

吊構造形式コンクリート橋の振動特性と構造改善に関する研究

著者	角本 周
著者別名	Tsunomoto, Meguru
雑誌名	博士学位論文要旨 論文内容の要旨および論文審査結果の要旨 / 金沢大学大学院自然科学研究科
巻	平成19年9月
ページ	598-604
発行年	2007-09-01
URL	http://hdl.handle.net/2297/26780

氏名	角本 周
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博乙第313号
学位授与の日付	平成19年3月22日
学位授与の要件	論文博士(学位規則第4条第2項)
学位授与の題目	吊構造形式コンクリート橋の振動特性と構造改善に関する研究
論文審査委員(主査)	梶川 康男(自然科学研究科・教授)
論文審査委員(副主査)	鳥居 和之(自然科学研究科・教授), 近田 康夫(自然科学研究科・教授), 岡林 隆敏(長崎大学・教授), 前田 研一(首都大学東京・教授)

Abstract

Today, concrete cable supported bridges are increasing in number, due to its dominant esthetics. On the other hand, this type bridges are sensitive to dynamic loads, because of their light self weight and low flexural stiffness. Therefore, in order to develop this type bridges, it is necessary to estimate vibration characteristics of the proposed bridge with sufficient accuracy. So, in this paper, some studies, which concerned with vibration characteristics and structure improvement of concrete cable supported bridges based on the stress-ribbon bridge, were carried out. The studies in this paper are as follows.

- (1) Estimation methods of natural frequency, mode shape, damping ratio and pedestrian-induced vibration of the stress-ribbon bridges were proposed, and the validity of methods were confirmed by vibration test.
- (2) Active vibration control methods for the stress-ribbon bridge using by H^∞ control theory were proposed.
- (3) Vibration characteristics of proposed concrete cable supported bridges, which are improved on stress-ribbon bridges, were confirmed by simulated analysis and vibration test.
- (4) The influence, which the structural parameters give to the serviceability for pedestrian-induced vibration, was examined by simulated analysis.

1. 序論

吊構造形式の橋梁は、ケーブルにより支持される軽量な構造であり、構造を構成するケーブルシステムを施工時の支持部材として使用できることから、広範囲の架設条件で経済的な施工が可能である。さらに、透過性が高くスレンダーな構造になることから、造形美や景観との調和などを求めて、独創的な構造が提案されている。一方、吊構造形式の橋梁は、軽量でスレンダーな構造ゆえに、「振動しやすい」という問題がある。例えば、歩行者の歩行に伴って過大な水平振動が生じたロンドンの Millennium Bridge のように、設計において振動に対する配慮が不足すれば、「人や車両を通過させる」という橋梁本来の目的を果せなくなることもある。したがって、吊構造

