

論文

[2143] 吊床版橋の静的および動的力学特性

中沢 隆雄*1・今井富士夫*1・前田 文男*2・高橋 司*2

1. はじめに

我国の吊床版橋は1969年に大阪万国博9号橋[1]が竣工して以来、施工実績も増加し[2]、最近では吊支間が100mを超える橋も建設されている[3、4]。この種の構造形式が経済性や施工性に優れており、また優美な景観的特色も有することなどから、歩道橋のみならず道路橋への適用[5]と今後ますます発展・長大化していくものと思われる。

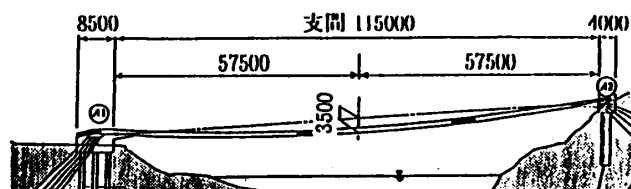
吊床版橋は曲げ剛性の小さな柔構造形式であり、その変形性能が可撓性のケーブルに依存するため、解析はケーブル理論や幾何学的非線形性を考慮した大変形理論による必要がある。また振動の問題も重要となるため、この種の橋梁の動特性の研究も行われてきている[6~12]。

昨年、我国最大の支間長を有する吊床版歩道橋（うさぎ橋、宮崎県北方町）が完成した[13]。本橋の断面力の算出にあたり、橋体自重に関してはケーブル理論、活荷重に関しては大変形理論が適用された。また、従来の吊床版橋においては、橋台と床版の接合部では温度変化や活荷重による回転変形が大きくなるため、曲面支承区間を設け、たわみの変化に追従して支持点が移動できるような形状としているが、本橋では接合部を完全に剛結とし、床版厚を変化させることによって回転変形量を分散させるようになっている。

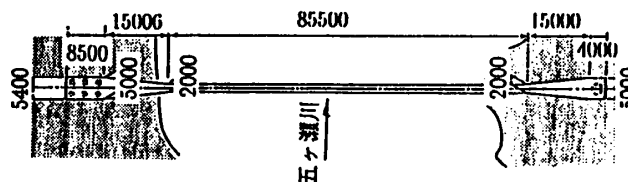
本論文は、本橋の静的・動的試験を行い、設計理論の妥当性ならびにケーブル理論との比較による橋台と床版の接合部を剛結としたことへの影響、さらに振動特性などについて理論的・実験的に検討を行ったものである。

2. 吊床版橋の概要

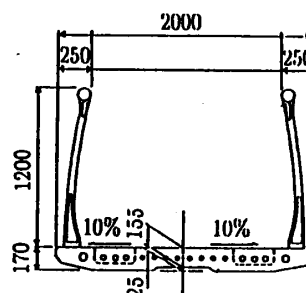
本橋は橋長127.5m、支間115m、全幅2m（有効幅員1.5m）で基本サグ量は3.5m（スパン／サグ比は約33）とやや大きくなっている。橋台A1とA2の高低差は約7mほどあり、A2橋



(a) 側面図



(b) 平面図



(c) 床版断面図

図-1 うさぎ橋の一般図

*1 宮崎大学助教授、工学部土木工学科、工博（正会員）

*2 株式会社ピー・エス 九州支店技術部設計課

台付近では約20%の縦断勾配となるため、橋面上に階段を設け、歩行者の便を計っている。

本橋の一般構造図を図-1に示す。床版断面は風対策として逆翼形断面が採用され、横風時の床版の浮き上がり防止が図られた。さらに耐風安定性を向上させるために、両橋台部付近は標準幅員2mに対して5mに拡幅され、それに伴って床版厚も標準部 18cmから約120cmにまで漸次増厚されている。橋台取付部は剛結構造であることから曲げモーメントが発生するため、この曲げモーメントに抵抗しうるだけの十分な鉄筋が配置されている。

3. 静的挙動

3.1 解析理論の概説

(1) ケーブル理論

吊床版橋にケーブル理論を適用するとき、死荷重に対する解析には床版の曲げ剛性を無視したケーブル理論が、活荷重に対する解析には曲げ剛性を考慮したケーブル理論が採用されるようである。ここでは、これら2つのケーブル理論について概説する。

