に対して、国及び鉄道事業者が定めた規程に基づいて定期的に点検・検査を実施している。その結果、必要により、橋脚、橋脚基礎工並びに橋脚防護工の補修、補強を行い、橋脚等の健全度を適正に維持・管理している。また、洪水時に規制すべき河川水位値を定めており、その値に達すると列車を徐行または停止するといった安全性確保のための方法（以降、異常時の運転取扱いを運転規制と言う）により、列車の安全運行を確保している。しかし、近年、日本の動脈である東海道新幹線では、輸送サービス面での列車の定時運転が、強く要望されている。従って、大雨・台風後においても早期のダイヤ回復が要求されている。このため、合理的な運転規制が求められている。

洪水時の運転規制は、一般的には各河川橋りょう毎に、規制を実施すべき水位が定められている。水位は台風時などでも比較的観測しやすい指標である。一方、洗掘深さは、洪水時の濁流の中では直接正確

に把握することは困難である。このため、水位と橋脚幅から、洗掘深さを予測している。この洗掘深さから、洪水時の橋脚の安定計算により運転を規制する水位が定められる。過去これまで、洪水時の正確な洗掘深さの計測方法の研究^{1),2)}と水位と洗掘深さとの関係予測式の研究³⁾は多く報告されている。

筆者らが管理している東海道新幹線においては、洪水時に洗掘の可能性のある橋りょうでは、水位毎に洗掘深さを推定して橋脚の安定計算を行い、常時の安全率1.5で徐行運転、1.2で運転停止する運転規制を実施していた。さらに、洗掘によらない橋りょうでは、桁下の余裕高さを考慮して徐行運転・運転停止の水位を定めている。洗掘深さを直接測定する機器の開発、並びにその精度に関する研究成果⁴⁾はこれまで多く報告されている。これらの研究報告では、比較的小規模な河川の計測結果には信頼性があるものの、長大橋りょうの洪水時での適用は、現状の計測機器において十分な精度を得ているという報告はない。従って、洗掘計による運転規制は、溪流河川を管理している一部の鉄道事業者にて実施されているのみである。

一方、東海道新幹線では延長1373mの最長橋りょうである富士川をはじめ、大井川、安部川、天竜川のように500mを超える長大橋りょうが11橋架かっている。これらの橋りょうの中で、洗掘の恐れがある橋りょうでは、予測される洗掘深さから、安定計算により運転を規制する水位が定められていた。しかも、富士川をはじめとする長大橋りょうでは大雨により増水すると、流域のダム設置の現状と、広大な降雨影響流域をもつため、水位の低下速度が遅い。このため、一旦、停止水位を超えた場合、長時間にわたり列車が停止することが過去繰り返されてきた。従って、橋脚の安定性の確認方法と合理的な運転規制のあり方を再検討する必要があった。

本研究では、実測した橋脚の固有振動数から、橋脚の安定性を評価して、洪水時の運転規制に活用するシステムを提言する。洗掘深さ、あるいは、水位観測に重きをおいたこれまでの運転規制とは異なり、随時、橋脚の固有振動数を測定することにより、橋脚の安定計算から定量的に洪水時の橋脚の健全度を評価する手法である。橋脚の固有振動数は筆者らが長年の実態調査結果から、橋りょう下部工の健全度判定手法として提案した「衝撃振動試験」⁵⁾により求める。洪水時に随時橋脚の固有振動数を測定し、規制が必要となる固有振動数との比較から、運転規制の必要性の有無を決定する。

本研究で提言する洪水時の安全管理システムは、安定計算において基礎耐力の低下と固有振動数の低下との関係に着目したものである。洗掘深さと橋脚の固有振動数との関係を数値解析により定量的に把握することにより、安定計算において、使用状態または限界状態での橋脚の固有振動数と、洪水時の実測固有振動数とを比較判定し、運転規制に活用するという手法である。本報告では、洪水時における合理的な安全管理システムの提案を行い、その実効性と信頼性を確認するために、東海道新幹線富士川橋りょうにおける3年間の検証結果を報告する。

2. 橋脚の安定性評価に関するこれまでの研究と本研究の位置づけ

(1) 鉄道橋りょうの洪水時の管理方法

洪水時における鉄道橋りょうの被災原因の多くは、従来から橋脚周辺の河床洗掘によるものと定性的には判明していた。鉄道橋りょうの洪水時の安定評価に関する体系的な研究の発端は、1982年8月2日に発生した東海道本線富士川橋りょうの第4橋脚流失災

表-1 河床形態に応じた洗掘深さの管理(村上の提案³⁾)

①局所洗掘深さの算定	②河床波の影響の算定
Tarapore の提案した型の式を下記のように用いる $Z/D = 1.45 \cdot hm/D \quad (hm/D < 1)$ $Z/D = 1.45 \quad (hm/D \geq 1)$ $\left\{ \begin{array}{l} hm : \text{平均水深} \\ D = \text{橋脚幅} \\ Z = \text{洗掘深} \end{array} \right.$	1. 中規模河床波の卓越する場合 1) 中規模河床波の形態を明確に定め得る場合 その形態に応じて定めた基準面より局所洗掘深を取る 2) 河道中央部の橋脚 局所洗掘深に1mを加算する 2. 小規模河床波の卓越する場合 局所洗掘深に河床波の大きさの80%を加算する

害である。この災害後、村上は、①災害の再現実験、②洗掘及びコンクリートブロックによる防護に関する基礎実験、③全国の鉄道橋りょうの被害の実態調査、④橋りょう付近の河床変動状況の調査を実施した³⁾。全国の河川橋りょう付近の河床変動を調査し、さらに、河川関係の資料について研究を進めた結果、河床は常に変動するものであり、特に、洪水時にその変動は大きいこと、河床変動に対する河床波の影響は、河床波の形態と規模を考慮する必要があること、根固め工などの人工工作物が河床の変動に大きく影響することを報告している⁶⁾。