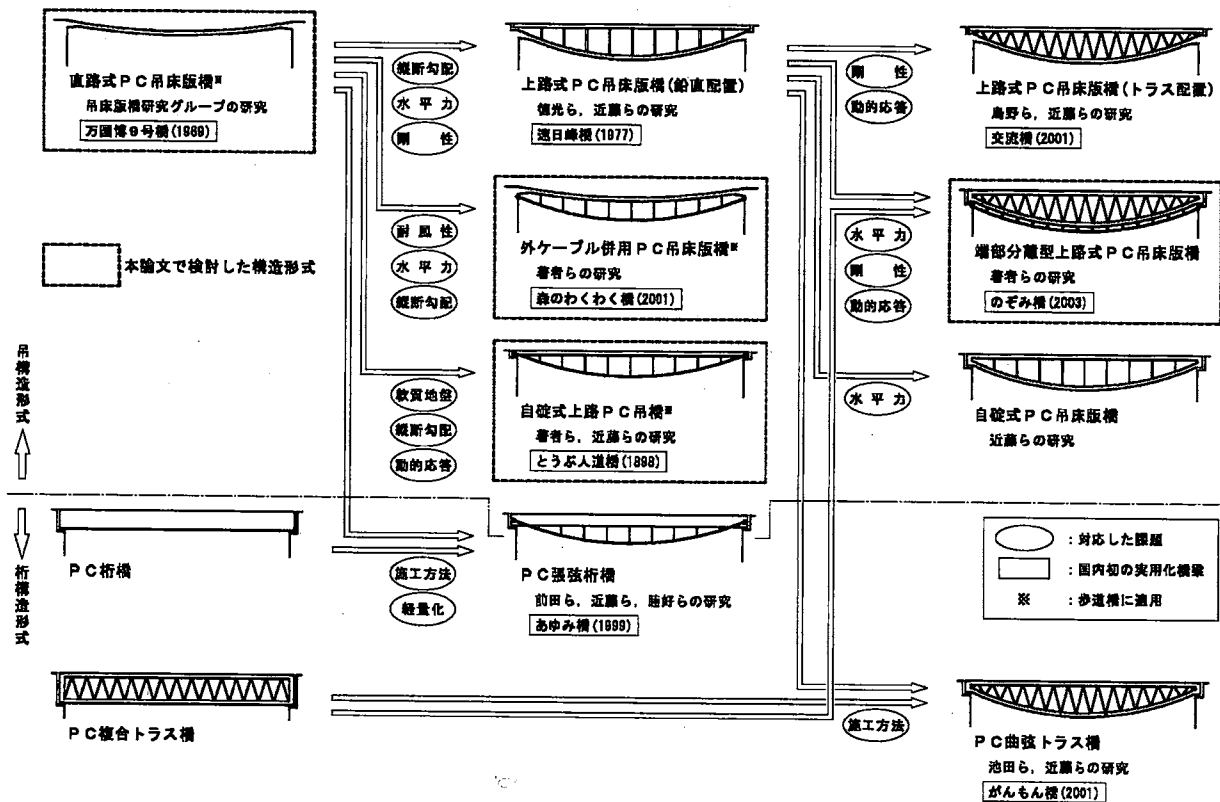


図-1 直路式PC吊床版橋を原点とした吊構造形式コンクリートの系統と本論文で検討した構造形式

形式の橋梁の発展のためには、「人や車両を通過させること」に起因する振動に対して精度良い性能照査方法を確立することが必要となる。特に、自重が重いことから「振動しにくい」とみられ、系統的な研究が十分に行われていないコンクリート橋については、原点となる構造形式から振動特性の予測方法を検討する必要がある。

このような背景から、本論文は、支間 100~150 m 程度までの中小支間の橋梁への適用拡大が期待されている直路式PC吊床版橋を原点とした系統の構造形式を対象とし、振動特性の予測方法を提示するとともに、構造改善を行った形式について振動特性を検討したものである。まず、原点である直路式PC吊床版橋を対象に、振動に対する性能照査方法を確立するために、モード減衰定数を含めた振動特性の予測方法を提案した。また、直路式PC吊床版橋で振動使用性が問題となる場合に対して、アクティブ制御の方法を提示した。次に、直路式PC吊床版橋や上路式PC吊床版橋の構造改善を提案した幾つかの構造形式に対して、振動特性を把握するとともに予測方法の妥当性を検証した。さらに、橋梁の構造パラメータが振動使用性に与える影響を検討し、構造形式を選定する際の指標を提示した。

2. 直路式PC吊床版橋の振動特性とその予測方法

本章では、本論文で対象とした吊構造形式コンクリート橋の原点である直路式PC吊床版橋について、まず、固有振動解析のモデル化方法および離散値で得た固有振動モードから歩行者通行時の動的応答を算出する方法を提案し、実験結果と比較して妥当性を検討した。図-2は、提案した固有振動解析モデルであり、幾何剛性がねじり剛性に与える影響を適切に評価できるモデル化を行っている。このモデル化方法により、ねじれと水平が連成した振動モードを含めて、固有振動数および固有振動モードは精度良く予測することが可能となった。また、歩行者通行時の動的応答を、図-2に示すような離散系解析モデルで求めた固有振動モードを基に算出する汎用的な方法を提案し、実験値と比較して妥当性を検証した(図-3)。

つぎに、実橋で得られたモード減衰定数の実測値を統計分析し、エネルギー的にモード減衰定数を予測する方法を提案した。図-4は、幾つかの実橋実験で得られた減衰定数の実測値とその振動モードにおける振動エネルギー

