

支点拘束を考慮した既設鋼鉄桁の計測・評価手法の提案

Proposes on Measurement and Estimation Methods of the Existing Composite Plate Girder Bridge in consideration of the Shoe Restriction.

○新銀 武*, 岩崎正二**, 出戸秀明 **, 宮本 裕***, 保 憲****

Takeshi SHINGIN, Shoji IWASAKI, Hideaki DETO, Yutaka MIYAMOTO, and Kenichi HO

- * 工修 岩手大学大学院工学研究科 (〒020-8551 盛岡市上田 4-3-5)
- ** 工博 岩手大学助教授 工学部建設環境工学科 (〒020-8551 盛岡市上田 4-3-5)
- *** 工博 岩手大学教授 工学部建設環境工学科 (〒020-8551 盛岡市上田 4-3-5)
- **** (社)岩手県土木技術センター (〒020-0122 盛岡市みたけ 4-4-20)

In connection with economy and the social situation changings, maintenance management of social capital becomes more difficult. Maintenance management of bridges will be the most important subject considered as the basis in management in the future. In this paper, the new manual of techniques used the bridge loading tests and FEM analysis is proposed that could judge the load-carrying capacity of steel composite plate girder bridges. Dividing measurement into two stages and considering of the horizontal reaction caused by shoes restrained, higher accuracy of the evaluation method can be obtained. The proposal technique of this paper is actually applied to the existing bridge where 25 years passed after it is constructed, and the effectiveness of this technique is clarified from the judgment result.

Key Words : Steel Composite Girder Bridge, Secular Degradation, Shoe Restriction, Bridge Loading Test

キーワード : 合成鋼鉄桁橋, 経年劣化, 支点拘束, 実橋載荷実験

1. まえがき

経済や社会情勢の変化に伴い, 社会資本の更新はより難しくなることが予想されるため, 既設橋梁を, 補修・補強しながら, いかに長く有効に維持・管理していくかが課題となっている. 道路橋の維持管理においては平成 5 年, 車両の大型化に伴い設計荷重が 200KN から 250KN に変更され, 設計荷重の変更に伴う橋梁の補修・補強に関しては数種の照査方法¹⁾が提案されているが, 社団法人岩手県土木技術センター共同研究会では平成 11 年度より 5 年間にわたり岩手県内の架設後年数のかなり経過した単純活荷重合成鋼鉄桁橋を対象に実橋載荷試験を行い, 発生する実応力の実態把握に努めてきた. その結果として, 鋼鉄桁の耐力を判定する手法として, 「既設鋼鉄桁の計測・評価マニュアル(案)」をとりまとめた. 岩手県内の 5 橋で実施した実橋載荷試験では^{2),3),4)}, 主桁支間中央におけるひずみの実測値が格子桁理論による計算値の 65% 程度になることが確認された. その原因の一つとしてほとんどの試験橋梁で支承の老朽化等のため可動支点の水平移動機能が拘束されて水平支承反力が発生していることがわかった⁵⁾. 本マニュアル(案)の特徴は, 支点の挙動が橋梁の耐力判定に大きな影響があることを明確にしたことである. この支点拘束により生じる水平支承反力による応力を 2 段階の判定基準をもって計測を実施し, その

結果に基づいて評価する手法を採用している. 本論文では, 実橋載荷試験結果及び 3 次元 FEM 解析により高精度な耐力判定を行う計測・評価手法を提案するとともに, 岩手県管理の一般的な県道に位置する架設後 25 年程度経過した橋梁に対して, 本マニュアル(案)に従った耐力判定を試みる. また, 本提案手法を用いることにより支点拘束のある橋梁においても, 判断を誤ることなく耐力力の判定が行えることを実橋の耐力力評価を行うことによって示し, 下記の通り本論文で着目している支点拘束有無の判定の重要性を示した.

- 支点拘束が有る場合には主桁支間中央下フランジ応力度の実測値は計算値(格子解析)の 65%程度となり, 主桁支間中央下フランジ応力度の評価のみで耐力力評価を行うことには注意が必要である.
- 支点拘束が有る場合には主桁支点部近傍下フランジ応力度は局部的に大きな圧縮応力状態となっており, 既設橋の耐力力評価を行う際には, 現行通行荷重頻度等を考慮し支承の維持管理を検討する必要がある.

本論文は, 提案しているマニュアル(案)の有効性を明確にし, 今後の既設橋梁の維持管理に資することを目的とする.

2. 計測・評価マニュアルの概要

2. 1 対象橋梁と目的

計測・評価マニュアル(案)の適用対象は「単純活荷重合成鋼鉄桁橋」で基本的には計測・評価が可能な橋梁を対象としている。対象条件を下記に示す。

- 試験中一時的な交通規制が可能なこと
- 設計図書等(現地計測含む)で上部構造が判断可能(部材長・厚等が判断可能)なこと
- 損傷が著しく、交通の安全確保の支障となる恐れのある劣化がないこと
- 現地架橋条件が計測障害(立入り禁止等)とならないこと

また、計測・評価マニュアル(案)の目的は対象橋梁の損傷程度を定量的に評価し、余剰耐力力により A・B 活荷重への適用が可能な判定を行うことにあり、最終的な補修・補強の判定は本マニュアル(案)の対象外とした。つまり、本マニュアル(案)の目的は既設橋梁の余剰耐力力の判定が主な目的であり、劣化・損傷の判定を行うマニュアルとはならない。そのため、目視点検による橋梁調査(「橋梁定期点検要領(案)」旧建設省(1988))の結果、判定区分〔I〕(損傷が著しく、交通の安全確保の支障となる恐れがある場合)に判定される場合には、耐力力判定を行わないこととする。

2. 2 計測・評価マニュアル(案)のフロー

本マニュアル(案)のフローを図-1に示す。

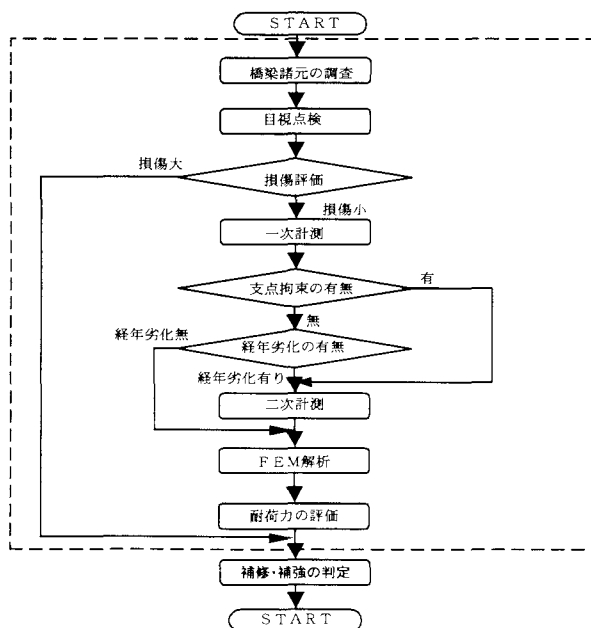


図-1 計測・評価マニュアル(案)フロー

既設鋼鉄桁の評価は図-1 のフローに示すとおり、2段階の計測・評価に分かれている。耐力力判定に影響の大きい

項目として、共同研究会での実橋載荷試験の結果、

- 支点拘束の有無
- 経年劣化の有無

があげられることが判明している。このことを評価につなげるために、簡易な一次計測によって、上記の内容を判定する。

判定の結果、支点拘束もしくは経年劣化の影響を両方あるいはどちらか一方について検討する必要がある場合には、詳細な二次計測を行うこととした。一方、一次計測の結果、それら影響が両方とも無いと判定された場合には、FEM解析で耐力力を評価し、二次計測は行わないものとした。

