

## V-9 橋梁下部工の機能更新技術に関する試験調査

研究予算：運営費交付金（道路整備勘定）  
研究期間：平 12～平 15  
担当チーム：基礎チーム  
研究担当者：福井 次郎、竹口 昌弘  
梅原 剛

### 【要旨】

橋梁の架替え時に、下部構造を合理的に再利用することを目的として、補強・架替え工事および塩害損傷の実態調査を行うとともに、効率的な耐力評価手法の検討を実施した。

その結果、下部構造の補強、架替えの要因として、耐震補強以外では洗掘、塩害、老朽化によるものが比較的に多いこと、飛来塩分量およびコンクリート中への塩分浸透度を適切に評価することで塩害により損傷を受けた下部構造の供用可能期間が概略推定できること、衝撃振動試験を有効に活用することにより、既設下部構造の健全度が概略把握できることなどを明らかにした。

キーワード：下部構造、再利用、耐力評価、衝撃振動試験、補強

### 1. はじめに

高度成長期に整備された多数の橋梁において、今後、老朽化や車道部の拡幅などに伴う架替え工事の増加が予想される。特に下部構造を含めた橋梁全体の架替えは、多額の工費、工期を要し、周辺環境への影響も大きい。一般に下部構造は、上部構造に比べ老朽化に伴う耐力の低下は少なく、洪水や地震などにより被災した場合でも、損傷後の保有耐力を精度よく評価することができれば、適切な補強により再利用が可能と考える。

しかし、架替えが対象となる橋梁は、供用開始から数十年経過しているケースが多く、そのために設計図書等の資料が散逸し、既存資料からでは耐力評価に必要な十分な資料が得られない場合が多い。また、洗掘等により地盤に変状が生じた場合や、老朽化、塩害、災害等により部材に損傷・劣化が生じた場合は、設計時の資料では不十分である。このような場合は、現地調査を行い耐力評価に必要な情報を補わなければならないが、その方法は多岐にわたっているためすべてを実施することは非現実的である。さらに、下部構造の一部を構成する基礎は、地中にあるため、一般にその調査・点検には多くの工費・工期が必要となる。このようなことから、より簡便な方法で構造物の状態を概略的に把握することが可能であれば、その後の耐力評価に必要な調査・点検が効率的に実施できるものと考えられる。

そこで、本課題では、橋梁の架替え時に、既設下部

構造を撤去することなく有効に再利用することを目的として、アンケート調査により既設橋梁の補強および架替え工事の実態を把握するとともに、経年的な劣化要因の一つである塩害の将来予測、衝撃振動試験を活用した効率的な耐力評価手法について検討を行った。

### 2. 研究方法

#### 2.1 補強および架替えの実態調査

橋梁の架替え、補強の実態および現状における既設下部構造の耐力評価手法とその課題を把握するために、各地方整備局、北海道開発局、沖縄総合事務局に対し、耐震補強以外に実施した補強工事、架替え工事（調査・計画中のものを含む）に関するアンケート調査を実施した。

基本的な調査項目は、①供用開始年月、②補強・架替え年月、③補強・架替え理由、④補強・架替え方法などである。さらに、下部構造の補強または架替えを行った理由として、「洗掘」、「塩害」、「老朽化」のいずれかを挙げた橋梁に対して、補強または架替えの必要性の判定方法とその判定基準についても調査を行った。

#### 2.2 塩害による損傷予測の検討

橋梁の補強または架替えの要否を判断する際には、調査・点検により現状の健全性を把握するだけでなく、経年的な部材の劣化による損傷の将来予測を適切に行うことが重要である。ここでは、下部工における経年的な部材の劣化要因の一つである塩害により損傷した下部構造の供用可能期間を把握することを目的に、

