

(25) 吊り区間を含むP C斜張橋「ハイブリッド斜張橋」の検討

(株)ピー・エス 土木技術部 正会員 ○武村浩志
 同上 正会員 大浦 隆
 同上 正会員 大主宗弘
 名古屋大学 工学部 正会員 田辺忠顕

1. はじめに

多々羅大橋(中央径間 890m)やノルマンディー橋(中央径間 856m)に代表されるように、P C複合斜張橋の最大スパンはついに 1000m 近くまで延びてきた。しかしながら、構造的・経済的な面からこれ以上のスパンの長大化はあまり期待できないのが実状である。一方、最大スパン 2000m 以上ともいわれる「海峡横断プロジェクト構想」をはじめ、鋼橋の分野では今後さらに長スパン化が進むと思われる現状を考えると、P C橋の分野でも鋼吊り橋に対抗できる新しい橋梁形式の登場が望まれる。このようなことから、吊りケーブルと斜張ケーブルを併用し、さらにコンクリートと鋼の複合橋(以下、ハイブリッド斜張橋と仮称する)とした橋梁形式を今回提案し、その適用性の検討を行ったのでここに報告する。

2. 海峡横断プロジェクト構想

これまでの一極集中型の国土構造を多極分散型に変換するためには、社会資本すなわち道路網の整備が必要不可欠である。このような背景から「海峡横断道路調査会」では図-1および表-1に示す海峡への架橋の実現を目指した基本的な調査・研究¹⁾を行っている。これらの計画では、最大スパンを 2000m 以上とした橋梁がほとんどで、明石海峡大橋をも上まわるものである。したがって、その橋梁形式は当然「鋼吊り橋」で計画されている。確かに、純粋な「P C斜張橋」ではここまでの長スパン化は難しく、何らかの複合化が必要であろう。このような発想から、多々羅大橋などではコンクリートと鋼とを複合化させて長スパン化を実現しているが、それに加えて斜張橋と吊り橋とを複合化させることで、海峡横断プロジェクト構想における鋼吊り橋に対抗できるだけのさらなる長スパン化が可能になるとと思われる。ハイブリッド斜張橋の発想は、このような背景から生まれたものである。



図-1 海峡横断プロジェクト構想

表-1 海峡横断プロジェクト地

架橋ルート		海上最短距離	架橋距離
津軽海峡	津軽半島ルート (白神～竜飛)	19.2km	20.7km
	下北半島ルート (汐首～大間)	18.7km	19.0km
東京湾口		7.0km	8.0km
伊勢湾口		17.3km	17.5km
紀淡海峡		11.0km	12.0km
豊予海峡		13.5km	13.5km
島原 天草 長島架橋	早崎瀬戸	5.1km	5.1km
	長島海峡	2.1km	2.1km

3. ハイブリッド斜張橋の概要

3. 1 歴史

ハイブリッド斜張橋の概念図を図-2に示す。桁を主塔

付近では斜張ケーブルで、その他の部分ではハンガーケーブルでそれぞれ支持した構造である。このような斜張ケーブルと吊りケーブルを併用するという概念はそれほど新しいものではなく、1883年完成の Roebing（米）による Brooklyn 橋をはじめ、世界各国に多くの橋梁が建設されている。ただしこれらはすべて鋼橋であり、また斜材区間と吊り区間が分かれていない（同一断面を斜材とハンガーの両方で支持している）形式が多い。図-2のような斜材区間と吊り区間が分かれた形式となると Amodin（仏）が1888年に建設した橋梁²⁾があり、また Dichinger（独）も図-3のような橋梁³⁾を1938年に提案しているが実現には至っていない。

近年になると、斜張橋部をPC、吊り橋部を鋼とした複合橋が提案されてきた。その例として図-4に示す Great Bealt East 橋⁴⁾や Izumit 湾横断道が挙げられる。しかしこれらも提案までにとどまっておき、採用されるまでには至っていない。また研究レベルでもほとんど報告⁵⁾されていないのが現状である。

3. 2 特長

ハイブリッド斜張橋はその構造上、通常の斜張橋や吊り橋に比べて以下のような特長を持つことが考えられ、またいくつかの報告⁶⁾によってそれらが実証されている。

【同一スパンの斜張橋に比べて】

- ①斜材が少ないため桁に生じる軸力が減少し、座屈安定性が向上する。
- ②上記の理由から、長スパン化が可能となる。
- ③斜張ケーブルが短くなるため、ケーブルの架設や振動に対して有利となる。
- ④斜張ケーブル本数が減少するために、主塔高を低くすることができる。