特に、洪水時の洗掘深さは、橋脚周辺の局所洗掘深さに河床変動の影響を加えたものであり、局所洗掘深さの算定には、過去に多くの予測式が提案されているが、Tarapore の提案した式⁷⁾を用いれば、実用的には十分であるという研究成果を、村上は報告している³⁾。さらに、村上は洪水がピークに達した時、最終的に洗掘深さは、橋脚幅の1.45倍としておけば良いという結論を提言している³⁾。これまでの研究により、橋脚周辺の洗掘深さは、橋脚の形状、橋脚幅、流量、水深、河床材料等の因子により多くの予測式が報告されている。例えば、石原、中川ら、須賀らにより洗掘深さの予測式が提案されている³⁾。これらの式に、実際に生じた東海道線富士川橋りょうの洗掘を適用して計算し、また、全国的な河川橋りょうの調査とも照合したところ、結論としては、どの式を用いてもあまり変わらないと村上は報告している³⁾。さらに、洗掘の始まる基準面をどこにとるのが重要であることも指摘している。その成果が、「河床形態に応じた洗掘深さの管理について(表-1)」として、具体的な管理方法が定められた。現在、多くの鉄道事業者において、この管理方法が採用されている。

洗掘深さの正確な把握、河床の変動と局所洗掘深さとの関係の把握、橋脚防護工の状況、並びに洪水流が橋脚に及ぼす力の算定、これら既往の研究から、

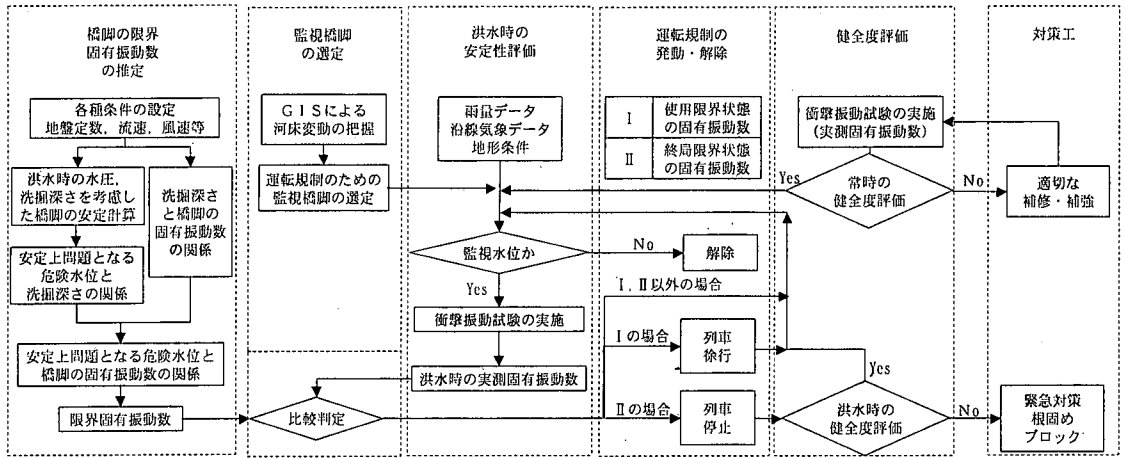


図-1 新しい洪水時の安全管理システム

これまででは、洪水時の運転規制方法として「運転を規制する水位のシステム」が成り立っていた。しかしながら、洗掘深さの算定は、いずれも経験式による間接的な評価であり、直接に橋脚の安定性を評価しているものではない。洪水時の橋脚の安定計算において必要な数値は、洗掘深さでなく、基礎耐力の低下の程度である。特に、ケーソン基礎では基礎の水平耐力の把握が必要である。従って、洪水時における橋脚の安定性評価のために、洗掘に伴う基礎耐力の低下を直接把握する手法の研究が求められていた。

(2) 衝撃振動試験による固有振動数の把握

JR東海では、日常の橋りょう下部構造物の健全度判定法として、1991年度より衝撃振動試験を採用している。衝撃振動試験による構造物の健全度判定法は、西村らが、橋脚の固有振動数が橋脚躯体の剛性と地盤ばねの変化に応じて変わることに着目して、主に橋脚の経年変化等の常時状態に対する健全度評価方法として1985年に初めて提案した³⁾。橋脚基礎部の基礎耐力が洗掘等により低下すると、橋脚の固有振動数が低下すること、及びその変化が衝撃振動試験による橋脚の固有振動数の測定により得られることを活用した方法である。

また、関らは、1995年の兵庫県南部地震で被災したラーメン高架橋に対して、衝撃振動試験を適用し、地震前後の固有振動数の差異に着目した解析を行った⁴⁾。この結果、地震による柱の剛性の低下と基礎周辺地盤の緩みの程度が定量的に把握できることが確認され、地震時の被災構造物の健全度評価法を提案している。

本研究では、橋りょうの下部工や躯体の常時、及び地震時の被災構造物の健全度評価手法として使わ

れている衝撃振動試験を、洪水時における橋脚の健全度評価手法として適用可能であることを提言する。洪水時の洗掘による基礎耐力の低下を、固有振動数の実測値から定量的に求め、洪水時における橋りょうの安定性の評価を効率的・確実に実施可能なものとする手法である。この結果、構造物の保守管理面で、固有振動数というひとつの評価値により、常時、地震時、並びに洪水時において一元的に健全度を評価することが可能となる。現場管理者にとって、データの一元管理は極めて効率的であり有効である。

なお、洪水時における水位の変化が衝撃振動試験結果に及ぼす影響に関しては、江崎らの干潮河川の橋りょうに対して実施された研究により影響を受けないという結果が報告されている⁹⁾。今回、本研究においても洪水時での測定結果から問題ないことを改めて確認した。また、洪水時における流水の影響を受けず、正しい測定結果が得られたことも確認した。

3. 橋脚の固有振動数に着目した運転規制

(1) 洪水時の安全管理システムの概要

本研究において提言する洪水時の安全管理システムの概要、すなわち、運転規制の内容、健全度評価等の基本的な手順を図-1に示す。

数値解析結果と衝撃振動試験測定結果とが一致し、任意の洗掘深さでの固有振動数が正しく把握できるかその妥当性を検証するために、本研究の特徴として、濁水期に東海道新幹線富士川橋りょうにおいて、洗掘状態を再現するための試験掘削を実施した。洗掘再現試験掘削の状況を写真-1に示す。写真は、人工的に河床から約7mまで洗掘された状況を示している。



写真-1 洗掘再現試験掘削の状況
(富士川橋りょう第25橋脚)

