

Ⅲ-17 橋梁の耐風安定性評価手法の開発に関する調査

研究予算：運営費交付金（道路整備勘定）

研究期間：平 14～平 17

担当チーム：構造物研究グループ（橋梁構造）

研究担当者：村越 潤、麓 興一郎、稲垣由紀子

【要旨】

本調査は、中長規模の橋に対して風洞試験を行わずに、風による振動性状を推定し耐風性を照査するための手法の開発を行うものである。鋼少数主げた橋を対象として、二次元模型風洞試験と実橋振動試験を行い、既存の研究結果との比較分析を踏まえ、風による振動発現時の風速・振幅推定式、構造減衰推定式および推定式に基づく耐風性照査法を提案するとともに、実務設計への適用性を明らかにした。また、橋（けた構造）の耐風性能をより詳細に推定するための支援ツールとして、過去に土研で実施した風洞試験結果を基に、推定対象橋に対して類似の構造パラメータを有する橋の試験結果を抽出する機能を付加した風洞試験データベースを作成した。

キーワード：鋼少数主げた橋、耐風性、風洞試験、振動実験、データベース

1. はじめに

橋の耐風性の検討に当たっては一般に道路橋耐風設計便覧（以下、耐風便覧）における振動推定式¹⁾により照査が行われているが、これを満足しない場合や新形式橋のように推定式が提示されていない場合には、風洞実験による確認が必要となることがある。一方、近年、コスト削減を目的とした新たな構造形式の橋（鋼少数主げた橋等）が建設されているが、従来のけた構造と比較して、積層ゴム支承の採用やけたのねじれ剛性の変化により振動特性が変化してきており、これらの橋の耐風性を適切に推定する手法が求められている。

本調査は、中長規模の橋の耐風設計において簡便かつ効率的に、風による振動性状を推定し耐風性を照査するための手法の開発を行うものである（図-1 参照）。具体的には、鋼少数主げた橋を対象として、一連の二次元模型風洞試験²⁾と実橋振動試験^{3)~5)}を行い、既存の研究結果との比較分析を踏まえ、構造諸元をパラメータとした風による振動発現時の風速・振幅

の推定式、構造減衰の推定式およびこれらの推定式に基づく耐風性照査法の検討を行った。また、橋の耐風性能をより詳細に推定するための方法として、過去に土研で実施した風洞試験結果を基に、推定対象橋に対して、類似の構造パラメータを有する橋のデータを用いた耐風性の推定法の検討を行った。

2. 鋼少数主げた橋の動的耐風性照査法の検討

2.1 検討方法

代表的な断面を有する鋼少数主げた橋を対象として、総幅、高欄形式、けた間隔、構造減衰等をパラメータとした二次元模型風洞試験（バネ支持試験）を行い、対風応答特性を調査した。また、鋼少数主げた橋³⁾⁴⁾2橋（A橋：最大支間長 60m、B橋：最大支間長 70m）と鋼細幅箱げた橋1橋⁵⁾（C橋：最大支間長 110m）の起振機による振動実験を行い、けた構造のたわみおよびねじれの振動数、構造減衰を調査した。なお、A橋、B橋、C橋いずれも、地震時水平力分散型ゴム支承が用いられている。

上記風洞試験より把握した鋼少数主げた橋の対風応答特性、振動実験より把握した振動特性、ならびに既存の研究結果等を基に、構造諸元をパラメータとした振動発現時の風速・振幅の推定式、構造減衰の推定式およびこれらの推定式に基づく鋼少数主げた橋の耐風性照査法を提案した。

2.2 検討結果

本調査では、耐風便覧における鋼箱げたに橋に対する

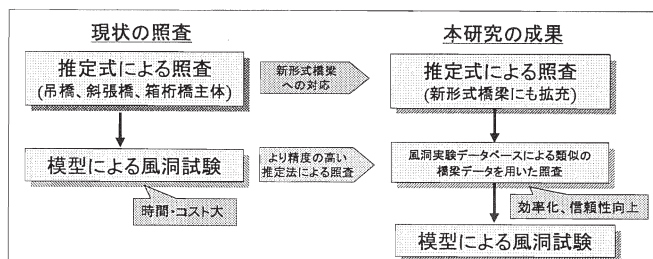


図-1 耐風性の照査法と本研究の成果の位置付け

耐風性の照査法を参考にして、鋼少数主げた橋の①固有振動数、②構造減衰、③発散振動の発現風速、④渦励振の発現風速および発現振幅の推定式を新たに提案した。照査法については、耐風便覧における照査法と同様とした。以下、提案式と根拠とした実験結果を示す。

(1) 構造減衰の推定式 (地震時水平力分散型ゴム支承)

地震時水平力分散型ゴム支承を有する鋼少数主げた橋の構造減衰推定式 (図-2 参照)

$$\delta = 0.35/\sqrt{L}$$

ここで、 δ : 構造減衰

L : 最大支間長 (m)