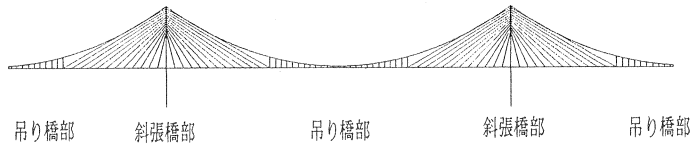


図-2 ハイブリッド斜張橋概念図

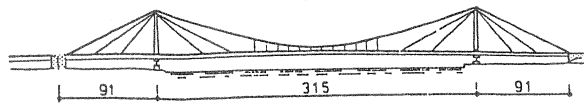
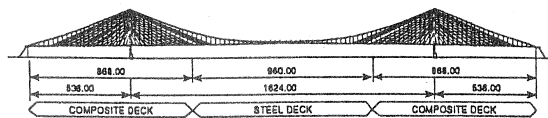
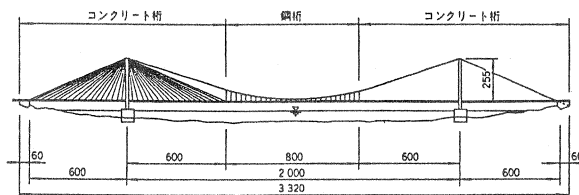


図-3 Dichinger による橋梁



(1) Great Bealt East 橋



(2) Izumit 湾横断道

図-4 近年のハイブリッド斜張橋例

【同一スパンの吊り橋に比べて】

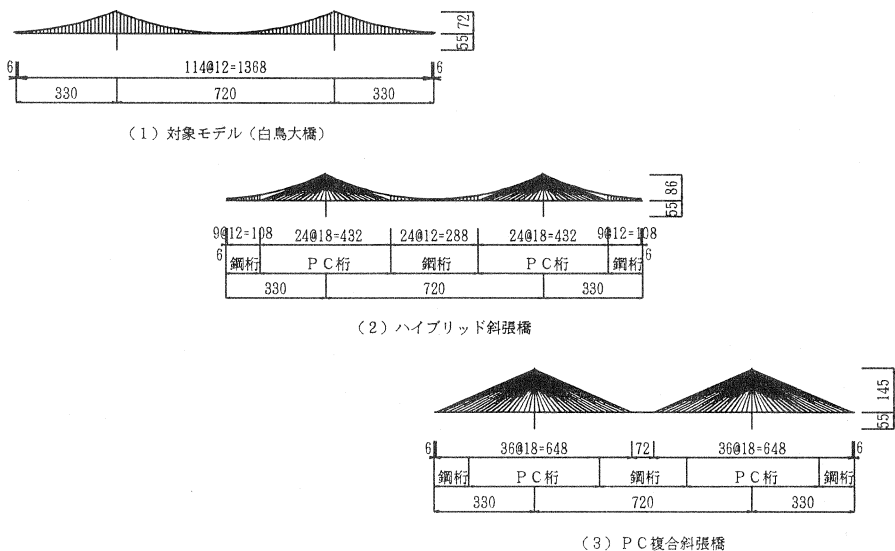
- ①斜張ケーブルがあるためにたわみ剛度が大きくなり、耐風安定性が向上する。
- ②主ケーブルが負担する荷重が小さくなるため、発生する張力を減少させられる。
- ③上記の理由から、主ケーブルの断面積およびケーブル総重量を減少させられる。
- ④同様の理由から、アンカレッジに対して有利となる。

4. 試設計

4. 1 対象モデル

ハイブリッド斜張橋の力学的特性の確認、さらに鋼吊り橋およびPC斜張橋との比較のために、概略的な試設計を行った。モデル橋として、図一5（1）に示す中央径間 720m、桁高 2.5m の白鳥大橋（北海道）を対象とした。この鋼吊り橋をハイブリッド斜張橋にする場合、PC斜張橋部と鋼吊り橋部との割合が問題となってくるが、今回は図一5（2）に示すように斜材区間と吊り区間の比が中央径間で6：4になるように設定している。吊り区間の設定については今後の課題とするところである。また、主塔高の設定には、斜張橋区間が中央径間で432m となることから、これに対する斜張橋の一般的な高さである $0.2L$ （ L ：スパン長）の 86m とした。この時、材質も鋼製からRCに変更している。さらに主桁は、鋼桁部は白鳥大橋と同一断面、およびPC桁部は高さ 2.5m の箱桁を基本としている。