(2) 徐行運転・運転停止の発動・解除となる固有振動数の設定

橋脚の固有振動数を用いた運転規制は、洗掘の深さを定量的に把握することが可能なため、橋脚が受ける被害のレベルの推定、及び安定計算上危険となる洗掘深さの想定が可能である。従って、洪水時の安定計算上、限界となる固有振動数を予めとめておくことにより、洪水時において限界固有振動数を下回る状態にならない場合は、従来の規制水位を超えても、徐行運転・運転停止を実施する必要がないという改善結果を得る。

固有振動数による洪水時の橋脚の健全度評価は以下による。まず、洪水時の水圧と洗掘深さ等を考慮して橋脚の安定計算を行い、安定計算上問題となる危険水位と洗掘深さの関係を把握する。一方、洗掘深さと洗掘による橋脚固有振動数の低下の関係を、振動モデルによる数値計算と平常時の橋脚の実測により得られた固有振動数の値から把握する。これら2つの関係式から、共通である洗掘深さを消去することによって、安定計算上問題となる危険水位と橋脚の洗掘固有振動数との関係を導く。この関係から、水位に関わらず橋脚の安定計算上、限界状態での洗掘深さに対応した最小となる固有振動数を限界固有振動数として設定する。この限界固有振動数を洪水時の運転規制の発動・解除の判断値として活用するのが本研究の主題である。

安定計算には、限界状態設計法^{10), 11)}を用いる。使用限界状態と終局限界状態における安全性の照査は、基礎の傾斜角、基礎天端の水平変位量、レールレベルの折れ角、鉛直支持、並びに水平支持に対する検討項目について実施する。安定計算は地盤定数、流速、風速等の各種荷重条件を設定し、橋脚の基礎の深さ、洗掘の深さ、水位をパラメーターとして、

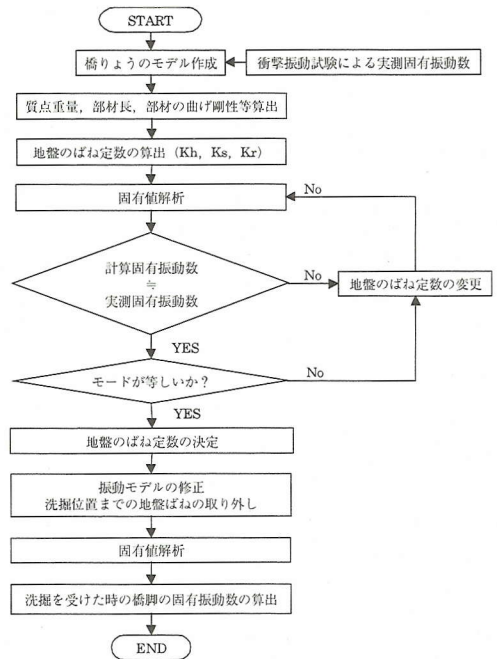


図-2 洗掘を受けた時の固有振動数の算出

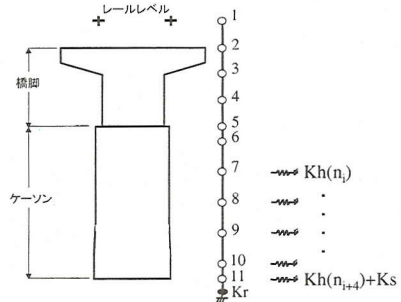


図-3 橋脚のバネ・マス系振動モデル

橋脚の安定計算から問題となる危険水位と洗掘深さの関係を把握する。なお、地盤定数は、PS検層、標準貫入試験、密度検層等により得られた現地での土質試験値を用いる。

(3) 洗掘を受けた時の固有振動数の算出

洗掘があっても、比較的浅い場合における、洗掘深さと橋脚の固有振動数との関係は実測値から求める。構造形式・寸法が同一な橋脚を選定し、現状の河床高さでの実測固有振動数を得ることにより、その構造条件における概略の振動特性が把握できる。しかしながら、洪水時の安定上限界となるような大きな洗掘を受けた時の橋脚の固有振動数は、予め数値解析から算出する必要がある。その算出手順を

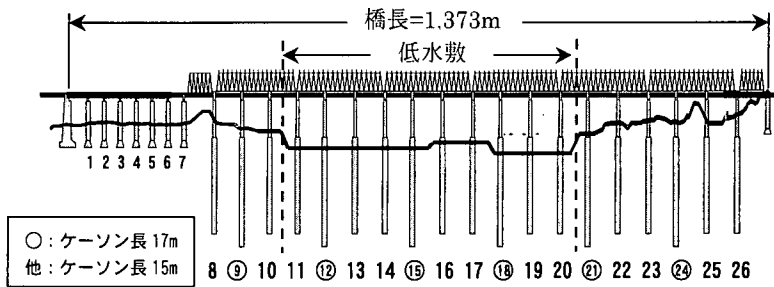


図-4 新幹線富士川橋りょう全体図 (1999年2月測定)

図-2に示す。洪水時に洗掘を受けた橋脚の固有振動数は、現地の地質調査データと平常時において測定された固有振動数から、橋脚のパネームス系振動モデルによる数値解析によって算出する。次にこの算出手順について新幹線富士川橋りょうの実例により説明する。

数値解析には、図-3に示すパネームス系振動モデルを用いる。橋脚の振動モデルを用いたシミュレーション解析では、土質試験値の中から、せん断波速度 V_s 、ポアソン比、密度等を用いて、橋脚基礎の側面および底面の地盤ばね定数を初期値として設定する。このばね定数 (K_h , K_s , K_r) は、構造物の設計計算で用いる地震時のばね定数である¹⁰⁾。この振動モデルの固有値解析から算出される固有振動数が、橋脚の実測固有振動数と一致するまで地盤ばね定数を橋脚側面、底面ともある一定の倍率で変化させる。このばね定数に補正をかけるための一定の倍率を、本報告では解析倍率と記す。補正の必要性は、衝撃振動試験によるひずみレベルが $10^{-6} \sim 10^{-5}$ であるのに対し、安定計算に用いる地震時のばね定数は、地震時の地盤のひずみレベルが $10^{-2} \sim 10^0$ のレベルであるためである。このひずみレベルの差を考慮して、数値解析では、衝撃振動試験の地盤ばね値に対して3~10倍の補正を実施することにより実測固有振動数と一致することは、関らが明らかにしている⁹⁾。なお、解析倍率は K_h , K_s , K_r のいずれに対しても一律に乗じることとした。地盤ひずみはケーソン基礎の回転中心に生じる回転角に比例するものと考え、地盤の抵抗はすべて回転中心における一つの回転ばねとして集約できると考えたからである。