(2) 発現風速および発現振幅の推定式

1) 発散振動および渦励振の発現風速

① ギャロッピング (たわみ発散振動)

ギャロッピングの発現風速推定式 (図-3 参照)

(乱れ強さ $I_u < 0.15$ かつ、 $B/d < 5$ の場合)

$$U_{cg} = 3.3 f_h \cdot B$$

ここで、 U_{cg} : ギャロッピング発現風速 (m/s)

f_h : 鉛直たわみ一次固有振動数 (Hz)

$$f_h = 100/L \quad (L : \text{最大支間長 (m)})$$

B : 橋げたの総幅 (m)

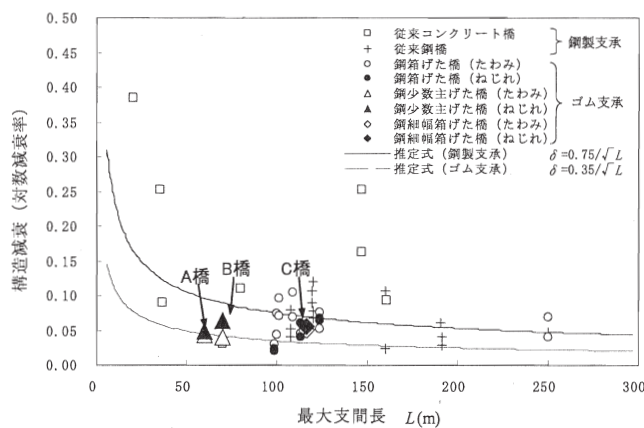


図-2 けた橋の構造減衰 (対数減衰率)

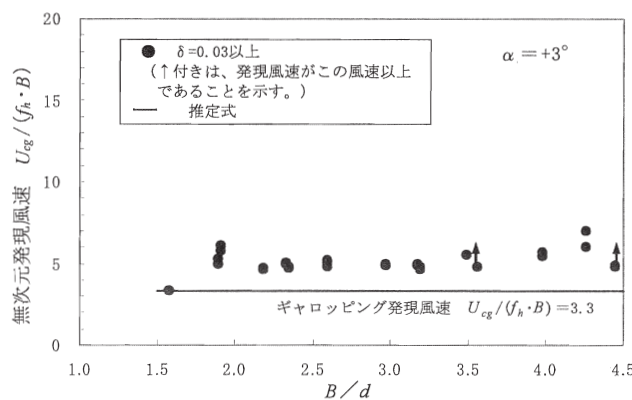


図-3 鋼少数主げた橋のギャロッピング発現風速

② フラッター (ねじれ発散振動)

フラッターの発現風速推定式 (図-4 参照)

(ただし、 $1.5 < B/d < 5$ の場合)

$$U_{cf} = (6.0 - B/d) f_{\theta} \cdot B \quad (1.5 < B/d < 3.5)$$

$$U_{cf} = 2.5 f_{\theta} \cdot B \quad (3.5 \leq B/d)$$

ただし、特に乱れの小さい海上部に建設する場合

$$U_{cf} = 2.1 f_{\theta} \cdot B \quad (3.0 < B/d < 5.0)$$

ここで、 U_{cf} : フラッターの発現風速 (m/s)

f_{θ} : ねじれの一次固有振動数 (Hz)

$$f_{\theta} = 1.1 f_h$$

B : 橋げたの総幅 (m)

d : 橋げたの有効高 (m)

③ たわみ渦励振

たわみ渦励振の発現風速推定式 (図-5 参照)

(乱れ強さ $I_u < 0.20$ の場合)

$$U_{cvh} = 2.0 f_h \cdot B$$

ここで、 U_{cvh} : 鉛直たわみモードの渦励振の発現風速 (m/s)