橋梁の余剰耐力力を判定するために、大がかりな計測をすべての橋梁に対して実施してから、耐力力判定を行うことは、膨大な社会資本の維持管理において、必ずしも効率的ではない。しかし、共同研究会で着目している「支点拘束の有無」を判定せず、主桁支間中央部下フランジのひずみ計測結果から、橋梁の耐力力を判定する従来の手法では危険側となる。従って、本マニュアル(案)では詳細な二次計測を行って耐力力判定を行った方が良いかの判定を簡易な一次計測によって判定することで、計測の信頼性・省力化を図り、実体に即した評価手法の提案を試みている。

3. 一次計測

3. 1 一次計測の内容

一次計測の目的は、対象橋梁の「支点拘束の有無」「経年劣化の有無」の判定である。その判定結果を基に対象橋梁の耐力力評価と二次計測の必要性を検討する。一次計測で実施する載荷試験の内容は以下の通りとする。

①静的載荷試験

予め計量された試験車両1台による静的載荷試験を行う。試験車両を所定位置に載荷し、可動側支点部近傍の下フランジひずみ及び支点部変位量を計測する。

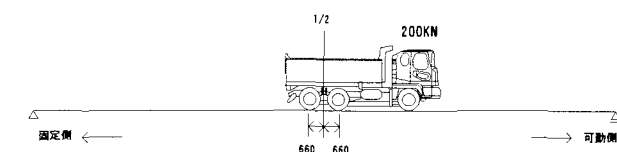
②動的載荷試験

予め計量された試験車両1台による動的載荷試験を行う。試験車両を橋梁上に走行させ、地覆上に設置した加速度計により振動加速度を計測する。

計測の内容について表-1に示す。また載荷試験の概要を図-2に示す。

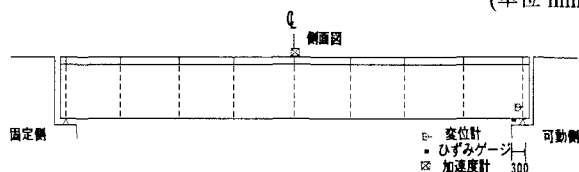
表-1 載荷試験概要

計測内容	計測目的	計測位置
① 静ひずみ(静的載荷試験)	支点拘束有無の判定	全可動支点位置。
② 水平方向変位量(静的・動的載荷試験)	支点拘束有無の判定	全可動支点位置
③ 加速度(動的載荷試験)	支点拘束・経年劣化有無の判定	支間中央地覆上2ヶ所



試験車両載荷状態

(単位 mm)



計測機器取付位置

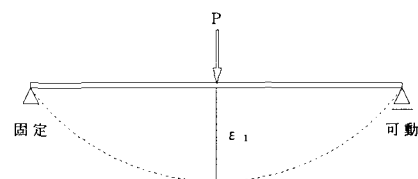
図-2 一次計測載荷試験の概要

一次計測内容の特徴は、簡易性を重視し、実用に即した判定を行う配慮にある。一次計測の目的が支点拘束有無と経年劣化有無の判定であることから、必要最小限のひずみ・変位量・加速度の計測を行うことにした。計測位置についても足場等の大がかりな仮設備が少なくなるように支点部近傍及び地覆上面とし、それらの計測結果から判定を行うこととした。

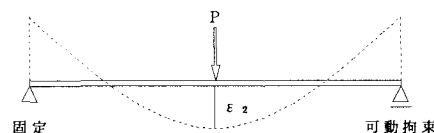
3. 2 一次計測結果の判定

一次計測の目的は、耐荷力評価に影響の大きい支点拘束の有無及び経年劣化の有無を判定することを目的としている。既設橋に対して載荷試験を行った場合、支間中央部主桁下フランジでは計算値(格子解析)に対してひずみが小さく計測されることが言われている⁵⁾。共同研究会で実施した載荷試験においても、計算値と実測値の比率は65%程度となり、ほぼ同様の結果を得た。一般に、計測値が計算値を下回る要因としては、RC床版による荷重分配作用や、RC床版と鋼桁の合成効果が設計と実構造物で異なることなどがあげられている。これに対して、共同研究会では、可動支承の支点拘束に着目し、回転拘束は局部的と考え、水平移動機能の低下(支点拘束)がその主たる要因であると考えた。

これまでに実施した載荷試験において、ひずみの発生を予想していない単純桁の支点部近傍主桁下フランジにおいて、極めて大きな圧縮ひずみが計測され、同時に支間中央部主桁下フランジでは計算値に対してひずみが小さく計測される結果となった。また、主桁たわみも計算値に対して小さく計測された。これら現象の主たる要因は、可動支承の水平移動機能が低下したために発生した可動支承部の水平反力が、主桁下フランジ全長にわたって圧縮ひずみを発生させ、支間中央部主桁下フランジひずみも計算値に対して小さくなったものと判断した(図-3)。



支点拘束の無い場合の主桁下フランジ ひずみ分布



支点拘束の有る場合の主桁下フランジ ひずみ分布

図-3 支点水平移動拘束の影響とひずみ分布

このような状態になっている既設鋼鉄桁橋の実測結果を実体に則して評価するためには、支間中央部主桁下フランジひずみの評価のみでは不十分であるため、一次計測において支点部近傍主桁下フランジのひずみ計測結果から、これら現象の有無を確認することとした。

また、本マニュアル(案)の対象としている損傷が著しく、交通の安全確保の支障となる恐れがない橋梁において、経年劣化の要因として想定されるものとして、主桁腐食等による若干の断面欠損・RC床版の劣化による剛性低下があげられるが、これらの影響の有無についても一次計測によって計測される一次固有振動数から判定することとした。

一次固有振動数によって経年劣化の影響を判定する方法は、共同研究会では、架設後年数のかなり経過している5橋梁とほぼ新設状態の橋梁の両橋梁を対象に実施しており、それらの動的載荷試験結果(実測固有振動数)と試設計した6橋梁に対するFEM固有振動数解析結果から策定した。検討対象とした橋梁諸元について表-2に示す。

以上のことから、一次計測結果の判定は加速度・支点部近傍下フランジひずみ・支点部水平変位とし、その個々の判定基準について以下の通りとした。

① 支点部近傍主桁下フランジ 実測ひずみ

支間長 L mの支点部近傍主桁下フランジ 実測ひずみ ε が

$$\varepsilon < (0.17L - 22.25) \times 10^{-6} ; 25 < L < 40 \text{ m} \quad (1)$$

の場合には、「支点拘束の可能性有り」と判定する。

本判定式の適用条件は、支間長 25～40m 程度，総重量 200KN の試験車両を支間中央に載荷させた場合の支点部近傍主桁下フランジの圧縮ひずみ計測値を対象とする。

