

【論 文】

質量付加式吊橋の提案 —セバーン橋の問題とその対策— Proposal for Suspension Bridge with Additional Mass —A Solution for The Severn Bridge Problem—

平 井 敦 *
Atsushi HIRAI
川 田 忠 樹 **
Tadaki KAWADA

〔要旨〕 流線形箱桁形式を最初に採用したセバーン橋が、使用開始後16～17年にしてすでに構造物としては疲労の限界に近づきつつあるのではないかと報告が最近なされている。

この原因としては、斜めハンガーに起因する問題点や交通量の激増などが挙げられているが、もっと根本的な問題すなわち吊橋の自重という要素を忘れたことに起因するのではないかと考えられる。そこで本文では、吊橋における自重の役割を述べ、従来の斜めハンガーを有する流線形箱桁形式に代って、付加質量を有する流線形箱桁形式の吊橋を提案している。

第1章

このところセバーン吊橋に対する問題が賑かであり、供用開始後16～17年にして、すでに構造物としては疲労の限界に近づきつつあることが明らかにされた。

セバーン橋が、このように比較的短い年月で寿命が尽きようとしている原因を、西ドイツのホンベルク博士(Dr. Hellmut Homberg)は斜めハンガーに求め¹⁾、それに対してイギリスの技術者ウェックス氏(Bernad Wex)は、原因は主として交通量の激増、すなわち活荷重条件が、設計値を大幅に上回ったことにあり、その上に各種のデリケートな条件が複合したものであるとの見解を述べた²⁾。

こうした説明は一面の真実を述べながらも、決して我々を十分に納得させてくれるものではない。その理由はもっと根本的な問題 — 吊橋における自重という要素 — を忘れ去ったところで議論が行われているためである。

第2章

すでに100年以上も前にジョン・ローブリング (John

Chapter 1

The Severn Bridge has been the most controversial topic recently among the engineering world, and it is now widely known that the bridge is approaching to the end of its life through material fatigue after 16 to 17 years of public service.

Dr-Ing Hellmut Homberg of West Germany ascribed its cause to the inclined hangers (Ref. 1), but Mr. Bernard Wex, Engineer and partner of the Freeman Fox and Partners in the U.K., claimed that the fatigue of the Severn Bridge mainly resulted from the soaring increase of traffics — the condition of live loading has changed greatly since the time the bridge was built. Moreover, he further commented that the phenomenon to the material fatigue is not so simple as to be attributed to the inclined hangers alone, but it is actually a more complicated and more delicately entangled one (Ref. 2).

Indeed, both the above explanations clarify the causes of the Severn Bridge problems in some aspects, but we dare say that they are not enough to satisfy us. The reason why is that in the above arguments one of the fundamental factors is forgotten. That is the dead load, or the weight of the suspension bridge itself.

Chapter 2

More than a hundred years ago in the U.S.A., John

* 東京大学名誉教授, 長岡技術科学大学名誉教授 ** 川田工業㈱取締役社長

Roebbling)は、吊橋を安定させるための三要素として“自重”と“トラス”と“ステー”を挙げている。そして Tacoma 吊橋の惨事以来、アメリカ流の吊橋には重厚な補剛トラスが採用されてきた。

このトラスを不要としたのが、イギリスのセバーン型流線形箱桁であり、ステーの変形としての斜めハンガーであったが、実はこの時点から自重の持つ意味が忘れられてしまったようである。

自重が忘れられた結果、吊橋は再び活荷重や風に対して極めてセンシティブな構造物となった。どのくらいセンシティブかを示すものとしては、図-1を御覧いただきたい。

この図はセバーン橋(軽い流線形箱桁で補剛)と、そこにフォース橋のトラス(鋼床版)を使用して補剛した場合と、さらにセバーン型の箱桁に質量を付加した場合の3ケースを比較したものである。なお、図-2に、念のためにセバーン橋およびフォース橋それぞれの吊構造の断面を掲げておいた。また、計算の条件を一覧すれば、表-1の如くである。

図-1(A)から明らかなように、セバーンタイプの補剛桁は、トラスに比べてはるかに撓みが大きく、その差は約20%である。ところがこのセバーンタイプの桁に質量を加え(自重を増し)てやると、実はフォース型トラスよりも更に剛度が上がることをこの図は示している。最大変位の差でトラスに対して20%、セバーンのオリジナルに対しては実に40%強となっている。