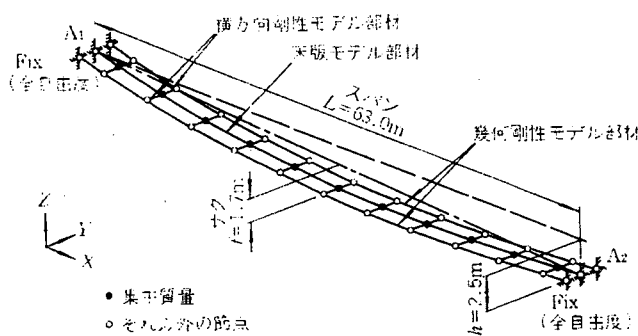


図-2 提案した固有振動解析モデル

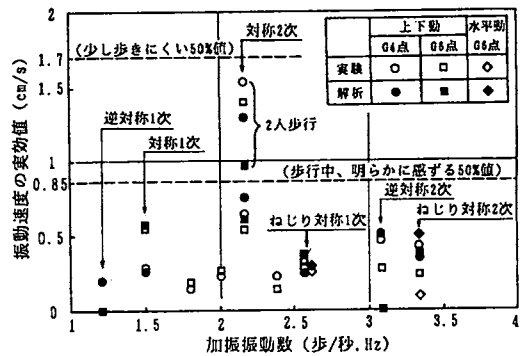


図-3 歩行者通行時の動的応答の実測値と解析値

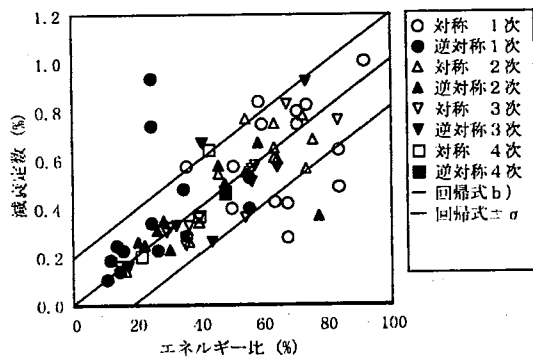


図-4 エネルギー比とモード減衰定数の実測値

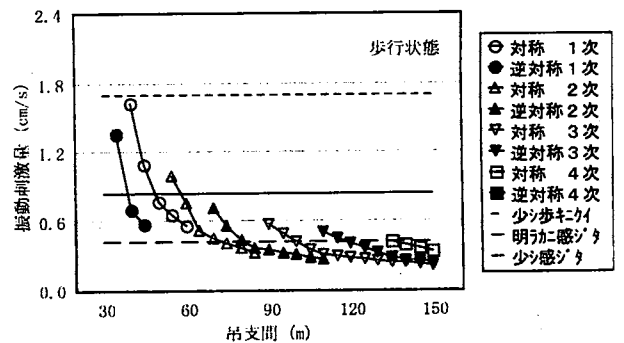


図-5 吊支間と振動刺激量(有効幅員2.0m)

一に対するひずみエネルギーの比を示したものであり、両者の間に強い相関性があることから、固有振動解析からエネルギー比を算出しモード減衰定数を予測する方法を提示した。

以上の検討により、動的応答を定める全ファクターの予測方法が提示されたことから、直路式PC吊床版橋の構造パラメータが歩行者通行時の振動使用性に与える影響について、固有振動数が近接する場合も含めて検討した。図-5は吊支間と振動刺激量との関係を示した一例であり、吊支間30~60mの直路式PC吊床版橋では、振動使用性に問題がある可能性が高いことが示されている。

3. 直路式PC吊床版橋のアクティブ振動制御

本章では、直路式PC吊床版橋を対象に、歩行者通行時の制振対策として、アクティブ・マス・ダンパーによる振動制御を検討した。この構造形式は卓越する振動数が低域から密に分布することから、特定の振動数領域の振動のみを制御する制御手法として、 H^∞ 制御理論の適用について解析により検討した。図-6は、本章で検討し

たフィードバックシステムである。また、図-7には、最適レギュレータによる状態フィードバック制御の場合と H^∞ 制御による出力フィードバック制御の場合の周波数応答関数を示す。直路式PC吊床版橋のような固有振動特性を有する場合は、最適レギュレータによる振動制御では制御の対象としていない2次振動モードのスピルオーバーが生じるが、 H^∞ 制御による振動制御では安定的で効率的な制御が行えることが示されている。