このように、基礎耐力評価は、橋脚基礎の側面および底面の地盤ばね定数の変化として数値解析により説明できる。従って、洗掘による基礎耐力の低下に対する評価は、橋脚の固有振動数を実測することにより直接把握することができることを示した。

4. 橋脚の限界固有振動数の算出

(1) 新幹線富士川橋りょうでの例示

新しい洪水時の安全管理システムの導入・実証は東海道新幹線の富士川橋りょうにおいて初めて実施した。ここでは富士川橋りょうを例として、運転規制に必要な限界固有振動数の算出手順を示す。

富士川は幹線流路延長128kmの1級河川であり、流域面積3,990km²の80%近くが2000m級以上の山地である。その河道は日本の三大急流のひとつに数えられる急勾配で、建設省の計画流量は16,600m³/secとなっている。過去、台風時には運転停止の他、橋脚防護のための根固めブロックの流失等の被害をもたらしてきた。特に、1982年8月2日の台風10号において、在来線の富士川橋りょうの下り線4号橋脚が流出等の被害を受け、東海道線が長期不通となったことはよく知られている。そのため、東海道新幹線においても、洪水時の運転規制は洪水時の規制水位により厳しく管理されていた。

1991年9月10日の台風18号の影響により、富士川の水位は上昇し、運転停止水位を長時間に亘って超える事象が発生した。さらにこの時、台風の通過速度が速く、天候の回復が早かった。しかしながら、水位は減少する様子が見られず、運転停止水位を下回るまで継続的に長時間運転停止を実施することとなった。このため、橋脚の健全度が確認できれば、規制水位に関らず異常時の運転規制を解除できる新しい手法の必要性が生じた。筆者らが、本研究に取り組み契機となった事由である。

(2) 洗掘再現のための試験掘削

東海道新幹線富士川橋りょうの全体横断面図を図-4に示す。26橋脚は全てケーソン構造であり、河道部は、上部工はスパン60m×3径間の鋼製の連続下路トラス桁橋が6連、下部工はケーソン深さが15mと17mの2種類である。第11橋脚から第20橋脚までの10橋

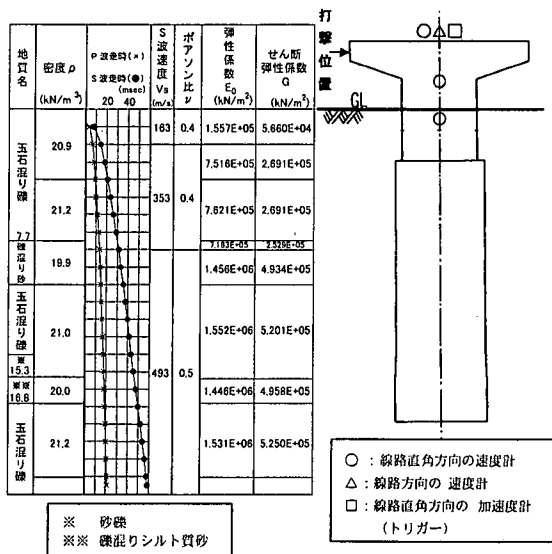


図-5 衝撃振動試験の測定点位置と地質調査結果

脚が通常時の低水敷の河道中にある。河道中の各橋脚の河床面は、平水時では、ケーソン天端面-2m~-3mの位置にある。それ以外の橋脚の河床面は概ねケーソン天端面+3mである。

1991年以降に通常時の点検・検査の一環として実施された衝撃振動試験では、異常な固有振動数はなく、新幹線富士川橋りょうの26基全ての橋脚が健全であることが確認されていた。その後、新たに、地質調査を実施し、得られた地盤定数を用いて安定計算、数値解析を実施した。この結果から、橋りょうの増水時におけるより合理的かつ安全性を具体的に示すことのできる管理方法の提案を行う。

橋脚の限界固有振動数算出のためには、地盤定数の把握が必要である。富士川の場合、建設当時等の過去に行われたボーリング調査、常時微動測定等種々の地盤調査の結果から、地表面から70m程度の深さまでは低水敷の河道中の橋脚と高水敷の第25橋脚は同じ地盤特性の玉石混じりの砂礫層であることがわかった。このため、高水敷の第25橋脚付近の地盤定数は河道中の橋脚と同一地盤という結論に達した。従って、数値解析に用いる土質定数は、地盤調査、人工洗掘等により実地検証することとし、濁水期に河道でない高水敷の第25橋脚（ケーソン深さ15m）を用いて実施した。

第25橋脚の周辺地盤での地盤調査項目は、ケーソン基礎の底面位置より-2mまでのボーリング、標準貫入試験、PS検層試験、密度検層試験である。地盤調査の結果を図-5に示す。土被りの部分でもある表層の2mを除いては、 $V_s=350\sim 500$ m/sの玉石混じり