軽い吊橋がいかに撓みやすく、従って揺れやすいものであるか、いかに活荷重に対してセンシティブであるかを、図-1は如実に物語っている。

ちなみに、ここで最もすぐれた性状を示すのは、セバーンタイプの断面に質量を付加したものであるが、この場合の質量というのは、単位長さ当たり7.45t程度のコンクリートを与えたにすぎない。

参考までに図-1の(B)には活荷重についての最大曲げモーメント図を掲げておいたが、ここでも荷重を付加することの有利さがはっきりと示されている。

Roebbling pointed out three important factors for the stabilization of the suspension bridges. They were “weight”, “truss” and “cable stays”.

After the disaster of the Tacoma Narrows Bridge in 1940, American engineers adopted customarily heavy stiffening trusses for their great suspension bridges.

In the U.K., however, when they started to construct the Severn Bridge, the engineers invented a stream-lined box girder and adopted inclined hangers for the sake of cable stays. With these two innovations which are widely acclaimed, it seems that bridge engineers disregarded heavy trusses and, at the same time, it looks that they forgot utterly what John Roebbling said of the weight.

Once neglected its weight, or the significance of the dead load, the suspension bridge has become to be very sensitive structures against live load as well as against wind forces. See Fig.1 (A) which shows how sensitive a light suspension bridge is.

In Fig.2, cross sections of both the Severn and the Forth Bridges are shown for the reference. The conditions for the above calculations are shown in Table 1.

The Severn type light box section shows the largest displacement with live load. The Forth type truss section shows more of the stiffness than the light box, and accordingly its deformation is about 20% less. The most eminent is what we propose, the Severn type box section with additional mass. It shows the most stiffness, 20% better than the truss-stiffened one, and 40% better than the original Severn type light girder.

These diagrams explain eloquently how sensitive a light suspension bridge is, and at the same time, they show how effective it is to add mass or weight upon a suspended structure.

The weight, or the additional mass, for our proposed section is rather a reasonable one. In this case we considered 7.45t/m of longitudinal uniform load.

For the reference we provide the maximum moment diagram in Fig.1 (B). This also shows evidently the excellence of our proposal.

ところで、長径間吊橋ともなると、橋が揺れるのは活荷重の影響だけではなく、むしろ風の影響の方が大きい場合もある。その点について調べたのが図-3である。

図-3(A)では、抗力係数の大きいトラスを採用した場合に最も大きく撓むことになり、セバーン型の流線形断面がきわだって有利なことが、よく示されている。そしてこの場合でも、質量を付加することは、良い効果を与えるもので、質量を付加せぬ場合に比べて23%ばかり変位を抑えるのに役立っている。図-3(B)の最大曲げモーメント図でも、流線形箱桁断面に質量を付加したものの有利さが顕著である。

一方、動力学的な特性については、これは実際に数値計算してみれば明らかであるが、吊構造部に多少の質量を付加しても、その固有振動数はほとんど変化しない。この傾向はとりわけ鉛直たわみ振動において顕著であり、またねじれ振動の場合でも、質量をせん断中心付近に集中的に付加する限りにおいて同様な傾向にある。

もちろん、せん断中心以外に質量を付加した場合には極慣性モーメントが増加し、ひいてはねじれ振動数にも影響が及ぼされるのであるが、これも一般にスラブコンクリートとして施工する程度では無視し得る程度のものであることを、既に筆者達は確めている。

以上に述べたように断面形状が同じで、しかも質量を付加することによっても吊橋の振動数がほとんど変化せぬことが明らかになったことにより、風などの外的な荷重によって誘起される振動においては、当然のことながら、その振幅は減少することになる。すなわち、質量を付加することによって吊橋の対風特性は向上すると考えられるのであり、図-4はこうした傾向を、たわみ風琴振動、バッフェティングおよび曲げねじれフラッターの限界風速についてそれぞれ示したものである。

So far as Fig.1 concerns, we discussed the live load and the vertical displacements alone. Concerning the long span suspension bridges, however, wind forces and lateral displacements are often more critical than the vertical ones. Fig.3 deals with this.