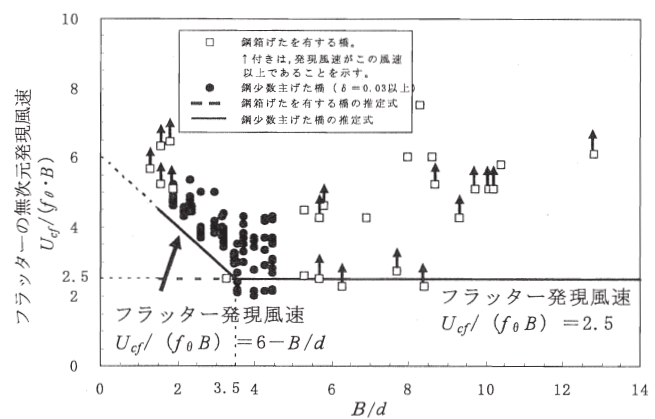


図-4 鋼少数主げた橋のフラッター発現風速

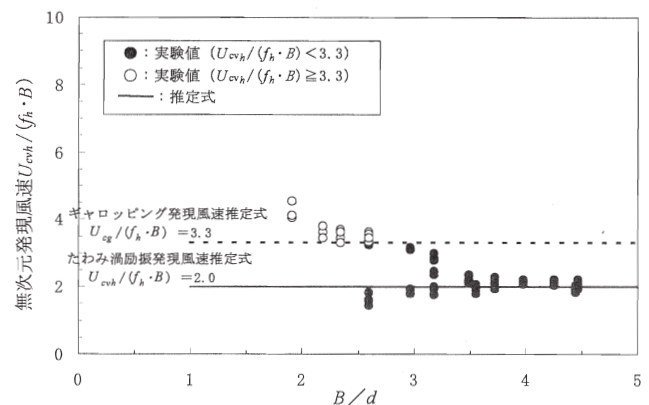


図-5 鋼少数主げた橋のたわみ渦励振発現風速

④ ねじれ渦励振

ねじれ渦励振の発現風速推定式 (図-6 参照)

(乱れ強さ $I_u < 0.20$ の場合)

$$U_{cv\theta} = (3.5 - 0.62B/d) f_\theta \cdot B \quad (1.5 < B/d < 3.5)$$

$$U_{cf} = 1.33 \cdot f_\theta \cdot B \quad (3.5 \leq B/d)$$

ここで、 $U_{cv\theta}$: ねじれモードの渦励振の発現風速 (m/s)

2) 渦励振の発現振幅

① たわみ渦励振

たわみ渦励振発現振幅の推定式 (図-7 参照)

$$h_c = 1.3\beta_h \left(\frac{B}{d}\right)^{-1} \cdot \frac{B}{m_r \cdot \delta_h} \cdot E_{th}$$

ここで、 h_c : 鉛直たわみモードの渦励振の発現振幅 (m)

f_h : 鉛直たわみ1次固有振動数 (Hz)

B : 橋げたの総幅 (m)

m_r : 無次元質量 ($=m / (\rho B^2)$)

m : 橋の単位長さあたり質量 (kg/m)

ρ : 空気密度 (1.23 kg/m³)

δ_h : 鉛直たわみモードの構造減衰

β_h : 鉛直たわみモード振幅換算係数

$$\beta_h = 0.04 \times (B/d) \quad (B/d < 3.5)$$

$$\beta_h = 0.14 \quad (3.5 \leq B/d)$$

E_{th} : 気流の乱れによる一様気流中で観測された振動
応答振幅の低減係数

$$E_{th} = 1 - 15 \cdot \beta_t \cdot (B/d)^{1/2} \cdot I_u^2 \geq 0$$

ここで、 β_t : 乱れの影響に関する係数。断面形状
が六角形の場合には0, その他の場合
には1とする。

d : 橋げたの有効高 (m)

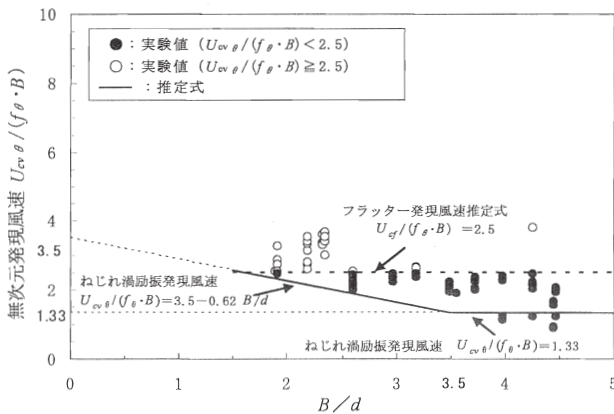


図-6 鋼少数主げた橋のねじれ渦励振発現風速

② ねじれ渦励振

ねじれ渦励振発現振幅の推定式 (図-8 参照)

$$\theta_c = 1.3\beta_\theta \left(\frac{B}{d}\right)^{-3} \cdot \frac{1}{I_{pr} \cdot \delta_\theta} \cdot E_{t\theta}$$

ここで、 θ_c : ねじれモードの渦励振の発現振幅 (°)

f_θ : ねじれ1次固有振動数 (Hz)

B : 橋げたの総幅 (m)

I_{pr} : 無次元極慣性モーメント ($\equiv I_p / (\rho B^4)$)

I_p : 橋の単位長さあたり極慣性モーメント (kg·m⁴)