なお、比較のためのPC斜張橋についても試設計を行っている。この時、中央径間 720m のすべてをPC桁にすることは現実的ではないため、ハイブリッド斜張橋と同様にPC桁部と鋼桁部の比が中央径間で6：4になるPC複合斜張橋とした。主塔高は $0.2L$ となる 145m、主桁はハイブリッド斜張橋と同様とした。図一5（3）にPC斜張橋のモデル図を示す。



図一5 試設計の対象モデル

4. 2 力学的特性の検討

図一5（2）に示したモデルを用いて、ハイブリッド斜張橋の力学的特性を検討した。本橋梁形式で最も懸念されるのが、斜張橋と吊り橋という異なった構造形式を組み合わせたことで、お互いに悪影響を及ぼし

てしまい、それぞれの構造上の特性を生かせなくなってしまうことである。今回はその点に着目して検討した。

図-6は、活荷重相当の群集荷重を全径間に満載した場合と斜張橋部のみで載荷した場合との主ケーブル張力の分布であり、図-7はその時の斜張ケーブルの張力分布である。図-6には死荷重時の初期張力も合わせて示しているが、全径間に満載した場合は主ケーブル張力が1000tf程度増加しているが、斜張橋部のみで載荷した場合は死荷重時張力からほとんど増加していないのがわかる。また、斜張ケーブルは全径間に満載しても斜張橋部のみで載荷しても、張力がほとんど変わっていない。これらから、本橋梁形式では、斜張橋部の荷重に対しては斜張橋部で、吊り橋部の荷重に対しては吊り橋部でそれぞれ抵抗していることがわかる。すなわち、構造形式の異なる斜張橋と吊り橋とを組み合わせても特に複雑な挙動を示すことなく、それぞれの特性を生かした効果的な力学的特性を示すことがわかった。またこれらの結果から、本橋梁形式の設計においては、斜張橋と吊り橋との接合部を除いては、それぞれを通常の方法で設計すればよいと考えられる。

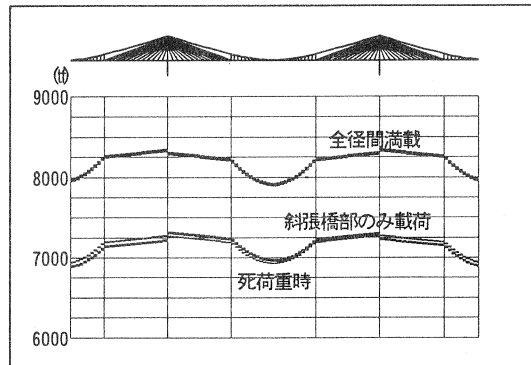


図-6 主ケーブルの張力分布

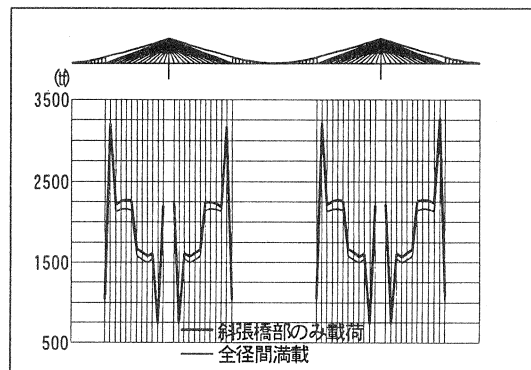


図-7 斜張ケーブルの張力分布

4. 3 試設計結果

上記の検討結果を踏まえて、ハイブリッド斜張橋およびPC斜張橋の概略的な試設計を行った。設計当初、桁高および主塔断面寸法はモデル橋とした鋼吊り橋である白鳥大橋に一致させて、桁高2.5m、主塔断面高3.6mとしたが、試設計を行った結果これらが以下のように変更になった。