まず、曲げ剛性を考慮しないケーブル理論を誘導すると、以下のようになる。

支間長 L の吊床版上に等分布荷重 q が作用するとき、支間中央におけるサグ量 f_0 と水平反力 H_0 との関係は、周知のように次式で表される。

$$H_0 = qL^2 / (8f_0) \quad (1)$$

この状態でさらに追加荷重 p が作用するとき、床版の伸び剛性が比較的大きく、荷重載荷による変形量か小さい場合には、追加荷重が作用したときの水平反力 H_1 は式(2)およびサグ f_1 は式(3)で求められる。

$$r^3 - (1 - J \cdot F_0) \cdot r^2 - J \cdot F_1 = 0 \quad (2)$$

$$H_1 = (q + p)L^2 / (8f_1) \quad (3)$$

ここに、 $J = EA / (2LH_0)$ 、 $F_j = \int_0^L (Q_j / H_0)^2 dx$ 、

EA は吊床版の伸び剛性、 H_0 ：追加荷重載荷前の水平反力、 Q_0 と Q_1 はそれぞれ L を支間とした単純梁の追加荷重載荷前後のせん断力、 $r = H_1 / H_0$

床版の曲げ剛性を考慮しなければならない場合の変形方程式は次のように表される。

$$EI (d^4 \eta / dx^4) - H_1 (d^2 \eta / dx^2) = p - q (H_1 - H_0) / H_0 \quad (4)$$

ここに、 η ：追加荷重 p が作用したときの変形量

また、ケーブル方程式は以下のよう表現される。

$$(H_1 - H_0)L / EA \cdot (1 + 8f^2 / L^2) - (8f / L^2) \int_0^L \eta dx = 0 \quad (5)$$

したがって、変形方程式を具体的な荷重状態に対して解き、その結果を上記のケーブル方程式

の第2項に代入することによって解析することができる。

(2) 大変形理論に基づくマトリックス解析法

解析法として前田らが誘導した推定増分法[14]を用いた。本法は、変形後の状態を考えることにより剛性マトリックスを単純化し、さらに荷重増分に対する変位増分を推定することにより、非線形解析での収束回数の低減を図ったものである。ここでの剛性方程式は以下のように与えられ、各々剛性マトリックス $[k]$ は文献[14]に簡便な形で与えられている。

$$\{f\} = [k(\delta)] \{\delta\} = [k_0 + k_1(\delta) + k_2(\delta)] \{\delta\} \quad (6)$$

ここに、 k_0 は微小変形理論における剛性マトリックス、 k_1 と k_2 は非線形項で変位の1次および2次の項を含むものである。

3.2 試験概要

本橋は歩道橋として設計されているため、多大な荷重を重量機械によって負荷することは困難なため、50人の人間を適宜配置することで、様々な荷重形態を創り出した。例えば、荷重増加に対する非線形挙動を確認する場合には、5人を1つの荷重単位として集中的に1箇所に随時増加していった。また分布荷重の場合には、想定する荷重形態となるように適切に分散して配置した。分布荷重は、設計が群集荷重を対象としているので、これに符合させるためのものである。

たわみ測定はレベルにて行われ、その計測点は支間長を20等分した各点である。また、コンクリートのひずみは埋め込みゲージを用いて、ケーブルの張力はアンカー部にてロードセルによって測定された。

3.3 結果および考察

図-2と図-3は、スパン中央に25人(1.73tf)を集中荷重として作用させた場合のたわみ曲線を示したものである。図-2にはケーブル理論による計算値と実験値を、図-3には大変形理論によるものと実験値を示している。なお、大変形理論による解析では、床版が変断面構造となっていることから、支間を48分割し、各分割区間の変断面による曲げ剛性を算定したうえで、端部回転拘束の有無について床版のたわみを求めた。