$$I_p = (0.3B)^2 \cdot m$$

δ_θ : ねじれモードの構造減衰

β_θ : ねじれ振動モード振幅換算係数

$$\beta_\theta = 1.3 \times (B/d)^3 \quad (B/d < 3.4)$$

$$\beta_\theta = 51.1 \quad (3.4 \leq B/d)$$

$E_{t\theta}$: 気流の乱れによる一様気流中で観測された振動
応答振幅の低減係数

$$E_{t\theta} = 1 - 20 \cdot \beta_t \cdot (B/d)^{1/2} \cdot I_u^2 \geq 0$$

ここで、 β_t : 乱れの影響に関する係数。断面形状
が六角形の場合には0, その他
の場合には1とする。

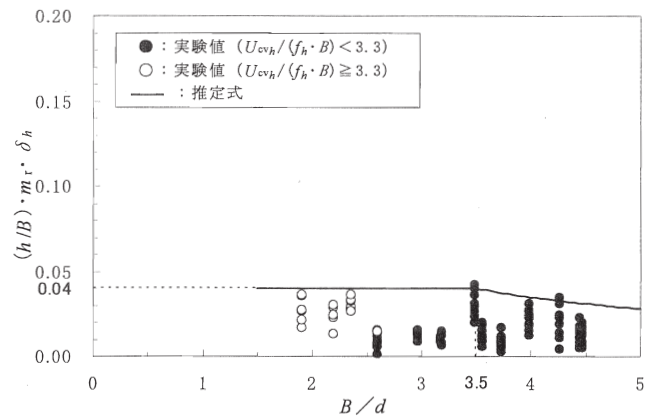


図-7 鋼少数主げた橋のたわみ渦励振発現振幅

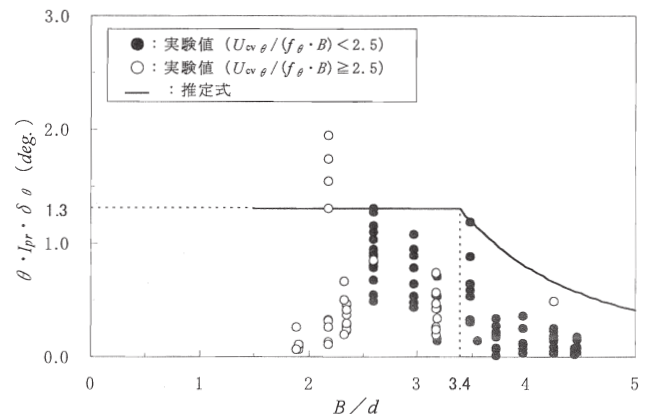


図-8 鋼少数主げた橋のねじれ渦励振発現振幅

3. 照査法の実橋への適用性の検討

3.1 検討方法

(1) 適用限界支間長の検討

鋼少数主げた橋の支間長をパラメータとして2.で提案した発散振動、渦励振の発現風速・発現振幅の推定式により振動発現風速の照査および発現振幅に対する使用性（利用者の不安感、不快感）の照査を行い、各照査を満足する支間長の上限值（以下、適用限界支間長）を試算するとともに、その決定要因を確認した。

検討対象として、既往の建設実績より幅員8m級、11m級、18m級の鋼少数主げた橋を想定して、その諸元を表-1、図-9のように与えた。高欄タイプは、鋼製高欄、壁高欄、遮音壁（最小の3m）を想定した。風の特徴値は

表-1 想定した橋の主な諸元

項目	幅員8m級	幅員11m級	幅員18m級	
総幅 B(m)	7.9	11.2	17.5	
桁高 h(m)	2.8	3.0	3.2	
床版厚(m)	0.30	0.30	0.36	
高欄タイプ 高さ(m)	鋼製高欄	1.1		
	壁高欄	1.1		
	遮音壁	3.0		
B/d	鋼製高欄	2.5	3.5	5.0
	壁高欄	2.0	2.5	4.0
	遮音壁	1.5	2.0	3.0

※ B/dは0.5丸めとした

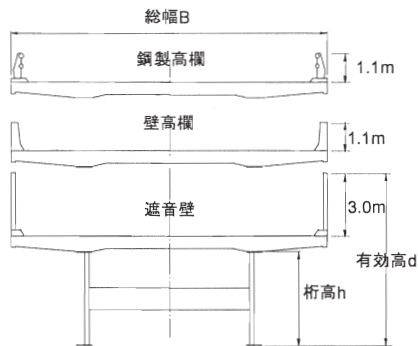


図-9 想定した橋の断面形状

表-2 想定した風の特徴値

項目	パラメータ
基本風速 U_{10} (m/s)	30 (全国の一般的な風速区分)
地表粗度区分	II (開けた土地)
高度 (m)	20
補正係数 E_1	1.09
設計基準風速 U_d (m/s)	33
乱れ強さ I_u	0.17

※一般的な地域条件を想定して風の特徴値を設定した

一般的な地域条件（開けた土地、高度20m、全国の一般的な風速区分）を想定して表-2のとおりを設定し、実橋の照査においても個々の架橋地点の条件を無視して同様とした。たわみ渦励振およびねじれ渦励振に対する許容振幅は、耐風便覧を参考にけた鉛直方向加速度100gal相当の振幅とした。

また、実橋計測もしくは解析により固有振動数が得られている実橋12橋（幅員11m級11橋、18m級1橋）に対して照査を行い、推定式の適用性を確認した。

(2) 渦励振時の疲労耐久性の検討

2.で提案した照査法には渦励振に対する疲労耐久性の照査は考慮されていない。そこで、渦励振時の鋼桁の応力振幅の頻度分布を推定することにより、疲労耐久性の照査を行った。