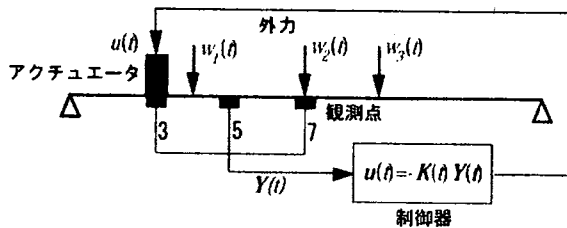


図-6 振動制御システム

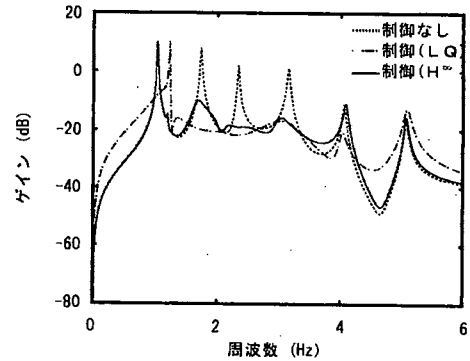


図-7 各制御理論に対する周波数伝達関数

4. 直路式PC吊床版橋の構造改善と振動特性

本章では、直路式PC吊床版橋の構造改善例である外ケーブル併用PC吊床版橋について、まず、従来型の直路式PC吊床版橋と比較して、構造特性および振動特性について検討を行った。つぎに、実橋実験により振動特性を実測し、解析結果と比較することで固有振動特性や歩行者および普通車両通行時の動的応答の予測方法の妥当性を検証した。図-8に、従来型の直路式PC吊床版橋と外ケーブル併用PC吊床版橋の、構造の相違点を示す。外ケーブル併用PC吊床版橋は、外ケーブルのサグを吊床版のサグよりも大きく設定することで、下部構造への作用水平力を従来型の直路式PC吊床版橋の60～90%に低減できる。実橋実験およびシミュレーション解析結果の一例として、総重量46kNの普通車両が走行した際の実効速度応答を表-1に示す。速度応答の実効値は、実験値と解析値とでよく一致しており、構造物のモデル化方法およびシミュレーション解析方法の妥当性が確認された。

5. 上路式PC吊床版橋の構造改善と振動特性

本章では、上路式PC吊床版橋の構造改善例である端部分離型上路式PC吊床版橋について、まず、従来型の上路式PC吊床版橋と比較して、構造特性および振動特性について検討を行った。つぎに、実橋実験により振動特性を実測し、解析結果と比較することで固有振動特性や大型車両通行時の動的応答の予測方法の妥当性を検証した。図-9に、従来型の上路式PC吊床版橋と端部分離型上路式PC吊床版橋の、構造の相違点を示す。端部分離型上路式PC吊床版橋は、躯体自重を吊構造で、橋面荷重や活荷重をトラス桁構造で支持することで、下部構

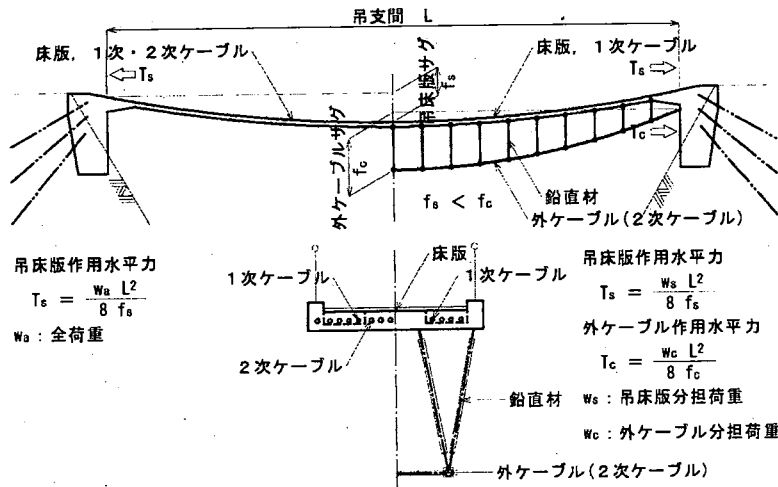


図-8 直路式PC吊床版橋および外ケーブル併用型PC吊床版橋

表-1 46 kN 車走行時の速度応答

実験ケース		速度 20 km/h		速度 30 km/h	
		①	②	①	②
実走行速度 (km/h)		18.0	17.7	26.4	27.2
実測値	最大振幅 (cm/s)	1/4	2.49	2.43	2.58
		3/8	2.45	2.27	2.30
	振幅実効値 (cm/s)	1/4	0.35	0.35	0.29
		3/8	0.31	0.30	0.26
解析値	最大振幅 (cm/s)	1/4	2.32	2.48	
		3/8	2.33	2.98	
	振幅実効値 (cm/s)	1/4	0.42	0.34	
		3/8	0.40	0.39	
アンケート	感じない	0	0		
	少し感じた	0	2		
	明らかに感じた	5	3		
	不快である	0	0		
苦痛である	0	0			

