

(49) 橋軸方向地震のもとでの吊橋の上部構造と下部構造の連成振動に関する一考察

—主塔2次モードとアンカーブロックの連成

埼玉大学工学部

正会員 ○ 東原 紘道

(株)長大橋設計センター

正会員 大月 哲

研究の要旨

吊橋の耐震設計において最も重要な問題の一つであるアンカーブロックと主塔の連成の影響を、特に主塔の2次モードが連成する場合について考察する。この場合には振動数が相当に高いので、変位および部材力の応答の増大は問題にならない。しかし加速度の応答は顕著な増加を示す。

1 はじめに

地震動が作用すると、吊橋は多様な応答を示す。特に上部構造と下部構造の連成振動は、耐震工学に特有の、重要な意義を有する。吊橋は、構造特性が著しく異なる種々の部分構造から成り、自由度の高い構造物であるため、検討すべき連成振動の種類は多い。このうち耐震工学上の意義が高い振動は、橋軸方向の地震動のもとで発生する。なかでもアンカーブロックと主塔の連成は詳細に検討する必要がある。

筆者らは主塔の1次モードがアンカーブロックと連成する場合について検討を行い若干の知見を得た¹⁾。本報告では主塔の2次モードが連成する場合を考察する。海中のアンカーブロックの基底固有振動数は、通常、主塔の1次と2次の固有振動数の中間に位置するので、上記の研究と本研究は共に1つの限界状態を画することになる。

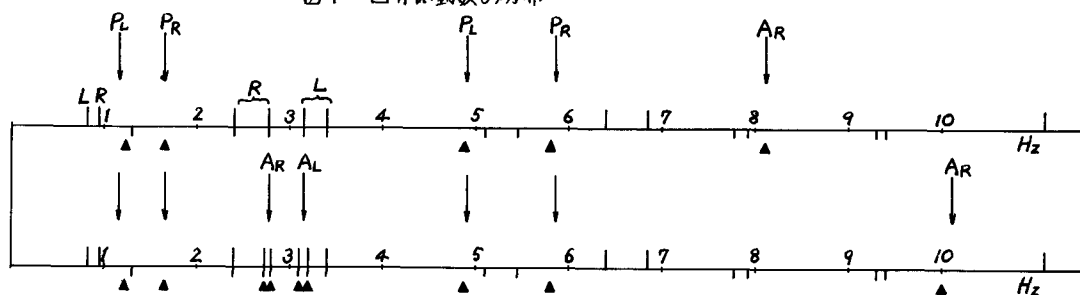
2 解析の方法

小西らによる研究以来、吊橋にモード解析手法を適用した研究が多くなされている。^{2)~4)} 本研究もこれを採用する。離散化には集中質量法を用いる。モード解析手法の前提として通常の線形化がなされる。²⁾ 吊橋構造部の鉛直振動と主塔の面内曲げ振動は最も中核的な要素である。本研究ではケーブルの水平振動を表現する自由度をも与える。この振動モードは一般に高い固有振動数を有しているため無視されることが多い。しかし本研究で注目する主塔の2次モードの近傍ではこの振動モードが出現しうるので考慮する。センターステイを有する通常の中央支間では、この自由度の導入は必然的に補剛トラスの軸方向振動の自由度の賦与が要求される。下部構造は線形ばね上の剛体として扱われる。⁵⁾

以下の計算では 250 + 1,000 + 250 m の3径間単純支持吊橋を例にとりて行う。下部構造をも考慮する場合には吊橋が対称となることはまずありえない。それを無理に対称すると非現実的な連成振動が発生し、妥当な結論が得られない。そこで実際の設計例を参考にして、適当な地形を定めて設計手順をとり踏んで構造諸元を決定した。

モデルの自由度は76である。本研究は比較的高次のモードを対象とする。しかしそれでも問題となるモードはほぼ30次以下に留まるので、これで十分な精度を期待できる。

図1 固有振動数の分布



3 固有振動モードの態様

前述のように吊橋のモード解析の例は少なくない。しかし部分構造相互の關係に留意した考証は限られているようである。ところでモード解析を用いた応答の計算がなされる場合、入力地震動および減衰作用の規定・構造諸元・出力される物理量の種類・着目点とい、たいずれも膨大な個数の組合せもしくは集計がなされるため、担当者は数字の洪水に直面する。その中で現象の本質を見失なわないためには、モードおよび部分構造の相互關係を先い出し、計算条件と結果の因果關係を十分に把握する必要がある。