表-2 検討対象橋梁諸元

種別	橋梁名	支間長 (m)	有効幅員 (m)	主桁本数 桁高 H	床版厚 (mm)	舗装厚 (mm)
モデル橋梁		30.0	8.00	4 主桁 H=1500mm	200	70
			9.50		230	70
		40.0	8.00	4 主桁 H=1500mm	200	70
			9.50		230	70
		50.0	8.00	4 主桁 H=1500mm	200	70
			9.50		230	70
実橋試験橋梁	西鉛橋 (S37 供用)	17.84	6.00	3 主桁 H=1000mm	180	60
	正徳橋 (S45 供用)	25.35	8.00	3 主桁 H=1400mm	200	60
	矢崎橋 (S55 供用)	26.30	9.75	4 主桁 H=1450mm	200	60
	梨の木橋 (S54 供用)	29.20	7.00	3 主桁 H=1600mm	230	70
	有根橋 (S55 供用)	29.25	8.00	4 主桁 H=1600mm	200	70
	落合橋 (H12 供用)	32.40	5.00	3 主桁 H=1700mm	190	50

図-4 は、総重量 200KN の試験車両を支間中央に載荷させた場合の支間長とひずみの関係を示したものである。実細線は、FEM 解析による試設計から求めた支間中央におけるひずみ ε_1 の近似直線であり、試験橋梁における π 中央のひずみの計算値に近い値となっている。

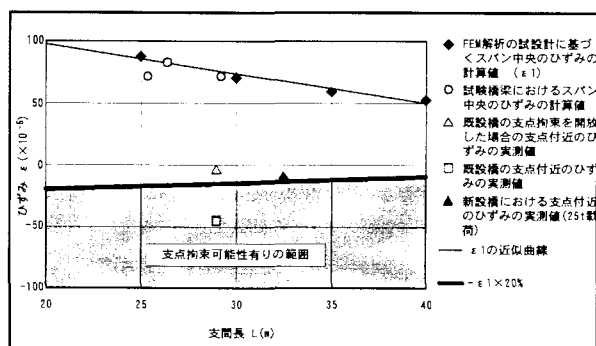


図-4 支点拘束判定図

実太線は、FEM 解析による試設計から求めた支間中央におけるひずみ ε_1 の近似直線の 20% に相当する圧縮ひずみを示し、合成鉄桁橋の一般的な適用支間長 (25m～40m) においては、 $\varepsilon = -0.2 \times \varepsilon_1 = -18 \times 10^{-6} \sim -15 \times 10^{-6}$ の値となり、支間長による影響は小さい。支点拘束の有る橋梁の実橋載荷試験において、支点拘束の解放により支点附近の圧縮ひずみがほぼ解放されるが完全にはゼロにならないことが判っている。また、新設橋の実橋載荷試験において支点附近の圧縮ひずみが若干

計測され、その値が支間中央におけるひずみの 20% 近くに達することもあった。これらの結果から、支間長が約 25m～40m の既設橋における支点附近の圧縮ひずみが支間中央におけるひずみの 20%、すなわち $\varepsilon = 0.17L - 22.25$ より小さい場合には、「支点拘束の可能性が有る」と判定するものとした。

② 可動支点部水平変位

可動支点の水平変位量 δ が

$$\delta < 0.05 \text{ mm} \quad (2)$$

の場合には、支点拘束の可能性が有ると判定する。ただし適用条件については、①と同様である。

過去の載荷試験結果から、可動支点拘束が明らかな橋梁においても極めて小さい値 (0.035mm 程度以下) の水平変位が計測されている。従って、一次計測における水平変位量がこれら誤差値を含めて、0.05mm 以下の場合には、「支点拘束の可能性が有る」と判定する。

③ 基本固有振動数(曲げ一次固有振動数)

対象橋梁の計測基本固有振動数 n が以下の両式を満たす場合には、「経年劣化」が生じている可能性が高いと判定する。

n : 対象橋梁の計測基本固有振動数 (Hz)

L : 支間長 (m)

とすると

・ 支点拘束の無い場合

$$n < 0.9 \times 32 L^{-0.66} \quad \dots\dots (3)$$

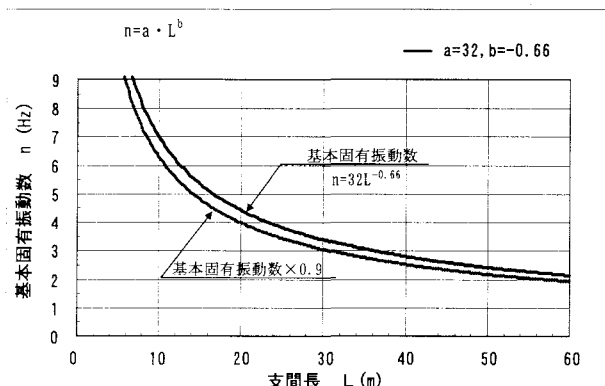


図-5 経年劣化判定図(支点拘束無し)

・ 支点拘束の有る場合

$$n < 0.85 \times 56 L^{-0.76} \quad \dots\dots (4)$$

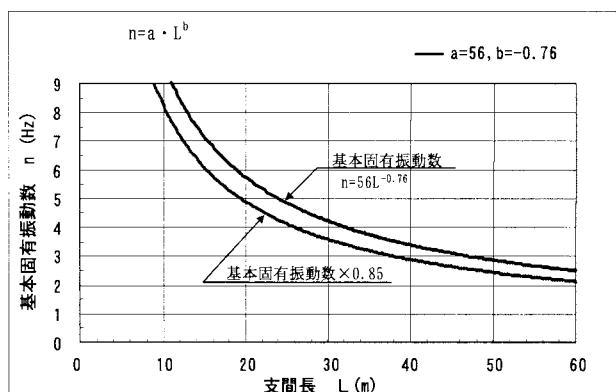


図-6 経年劣化判定図(支点拘束有り)

実橋と試設計した橋梁に対する FEM 固有振動解析結果から、支点拘束の無い場合の単純合成鈹桁橋の支間長と基本固有振動数との関係は回帰曲線算出の結果、図-7 に示すように、

$$n = 32L^{-0.66} \quad (5)$$

で表される。

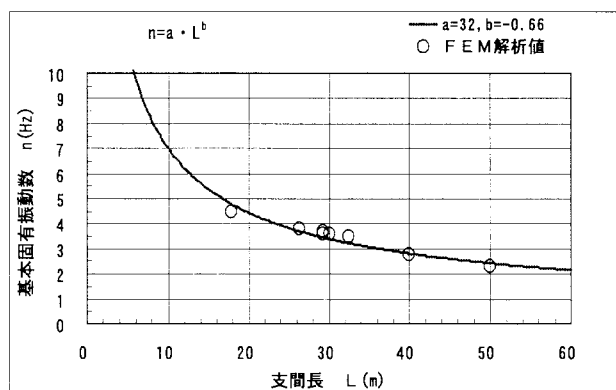


図-7 支間長と基本固有振動数の関係(支点拘束無し)

一般的に可動支点が拘束されていない場合は、「外桁全長にわたる 30%の剛性低下に対して 10~15%程度固有振動数が減少する」とされ、「固有振動数が 5~10%程度以上小さくなったような場合にはその原因を追求し、橋梁本体に重大な欠陥が生じていないかどうかを確認することが重要であると考えられる」⁶⁾とされている。