既設下部構造の損傷実態データを収集・整理し、それと塩化物イオン濃度の推定式に基づく試算結果を比較検討した。

ここでは、各地方整備局、北海道開発局、沖縄総合事務局が管理する橋梁の橋梁諸元データおよび橋梁定期点検(近接)データを使用した。これらのデータは、国土交通省道路管理データベースシステム(M I C H)と(財)道路保全センターがM I C Hのデータファイルを利用して開発した橋梁保全支援システムをデータソースとしている。

### 2. 3 効率的な耐力評価手法の検討

架替え時に既設下部構造の耐力評価を行うにあたり、詳細な現地調査の実施前に簡便な方法で下部構造全体の損傷度を概略把握することを目的に、鉄道橋の健全度評価方法として多くの実績を有する衝撃振動試験に着目して、その有効性を検討した。

## 3. 研究成果

### 3. 1 補強および架替えの実態調査結果

#### 3. 1. 1 補強および架替えの実績

アンケート調査による既設下部構造の補強または架替えされた橋梁の回答数は67橋である。そのうち、補強が23橋、架替えが44橋であった。

これらの橋梁の補強、架替えを実施した理由を表-1に示す。ここで、「耐久性の低下」とは主として塩害による橋脚の躯体コンクリートの損傷を指している。これによると、最も多い理由は、「耐久性の低下」であり、既設下部構造の補強、架替えの検討においては、耐久性の評価が重要であることがわかる。

なお、本アンケートでは、架替えした橋梁に対し、再利用しなかった理由の調査も行ったが、その主な理由としては、①コンクリートの劣化が著しいため、②下部構造の詳細が不明で耐力評価ができないため、③

表-1 補強・架替えを実施した理由(複数回答)

実施理由	補強 (23橋)	架替え (44橋)	合計 (67橋)
道路構造変更(拡幅、線形の変更等)への対応	5	11	16
河川条件を満足しない	0	10	10
交通量増加への対応	1	11	12
車両大型化への対応	4	13	17
洗掘	6	1	7
耐久性の低下	6	19	25
その他	9	2	11

道路構造の変更により、幅員や取り付け位置が変更されたため、④河川改修計画に合わせるため、であった。

このうち、①、②については、既設下部構造の耐力評価に関係している問題であり、橋梁を補強により再利用するか、架替えするか判断には、コンクリートの劣化の適切な評価や構造詳細が不明な下部構造の性能を適切に評価する方法が必要であるといえる。

また、再利用するための補強工事を実施するうえでの問題点として、供用中の橋梁での工事となるため、作業スペースの制約等により施工性が劣るとの回答が複数あった。

### 3. 1. 2 耐力判定方法とその課題

#### (1) 判定方法と判断基準

補強・架替えの理由に「洗掘」、「塩害」、「老朽化」をあげた橋梁について、その判定方法および判断基準を調査した。表-2に判定方法のアンケート結果を示す。多くの橋梁では目視を判定方法の一つにあげている。また、塩害を理由としている橋梁では、材料試験が行われていた。これらの判定方法のうち、「目視」、「耐力照査」の判断基準は以下のとおりであった。

##### (a) 目視

目視による調査を行った橋梁のうち13橋について回答があり、そのうち3橋が判断基準として「橋梁点検要領(案)S63.7 土木研究所」を用いている。この3橋では、橋脚および橋台の躯体コンクリートの剥離、ひび割れ、変色などが損傷ランクⅡ(損傷が大きく、詳細調査を実施し補修するかどうかの検討が行う必要がある)と判定されている。また、「H8道路防災点検要領(豪雨・豪雪)」を判断基準にした橋梁は3橋で、要対策箇所と判定されている。その他の7橋については、特に目視による判断基準を設けていないが、材料試験、耐力照査、その他の状況(上部工の改修、計画河床の見直し等)と併せて判断している。

表-2 洗掘・塩害、老朽化の判定方法(複数回答)

判断方法	補強 (12橋)	架替え (21橋)	合計 (33橋)
目視	7	15	22
解析による耐力照査	3	10	13
材料試験	1	8	9
洗掘深さ調査	2	2	4
供用年数	2	9	11
その他	4	3	7
未回答	4	5	9