図1は固有振動数の分布を示す。吊橋構造部の鉛直モードは当面の考察の対象でないので除外してある。横軸の上側の線は主塔の振動が有力なモード、下側の線はケーブルの水平振動が、また三角印は下部構造の振動がそれぞれ有力なモードである。Aはアンカースロック、Pは橋脚である。またR、Lは右、左を示す。矢印は下部構造のみの固有振動数を示す。上側はアンカースロックの基礎の剛性が高いケースである。8 Hz 付近に始めてその最低次のモードが現れている。これを非連成系と呼ぶ。このアンカースロックの諸元を変更して、その1次モードが主塔の2次モードと連成するケースが下側に与えられている。これを連成系と呼ぶ。

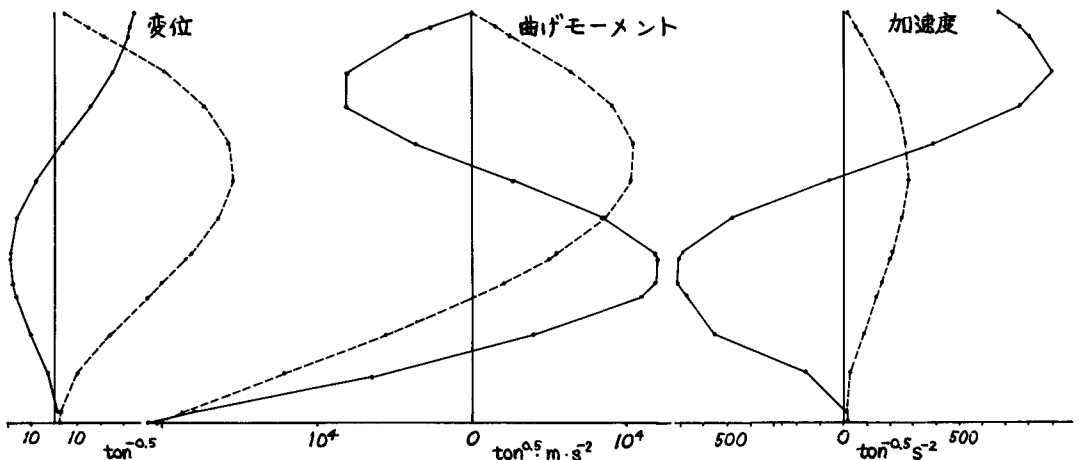
図2は、主塔の1次および2次モードについて、主要な物理量の分布形状を示す。これらは変位量のモードが規格化されるように統一されている。実線で示されるのが2次モードである。これは変位においては1次モード（破線で示される）より遙かに小さい。しかし曲げモーメントではほぼ同程度である。加速度は固有振動数の違いが現れて2次モードの方が著しく大きい。さらに2次モードの加速度のピークが補剛桁取付部に生じることも注目に値する。

4 応答計算の例

応答スペクトルを入力条件として応答を計算するのが通例である。応答スペクトルの本質は、したがって、それぞれのモードを重ね合わせる際の重みづけにあり、ここに設計思想が反映される。ここでは本州四国連絡橋に対するスペクトルを用いて計算する。設計計算では4つの下部構造からの入力地震動の作用が適切に重ね合せられなければならないが、ここでは考察を容易にするために着目する特定の下部構造の寄与のみを示す。

図3は変位応答である。吊橋構造部の実線は鉛直変位であり、破線はケーブルの水平変位である。前者はほとんどがアンカースロックからの入力を略対称形を有するモードにより伝達された結果生じるものである。橋脚からの入力の寄与は図に現れないほどに小さい。水平変位の主な部分もまたアンカースロックからの入力で形成される。これは図1に見られるように振動数が高いため、加速度は大きいことが予想される。