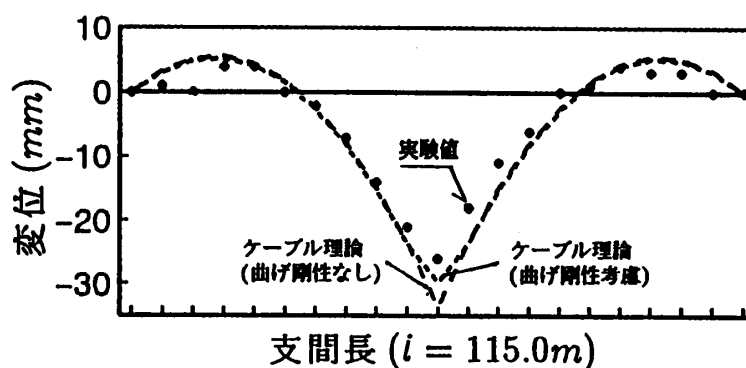


図-2 ケーブル理論によるたわみ曲線

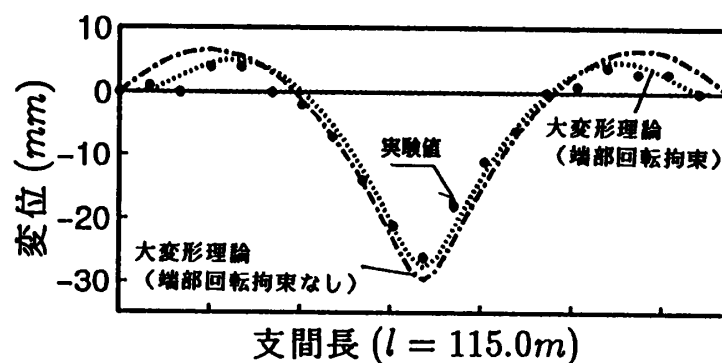


図-3 大変形理論によるたわみ曲線

ケーブル理論における床版の曲げ剛性は、載荷点近傍のたわみにのみ影響を及ぼしており、その他の位置ではほとんど影響していないようである。しかし、ケーブル理論と実験値を比較してみると、実験値には端部の回転拘束の影響が生じており、ケーブル理論は実験値を明確には表現していないことになる。これに対して、大変形理論を用いた場合、端部の回転を拘束して解析すれば、実験値と極めてよく一致する結果が得られた。

また、本橋のような吊構造の場合、荷重増加によってケーブル張力も増すため、床版剛性が上昇し、変形増分は低減していく。このことを確認する目的で、支間中央部に集中荷重を1荷重単位ごと増加していった。そのときの荷重は、5人(0.39tf)、10人(0.73tf)、15人(1.06tf)および20人(1.39tf)とした。

図-4はその荷重とたわみの関係を示したものである。実験値と最もよく合致するのは、端部の回転を拘束した大変形理論による計算値であるが、この荷重区間では非線形性はあまりみられないようである。

次いで、50人を満載等分布荷重(0.03tf/m)として作用させたときのたわみ曲線を図-5に、半載分布荷重(0.06tf/m)

として作用させたときのたわみ曲線を図-6に示す。本橋のように橋台と床版が剛結された場合には、その接合部の回転を拘束した大変形理論による解析結果が、実験値に最もよく合致したものとなっている。また、変形量についてみれば、荷重強度の相違を念頭にいれても半載荷の状態の方がかなり大きくなっており、吊床版橋の変形性状の特徴がよく現れている。なお、50人満載および50人半載分布荷重時において、大変形理論によるケーブル張力の変化は約12tfであり、これによる床版コンクリートの軸ひずみの変化は 12×10^{-6} 程度であったのに対して、支間の中央部に埋め込んだコンクリートひずみゲージによる軸ひずみの変化は約 10×10^{-6} となっており、解析値とほぼ合致した結果がえられた。