具体的には、風速の生起確率分布と設計疲労寿命曲線を用いて、図-10に示す手順に従って、鋼げた溶接継手（下フランジと垂直補剛材間のリブ十字継手を想定）の疲労照査を行った。ここで、渦励振時の風速と振幅の関係については、安全側の照査となるよう発現風速域を20m/s、開始風速を（発現風速-3）m/s、終止風速を（発現風速+17）m/sとした矩形モデルを設定した。また、照査に当たっては、線形累積被害則により、渦励振による振動に対する累積損傷度 $D (=n_v/N)$ を求め、 $D \leq 1$ となることを確認した。なお、渦励振累積損傷度については、活荷重による累積損傷度も考慮して設定する必要があるが、ここでは渦励振時の振動による繰返し応力のみを考慮した。

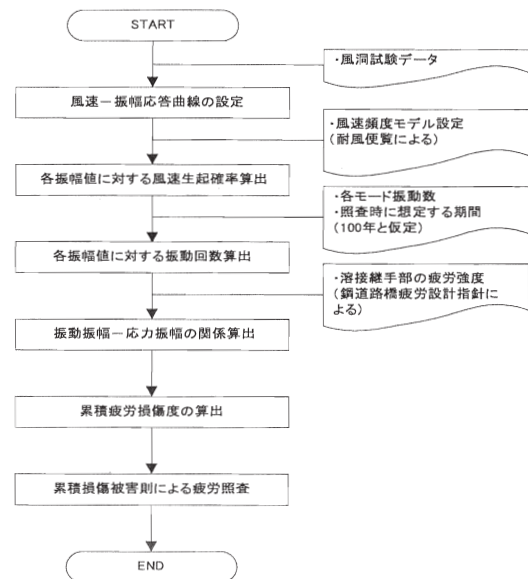


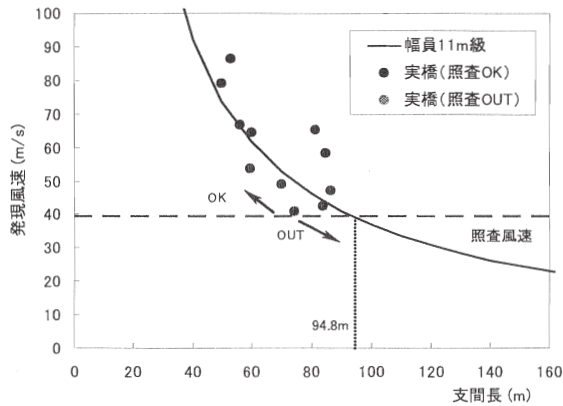
図-10 疲労照査検討フロー

3. 2 検討結果

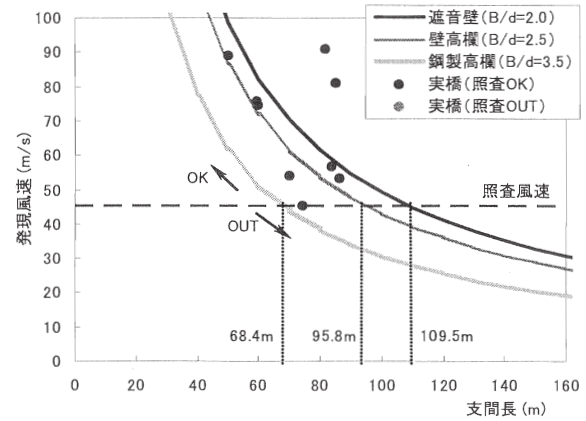
(1) 適用限界支間長の検討結果

各幅員において、各振動現象（たわみおよびねじれの発散振動および渦励振）に対し、適用限界支間長の試算を行った。図-11に、一例として幅員11m級に対して適用限界支間長の試算をした結果を示す。図中のプロット

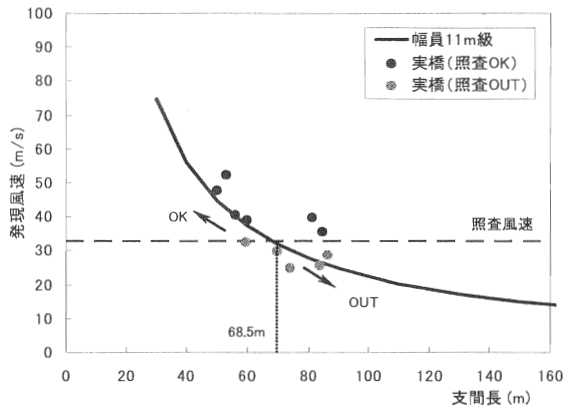
は実橋12橋の結果のうち、発現風速の照査でOUTになったケースを示している。例えば、たわみ渦励振の発現振幅の場合、支間長70mまでは、発現風速に関する照査を満足し、発現振幅に対する照査は不要となるが、それ以上の支間長で、発現振幅が許容振幅を上回り、照査を満足しなかったことを示している。