As shown in Fig.3 (A), truss section has naturally wider resisting area against the wind than the stream-lined box section. Accordingly truss sways wider, thus distinguishing the eminence of the stream-lined section. Even in this case, additional mass increases the stiffness compared with the original light girder. The same effect is clearly shown in the maximum moment diagram of Fig.3 (B), where the moment of the mass added section is about 23% less compared with the original light section at the center of the span.

Speaking of dynamic characteristic, it can be easily proved through numerical calculation that the natural frequency of a suspension bridge is hardly affected by the application of mass on the suspended structure. This tendency is especially prominent with the vertical oscillation, and even with the torsional oscillation, so far as the mass is concentrated along the center of torsion of the suspended structure, the same tendency is clearly seen.

It is true that the polar moment of inertia is affected if the mass is applied excentrically on the center of torsion of the structure. It is also true that once the polar moment of inertia is changed the natural frequency of the torsional oscillation varies consequently. We have already confirmed, however, that the variation of torsional frequency of a suspension bridge is slight and practically negligible, so long as the addition of mass is applied uniformly in the form of concrete slab upon the surface of the suspended deck.

As it is clear now from the above explanation, the natural frequency of a suspension bridge is hardly affected with addition of mass upon its suspended deck, provided that the cross sectional characteristics remain unchanged. This follows that the addition of mass upon a suspension bridge reduces the amplitude of oscillation induced by the external force such as wind or vehicles. In other words the addition of mass improves the aerodynamic stability of a suspension bridge, and Fig.4 shows the three typical cases of such aerodynamic amelioration: the bending aeolian oscillation, the buffeting motion, and the critical wind velocity of classical flutter.

Table 1

Conditions for Calculation					
		Sev.	For.	Sev.(M)	
Dead Load	Cable and Hanger (t/m/Br)	2.76	3.90(4.0)	4.80	
	Suspended Structure (t/m/Br)	9.55	11.50(17.0)	17.00	
	Total (t/m/Br)	12.31	15.40(21.0)	21.80	
Wind Load	Wc (on cable) (t/m/Br)	0.217	0.256	0.284	
	Wg (on girder) (t/m/Br)	0.238	1.080	0.238	
Stiffness	Area of Cable (m ² /Br)	0.324	0.452	0.556	
	Moment of Inertia (vertical) (m ⁴ /Br): I _x	1.126	4.7(3.5)	1.126	
	Moment of Inertia (lateral) (m ⁴ /Br): I _y	48.070	38.0(27.0)	48.070	
	Torsional Stiffness (m ⁴ /Br) Factor of Girder: J	2.898	1.3(1.3)	2.898	

(): side span

In the above table, symbols for Sev., For. and Sev.(M) mean as follows;

Sev. — Original Severn Bridge itself, that is the one stiffened with the Severn type light box section.

For. — This means the case where the suspension bridge is stiffened with the Forth type trusses with steel deck.

Sev.(M) — This is our proposal, the Severn type light box section with "additional mass".
In this case, the reinforced concrete slab on the side span of the Forth Road Bridge is considered as the mass.

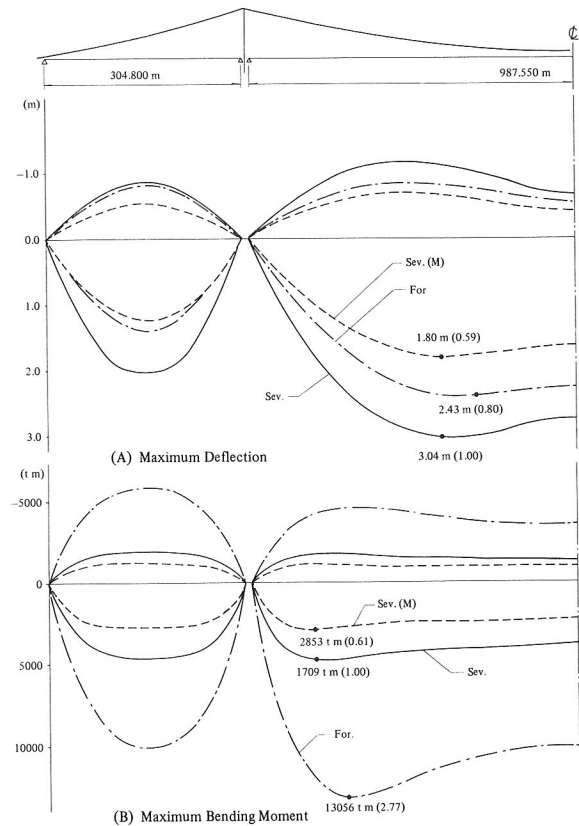
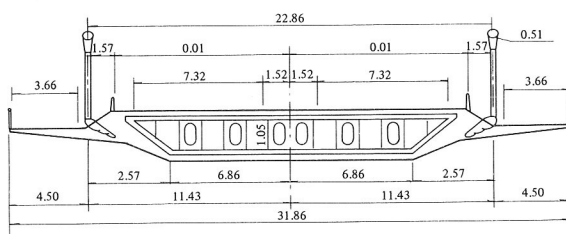
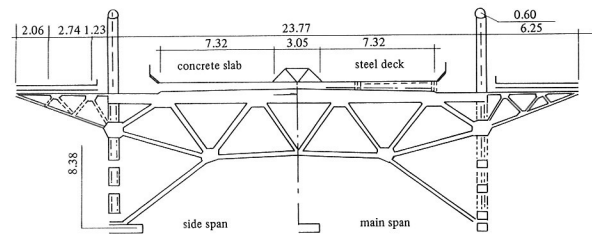