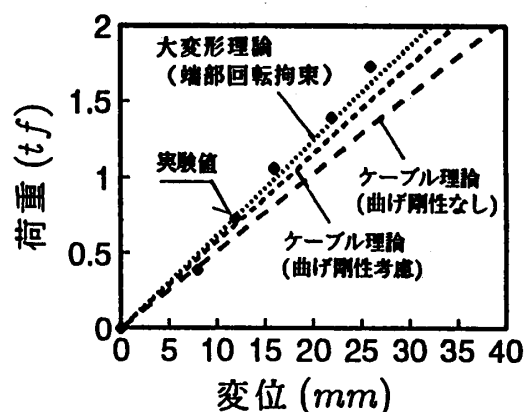


図-4 荷重-たわみ関係

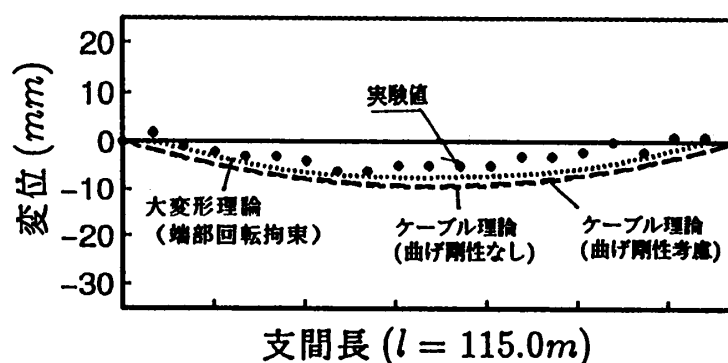


図-5 満載等分布荷重によるたわみ曲線

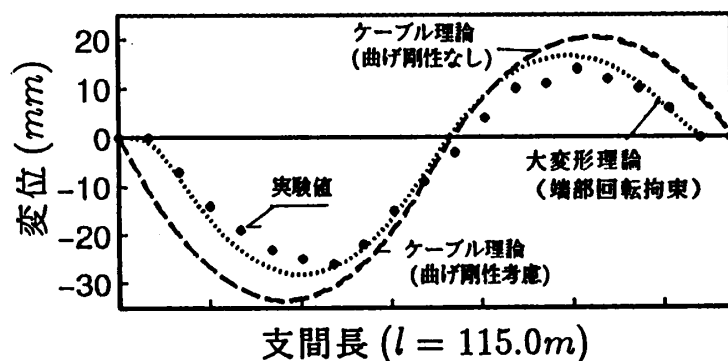


図-6 半載分布荷重によるたわみ曲線

4. 動的挙動

吊床版橋のような柔構造では、歩行者による周期性の外力が作用すると、共振により振動が生じ、歩行者が不快感や不安感を抱くことが懸念される[2]。人は様々な歩調で歩くが、一般に歩調は平均2歩/秒、標準偏差 0.2歩/秒の正規分布であると言われている[11]。そこで本橋の歩行者による振動性状を確認するため、12人が1列あるいは2列になって歩行したり、駆け足で通行する場合などについての振動試験を行った。

図-7は応答加速度を測定するための加速度計の設置位置を示すもので、○は鉛直方向の、●は橋軸直角方向の加速度を測定するためのものである。

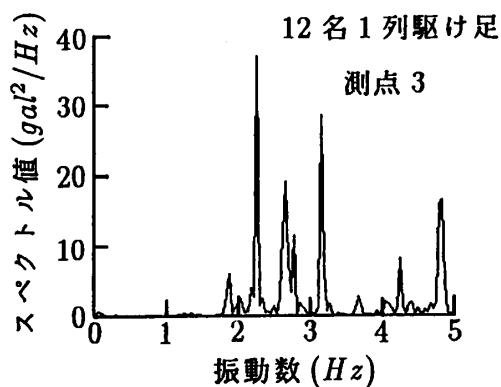
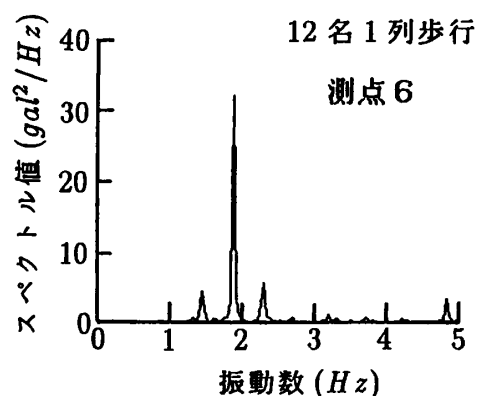
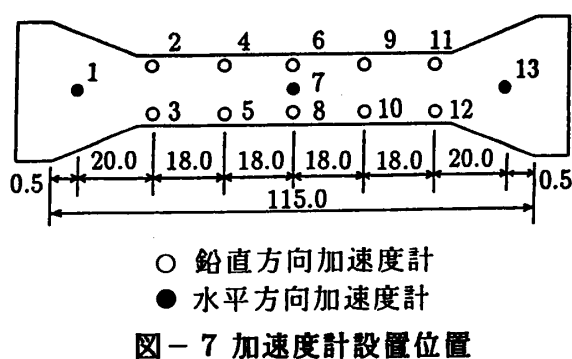
図-8は12人が1列となって歩行したときの測点6の応答加速度スペクトルを、図-9は12人が1列となって駆け足で進行したときの測点3のものを示したものである。図から明らかなように、歩行時には振動数1.88Hzに卓越した応答スペクトル値がみられ、駆け足時には幾つかの立ち上がりが見られるが、特に固有振動数2.27Hzと3.20Hzが大きくなっているようである。