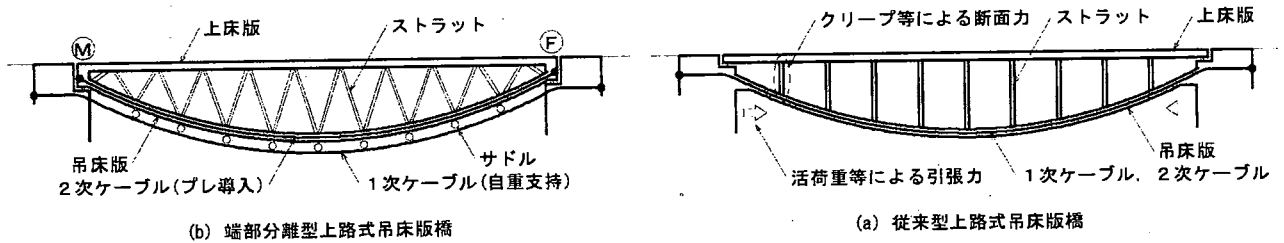


図-9 端部分離型上路式PC吊床版橋および従来型上路式PC吊床版橋

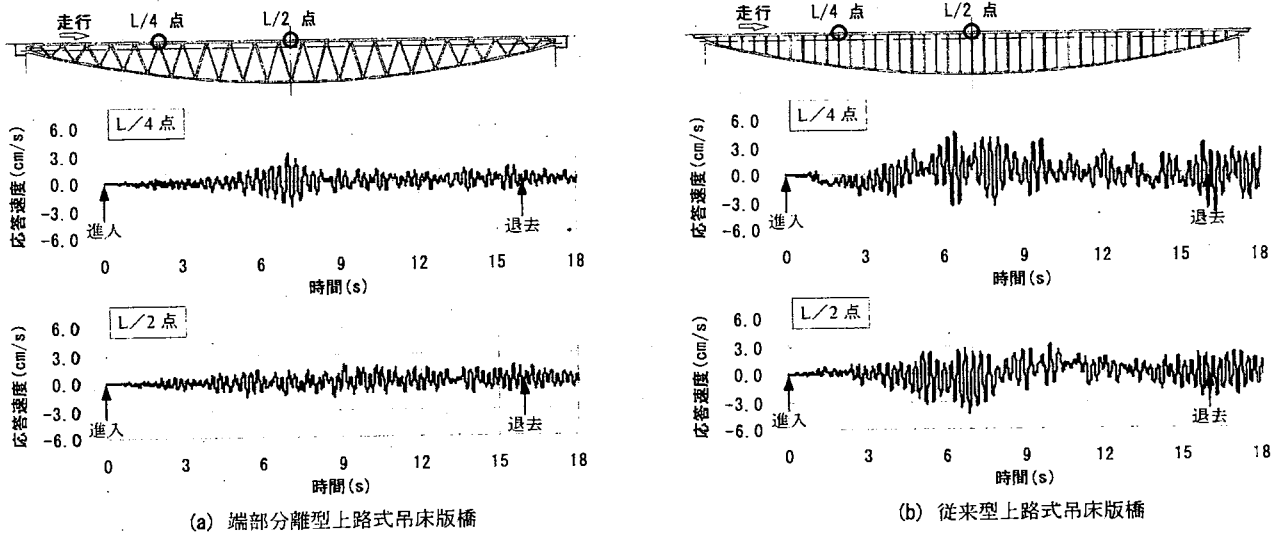


図-10 196 kN 車走行シミュレーションによる速度応答波形

造への作用水平力を従来型の上路式PC吊床版橋の60~70%に低減できる。196 kN 車走行をシミュレーションした解析結果として、速度応答波形を図-10に示す。端部分離型上路式PC吊床版橋の速度応答は従来型上路式PC吊床版橋の1/2程度になっており、大型車両走行時の動的応答も低減されている。なお、実橋実験で得られた196 kN 車走行時の速度応答の実効値は0.2~0.4 cm/sであり、有効幅員4.0 mの橋梁であっても振動使用性の問題は無く、また、路面凹凸の相違を考慮すればシミュレーション解析の結果とほぼ一致した結果が得られた。