Fig. 1 Comparison of 3-types of Suspended Structures by the Live Load



(A) Severn Bridge



(B) Forth Road Bridge

Fig.2 Sections of Severn and Forth Road Bridges (unit:m)

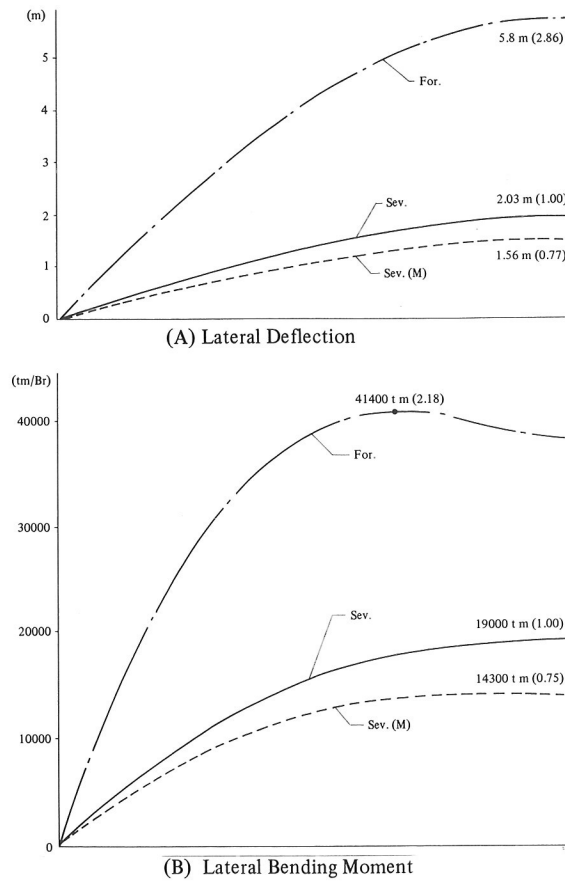


Fig. 3 Comparison of 3-types of Suspended Structures by the Lateral Wind Force

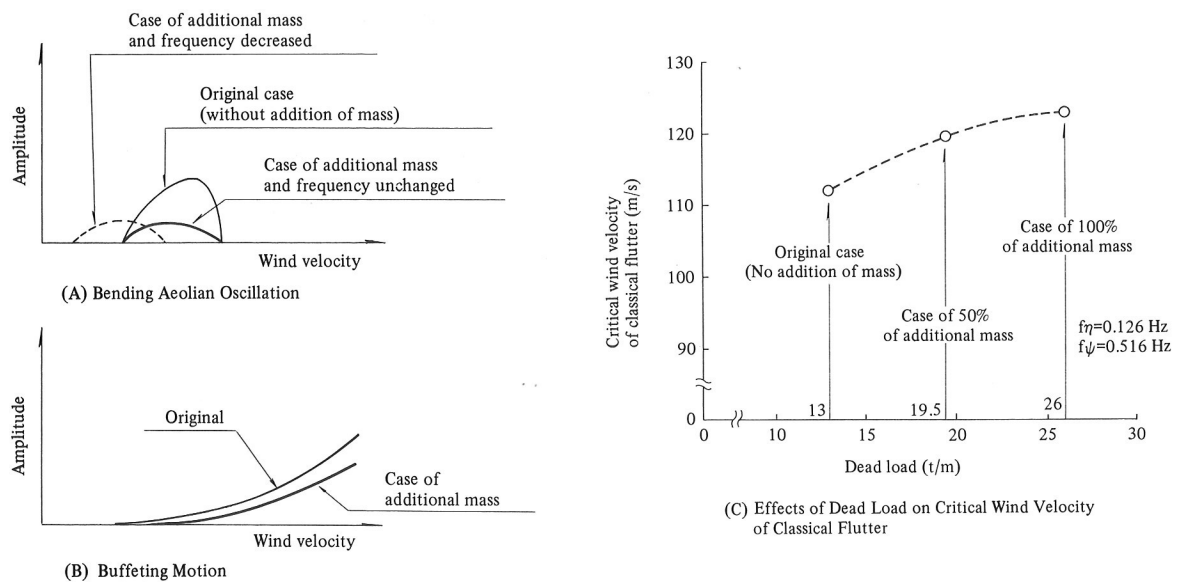


Fig.4 Aerodynamic Improvement of Suspension Bridge with Addition of Mass

第3章

著者の一人である平井 敦は、現東京大学教授伊藤 学とともに、かつて吊橋における自重（質量）の果たす役割の重要さに着目して、ほとんど自重だけで吊橋に必要な剛度を与えるという、重橋床式吊橋を提案した。³⁾これは日本においては特許が成立し、1955年には最初の施工例としての白金橋が完成をみている。

上記の工法はその後我が国において中小スパンの低価格橋梁として定着をみるにいたり、施工実績としては既に数十橋を数えるにいたっている。そのうち施工年次の古いものの幾つかを表-2に掲げたが、その多くは図-5に示した設計に類似のきわめて簡易なものであった。だがそれにもかかわらず、いずれも近代技術の粋を集めて作られたセバーン橋より長い寿命を保ち、いまだに供用されて架け替えられたという報告を受けていない。この一事をもってしても、吊橋における自重が、いかに本質的なものであるかがよく理解できるのである。

セバーン型の流線形箱型断面を採用した時点で、吊橋の自重が持つ意味に注目しなかったことは残念なことであった。そしてこのような軽い吊橋を安定させようとして斜めハンガーを採用したことは、より一層事態を悪化させてしまったようである。

実際には、自重さえ増してやれば、斜めハンガーなどは不要であったと思われる。

Table 2 Examples of Unstiffened Suspension Bridge with Heavy Deck

Name of Bridge	Year Built	Span Length (m)	Width (m)
SHIROGANE	1955	162.4	2.6
YATATE	1955	90	3.5
ICHINO	1962	90.8	3.1
HACHIMAN	1969	160	3.5

Chapter 3