支点拘束が無い場合は、拘束による基本固有振動数の増加は考えられないことから、基本固有振動数の変化は、経年劣化の影響が支配的と考えられる。試設計した橋梁での FEM 固有振動解析において、支点拘束の無い条件では、ヤング係数比 N の違いによる基本固有振動数の減少が 5%程度であった(表-3)。

表-3 経年劣化による基本固有振動数変化(支点拘束無し)

支間長 (m)	有効幅員 (m)	FEM 基本固有振動数 (Hz)		減少率 (%)
		N=10	N=15	
30.0	8.00	3.79	3.58	5.5
	9.50	3.54	3.37	4.8
40.0	8.00	3.00	2.79	7.0
	9.50	2.79	2.64	5.4
50.0	8.00	2.42	2.29	5.4
	9.50	2.30	2.18	5.2
平均				5.6

このようなことから、基本固有振動数の測定誤差等を 5%程度考慮し、経年劣化の判定基準を式(5)の平均値から 5%程度増加させた値 10%以下とした。

一方、支点拘束の有る場合の単純合成鈹桁橋の支間長と基本固有振動数との関係は図-8 に示すように、

$$n = 56L^{-0.76} \quad (6)$$

で表される。

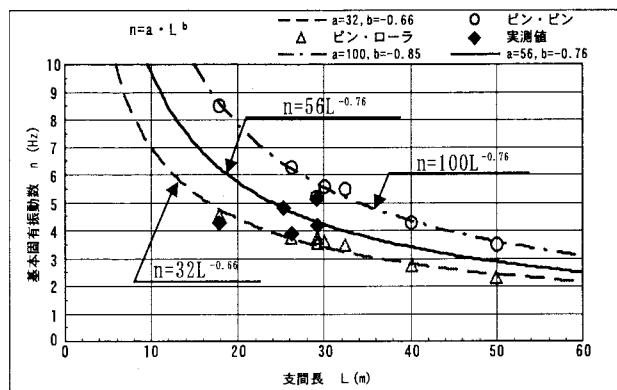


図-8 支間長と基本固有振動数の関係(支点拘束有り)

支点拘束が有る場合の基本固有振動数の実測値は図-8 に示すように、支点状態がピン・ピン支持とピン・ローラ支持の FEM 基本固有振動解析結果より得られた支間長-基本固有振動数の両回帰曲線の間に入っていることから、それらの実測値に最も近似する回帰曲線を導き、支点拘束のある場合の支間長と基本固有振動数との関係式とした。

支点拘束が有る場合、一般的に実測基本固有振動数は高くなり、経年劣化による基本固有振動数の低下と相反することになる。このため、支点拘束による影響と経年劣化の影響の両方を考慮しなければならない。前述のとおり 30%の剛性低下に対して 10~15%程度の基本固有振動数の低下が考えられることと、試設計した橋梁での FEM 固有振動解析において支点拘束の有る条件では、ヤング係数比 N の違いによる基本固有振動数の減少が 10%程度であった(表-4)。

表－4 経年劣化による基本固有振動数変化(支点拘束有り)

支間長 (m)	有効幅員 (m)	FEM 基本固有振動数 (Hz)		減少率 (%)
		N=10	N=15	
30.0	8.00	5.87	5.31	9.5
	9.50	5.63	5.12	9.1
40.0	8.00	4.44	4.02	9.5
	9.50	4.29	3.89	9.3
50.0	8.00	3.58	3.26	8.9
	9.50	3.47	3.16	8.9
平均				9.2

このようなことから、基本固有振動数の測定誤差等を5%程度考慮し、経年劣化の判定基準を式(6)の平均値から5%程度増加させた値15%以下とした。

上記①・②・③により「支点拘束」または「経年劣化」が有ると判定された場合には、二次計測を行い、その結果を用いて耐荷力を評価するものとした。なお、①・②・③の判定条件は「支点拘束」または「経年劣化」の有無を判定するものであり、一次計測のみで計測橋梁の支点拘束の程度や耐荷力への影響度さらには劣化度の正確な判定を行うことはできない。

一方、共同研究会ではほぼ新設状態の既設橋でも実橋載荷試験を行っており、その結果、支点拘束や経年劣化の影響のない橋梁の場合は、FEM 解析によってほぼその実体応力度の再現ができることがわかった⁷⁾。従って、一次計測によって支点拘束や経年劣化の影響がないと判定された橋梁に対しては、二次計測を行うことなく FEM 解析によって耐荷力判定を行い評価の省力化を図った。