図2 モード形状

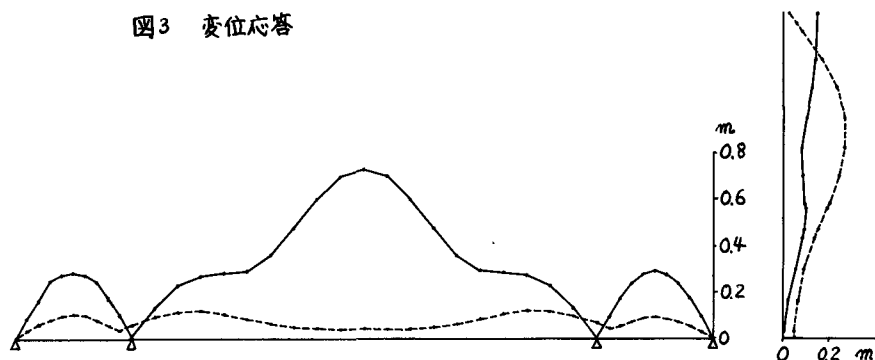


これに対して、主塔の変位はアンカーブロックと橋脚のいずれからも寄与を受ける。構造形式の故に橋脚と主塔は常に若干の連成を成している。また橋脚の固有振動数は相対的に低いので、図のように主塔の1次モードに近い応答を示す。一方アンカーブロックは橋脚より遙かに大きいモード分配率（刺激係数）を有するが、その固有振動数は、立地条件に応じて大きく変化する。着目するケースではアンカーブロックの固有振動数が高いので、変位応答は小さく、また2次モードの寄与が大きい。

図4および図5はそれぞれ吊構造部および主塔の曲げモーメント応答である。スペースの制約で図の寸法を違えているが、もちろん主塔の曲げモーメントの方が1桁大きい。図の実線はアンカーブロックの一つによる応答であり、破線は着

目する主塔に直結する橋脚の寄与である。

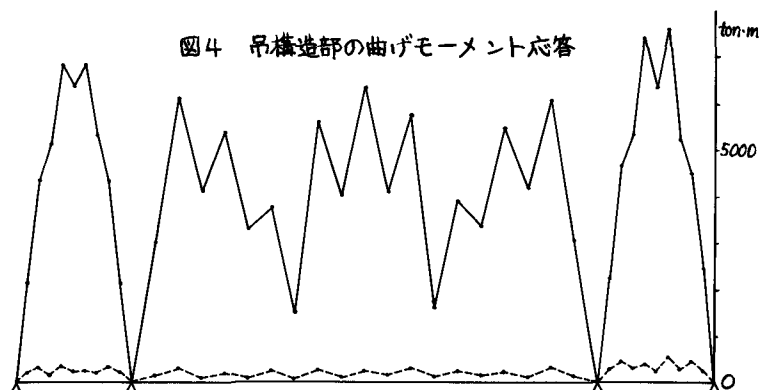
図3 変位応答



吊構造部の曲げモーメントは、低次の略対称形モードを經由して形成される。特に最低次である2, 3次モードによって、

中央径間に特有の3ピーク形と、側径間の高いピークが生じる。より細かな変動もほとんど10次以下のモードで決せられる。主塔および下部構造のモードは常にもっと高次であるので、吊構造部の曲げモーメント応答は、他の部分構造の特性にほとんど影響されない。

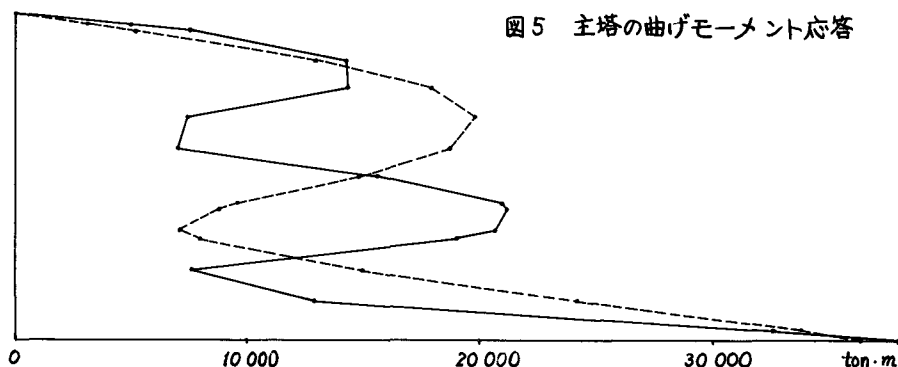
図4 吊構造部の曲げモーメント応答



主塔の曲げモーメント応答

は、アンカーブロック經由の成分が2次モード、橋脚經由の成分が1次モードを主成分として、形成されている。応答スペクトルによる重みは後者が

図5 主塔の曲げモーメント応答



ほぼ2倍の大きさを有するのに対し、アンカブロックのモード分配率が橋脚のほぼ2倍あるので、ちょうど相殺し合っている。なお非連成系ではアンカブロック経由の応答は約 $\frac{1}{4}$ に減衰し、全入力系を集計した結果でも約半分になる。