(b) 耐力照査

解析により耐力照査を行った橋梁のうち6橋から回答があり、耐力照査に必要な情報をどのように設定したかを調査した(表-3)。

6橋のうち1橋については、コンクリートの圧縮強度試験によるコンクリート強度が設計基準に達していないために耐力が不十分と判断されている(構造物の詳細が不明なため、応力度照査等は実施されていない)。他の5橋については、以下の各試験により必要な情報を設定している。

- ・ コアを用いたコンクリート圧縮強度試験
- ・ シュミットハンマー試験(躯体のコンクリート強度確認)
- ・ RCレーダおよびはつり(躯体の鉄筋調査)
- ・ ボーリング調査(土質定数、フーチング厚さ調査)

表-3 耐力照査に必要な情報の設定方法(複数回答)

部位	項目	設定方法				
		試験測定	設計図書	道示	類似構造物から推定	その他
躯体	部材寸法	4	2	-	1	-
	鉄筋量	1	2	-	3	-
	コンクリート強度	3	2	3	-	-
	鉄筋強度	-	2	2	-	-
	許容変位率	-	-	3	-	-
フーチング	部材寸法	2	2	-	1	-
	鉄筋量	-	2	-	2	-
	コンクリート強度	1	3	1	-	-
	鉄筋強度	-	3	-	-	-
基礎	土質定数	3	-	1	-	-
	部材寸法	1	2	-	1	1
	鉄筋量	-	1	-	2	-
	コンクリート強度	-	1	1	-	-
	鉄筋強度	-	1	1	-	-
	許容変位	-	-	2	-	-

(2) 耐力判定の課題

耐力判定における問題点としては、4橋において設計資料の不足による構造詳細の不明が挙げられている。また、このうち2橋については、特に基礎構造が不明であるとの回答であった。

このように、古い橋梁では設計資料が整備されていないケースが多いことが予想され、特に基礎においては、地中構造物であるため、その合理的な調査方法および耐力評価手法の開発が必要であるといえる。

3.2 塩害による損傷予測の検討結果

3.2.1 塩害損傷データの整理

国土交通省道路管理データベースシステム(MICHI)に収録されていた全19,065橋のうち、橋台・橋脚(RCまたはSRC構造)約50,000基を対象に損傷の実態データを整理した。海岸線からの距離、供用年数、損傷度との関係を整理した結果を図-1に示す。ここで、

損傷度は、塩害との関連性が考えられる「剥離・鉄筋露出」を対象に判定したものである。

3.2.2 推定式による塩害損傷の推定

フィックの拡散理論に基づく鉄筋位置塩分濃度照査式(式(1))により、塩害損傷を受けた橋梁の供用可能期間が予測できるかを検討した。ここでは、式(1)による推定結果と下部構造の損傷実態調査結果を対比した。

鉄筋位置塩分濃度照査式

$$C(x,t) = (C_0 - C_i) \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right) \leq (C_{\text{lim}} - C_i) \quad \dots(1)$$

ここに、

$C_0$  : 表面塩化物イオン量 ( $\text{kg/m}^3$ )

$$C_0 = 1.2 \cdot C_{\text{air}}^{0.4} \quad (\text{NaCl 換算})$$

$$C_{\text{air}} = C_1 \times d^{0.6} \quad (\text{飛来塩分量(mmd)})$$

$C(x,t)$  : 表面からの距離  $x$  (cm), 時間  $t$  (sec)における塩分量の予測値( $\text{kg/m}^3$ )

$C_i$  : 初期混入塩化物イオン量 ( $0.3\text{kg/m}^3$ )

$C_{\text{lim}}$  : 鋼材腐食発生限度塩化物イオン濃度 ( $1.2\text{kg/m}^3$ )

$D_c$  : コンクリートの見かけの拡散係数( $\text{cm}^2/\text{sec}$ )

$$D_c = 5 \times 10^{-7} \times e^{-1.6(C/M)}$$

$\operatorname{erf}(x)$  : 誤差関数

$D$  : 海岸線からの距離 (km)