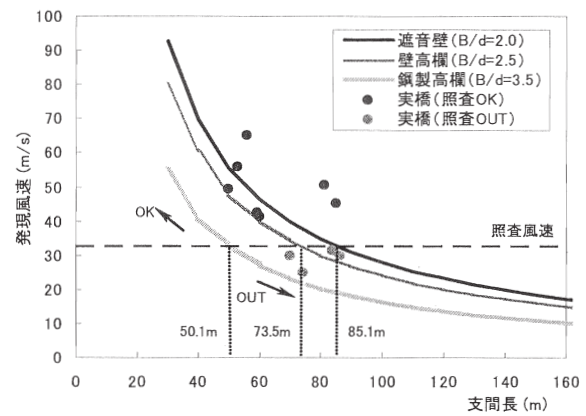
(a) ギャロッピング発現風速に対する照査



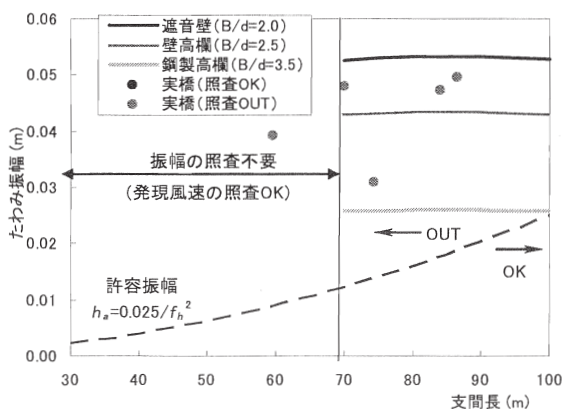
(b) フラッター発現風速に対する照査



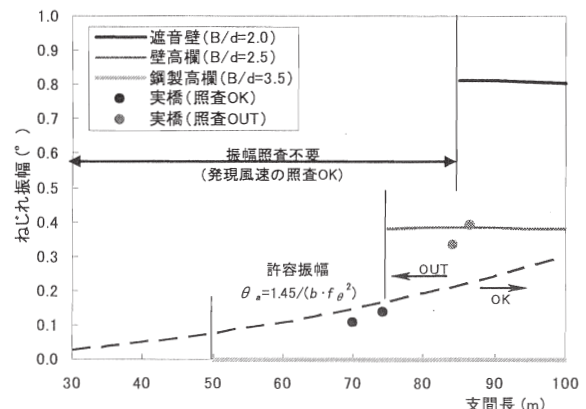
(c) たわみ渦励振発現風速に対する照査



(d) ねじれ渦励振発現風速に対する照査



(e) たわみ渦励振発現振幅に対する照査



(f) ねじれ渦励振発現振幅に対する照査

図-11 適用限界支間長の試算結果の一例（幅員11m級）

図-12 に適用限界支間長の試算結果及び実橋 12 橋の照査結果を示す。本検討で得られた主な結果を以下にまとめる。

- ・適用限界支間長は B/d 、幅員および高欄の種類に応じて異なるが、支間 50 (幅員 8m 級) ~105m (幅員 18m 級) 程度まで推定式による照査を満足する。
- ・実橋 12 橋に対して、全橋で発散振動に対する照査を満足し、5 橋で渦励振の照査を満足しなかった。これらの 5 橋のうち、1 橋を除き、通常通行止めとなる 25m/sec 以上の強風時での渦励振が発現したものであり、使用性 (利用者の不安感、不快感) に関しては問題ないと考えられる。

以上、耐風性の観点からの適用限界支間長の試算結果と実橋の耐風性照査への適用結果を踏まえると、提案した照査法は、鋼少数上げた橋の耐風性を概略評価する上では、既に建設された橋の現況 (風による振動が問題となった事例は報告されていないこと) や実橋を対象とした風洞試験結果とかけ離れたものでないものと考えられる。

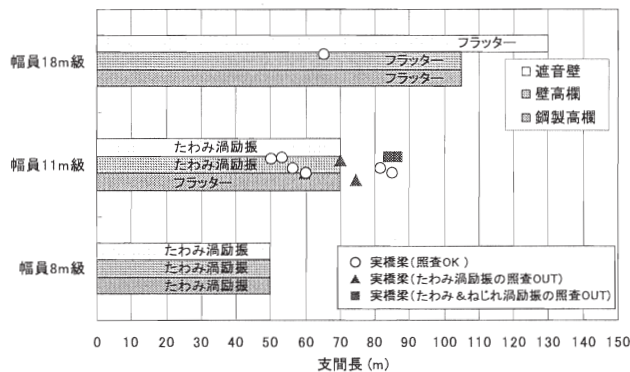


図-12 適用限界支間長の試算結果および実橋の照査結果

表-3 疲労照査結果のまとめ

支間長 (m)	累積損傷度 D					
	幅員 8m 級		幅員 11m 級		幅員 18m 級	
	たわみ	ねじれ	たわみ	ねじれ	たわみ	ねじれ
50	0.015	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
60	0.123	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
70	0.371	0.001	0.015	0.000	0.000	0.000
80	0.651	0.002	0.071	0.002	0.000	0.000
90	0.825	0.004	0.191	0.007	0.000	0.000
100	0.852	0.005	0.348	0.016	0.000	0.000
110	0.769	0.006	0.490	0.025	0.001	0.000
適用支間長	50~110m		50~110m		50~110m	