【ハイブリッド斜張橋】

- ①斜張ケーブル張力の水平方向分力によってPC桁に大きな軸圧縮力が生じ、主塔部における主桁の曲げ圧縮応力度が許容値を満足しなかったため、桁高を図-8のように最大3.5mにまで高くした。
- ②同様に、斜張ケーブル張力の鉛直方向分力によって主塔に大きな軸圧縮力が生じ、曲げ圧縮応力度が許容値を満足しなかったため、主塔断面高を図-8のように主桁設置位置で5.0mにまで広くした。
- ③鋼桁部は、斜張ケーブルの張力が主塔の左右でバランスされているために大きな軸引張力が生じなく、鋼吊り橋と同断面で許容値を満足した。

【PC斜張橋】

- ①斜張ケーブル張力の水平方向分力によってPC桁に大きな軸圧縮力が生じ、主塔部における主桁の曲げ圧縮応力度が許容値を満足しなかった。しかしその程度は、ハイブリッド斜張橋に比べて斜張ケーブルが多いにもかかわらず、それほど変わらなかった。これは、主塔高が高いために斜張ケーブルの角度が大きく、水平方向への分力がそれほど大きくならないためである。したがって、桁高は図-8のようにハイブリッド斜張橋と同じ最大3.5mで許容値を満足した。
- ②斜張ケーブル張力の鉛直方向分力によって主塔に大きな軸圧縮力が生じ、曲げ圧縮応力度が許容値を満

足しなかった。この時、その程度は上記①の理由とは逆に、斜張ケーブルの角度が大きいために鉛直分力が大きくなり、主塔断面高を図-8の括弧内のように主桁設置位置で6.0mにまで広くする必要があった。

③鋼桁部にも斜張ケーブルの水平方向分力によって軸圧縮力が生じるが、上記①と同じ理由によりその値はそれほど大きくなく、鋼吊り橋と同断面で許容値を満足した。

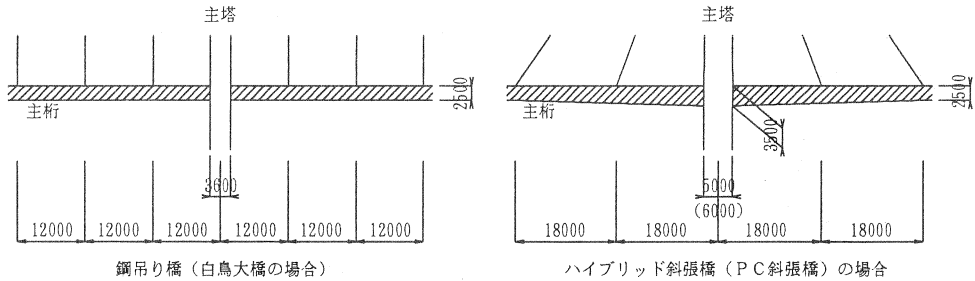


図-8 鋼吊り橋からの変更点

4. 4 概算数量および工費比較

本試設計で決定された各断面諸元から、ハイブリッド斜張橋およびP C斜張橋の概算数量を算出し、鋼吊り橋である白鳥大橋の実績と比較した。その結果を表-2に示す。

鋼吊り橋をハイブリッド斜張橋にすることで、まず主ケーブル重量が45%へと大幅に減少した。これは、主ケーブルに生じる張力が約4割に減少したためである。また、吊り区間が鋼吊り橋の4割であるため、ハンガーケーブル重量も240tから10tへと激減した。

表-2 概算数量および工費の比較

		単位	鋼吊り橋 (白鳥大橋)	P C斜張橋	ハイブリッド 斜張橋
主桁	P C桁	m ³	—	17200	17200
	鋼桁	ton	11130	3740	3740
ケーブル	主ケーブル	ton	3560	—	1610
	ハンガーケーブル	ton	240	—	10
	斜張ケーブル	ton	—	2070	1580
主塔	コンクリート	m ³	—	14360	8860
	鋼	ton	5310	—	—
工費		%	100	92	93

これら両者で、ハイブリッド斜張橋は鋼吊り橋の43%のケーブル重量になっている。ハイブリッド斜張橋では、さらに1580tの斜張ケーブルが必要となるが、これを考慮しても鋼吊り橋の84%のケーブル総重量で済んでいる。

一方、P C斜張橋はケーブル重量が2070tであり、ハイブリッド斜張橋の斜張ケーブル1580tに比べて大きくなっているものの、ケーブル総重量で比較するとハイブリッド斜張橋の65%に減少した。この理由として、主ケーブルの安全率が3.0であるのに対し、斜張ケーブルの安全率は2.5でいいことも一因として挙げられる。ただし、主塔のコンクリート体積は、高さおよび断面が大きくなったことにより約1.6倍に増加した。