$C_1$  : 1km換算飛来塩分量 (mmd)

A地域: 平均  $C_1=0.24$ , 平均+1 $\sigma$   $C_1=1.35$

B地域: 平均  $C_1=0.92$ , 平均+1 $\sigma$   $C_1=2.51$

C地域: 平均  $C_1=0.11$ , 平均+1 $\sigma$   $C_1=0.44$

試算結果の一例として、水セメント比  $W/C=55.0\%$ 、設計かぶり 70mm、塩害地域区分 B 地域における損傷の推定結果を図-1の実態調査結果に合わせて示す。なお、ここに示す損傷の実態調査結果は、塩害の代表的な損傷状態である「剥離・鉄筋露出」を対象としたものである。

1km換算飛来塩分量  $C_1$  に平均値を用いた推定線(図中の実線)と  $C_1$  に平均値+1 $\sigma$  ( $\sigma$ :標準偏差)を用いた推定線(図中の点線)の中間程度が実際の損傷状態を評価している。このことから、損傷事例が少ないため、精度は高くないと考えられるが、飛来塩分量を適切に評価することにより、塩害を受けた既設下部構造の供用可能期間を概略把握することが可能なことが確認された。

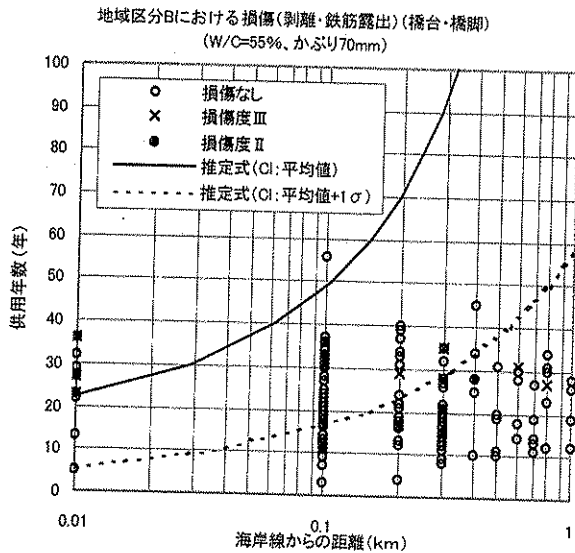


図-1 損傷実態と推定式による比較

### 3. 3 効率的な耐力評価手法の検討結果

#### 3. 3. 1 衝撃振動試験の概要

下部構造物の損傷は、ひび割れ、腐食、材料の劣化、設計地盤面の低下など多岐に渡るが、これらは、躯体の曲げ剛性や支持力に影響を及ぼし、それは下部構造の振動特性の変化として捉えることができると考えられる。このような考えの基、鉄道橋では衝撃振動試験を実施し下部構造全体の固有振動数を実測し、それと健全状態における固有振動数の標準値とを比較することにより、下部構造全体の健全性が評価されている。ここで固有振動数の標準値とは、鉄道橋を対象とした膨大な衝撃振動試験結果を統計処理することで求められた固有振動数の標準算定式で計算される値である。

#### 3. 3. 2 衝撃振動試験の有効性に関する検討

下部構造の損傷の一つである洗掘を受けた既設下部構造を対象に、衝撃振動試験を活用することにより、その損傷状態の把握が可能であるかを検討した。ここでは、まず、設計条件を基に作成した解析モデルを用いて固有値解析を行い下部構造全体の固有振動数を求めた。その値と衝撃振動試験による固有振動数の実測値とを比較することにより、下部構造の健全性を検討した。

##### (1) 多自由度系モデル

衝撃振動試験が実施されたRC橋脚(ケーソン基礎)を対象に、図-2に示す解析モデルを設定した。図に示すように、ケーソン基礎を道路橋示方書IVに示される地盤ばねを考慮した集中バネに置き換え、橋脚躯体をはり要素でモデル化した。また、上部工質量には死荷重反力に相当する質量を用いた。なお、橋脚躯体の