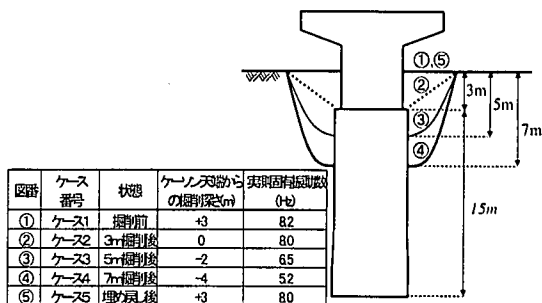


図-6 試験掘削のケース一覧

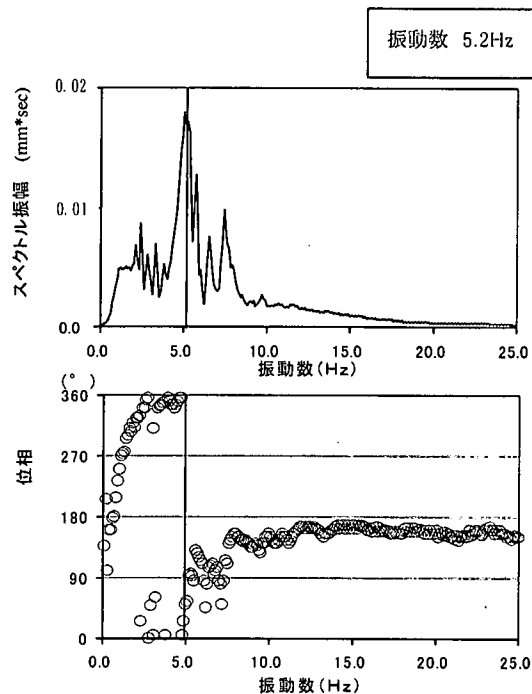


図-7 ケース4の場合の衝撃波形の周波数分析結果

り礫層である。

次に、本報告の特徴である洗掘を想定した試験掘削について説明する。提言する新しい運転規制では、固有振動数の値の信頼性が、洪水時の列車の安全に大きく関わるため、その実施に際しては十分な確認が必要であった。そこで、富士川の第25橋脚において、洗掘深さと橋脚の固有振動数の関係が、理論値と実測値とで一致するか検証する目的で試験掘削を実施した。

具体的には、図-6に示す洗掘深さの違う5ケースについて試験掘削を実施し、洗掘深さと橋脚の固有振動数の関係を把握した。最大掘削深さは、新幹線の運転中のため、安全性を考慮して、現行河床面から7m（ケーソン天端から-4m）までとした。また、

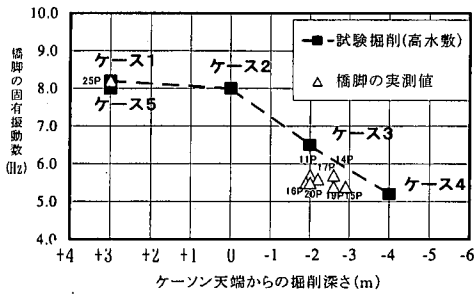


図-8 橋脚の掘削深さと橋軸直角方向の固有振動数の変化

埋め戻し後は、地盤の緩みから掘削前の固有振動数とは異なると予測されたため、確認のために固有振動数の測定を行った。5ケースの中から最大掘削深さ7mのケース4について、橋脚天端の衝撃波形を周波数分析した結果を図-7に示す。これらの橋脚の実測固有振動数から橋脚の掘削深さと固有振動数の関係を図-8に示す。この結果、ケーソン天端までの掘削ではほとんど固有振動数は変化しないが、それより深い掘削では固有振動数は大きく減少する。これは、ケーソン天端より浅い箇所では比較的柔らかい表土であるために掘削による影響が少ないのに対し、ケーソン天端以深では、比較的良好な地盤であるため掘削による影響が大きいことによる。また、埋め戻し後の固有振動数は特別な転圧をすることなしにほぼ回復している。これは周辺地盤の土質が比較的粒度の大きい玉石混じり礫であり、密度も比較的大きく、土圧による基礎の拘束効果が有効に作用したためであると考えられる。河道部のケーソン長15mの橋脚の実測値を図-8に示す。河道部の橋脚は、過去に現在の河床位置よりも深い位置まで洗掘を受け、その後、現在の位置まで埋め戻しているが、その影響で第25橋脚と若干異なっていると考えられる。

(3) 数値解析による固有振動数の算出

試験掘削を実施した第25橋脚の掘削前の現河床高さにおける実測固有振動数は8.2Hzであった。同じ状態での振動モデルによる数値解析から算出される計算固有振動数が8.2Hzと一致するまで図-2に示す解析手順にて、地盤ばね定数の解析倍率をケーソン側面、底面とも変化させた。その結果、設計時の地盤ばね定数に対して解析倍率を7倍にした場合に、数値解析による固有振動数も8.2Hzとなる。次に、深い洗掘を想定したケース4の実測固有振動数5.2Hzに対しては、同様に算出し、解析倍率は5倍となる。

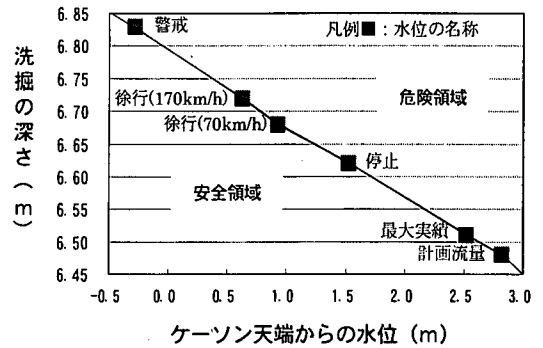


図-9 列車走行限界水位と洗掘の度合い(使用限界)

また、低水敷内の第17橋脚(ケーソン深さ:15m, 河床高さ:ケーソン天端より-2.2m)の実測固有振動数は5.6Hzに対して、解析倍率は5倍となり、ケース4と同様の結果を示している。

第25橋脚において河床面が最も高いケース1の解析倍率が7倍、河床面が低いケース4が5倍、ケース4と同程度の河床位置である第17橋脚が5倍であった。この結果は、河床面の高低によって解析倍率が変化するを示しているが、これは河床面の高低によって地盤の抵抗が変化するため、地盤のひずみレベルも変化する、解析倍率も変化したことによる。このことから、河床面の位置が同程度であれば、衝撃振動試験時の地盤のひずみレベルは同程度となるため、同じ解析倍率の値を用いる。なお、解析倍率は地盤によって変える必要があるが、今回河道中の第11橋脚から第20橋脚での実測固有振動数と解析固有振動数が一致するのは、解析倍率がすべて5倍であった。

以上のように、掘削深さの変化による橋脚の固有振動数の変化を、振動モデルを用いた数値解析により説明できることを確認した。特に、任意の洗掘深さでの固有振動数は、数値解析においては、構造物の設計時の地盤ばね定数に対して解析倍率を乗ずることにより算出される。しかも数値解析の妥当性は-7m程度の試験掘削により十分実証された。

(4) 限界固有振動数の算出

安定計算上問題となる危険な状態となる洗掘深さは、限界状態設計法により算出される。図-5に示したケーソン深さ15mの橋脚の場合では、使用限界状態においては基礎天端の水平変位量が最も厳しい条件となる。基礎天端の水平変位量が限界値を示す時の水位と洗掘深さの関係を図-9に示す。この場合、水位、洗掘深さ共、ケーソン天端を基準高さとする。