A. Hirai, one of the authors, proposed some 25 years ago an "Unstiffened Suspension Bridge with Heavy Deck" (Ref. 3) with Dr. Manabu Ito, now professor of the University of Tokyo, and got patent right in Japan. In this invention the necessary stiffness for a suspension bridge is mainly obtained from the dead load, or mass, and its first application was the Shiroganebashi Bridge in the year of 1955.

Since then, this type of suspension bridge has been widely accepted in our country for light traffic, medium-size spans because of its economical advantage. Up to this time, scores of such bridges have been erected and some of their early examples are listed in Table 2.

In Fig.5, we showed the typical cross section of this type of heavy deck. Principally most of the heavy decks of our type of unstiffened suspension bridges are in similar designs and are all very simple, but actually their lifetimes of service are longer than that of the more sophisticated Severn Bridge.

So far not a single span of our invention was reported to have been critically damaged or reconstructed. This tells us most eloquently how important the weight working upon a suspension bridge is!

Since the time, however, when the stream-lined box section for the stiffening girder was adopted for the Severn Bridge, it was regrettable that the engineers seems to have forgotten the role and the significance of the weight or mass in a suspension bridge. Instead, they invented the inclined hangers for the purpose of stabilizing a light suspension bridge, and made the matter worse on the contrary.