4. 二次計測

4. 1 二次計測の内容

二次計測の目的は対象橋梁の詳細な実態把握であり、一次計測の結果、対象橋梁の耐荷力検討に詳細な計測が必要と判断された場合に実施する。

二次計測で実施する載荷試験の内容は以下の通りとする。

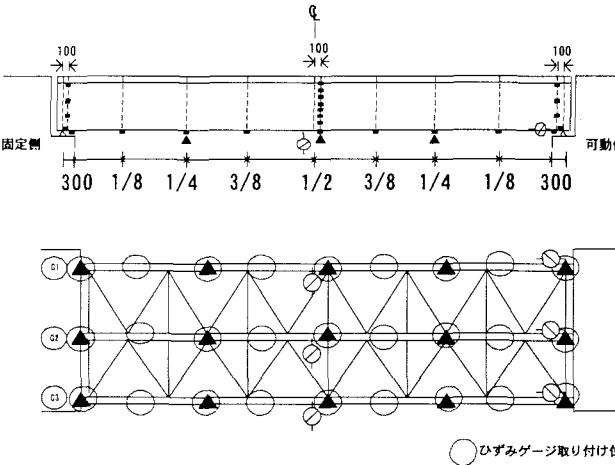
①静的載荷試験

予め計量された試験車両2台による静的載荷試験を行う。試験車両を所定位置に載荷し、着目する各部のひずみ及び変位量を計測する。

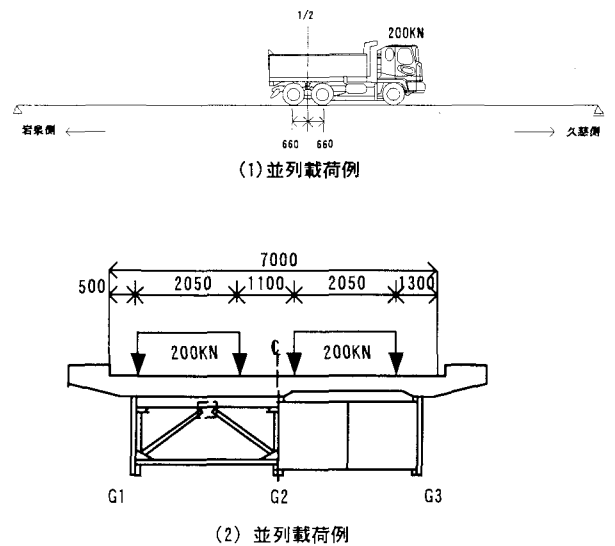
②動的載荷試験

予め計量された試験車両1台による動的載荷試験を行う。試験車両を橋梁上に走行させ、主桁各部に設置した加速度計により振動加速度を計測する。

二次計測における計測機器の取り付け位置例及び試験車両の載荷位置例を図－9 及び図－10 に示す。



(単位 mm)
図－9 計測機器設置位置図例



図－10 試験車両載荷位置図例

4. 2 二次計測結果の判定

二次計測結果と比較する計算値は静応力解析及び固有振動解析ともに3次元 FEM 解析によって算出する。解析

モデルは、RC 床版・地覆・ソールプレートはリット要素、主桁・横桁はシェル要素、対傾構・横構はビーム要素でモデル化する。事例として、モデル図を図-11 に示す。

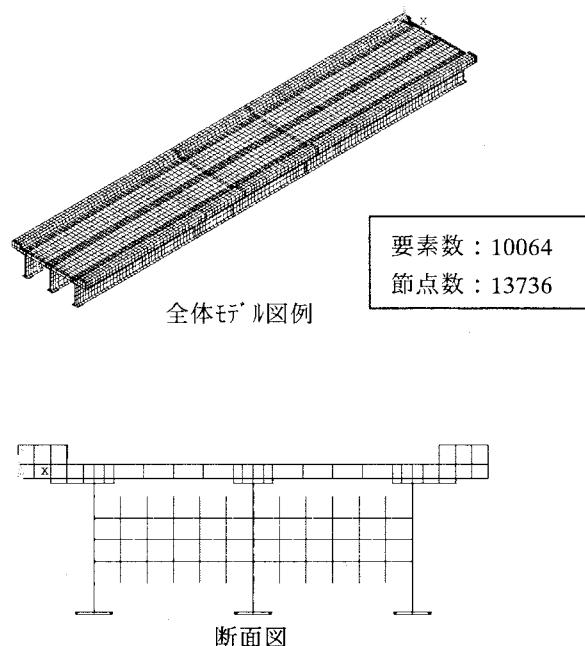


図-11 三次元 FEM 解析モデル例

① 支点拘束の無い場合

支点拘束の無い場合の耐荷力の判定は、FEM 解析を用いることで、ほぼ実体応力を推定できると考えられ、経年劣化の少ない場合には、実測値と FEM 解析値の比率は 0.96~1.00 と評価できる。従って、FEM 解析で算出された応力度と部材の許容応力度を比較することで、耐荷力評価を行う（図-12 参照）。

一方、経年劣化により床版等何らかの影響で剛性が低下し、橋全体の挙動に影響を及ぼす場合には、静的載荷試験による実測応力度は FEM 解析で得られる応力度に対して、大きくなることが想定される。

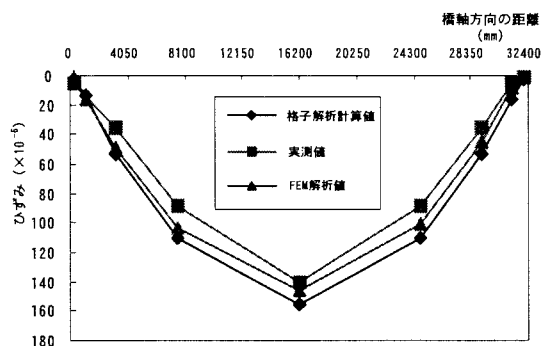


図-12 支点拘束の無い場合の主桁下フランジ ひずみ分布比較結果
(ひずみ計測位置は図-9 参照)

従って、静的載荷試験による実測応力度と支点条件ビ

ン・ロー状態での FEM 解析における応力度の比率を

$$\beta = \text{実測応力度} / \text{FEM 解析応力度} \quad (\beta \geq 1) \quad (7)$$

とし、B 活荷重に対する耐荷力評価を下記式にて行う。

$$\sigma_d + \sigma_l \times \beta + \sigma_i < \sigma_a \quad (8)$$

ここに、 β は経年劣化の影響係数で $\beta \geq 1$

σ_d : 格子解析で算出された死荷重応力度

σ_l : FEM 解析(支点条件ビン・ロー)で算出された B 活荷重応力度

σ_i : 格子解析で算出された衝撃応力度

σ_a : 許容応力度

支点拘束が無く経年劣化の無い場合の FEM 解析値は、過去の新設橋の静的実験結果（図-12 参照）から、

$$\text{実測応力度} / \text{FEM 解析応力度} = 0.96 \sim 1.00 \quad (9)$$

程度となり、

- FEM 解析はほぼ静的荷重に対して、実体評価として有効である。

ことから、支点拘束が無く経年劣化の無い場合には、FEM 解析で静的活荷重を評価して良いものとした ($\beta = 1$)。

一方、経年劣化等モデル化が困難な影響因子が有る場合には、実測値が FEM 解析値よりも大きく計測される場合がある。その場合には、橋の剛性低下等の経年劣化による影響があるものと考え、係数 β を考慮した ($\beta > 1$)。

② 支点拘束の有る場合

支点拘束の有る場合で、その支点拘束が強い場合の耐荷力の判定は、FEM 解析で支点条件をビン・ビン状態でモデル化した場合の応力度で評価を行う（図-13 参照）。

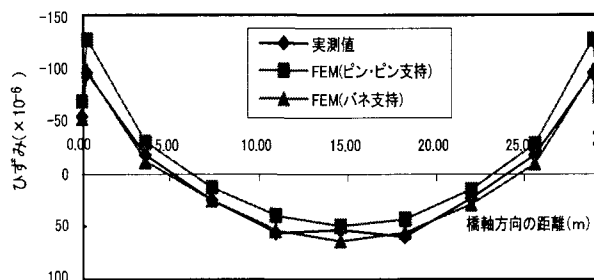


図-13 支点拘束の有る場合の主桁下フランジ ひずみ分布比較結果
(ひずみ計測位置は図-9 参照)

支点拘束が有る場合には、実体応力度は支点がピン・ピン状態ではなく、相当大きな水平バネに拘束されている状態であることが、研究の結果明らかとなっている^{5),8)}。

しかし、その支点拘束が強い場合、支間中央部の応力度は、ピン・ピン状態での FEM 解析結果とほぼ同等ないしは、若干実測値が大きい状態である。これらの関係は、実測橋梁が経年劣化の影響が大きくなると差が増大する傾向にあることから、支点拘束の有る場合においても、その支点拘束が強いと判断できる場合、実測応力度とピン・ピン状態での FEM 解析における応力度の比率を