歩行時および駆け足通行時に考えられる歩調の範囲は1.5～3.0歩/秒であるとするならば、この間に3つの固有振動数が存在することになる。このように、歩調に近いところに固有振動数が存在することは共振による振動が発生して、歩行者に不安感を与えかねない。よって、今後はこのような不安感に対する数量的な解析をしていく必要がある。

5. まとめ

本吊床版橋の静的および動的特性に関して得られた成果を要約すると、次のとおりである。

- (1) ケーブル理論において床版の曲げ剛性を考慮しても、その影響は荷重載荷点近傍のみに限定される。
- (2) 本橋のように端部回転拘束の影響が大きい場合、そのような支持条件を考慮した大変形理論を適用すべきである。
- (3) 本実験で載荷した程度の荷重の範囲では、荷重-変形関係に非線形性は認められなかった。



(4) 本橋は歩行者の歩調に近い固有振動数を有している。

参考文献

- 1) 国広哲男、吉田正吾、野尻陽一：吊床版—主として万博会場内第9号歩道橋について—、橋梁と基礎、1969.8
- 2) 新井英雄、錦英樹：吊床版橋、コンクリート工学、Vol.30, No.3, pp.42~52, 1992.3
- 3) 松永純一、岡崎洋、荒巻武文、錦英樹：梅の木轟公園吊橋について、プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、P C技術協会、1990.10
- 4) 則武邦具、細野宏巳、新井英雄、錦英樹、高橋正雄：石鏈橋の設計と施工、プレストレストコンクリート技術協会第3回シンポジウム論文集、pp.217~222, 1992.11
- 5) 上迫田和人、徳山清治、佐野健一、大沼孝司：千振湖橋（吊床版橋）の設計と施工、プレストレストコンクリート、Vol.34, No.4, pp.7~13, 1992.7
- 6) 堤一、中沢隆雄：吊床版橋の振動特性に関する一実験結果、土木構造・材料論文集、第3号、pp.4954, 1988.1
- 7) T.Nakazawa, H.hajime and H.Yokota : Experimental Study on Dynamic Characteristics of Stress-Ribbon Bridge, Proc.of 9th World Conference on Earthquake Engineering, Vol.VI, pp.519~524, 1988.8
- 8) 錦英樹、則武邦具、熊谷紳一郎：P C吊床版橋の振動使用性の照査、土木学会第44回年次学術講演会講演概要集、第5部、pp.466~467, 1989.10
- 9) 水田洋司、平井一男、元田和章：吊床版歩道橋の固有振動数特性について、土木学会第46回年次学術講演会講演概要集、第1部、pp.902~903, 1989.10
- 10) 比江島慎二、原口一哉、藤野陽三：吊床版橋の面内、面外モードの固有振動数の近似解、土木学会第46回年次学術講演会講演概要集、第1部、pp.904~905, 1989.10
- 11) 梶川康男、津村直宜、角本周：P C吊床版歩道橋の振動とその使用性、構造工学論文集、Vol.36A, pp.685~695, 1990.3
- 12) 徳山清治、上迫田和人、石原元、矢野一正：吊床版橋の動的挙動について、一車両走行試験と封道実験—、プレストレストコンクリート技術協会第3回シンポジウム論文集、pp.201~206, 1992.11
- 13) 柴田英雄、山口順一、牧野正明、前田文男：吊床版橋「うさぎ橋」の設計と施工、プレストレストコンクリート技術協会第3回シンポジウム論文集、pp.201~206, 1992.11
- 14) 前田幸雄・林 正・中村守：増分法による平面骨組構造物の大変形解析の加速計算法、土木学会論文報告集、第223号、pp.1-9、1974.3