- : 発現風速の照査で OK
- : 発現振幅 (100gal 相当) の照査で OK

(2) 渦励振時の疲労耐久性の検討結果

表-3 に幅員 8m 級、11m 級、18m 級の疲労照査結果 (累積損傷度 D の計算結果) を示す。想定した条件として、表-2 に風の特値の条件 (一般的な地域条件) を、表-2 に想定した橋の条件を示す。疲労照査は、支間 50~110m の範囲内で支間 10m 毎に行った。

支間長 50~110m において累積損傷度 D は 1 以下となっており、一般的な地域条件では、2. で提案した照査法を満足しない場合 (発現振幅の照査で OUT の場合) においても疲労耐久性が問題となることはないと考えられる。

4. 風洞試験データベースを用いた耐風性照査法の検討

4.1 検討方法

橋 (けた構造) の耐風性をより詳細に推定するための支援ツールとして、過去に土木研究所 (以下、土研) で実施した風洞試験結果を基に、推定対象橋に対して類似の構造パラメータを有する橋の試験結果を抽出する機能を付加した風洞試験データベースを作成した。

風洞試験データとしては、過去に土木研究所において実施された、けたのパネ支持試験結果を対象とした。パネ支持試験、三分力試験、非定常空気力試験などがあるが、耐風性の照査には、通常パネ支持試験結果による風速と振幅の応答関 (以下、V-A 関) が用いられていることから、パネ指示試験結果の V-A 関データを整理した。

4.2 検討結果

(1) データの概要

表-4 に収集したデータの内訳を示す。全部で 40 橋、700 ケースの V-A 関のデータである。

1 件のパネ支持試験結果 (V-A 関) に対する入力データとしては、構造諸元、試験条件及び試験結果とした。構造諸元および試験条件としては、断面形状 (基本断面、対策断面の区分)、幅員 B 、桁高 D 、充実率 (トラスの場合)、模型長さ、質量、極慣性モ

表-4 収集したデータの内訳

橋梁形式	データ総数	データの内訳			
		箱桁	フェアリング付	フラップ付	支間長 300m 未満
吊橋	16	7	5	0	2
斜張橋	20	13	8	6	10
連続橋	4	2	0	2	2

ーメント、振動数、構造減衰、迎角、気流等を入力した。試験結果としては、フラッター風速、ギャロッピング風速、渦励振風速、渦励振振幅を入力した。また、耐風性に影響を与える、高欄形式、地覆形状、耐風対策物の種類・形状（角度、大きさ等）・配置、グレーチングの配置・メッシュサイズ、公共添加物の有無、単独橋または並列橋の橋梁条件、風向（左右非対称な断面形状の場合）等にも着目して、データを入力した。

(2) データベースの概要

表-5に作成したデータベースの登録例を示す。データベースには、耐風性照査対象の橋に対して類似の構造パラメータを有する橋げた断面（以下、類似断面）の試験結果を抽出する機能を付加している。データベースを利用した耐風性の推定法とは、この機能により抽出した試験結果を利用し、次式の関係（発現振幅の場合）を想定して、推定対象橋の発現風速、発現振幅を概略推定しようとするものである。

$$U_{cf} = (U_{cf\text{データベース}} / f_{\text{データベース}} B_{\text{データベース}}) * f * B$$

$$U_{cg} = (U_{cg\text{データベース}} / f_{\text{データベース}} B_{\text{データベース}}) * f * B$$

$$U_{cv} = (U_{cv\text{データベース}} / f_{\text{データベース}} B_{\text{データベース}}) * f * B$$

ここで、 U_{cv} ：渦励振発現風速 (m/s)

U_{cf} ：フラッター発現風速 (m/s)

U_{cg} ：ギャロッピング発現風速 (m/s)

f ：振動数 (Hz)

B ：幅員 (m)