To tell the truth, if only we remembered correctly what John Roebling meant, and if we added some mass on that suspended box girder, the inclined hangers were of no use and would not have been contrived.

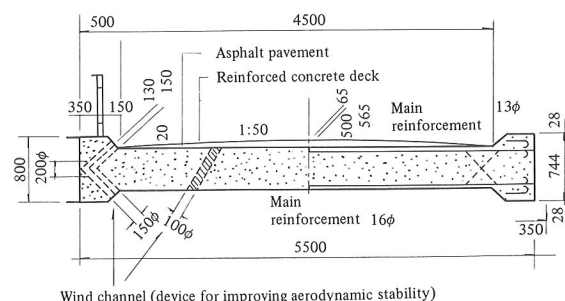


Fig. 5 Cross Section of the Unstiffened Suspension Bridge with Heavy Deck

むしろ、流線形箱桁プラス質量付加という組合せが、吊橋としては構造的にも経済的にも、最も有利なものとなるべきものであったと、現在筆者達は考えている。

ちなみに、セバーン吊橋で一番問題になったハンガーについても、たんに垂直になし得るだけではなくて、死荷重が増えることにより、活荷重の変動幅がぐんと小さくなって、当然のことながら疲労に対する強度は、飛躍的に増大する。そしてこの効果は、ケーブルについても、塔その他についても期待しうることなのである。

この程度の質量（自重）の増加によって、ケーブルを含めた吊構造部の鋼重の増加は、筆者達の試算では、セバーンのオリジナルに対して20%を超えることなく、これはトラスを採用する場合の鋼重増のほぼ半分ということになる。

なお付加すべき質量については、ここでは一つの目安として、コンクリート床版程度のものを考慮したが、もちろんこれは実施に際して最適なものを選べばよく、またその付加の方法も、振れ振動性状などを考慮すれば、たとえば、剪断中心部に集中して、などということも考えられるかもしれない。

いずれにしても、今日大きく話題とされているセバーン橋の問題の本質は、橋梁技術者達が吊橋において自重の果たす役割を忘れたことに、その真の原因が存在するのであり、したがって今後の対策もいまや明白である。すなわち我々の提案するように必要な質量を付加して、吊橋の自重を増してやれば良いのである。

参考文献

- 1) New Civil Engineering, 1982年4月15日号。
- 2) New Civil Engineering, 1982年4月29日号。
- 3) 平井・伊藤：重橋床式無補剛吊橋について，土木学会論文集，第64号，1959。

In our opinion, the stream-lined box section with the additional mass should have been prevalent as the best solution for both structural and economical reasons, not the one with the inclined hangers.

Speaking of the hangers which are the most critical and so the most controversial among the members of the Severn Bridge, addition of the mass or the weight does not only mean the alteration of hangers from the inclined position to the vertical, but it also ameliorates greatly the resisting strength of the material for the fatigue. Additional mass makes the dead load heavier and the proportion of the live load relatively smaller, thus the amplitude of the live load stress comes to be smaller, too. This effect is equally expected for the other members, such as cables, towers, and so on.

Increase of the steel weight in the superstructure, owing to such addition of mass, is quite a reasonable one. Compared with the original Severn Bridge with light box section, it does not surpass 20% at most by our estimation. This value is equivalent to about the half of the increment of the expected steel weight, if the Forth type stiffening trusses were adopted.

Speaking of the volume of the additional mass or weight applied in the above calculation, we considered that of the concrete slab just for our convenience. This could be varied, of course, and we could find optimum quantity for each case. Further studies concerning the oscillations, both vertical and torsional, may well suggest us to concentrate the whole additional mass to the center of the twist, instead of distributing it like slab or pavement as we mentioned here.

In conclusion, we want to say all the troubles now occurring to the Severn Bridge and its followers resulted from just one thing: the bridge engineers disregarded the important role of the "weight" in the suspension bridge. Thus the solution for these troubles are clear enough now: just add the necessary mass to the suspended structures and increase the dead weight of the bridge according to our method.

References:

- 1) New Civil Engineering, 15th April, 1982.
- 2) New Civil Engineering, 29th April, 1984.
- 3) Hirai, A. and Ito, M; An unstiffened suspension bridge with heavy deck, Trans. of Japanese Society of Civil Engineering, No. 54, Sept., 1959 (in Japanese).