$$\gamma = \text{実測応力度} / \text{FEM 解析応力度} \quad (\gamma \geq 1) \quad (10)$$

とし、B 活荷重に対する耐荷力評価を下記式にて行う。

$$\sigma_d + \sigma_l \times \gamma + \sigma_i < \sigma_a \quad (11)$$

ここに、 γ は経年劣化の影響係数で $\gamma \geq 1$

σ_d : 格子解析で算出された死荷重応力度

σ_l : FEM 解析(支点条件ピン・ローラー)で算出された B 活荷重応力度

σ_i : 格子解析で算出された衝撃応力度

σ_a : 許容応力度

支点拘束の有る場合の FEM 解析値は、過去の静的載荷試験結果から、

$$\text{実測応力度} / \text{FEM 解析応力度} = 1.00 \sim 1.05 \quad (12)$$

程度となり、経年劣化の影響は FEM 解析値に対して係数 γ をかけることで評価可能であるとした。 $(\gamma \geq 1)$

支点拘束が有る場合で、支点拘束状態がピン・ピン状態とピン・ローラー状態の中間的なひずみ分布を示す場合には、前述した耐荷力評価式(11)は、かなり安全側の評価となる。このような支点拘束状態の場合には、FEM 解析モデルの支点拘束状態、床版の剛性等を変化させ、静的載荷試験結果に合うように FEM 解析モデルを修正し、実測値の再現を図る(図-13 FEM(バネ支持)参照)。その上で、修正した FEM 解析モデルの支承条件をバネ支持からピン・ローラー状態に戻して、B 活荷重に対する応力度を評価する。すなわち、支点拘束が有る状態で計測した結果を基に評価を下し、支点拘束が無くなった(支承の取り替えまたは補修)後の耐荷力を判定したものである。修正されたモデルにおける B 活荷重に対する耐荷力評価の判定式は下記式のようになる。

$$\sigma_d + \sigma_l + \sigma_i < \sigma_a \quad (13)$$

ここに、

σ_d : 格子解析で算出された死荷重応力度

σ_l : 修正モデルを用いた FEM 解析(支点条件ピン・ローラー)で算出された B 活荷重応力度

σ_i : 格子解析で算出された衝撃応力度

σ_a : 許容応力度

本論文では、支点拘束のある橋梁(支承の機能不全により支点拘束条件が変わった橋梁)についての耐荷力評価手法について、式(11)及び(13)を提案しているが、これら評価式は支承機能を回復させた後の耐荷力評価であるといえる。支点がピン・ローラー状態で設計された橋梁がピン・ピン状態になった場合の悪影響としては、

- 合成桁としての床版への悪影響
- 支点近傍に発生する局部応力
- 地震時等での下部工への悪影響

等が考えられるので、耐荷力評価及びその後の維持管理を検討する場合には支承の機能回復を図ることが前提となることをあらためて強調したい。

③ 支点拘束の有る場合の支点近傍応力度の評価

支点拘束の有る場合で、その支点拘束が強い場合の FEM 解析値は、過去の実験結果(図-13 参照)から、支間中央部のひずみ差(実測値・解析値)に対して、支点近傍では局部応力によりひずみ差が大きくなる傾向にある。これらの応力差は、一般に

- 支点の水平移動拘束
- 支点の回転拘束による下フランジの板曲げ応力

等の影響であると考えられるが、過去の実橋載荷試験の結果から、支点拘束があっても若干の変位・回転はあることからそれらを分離して評価することは困難である。

支点拘束の有る場合における支点近傍局部応力は、

- 支承リフトプレート溶接部の疲労
- 腹板下側の座屈
- 下フランジの座屈

に影響を与えられと考えられる。図-14・15 に支点拘束の有る場合の支点近傍応力分布を示す。

図-14・15 より、支点近傍の応力分布は

- 発生が局部に限られ座屈等の問題発生の可能性は低いこと
- 応力頻度や振幅レベルによって疲労損傷の程度が大きく変わること

- 支承の交換で解消されること
- 床版への引張応力等の影響は小さい

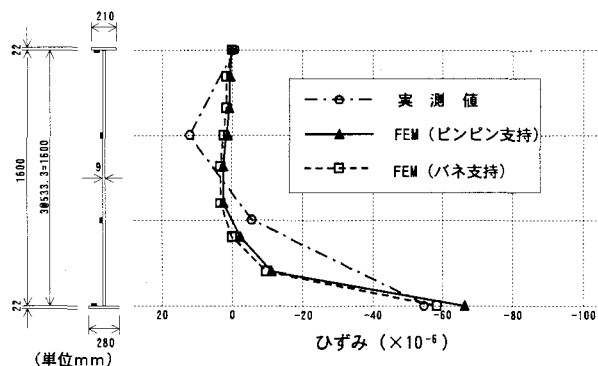


図-14 支点拘束の有る場合の支点近傍の η ひずみ分布の実測値と FEM 解析値の比較

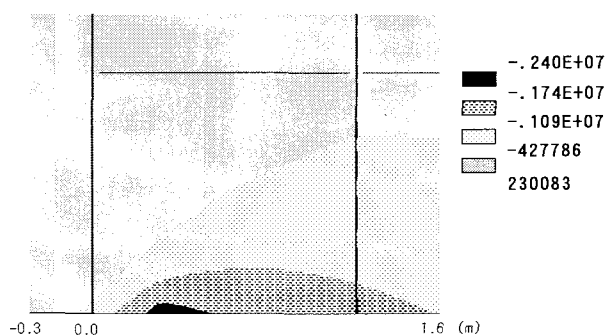


図-15 FEM 解析による支点部近傍橋軸方向の応力図 (単位: 10^{-5}N/mm^2)

ことから、支承の機能回復を行うことで解消される問題であるとし、全体耐荷力の評価対象とはしないこととした。

これらの応力度は、支点付近に発生している水平支承反力を推定することで、応力分布自体の推定が可能⁸⁾であり実橋での損傷に対する影響については、別途疲労余寿命等の評価を行うことが望ましい。

④ 衝撃係数の評価

二次計測で得られた各点の加速度のデータを基に卓越固有振動数を算出する。一次計測では簡易性を重視し計測位置を橋梁の 1/2 点の地覆上としたが、二次計測では、詳細なデータを得るため計測位置を 1/2 点・1/4 点及び 1/8 点の主桁とした。このため、より精度の高い解析結果が得られ、各点の卓越固有振動数を FEM 解析によるモード別固有振動数の算出結果と照らし合わせて、実測で得られた固有振動のモードを特定する。図-16 に同定した振動モード図の一例を示す。

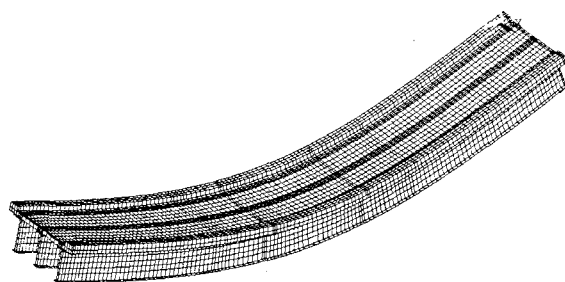


図-16 曲げ一次モード算定図例

また、各点の応答加速度からモード解析を行い、モードの特定や、モード減衰定数も求め、衝撃係数への評価も可能であるが、本マニュアルでは安全側の処置として評価へは反映せず、経年劣化の影響判定を詳細に行うに留める。

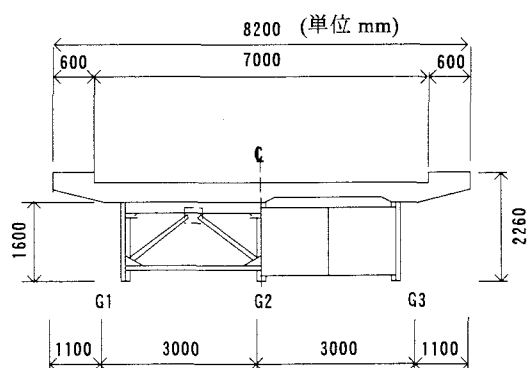
5. 計測・評価マニュアル(案)の適用事例

5.1 梨の木橋の耐荷力判定

本マニュアル(案)の実用性を検証するために、架設後 25 年程度経過した一般的な橋梁に対してマニュアル(案)を適用して耐荷力判定を行った。以下、その判定結果について示す。