これらケーブル重量の比較を図-9に示す。

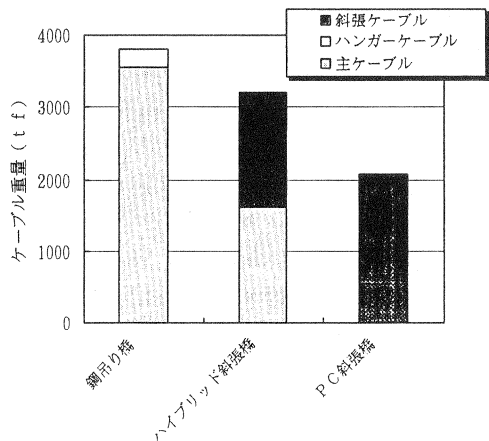


図-9 ケーブル重量の比較

以上の概算数量から概略の工費を比較すると、鋼吊り橋のそれを100%とした場合、ハイブリッド斜張橋は93%、PC斜張橋は92%にそれぞれなった。最大スパン700m程度の橋の場合、鋼吊り橋をハイブリッド斜張橋にすることで7%程度安価になり、PC斜張橋に比べても多少高くはなるものの、その差はわずかであることがわかる。今回の検討対象は最大スパン720mとPC斜張橋でも対応可能な範囲であるが、最大スパンが倍の1500mまたは海峡横断プロジェクトで計画されている2000m以上ともなると、PC斜張橋で計画することは考えにくく、たとえ計画したとしても工費はハイブリッド斜張橋に比べて高くなるであろう。このようなことから、最大スパン2000mクラスの超長大橋に対してはハイブリッド斜張橋は非常に有効な橋梁形式であると思われる。

5. まとめ

PC橋の長スパン化を可能にする新しい橋梁形式として、径間中央を吊り構造とするハイブリッド斜張橋を提案した。本報告をまとめると以下のようである。

- 1) ハイブリッド斜張橋の力学的特性は特に複雑なものではなく、斜張橋部の荷重に対しては斜張橋部で、吊り橋部の荷重に対しては吊り橋部でそれぞれ抵抗する。
- 2) ハイブリッド斜張橋を試設計した結果、主ケーブルおよびハンガーケーブルが鋼吊り橋に比べて大幅に減少した。斜張ケーブルを含めたケーブル総重量も鋼吊り橋の84%となった。
- 3) ハイブリッド斜張橋の概算工費は、鋼吊り橋に比べて7%程度安価になり、PC斜張橋に比べてもほとんど変わらなかった。
- 4) 超長大橋を考えた場合、ハイブリッド斜張橋はPC斜張橋に比べて長スパン化が可能であり、鋼吊り橋に比べて工費が安くなることを考えると、非常に魅力的な橋梁形式であると思われる。

6. 課題

今回の試設計は最大スパンを720mとしたが、2000mクラスの試設計も行って今回と同様に概算数量および工費の比較をすることが望まれる。この際、斜張橋部と吊り橋部の割合によって数量および工費は変わってくるので、この最適な割合を探し出す必要があるだろう。

また、より詳細な力学的特性の把握、耐風性や耐震性などの問題など、実用化を目指して今後さらに検討を進めていくつもりである。

参考文献

- 1) (財) 海洋架橋調査会、海峡横断 Vol.11、1997年
- 2) M.S.Troitsky、CABLE-STAYED BRIDGES second edition
- 3) N.J.Gimsing、吊形式橋梁—計画と設計—、建設図書、1994年
- 4) R.Walther、D.Amsler、Hybrid Suspension Systems for Very Long Span Bridges : Aerodynamic Analysis and Cost Estimates、International Conference A.I.P.C.-F.I.P.、1994年
- 5) 黒沼真一 他、斜張橋と吊り橋の複合による超長大橋の検討、土木学会東北支部技術研究発表会、1998年
- 6) 野村國勝 他、斜張吊橋の構造特性に関する基礎的研究、構造工学論文集 Vol.40A、1994年
- 7) 武村浩志 他、吊り区間を含むPC斜張橋「ハイブリッド斜張橋」の検討、第55回土木学会年次学術講演会、2000年