図6および図7は吊橋構造部および主塔の加速度応答である。実線は連成系を示し破線は非連成系を示す。図6の黒丸はケーブルの水平振動であり+は鉛直振動である。ケーブルの水平振動は固有振動数が高い。このため加速度応答が問題になる場合には必ずこのモードが絡んでいる。

図3が示すようにケーブルの水平振動の変位応答は小さく、換言すれば微小振幅の高周波を意味する。

図7には比較のために橋脚経由の入力に対する応答も表示した。やはりアンカブロックの寄与は2次モードを主体にし、橋脚の寄与は1次モードを主体にしている。ただこの場合にはモード分配率と固有振動数の2乗の効果が、応答スペクトルの重みの差および固有モードの振幅の差を打ち消してなお余りある結果をもたらしているわけである。

加速度応答は卓越周波数が高いため比較的計測しやすい。そこでこれの研究によって吊橋の振動理論の適合性を検証することが期待される。

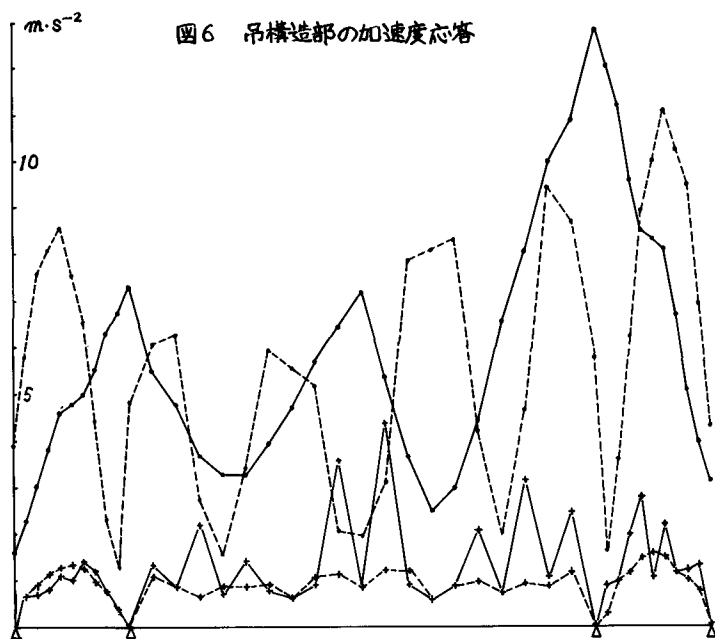


図6 吊橋構造部の加速度応答

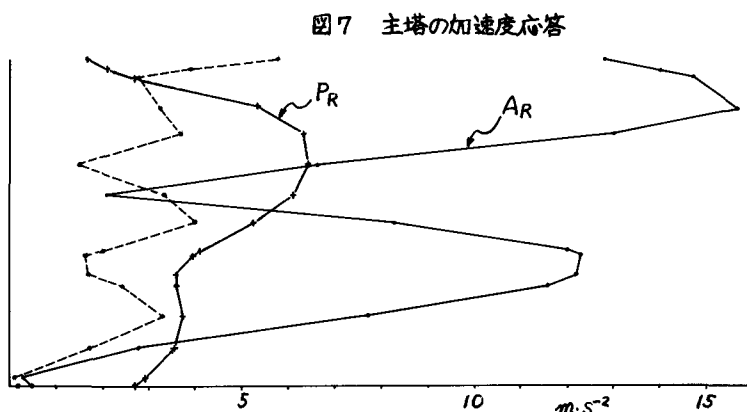


図7 主塔の加速度応答

参考文献

- 1) 東原・大月：橋軸方向地動のもとでの吊橋の主塔とアンカブロックの連成振動，土論327，1982
- 2) 小西一郎他：長大つり橋の地震応答と耐震設計法に関する研究，土論159，1968
- 3) 青柳史郎：地震動の位相差を考慮した長大吊橋の地震応答について，土論190，1971
- 4) Abdel-Ghaffar：Vertical Vibration Analysis of Suspension Bridges, Proc. ASCE, ST10, 1980
- 5) 本州四国連絡橋公団：耐震設計基準・同解説，1977