剛性については、コア採取による圧縮強度試験で求めたコンクリート強度から推定した値を用いた。

##### (2) 固有値解析結果

表-4に固有振動数の解析結果と衝撃振動試験による計測結果を示す。

衝撃振動試験から求めた固有振動数は、設計条件を基に算出した値に対して約3割小さくなった。衝撃振動試験による固有振動数が計算値と同等であることを健全な状態とすると、何らかの劣化・損傷が生じていると推測され、剛性が低下している可能性があると判断される。

そこで、固有振動数が計測値に近づくまで、設計地盤面を下方に変化させて繰り返し計算を行った(表-5)。その結果、設計地盤面を現地盤面から約1.5m低下させることにより、固有振動数の計算値は計測値と同程度の値となった。この橋梁周辺で実施された深淺測量による河床変動記録では、過去に1.5mを越える河床低下が生じた後、土砂の堆積が徐々に進行している傾向にある。このようなことから、衝撃振動試験を活用することにより、河川内に位置する橋脚の洗掘状況を概略評価できるものと考えられる。

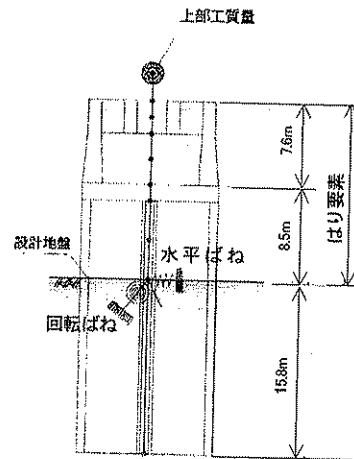


図-2 固有値解析モデル

表-4 固有振動数の比較

計算による1次モード振動数 $f_0$	2.60 Hz <sup>*)</sup>
衝撃振動試験による1次モード振動数 $f$	1.90 Hz
$f/f_0$	0.73

\*) 現地盤を設計地盤として算出した固有振動数

表-5 固有振動数の比較(設計地盤面の変更)

計算による1次モード振動数 $f_0$	1.79 Hz <sup>*)</sup>
衝撃振動試験による1次モード振動数 $f$	1.90 Hz
$f/f_0$	1.06

\*) 現地盤から1.58m下方を設計地盤として算出した固有振動数

### (3) 固有振動数に及ぼす剛性の影響度

表-6に示す衝撃振動試験が実施された鉄道橋の6橋脚に対して、橋脚剛性および地盤ばね剛性の変化が固有振動数に与える影響度を試算した。ここでは、衝撃振動試験で計測された振動特性（振動数、振動モード）に同定化された固有値解析モデルを基に、橋脚剛性および地盤ばね剛性を、それぞれ0.8、0.5倍させて、振動数の実測値に対する計算値の比率を求めた。図-3に各橋脚の剛性低下による振動数の変化を示す。この試算結果から以下のことがわかる。

- ・直接基礎の場合は、橋脚剛性と地盤ばね剛性の固有振動数に及ぼす影響度は同程度であり、剛性を2割低減すると固有振動数は1割弱変化し、剛性を5割低減すると固有振動数は2割程度変化する。
- ・杭基礎も直接基礎と同様な傾向を示す。これは、対象とした杭基礎が細く短いことから、直接基礎に近い挙動を呈するためと考えられる。
- ・ケーソン基礎の場合は、直接基礎と傾向は異なり、地盤ばね剛性の方が橋脚剛性に比べ、固有振動数に及ぼす影響は大きい。

この試算結果については、橋脚および基礎の構造諸元や地盤条件などの違いにも影響され定量的な評価はできないが、各基礎形式の支持機構を考えると、定性的な傾向であると考えられる。