データベース：データベースから検索した値

表-6、表-7に、データベースからのデータ抽出における条件設定方法、データ作図機能を示す。

表-5 データベースへのデータ登録例

工研実 験No.	耐風性	年度	橋梁名	形式		実構諸元							
				橋梁形式	桁形式	橋長 (m)	桁幅 (mm)	桁高 (mm)	B/D	重量(t/m)	降伏性モ メント(10 ⁶ m ³) sec ² /m ² /R ²	たわみ係 数(Hz)	ねじれ係 数(Hz)
932	○	S49	新水郷大橋	鋼斜張橋	鋼床版桁橋	176.6	24000	3000	8	13.38	47.35	0.448	1.859
932	○	S49	新水郷大橋	鋼斜張橋	鋼床版桁橋	176.6	24000	3000	8	13.38	47.35	0.448	1.859
932	○	S49	新水郷大橋	鋼斜張橋	鋼床版桁橋	176.6	24000	3000	8	13.38	47.35	0.448	1.859
932	○	S49	新水郷大橋	鋼斜張橋	鋼床版桁橋	176.6	24000	3000	8	13.38	47.35	0.448	1.859
989		S50	因島大橋	吊橋	補剛トラス桁	770	-	-	-	21.183	229.4	0.178	0.384
989		S50	因島大橋	吊橋	補剛トラス桁	770	-	-	-	21.183	229.4	0.178	0.384
989		S50	因島大橋	吊橋	補剛トラス桁	770	-	-	-	21.183	229.4	0.178	0.384
1014	○	S50	横浜航路橋	斜張橋	補剛トラス桁	480	30500	12000	2.54	20	595	0.323	0.82
1014	○	S50	横浜航路橋	斜張橋	補剛トラス桁	480	30500	12000	2.54	20	595	0.323	0.82
1014	○	S50	横浜航路橋	斜張橋	補剛トラス桁	480	30500	12000	2.54	20	595	0.323	0.82

耐風性の推定に当たっては、推定対象橋と類似断面との類似（動的特性、空気力学的特性）の程度が重要となるが、各種のパラメータが影響するので、本データベースの活用方法としては、現状では抽出されたデータを踏まえて、専門家が耐風性能の推定を行うのが現実的と考えられる。

(3) データベースと解析を組み合わせた推定法の検討

データベースから抽出された類似断面の試験結果と、振動の運動方程式を組み合わせることにより、より精度の高い推定の可能性について検討を行った。

推定方法の詳細はここでは省略するが、例えば、たわみ振幅の場合、振動を支点間の正弦波と仮定し、運動方程式中の振幅項にデータベース中の類似断面の試験結果（振幅値）を与えて、推定対象橋の構造諸元を代入することにより振幅を求めるものである。

実橋（鋼少数主げた橋1橋、鋼箱げた橋1橋）に適用した結果、鋼少数主げた橋の場合、発現風速・振幅ともに、実験値と推定値がほぼ等しい結果が得られた。一方、鋼箱げた橋の場合、発現風速の推定値は実験値とほぼ等しくなったが、発現振幅の推定値は迎角等の条件によって実験値との差が見られ、抽出データと解析との組合せによる推定法に関しては、今後改良等の課題があることが確認された。

表-6 データ抽出における条件設定方法

橋の諸元	条件設定方法
橋梁形式	形式
けた形式	形式
最大支間長	支間長の範囲
けた幅/けた高 (B/d)	B/dの範囲
耐風安定化部材	部材名指定 または 有/無
高欄	形式指定（鋼製/壁） または 有/無
構造減衰	減衰値の範囲
着目実験	たわみ/ねじれ

(B：幅員 (m)、d：有効高 (m))

表-7 抽出データの作図機能

縦軸	横軸
フラッター発現風速	B/d
ギャロッピング発現風速	B/d
渦励振（たわみ）発現風速	B/d
渦励振（ねじれ）発現風速	B/d
渦励振発現振幅	B/d
構造減衰	最大支間長

(B：幅員 (m)、d：有効高 (m))

4. まとめ

本調査により得られた結果を以下にまとめる。

(1) 鋼少数主げた橋を対象として、一連の二次元模型風洞試験と実橋振動実験を行い、既存の研究結果との比較分析を踏まえ、風による振動発現時の風速・振幅の推定式、構造減衰の推定式及びこれらの推定式に基づく耐風性照査法を提案するとともに、実務設計への適用性を明らかにした。

(2) 橋（けた構造）の耐風性能をより詳細に推定するための支援ツールとして、過去に土研で実施した風洞試験結果（約 40 橋 700 ケース）を基に、推定対象橋に対して、類似の構造パラメータを有する橋のデータの抽出機能を付加した風洞試験データベースを作成した。

鋼少数げた橋の耐風性照査法については、道路橋耐風設計便覧（日本道路協会、平成 18 年度改訂予定）に反映させる予定であり、合理化橋の耐風設計における安全性の向上および設計の合理化に寄与するものと考えられる。

【参考文献】

- 1) (社)日本道路協会：道路橋耐風設計便覧，1991.7.
- 2) 村越，麓他：鋼少数桁の耐風安定性と振動特性に関する実験的検討，振動コロキウム論文集，pp.357-362，2003.9.
- 3) 麓，村越他：鋼少数主桁橋振動試験，土木学会第 58 回年次学術講演会，I-766，2003.9.
- 4) 麓，忽那，清田，宮崎，荒居：長支間少数主桁橋の現地振動試験，土木学会第 60 回年次学術講演会，I-534，2005.9.
- 5) 麓，忽那，荒居，清田，宮崎：長支間少数主桁（細幅箱桁）橋の現地振動試験，土木学会第 60 回年次学術講演会，I-543，2005.9.