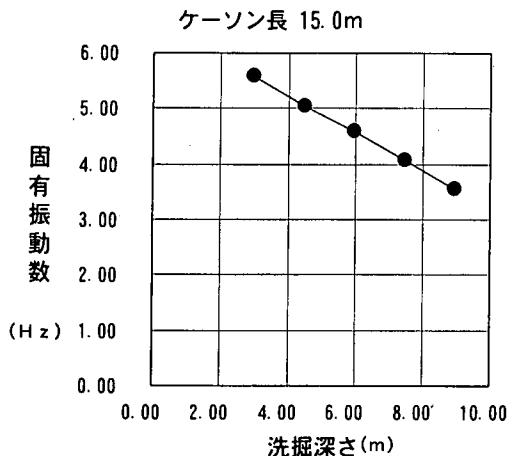


図-10 洗掘深さと橋脚の固有振動数の関係

例えば、列車走行安全上危険となる洗掘深さは、ケーソン天端からの水位 - 0.28m、警戒水位 (3,500m³/sec) のとき6.83mまで、水位2.82m、計画流量 (16,600m³/sec) のとき6.48mまでである。次に、洗掘深さと橋脚の固有振動数の数値解析による関係を図-10に示す。洗掘深さ - 3.0mから - 9.0mの範囲で、5ケースについて、所定の位置まで地盤ばねを変化させて固有振動数を数値解析により算出した結果である。なお、振動モデルに取り付けた地盤ばねは、先に示した第25橋脚の地盤のPS検層から得られたせん断波速度Vs、ポアソン比νと密度検層から得られた地盤の密度を用いて、設計計算に用いる地震時の地盤ばね定数を算出し、その地盤ばね定数に解析倍率を5倍として算出した。

さらに、図-9と図-10を用いて、列車走行限界水位と橋脚の固有振動数の関係を求めた結果を図-11に示す。図において固有振動数が4.42Hz以上あれば、使用限界状態では、水位の変化に関わらず、橋脚は常に安定な状態を保っている。この値が図-2に示す限界固有振動数の具体的な値である。従って、洪水時において衝撃振動試験により測定された固有振動数が、この限界固有振動数以上の場合、橋脚は安定であるため、徐行運転・運転停止の取扱いは必要がないということになる。

5. 運転規制と固有振動数の測定頻度

固有振動数を用いた運転規制の基本的な考え方を示す。徐行運転等の規制発動・解除の判断基準値は、徐行運転が使用限界状態における限界固有振動数、運転停止が終局限界状態における限界固有振動数と

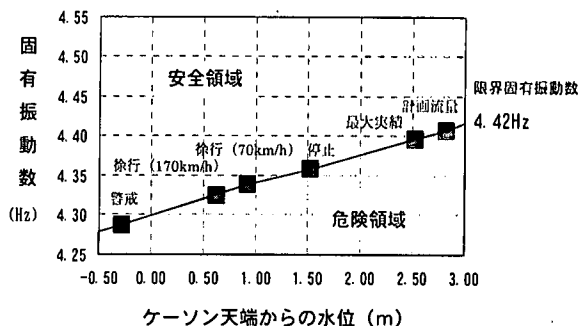


図-11 安定計算における水位と橋脚の固有振動数の関係 (使用限界)

表-2 新しい運転規制 (富士川の例)

観測開始 (警戒水位)	規制の発動、解除基準	観測頻度	富士川橋りょうの橋脚の固有振動数等
徐行運転 (170km/h)	現状の監視水位	1回 / 1時間	ケーソン天端より -0.28mの水位
徐行運転 (170km/h)	時間的準備を見込んだ固有振動数	1回 / 30分	5.0Hz以下
運転停止	限界固有振動数 (使用限界状態)	1回 / 15分	4.5Hz以下
停止規制	限界固有振動数 (終局限界状態)	1回 / 15分	3.9Hz以下

定めた。衝撃振動試験により固有振動数の測定開始のタイミングは現状の監視水位に達した時点としてここでは、東海道新幹線富士川橋りょうを例として具体的に説明する。

図-11に示した安定計算上危険となる水位と橋脚の固有振動数の関係から、橋脚の限界固有振動数は使用限界状態において、4.42Hzであることが導かれた。これは洗掘深さ - 6mに相当する。また、衝撃振動試験による固有振動数の測定精度は0.1Hzであることから、実際の運転規制は、4.5Hzを70km/h徐行の固有振動数として設定する。また、同様に算出した終局限界状態において、限界固有振動数として3.85Hzが得られる。従って、運転停止の固有振動数は、3.9Hzとした。従来の警戒水位に相当する規制は、橋脚の固有振動数の測定開始水位として、警戒水位 (ケーソン天端より - 0.28m) をそのまま適用した。東海道新幹線富士川橋りょうの運転規制の考え方をまとめて表-2に示す。表中に170km/h徐行振動数として5.0Hzを付け加えたのは、洗掘の進行の有無を確認する時間的準備と監視体制強化のためである。洗掘深さではケーソン天端より - 4.0mであり、現状より1.0m低下したことに相当する。

さらに、一般的な規制時の固有振動数の観測頻度と運転規制の解除方法も表-2 に示す。これらの規制の内、徐行運転（70km/h）と運転停止の場合には、激しい解除方法とした。

警戒水位の段階では平水位に戻るまで1時間に1回程度の観測を行い、平水位に戻った時点で規制解除とする。徐行運転（170km/h）の段階では急激な洗掘の進行に伴う固有振動数の変化に対応するために30分に一回程度の観測を行い、固有振動数の増減を常時監視する。徐行運転（70km/h）の段階では、使用限界状態の限界点であることから、ほぼ連続測定となる15分に一回程度の観測を行い、固有振動数が3.9Hz以下になるか否か確認する。規制解除は、徐行運転（70km/h）の段階では、固有振動数が4.5Hz以上に回復したことを確認して規制解除する。また、停止の段階では終局限界状態の限界点であることから、徐行運転（70km/h）と同様に固有振動数が4.5Hz以上に回復したことを確認して初めて規制解除とすることとした。