表-6 剛性影響度の試算に用いた下部構造諸元

橋脚No.	橋脚寸法	基礎形式	実測振動数
P1	H=16m, φ20~4.0m	直接基礎	5.2Hz
P2	H=7.5m, φ2.0~2.7m	杭基礎(φ0.2m, L=2.0m, 64本)	5.6Hz
P3	H=8.5m, φ2.0~3.0m	杭基礎(φ0.3m, L=5.0m, 36本)	7.6Hz
P4	H=5.0m, φ2.2~2.9m	ケーソン基礎(φ4.5m, L=8.0m)	10.4Hz
P5	H=5.8m, φ2.4~3.2m	ケーソン基礎(φ4.6m, L=6.5m)	10.0Hz
P6	H=5.5m, φ2.4~3.4m	ケーソン基礎(φ4.0m, L=7.0m)	11.6Hz

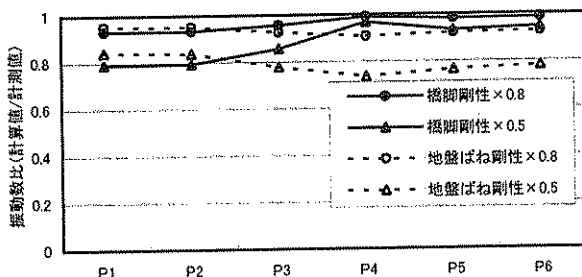


図-3 固有振動数に及ぼす剛性の影響度

### (3) 衝撃振動試験の有効性

図-4に衝撃振動試験を損傷度の一次判定照査に活用した既設下部構造の耐力評価フローを示す。

先に示したとおり、健全な状態での下部構造の固有振動数が得られている場合は、衝撃振動試験を活用す

ることで、洗掘による設計地盤面の低下などが概略把握することが可能であり、耐力評価に必要な詳細な損傷度調査を実施する前の一次照査方法として有効であると考えられる。しかし、衝撃振動試験は微小な応答から固有振動数を評価しているため、橋脚躯体に生じるひび割れや鉄筋の腐食等の影響は、固有振動数の低下として把握することは困難である。したがって、橋脚躯体については、目視やコア抜き調査などの比較的簡便な調査・試験で剛性を精度良く評価することが可能であるため、衝撃振動試験を活用した損傷度評価を行ううえでは、予め橋脚剛性をそれらの調査により求めておくのがよいと考える。また、下部構造の補強工事の前後で衝撃振動試験を行うことにより、その補強効果を固有振動数の変化として捉えることができるため、衝撃振動試験は補強効果を確認する方法としても有効であるといえる。

### 4. まとめ

本研究では、既設下部構造の合理的な再利用を目的として、補強・架替え工事および塩害損傷の実態調査を行うとともに、効率的な耐力評価手法の検討を実施した。その結果、以下の成果が得られた。

- 1) 既設下部構造の補強・架替えを実施した理由として、耐震補強以外では洗掘、塩害、老朽化が比較的多いことを確認した。
- 2) 既設下部構造の耐力評価に関する主な問題点として、供用開始年が古い橋梁では耐力評価に必要な設計図書が十分に整備されていない場合が多いことや塩害などの劣化・変状が適切に耐力評価に反映されていないことを確認した。
- 3) 海岸から飛来する塩分量およびコンクリート中への塩分浸透度を適切に評価することにより、塩害により損傷を受けた既設下部構造の供用可能期間を概略把握できることを明らかにした。
- 4) 衝撃振動試験を活用することにより、既設下部構造の損傷度が概略把握することができ、耐力評価に必要な詳細調査を行う前の一次調査方法として有効であること、また、衝撃振動試験は補強工事の効果を確認する方法としても有効であることを明らかにした。

以上、本研究では、既設下部構造の効率的な耐力評価手法の検討を中心に実施したが、その再利用するための補強工事にマイクロパイル工法など、施工条件の制約を受けにくい補強工法を採用することにより、既設下部構造の有効な機能更新が図られるものと考えられる。