1) 対象橋梁の概要

図-17 に示す岩手県久慈市梨ノ木橋は、昭和 55 年に架設された支間長 29.2m の単純合成鋼桁橋であり、目視調査から極めて重大な損傷が見られない橋であることを確認した。支承構造は、高力黄銅支承板支承である。



橋 長: 30.0m 支間: 29.2m
形 式: 単純合成鋼桁橋 幅員: 7000mm
活荷重: 一等橋 (TL-20) 竣工: 昭和 55 年

図-17 梨ノ木橋の諸元

2) 一次計測結果の判定

本マニュアル(案)に従って、重量 200kN のトラック荷重による静的及び動的載荷試験を行った。

① 主桁近傍下フランジ ひずみの判定

可動側下フランジ ひずみは

- ・ G1 桁着目時 $\varepsilon = -43 \times 10^{-6} < (0.17L - 22.25) \times 10^{-6}$
 $= -17.3 \times 10^{-6}$
- ・ G2 桁着目時 $\varepsilon = -36 \times 10^{-6} < (0.17L - 22.25) \times 10^{-6}$
 $= -17.3 \times 10^{-6}$

であり、図-18 に示すとおり支点拘束の可能性が有ると判定した。

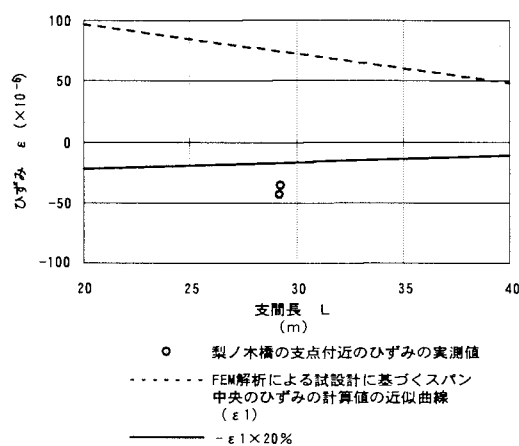


図-18 支点近傍下フランジ ひずみの判定

② 可動支点部水平変位量の判定

可動支点部水平変位量は

- ・ G1 桁着目時 $\delta 1 = 0.025\text{mm}$
- ・ G2 桁着目時 $\delta 2 = 0.050\text{mm}$

であり、判定値 $\delta < 0.05\text{mm}$ に対して若干の移動を示している。しかし、ほぼ判定規定値近傍であることから、支点拘束の可能性が有ると判定した。

③ 基本固有振動数の判定

固有振動数の計測の結果、卓越基本固有振動数は、

$$n = 3.7 \text{ Hz} > 0.85 \times 56L^{-0.76} = 3.66 \text{ Hz}$$

であり、図-19 に示すとおり経年劣化の可能性については疑わしいといった判定に留めた。

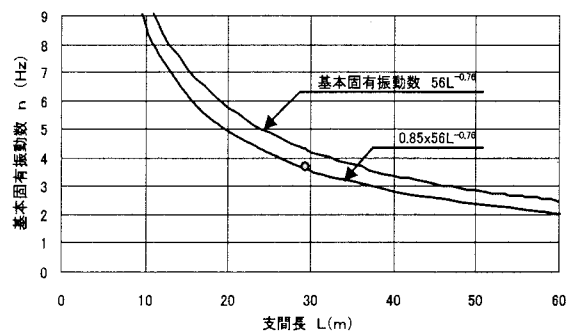


図-19 基本固有振動数の判定

以上、一次計測の結果、本橋は、

- 支点拘束の可能性がある
- 経年劣化の可能性については疑わしい

と判定され、詳細な二次計測を行って耐荷力を判定することとした。

3) 二次計測結果の判定

本マニュアル(案)に従って、重量 200kN+250kN のトラック荷重による静的載荷試験を行った。

図-20 に G2 桁着目時の下フランジ ひずみの実測値と FEM 解析値の比較を示す。

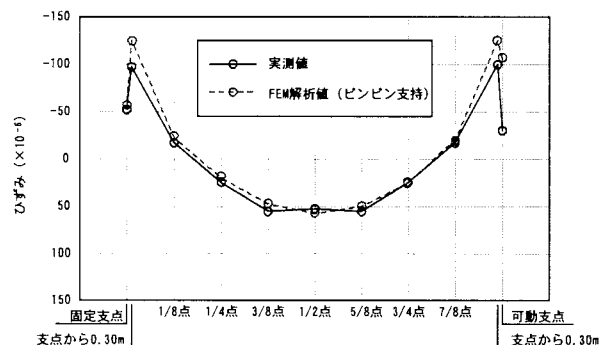


図-20 実測ひずみと FEM 解析結果比較
(ひずみ計測位置は図-9 参照)

一次計測の結果、本橋は支点拘束の可能性があると判断されており、支点拘束の有る場合の B 活荷重に対する耐荷力評価の判定式；

$$\sigma_d + \sigma_l \times \gamma + \sigma_i \leq \sigma_a$$

による耐荷力評価を行った。

① 経年劣化の影響係数 γ の判定

経年劣化の影響係数である γ は、G1 桁着目時及び G2

桁着目時の実測値と FEM 解析値の比率の平均値で評価を行った。すなわち、 γ は①200KN+250KN;中桁直列載荷 (G2 桁最大) の場合と、②200KN+250KN;並列載荷 (G1 桁最大) の場合の 2 通りのひずみを用いて算出した値の平均値を採用した。

$$\gamma = \frac{\text{実測応力度}}{\text{FEM解析応力度}} = \frac{\text{実測ひずみ}}{\text{FEM解析ひずみ}}$$

$$= \left\{ \frac{80}{90} + \frac{54}{55} \right\} \div 2 = 0.9354$$

$$\therefore \gamma = 0.9354 (\leq 1.00) \Rightarrow \gamma = 1.00$$

これらの結果から、経年劣化の影響係数 γ は 1.0 より小さく算出されたので、経年劣化の影響は無いものと考え γ を 1.0 と判定し、経年劣化の影響は耐荷力判定に影響しないと判断した。