6. 東海道新幹線富士川橋りょうにおける実効性の検証

多くの橋脚がある長大橋りょうでは、正確な運転規制の実施のために、洪水時に監視すべき橋脚の選定が重要となる。全ての橋脚に対して、衝撃振動試験を実施することは、時間と労力を勘案すれば、システムとして成立しない。また、安全面では、湾曲・滞筋等の河道・河床変化を把握し、深堀りの発生する橋脚を予測しておく必要がある。滞筋の変動把握は最も大切である。つまり、多くの橋脚の中から、洪水時において危険となる監視すべき橋脚を予め選定しておく必要がある。特に、河川では橋りょうの上流・下流部において、川砂の採集等により河床の低下及び落差が生ずる場合がある。従って、河道・河床の長期にわたる時系列変化を把握することが重要である。本研究では、河川側の管理台帳、JRの空中写真等からGIS（地理情報システム）を活用して河道・河床の変化を把握することにより、監視すべき橋脚を選定した¹²⁾。

従来の東海道新幹線富士川橋りょうにおける運転停止の規制水位は、ケーソン天端から1.52mであった。この値は水深が7.52mであり、流量に換算すると10,000m³/sec相当である。また、列車最高速度270km/hを70km/hに徐行する規制水位はケーソン天端から0.92mであった。同様に、水深が6.92m、

表-3 従来の運転規制（富士川の例）

運転規制等	規制水位 (m)*	流量 (m ³ /s)	T. P. (m)	桁下水位 (m)	表面最大 流速 (m/s)	再現確率
警戒水位	-0.28	3,500	9.7	9.0	4.9	約1年
徐行水位 (170km/h)	(0.62)	(6,000)**	(10.6)	(8.1)	—	—
徐行水位 (70km/h)	0.92	7,500	10.9	7.8	5.9	約10年
停止水位	1.52	10,000	11.5	7.2	5.7	約40年 1985.7 台風
既往実績 最大流量	2.52	14,400	12.5	6.2	6.8	約90年 1982.8 台風
計画流量	2.82	16,600	12.8	5.9	9.5	約150年

*：水位はケーソン天端を基準とする
**：170km/h の6,000 m³/sは今回追加

表-4 過去の増水時の固有振動数

測定日	時刻	固有振動数 (Hz)	桁下水位 (m)	運転規制等	
				従来	今回
97.6.20	16:00	5.6	8.5	警戒	なし
	17:00	5.6	8.4	警戒	
98.9.16	10:30	5.6	7.8	70 km/h 徐行	
	11:24	5.6	8.0	170 km/h 徐行	
	12:18	5.6	8.1	170 km/h 徐行	
99.6.30	9:59	5.6	8.7	警戒	
	13:23	5.6	8.9	警戒	

7,500m³/secに相当する流量にて設定されていた。新幹線富士川の運転規制水位と流量、流速等との数値を総括して表-3に示す。

新幹線富士川橋りょうの限界固有振動数は、数値解析により算出した。しかしながら、橋脚の固有振動数に対して、洪水時における水位の変化の影響、水のスロッシングの影響、並びに流木、土石の橋脚への衝突による影響等を確認する必要がある。つまり、水位がほとんど無い状態での橋脚の固有振動数と洪水時の値とは同じか否か確認する必要がある。このため、これらの影響について、3年間にわたり、台風等による実際の洪水時において確認した。この間、警戒水位を超える洪水は3回生じた。ここでは、最も流量が多かった1998年9月16日、台風5号の検証結果を報告する。

台風5号の影響で富士川流域では、連続降雨量が225mmに達した。このため、桁下水位は10時30分には、7.8mに達した（ケーソン天端からの水位0.92m）。この水位は、従来の新幹線の運転規制によれば、70km/h徐行水位である。表-2に示す新しい運転規制の考え方により、警戒水位を超えた7時30分から予め第17橋脚に設置した衝撃振動装置を用いて随時橋脚の固有振動数が測定された。測定値の例と

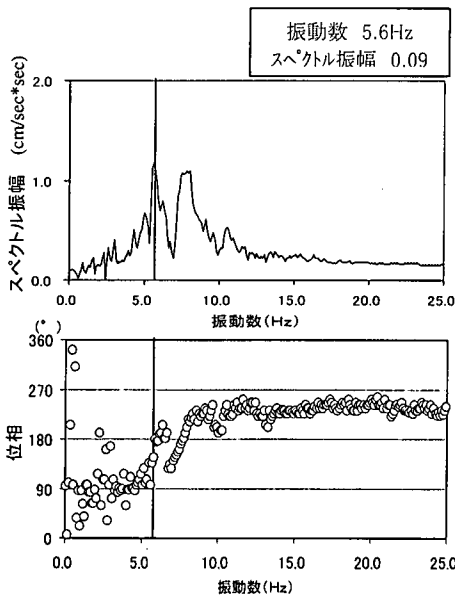


図-12 橋脚天端の衝撃波形の周波数分析結果
(1998年9月16日10:30、桁下水位7.8m)

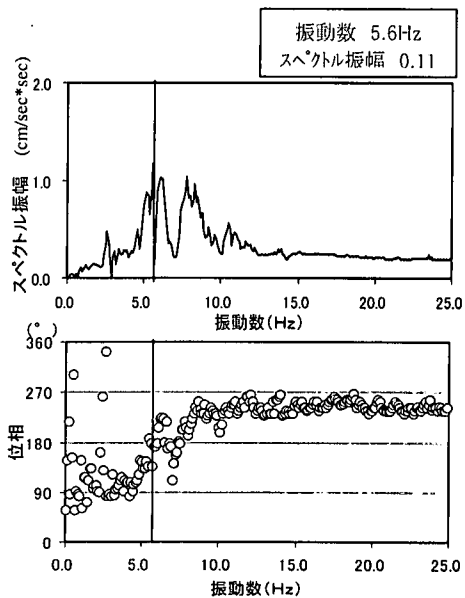


図-13 橋脚天端の衝撃波形の周波数分析結果
(1998年9月16日12:18、桁下水位8.1m)

して水位がピークとなった10時30分と減水がみられた12時18分の2回について、第17橋脚天端の線路直角方向の衝撃波形とその周波数分析の結果を図-12、図-13に示す。これら洪水時の橋脚の固有振動数はいずれも5.6Hzであり、平常時及び警戒水位に達した時の測定結果と同じ値である。なお、現地調査により橋脚に洗掘は生じていないことを確認した。このことより、洪水時の橋脚の固有振動数の変化は、洗掘のみで変化し、水位の変化による橋脚の固有振動数への影響、並びに増水時の水のスロッシングや流木、土石の橋脚への衝突に対しては影響が無いことを確認した。