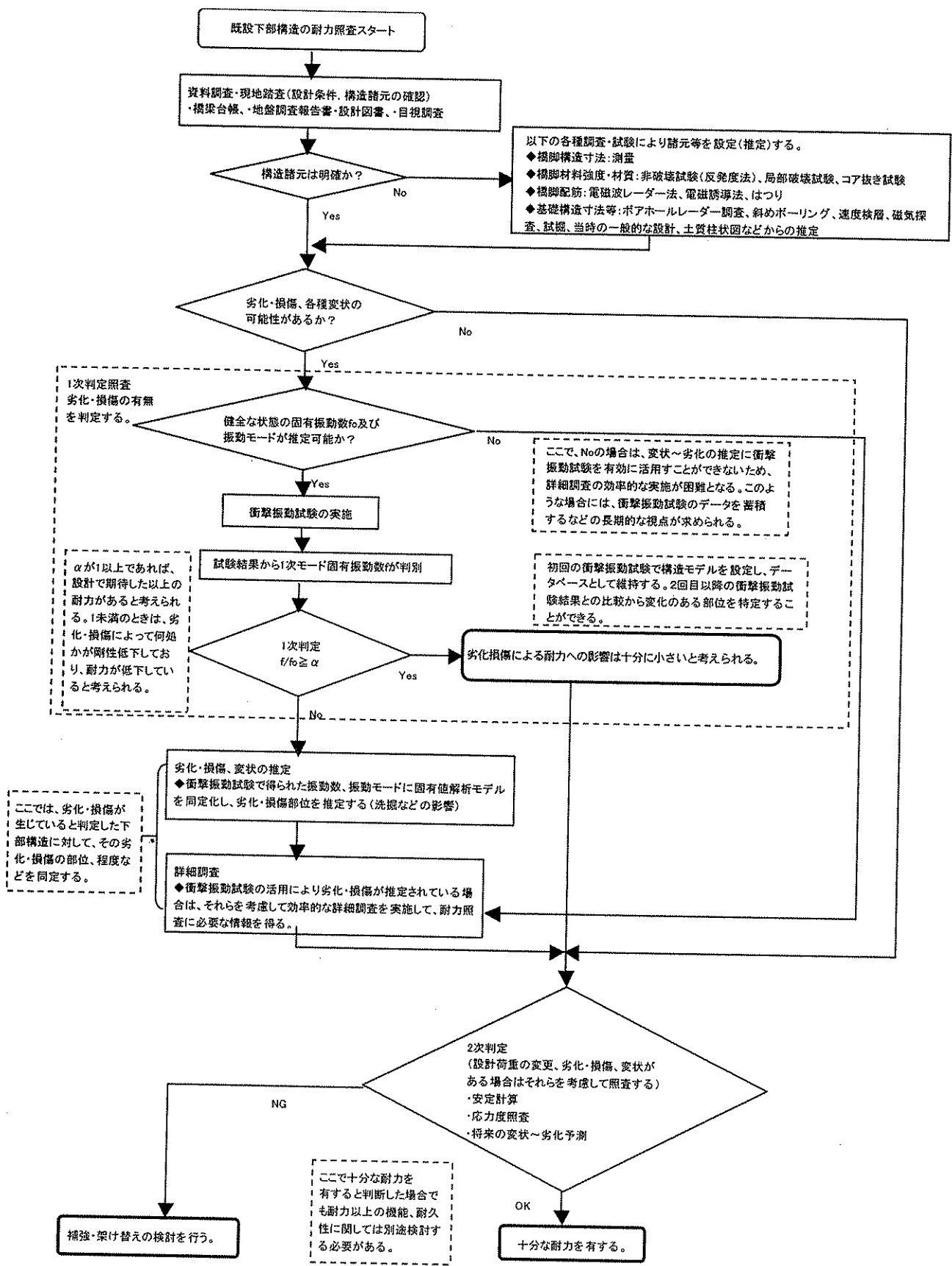


図-4 衝撃振動試験を活用した既設下部構造の耐力評価フロー