② FEM 解析による B 活荷重応力度 σ_l の算出

図-11 に示すような梨の木橋全体の FEM 解析モデルを作成し、B 活荷重が作用した場合の FEM 解析を行った結果、主桁下フランジ中央の応力度は以下の通りとなった。

$$\cdot \text{G1 桁着目時} \quad \sigma_l = 65.20 \text{ N/mm}^2$$

$$\cdot \text{G2 桁着目時} \quad \sigma_l = 64.59 \text{ N/mm}^2$$

③ 格子解析による死荷重応力度 σ_d 及び衝撃応力度 σ_i の算出

本マニュアル(案)に従って死荷重応力度及び衝撃応力度を以下の通り算出した。

$$\sigma_i = \sigma' \times \frac{\left(\frac{M_v - M_{vd}}{1+i} \times i \right)}{M_v} \quad (14)$$

$$\sigma_{da} = \sigma' \times \frac{M_{vd}}{M_v} \quad (15)$$

$$\sigma_d = \sigma + \sigma_{da} \quad (16)$$

σ_i ; 衝撃応力度

σ' ; 合成後応力度

σ_d ; 死荷重応力度

σ ; 合成前死荷重応力度

σ_{da} ; 合成後死荷重応力度

M_v ; 合成後曲げモーメント

M_{vd} ; 合成後死荷重曲げモーメント

i ; 衝撃係数

式(14)～(16)に格子解析より得られた合成前後の曲げモーメント及び応力度を代入すると以下の通りとなる。

・ G1 桁着目時

$$\sigma_i = 102.0 \times \frac{\left(\frac{3455 - 435}{1 + 0.253} \times 0.253 \right)}{3455} = 18.00 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_d = 101.4 + \frac{435}{3455} = 114.84 \text{ N/mm}^2$$

・ G2 桁着目時

$$\sigma_i = 93.6 \times \frac{\left(\frac{3329 - 558}{1 + 0.253} \times 0.253 \right)}{3329} = 15.73 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_d = 98.2 + 93.6 \times \frac{558}{3329} = 113.89 \text{ N/mm}^2$$

④ B 活荷重に対する耐荷力の判定

以上の結果から G1 桁及び G2 桁着目時の B 活荷重に対する耐荷力判定結果は、下記判定式を用いると以下のようになる。

$$\sigma_d + \sigma_l \times \gamma + \sigma_i \leq \sigma_a$$

・ G1 桁着目時

$$\sigma_{G1} = 114.84 + 65.25 \times 1.00 + 18.00 = 198.09 \text{ N/mm}^2$$

$$< \sigma_a = 210.00 \text{ N/mm}^2$$

・ G2 桁着目時

$$\sigma_{G2} = 113.89 + 64.59 \times 1.00 + 15.73 = 194.21 \text{ N/mm}^2$$

$$< \sigma_a = 210.00 \text{ N/mm}^2$$

以上の結果より、TL-20 荷重で設計されている本橋は G1 桁及び G2 桁とも B 活荷重に対する耐荷力を有していると判定した。

6. まとめ

本論文は実橋載荷試験結果を耐荷力判定に取り入れることにより実体の劣化・損傷に適した判定が行え、橋梁の耐荷力判定をより高精度に行えるようにした計測・評価手法を提案したものである。本手法の特徴として以下の内容があげられる。

- ① 計測は二段階に分かれ、最初に簡易な一次計測により支点拘束や経年劣化の有無を判定する。

- ② 支点拘束や経年劣化の有無は一次計測で判定し、その耐荷力への影響度は二次計測によりその程度を判断する。
- ③ 耐荷力の判定は支点拘束・経年劣化の影響を考慮したFEM解析を用いて評価する。

また、本論文では、提案手法を用いることにより支点拘束のある橋梁においても、判断を誤ることなく耐荷力の判定が行えることを実橋の耐荷力評価を行うことによって示し、実測値と格子解析計算値の比率が50%~80%程度であるという評価⁹⁾に対して、下記の通り本論文で着目している支点拘束有無の判定の重要性を示した。

- 支点拘束が有る場合には主桁支間中央下フランジ応力度の実測値は計算値(格子解析)の65%程度となり、主桁支間中央下フランジ応力度の評価のみで耐荷力評価を行うことには注意が必要である。
- 支点拘束が有る場合には主桁支点部近傍下フランジ応力度は局部的に大きな圧縮応力状態となっており、既設橋の耐荷力評価を行う際には、現行通行荷重頻度等を考慮し支承の維持管理を検討する必要がある。

7. あとがき

経済や社会情勢の変化に伴い、既設の社会資本の更新はより難しくなることが予想される。現有の橋梁を補修・補強しながら、いかに長く有効に利用していくべきかは今後最も重要な課題であり、その判定方法の精度はマネジメントにおける根幹となるものである。岩手県内においても、昭和55年前後に、多数の橋梁が架設されており、本マニュアル(案)がこれら実橋の性能評価結果をもとに作成されていることは意義深い。また、実橋ではほとんどの既設橋梁が支点拘束されていることに着目し、計測を二段階に分割し、より実体に近い評価を可能としているなど、実務上の工夫も多い。これは支点拘束や経年劣化の有無を目視等定性的な判定からより定量的な判定を簡易に行うために工夫したものであるが、一方で二次計測では支点拘束の有る状態で耐荷力判定を行うために詳細の応力分布を計測しFEM解析モデルを作成するため計測が大がかりとなる欠点もある。

現在、多くの自治体が財政危機にあるとともに、道路財源の確保が不透明なことから、判定(点検・台帳整備・マネジメントシステムの構築・解析や現地計測による評価など)に

要する費用、維持・補修・補強に要する費用、さらには施設更新に要する費用のバランスをとり最も効果的な維持管理を模索している段階である。本マニュアル(案)で提案している耐荷力判定方法についても簡易化への改善を試みる予定であり、主桁耐荷力判定のみでなく、疲労余寿命判定や支点付近の応力状態も考慮した総合的な評価を行うならば、より実用的であると思われる。

また同時に目視等簡易な判定から岩手県等積雪寒冷地特有の劣化や交通事情などを考慮した劣化進展速度を加味した判定手法についても現在研究を進めている段階であり、耐荷力判定・耐久性判定結果から対象構造物の総合的維持管理方針が決定されるマネジメントシステムの構築を検討している。

本論文を作成するに当たり、共同して研究を行った社団法人岩手県土木技術センター研究員の皆様、また研究に協力いただいた日本大学五郎丸教授・地熱エンジニアリング(株)に心より御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 財団法人道路保全センター：既設橋梁の耐荷力照査実施要領(案)1996.8
- 2) 社団法人岩手県土木技術センター：道路橋設計荷重の変更による既設橋梁上部工に及ぼす影響，第1回共同研究報告書，1999. 6
- 3) 社団法人岩手県土木技術センター：道路橋設計荷重の変更による既設橋梁上部工に及ぼす影響，第2回共同研究報告書，2000. 6
- 4) 社団法人岩手県土木技術センター：道路橋設計荷重の変更による既設橋梁上部工に及ぼす影響，第3回共同研究報告書，2001. 6
- 5) 岩崎正二，出戸秀明，寺田晃，兼子清，村上功：静的載荷試験に基づく既設鉸桁橋の静的耐荷力算定に関する一考察，鋼構造年次論文報告集，第8巻，pp. 9-16，2000. 11
- 6) 土木学会構造工学委員会橋梁振動モニタリング研究小委員会：橋梁振動モニタリングのガイドライン，2000.10
- 7) 社団法人岩手県土木技術センター：道路橋設計荷重の変更による既設橋梁上部工に及ぼす影響，第5回共同研究報告書，2003. 6
- 8) 出戸秀明，岩崎正二，五郎丸英博，山村浩一，沼田光徳：鋼製支承を用いた既設合成鋼鉸桁橋の支点応力解析，鋼構造年次論文報告集，第10巻，pp. 95-102，2002.11
- 9) 社団法人日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，2002. 3

(2004年9月17日受付)