また、洪水時の運転規制では、表-4に示すように、増水の結果、従来では徐行運転を実施していたものが、新しい運転規制ではすべて正常運転が確保された。この結果、本研究で提案した新しい運転規制の改善効果と妥当性が検証できた。

衝撃振動試験は測定が簡易であるため、専門家によらず現場の保線管理社員により、測定が可能であるという利点がある。これまでの検証・分析結果から、固有振動数に着目した新たな安全管理システムを導入するための信頼性は確認された。

7. まとめ

今回、洪水時における合理的な安全管理システムの提案を行った。事例研究の対象とした東海道新幹

線富士川橋りょうにおける3年間での現地観測結果から、その実効性と信頼性を確認した。本研究での主な成果は以下の通りである。

(1) これまで水位のみに着目して行われてきた洪水時の運転規制に代えて、洗掘の状況が直接把握可能な橋脚の固有振動数による運転取扱いは合理的である。

(2) 洪水時における橋脚の固有振動数の把握方法として衝撃振動試験は有効である。今回の研究成果により、橋脚の健全度判定は、常時・地震時・洪水時のいずれの場合においても衝撃振動試験による一元管理が可能となった。

(3) 洗掘を受けた橋脚の任意の深さにおける固有振動数は、パネーマス系振動モデルを用いた数値解析により算出可能である。

(4) 土被り量の変化と固有振動数の関係は、現地掘削試験が最も精度良く把握できる。運転規制に適用する固有振動数の把握のため、橋りょうごとに現地掘削試験を実施することが望ましい。なお、地表面から7m(ケーソン天端-4m)程度でも洗掘状態再現のための現地試験掘削は有効であり、人工掘削から適正な地盤のパネ定数の解析倍率を求めることにより、精度のよい解析結果が得られた。

(5) 今回提案した新しい運転規制では洗掘の度合いが定量的に把握可能なため、洪水時に橋脚が受けた被害の程度、及び安定計算上危険となる状態の把握も可能である。

近年の異常豪雨により貴重な社会基盤が流失さ

れる危険性は依然残っている。鉄道事業者は各橋りょうごとに実態把握を実施して事前の防災対策を実施しておく必要がある。また、河川の砂の採取による河床低下には充分留意する必要がある。河川管理者との気象情報連絡の徹底、並びに適正な河床高さの維持管理に関する協力体制の強化が望まれる。今後、洪水時における鉄道橋の安全管理のためには、河川管理者と鉄道事業者との協力体制の深度化が益々重要な課題となる。

なお、洪水時における継続的な橋脚の固有振動数の測定結果を蓄積することにより、現状設置されている根固め防護工の健全度判定並びに合理的な橋脚防護工の設計に活用の可能性がある。この内容に関しては、別稿にて報告の予定である。

謝辞：本研究に際し、台風の来襲の都度、暴風雨の悪環境の中で、衝撃振動試験を実施したJR東海の静岡新幹線構造物検査センターの神田仁氏、樋口邦寛氏を初めとする所員各位、GISを活用した調査研究に助言頂いた(株)パスコの各位、並びに技術的な助言を頂いたJR総研の小山幸則氏、村田修氏、村石尚氏他各位に紙面にて深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 森野亮宏, 村石尚: 合理的な洗掘対策のうち洗掘検知方式の研究, 鉄道技術研究所速報 80-1002, 1980. 2.
- 2) 村石尚: 合理的な洗掘対策のうち洗掘検知方式の研究(第2報), 鉄道技術研究所速報, 80-159, 1981. 10.
- 3) 村上温: 鉄道橋の洪水時被災機構と安全管理に関する

る研究, 鉄道技術研究報告, No. 1307, 1986. 3.

- 4) 田中淳一: 洗掘検知装置の開発, 日本鉄道施設協会誌, Vol. 36, No. 3, pp. 37-39, 1998. 3.
- 5) 西村昭彦, 棚村史郎: 既設橋梁橋脚の健全度判定法に関する研究, 鉄道総研報告, Vol. 3, No. 8, 1989. 8.
- 6) 村上温, 村石尚, 四十九勇治: 出水による橋りょう下部工の被災調査について, 土木学会年次講演会, Vol. 2, pp. 551-552, 1983.
- 7) Tarapore, Z.S.: A Theoretical and Experimental Determination of The Erosion Pattern Cansed by Obstructions in an Alluvial Channel with Particular Unpublished Ph.D. Thesis, University of Minnesota, 1962.
- 8) 関雅樹, 水谷健太, 西村昭彦, 中野聡: 兵庫県南部地震によるラーメン高架橋の振動特性に関する考察, 土木学会論文集, No550/V-33, pp. 145-154, 1996. 11.
- 9) 江崎俊岳: 衝撃振動試験による「増水期橋りょう下部工」の安全性確認の妥当性, 平成9年度総合技術講演会(構造物検査)講演概要集(社団法人日本鉄道施設協会主催), pp. 25-28, 1997. 10.
- 10) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物, 1997. 3.
- 11) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物, 1992. 10.
- 12) 樋口邦寛, 山下和敏, 赤堀和彦, 関雅樹: 新幹線河川構造物の検査管理におけるGISの活用, 土木学会第56回年次学術講演会, 2000. 9, CS-246.

(2000.6.30受付)

A PROPOSAL OF TRAIN OPERATION CONTROL SYSTEM OF RAILWAY BRIDGES CONSIDERING NATURAL FREQUENCY OF PIERS UNDER FLOODS

Masaki SEKI, Hiromasa TANAKA, Yoji TSUTSUMI,
Kazutoshi YAMASHITA, Satoshi NAKANO and Akihiko NISHIMURA

In this study, a new method is suggested to determine the rule for train operation control on bridges under floods. In the method, the drop in natural frequency of a pier with reduction in the supporting power of fundation caused by scour is considered. And it was verified that the measured natural frequency obtained through dynamic percussion test coincides with the calculated one obtained through dynamic analysis based on the relationship between scour depth and natural frequency of the pier.

This rational and generally applicable method, which has already been proved on the site excavation tests of bridge piers on the Tokaido Shinkansen, can also be applied to road bridges.