6. 自碇式上路PC吊橋の主桁剛性と振動特性

本章では、基礎構造で水平力を負担することが困難な条件に適する自碇式上路PC吊橋を対象とし、実橋実験により振動特性を実測し、解析結果と比較することで固有振動特性や歩行者通行時の動的応答の予測方法の妥当性を検討した。さらに、振動使用性に配慮した合理的な設計を行うために、構造パラメータが歩行者通行時の振動使用性に与える影響について検討するとともに、たわみ制限の有効性について検討した。また、主桁の損傷と振動特性の変化について模型実験により把握し、維持管理における診断指標としての可能性を検討した。図-11は、自碇式上路PC吊橋の実施事例である。自碇式上路PC吊橋は、桁高を支間の1/130程度までにしても、座屈に対する安全性を確保できるが、我が国において振動使用性の照査に仕様規定的に用いられている活荷重たわみの制限値を満足しない場合がある。図-12は、活荷重たわみとシミュレーション解析で得られた歩行者通行時の振動刺激量の関係である。これより、仕様規定で制限されている活荷重たわみ $L/600$ や $L/400$ を満足しなくても、振動使用性に問題ないことが示されている。

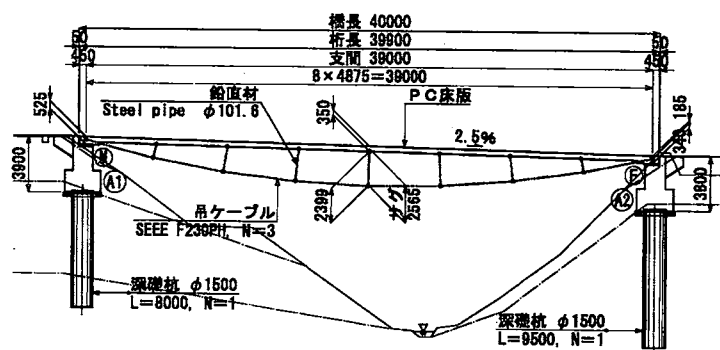


図-11 自碇式上路PC吊橋の実施事例

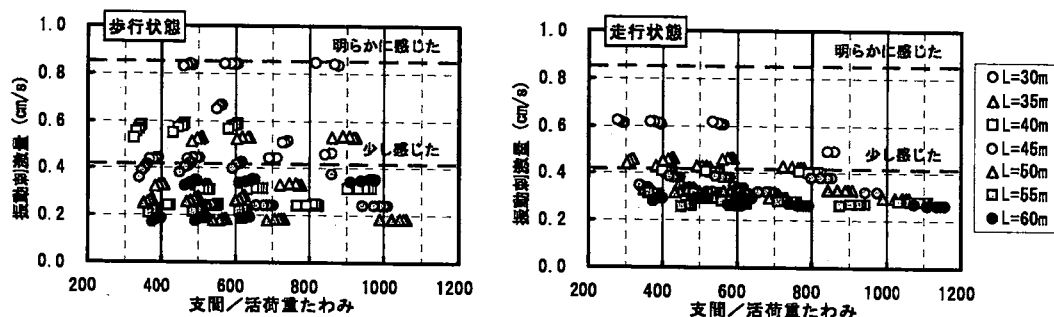


図-12 自碇式上路PC吊橋における活荷重たわみと歩行者単独通行時の振動刺激量

7. 結論

本章では、本論文で得られた知見を取りまとめるとともに、今後の課題を提示した。

学位論文審査結果の要旨

本学位申請論文に対して、審査委員が個別に面接と試問を行うとともに、第1回審査委員会にて論文内容と研究能力・学力等を検討し、審査方針を決定した。12月8日開催の口頭発表及び同日開催の第2回審査委員会にて協議の結果、以下の通り判定した。

本研究は、吊構造形式コンクリート橋を対象にして、原点となる直路式PC吊床版橋について固有振動特性、モード減衰定数、歩行者通過時の動的応答を予測する方法を提案するとともに、直路式吊床版橋から発展させた構造形式に対して、提案した予測方法の適用性を検証したものである。さらに、構造パラメータと振動使用性との関係を示し、振動使用性の問題が生じないパラメータの範囲を示すとともに、一般的に行われている仕様規定的な照査の妥当性を検討した。また、制振対策が必要な場合について、吊構造形式特有の固有振動特性に対しても安定的かつ効率的な制御方法を提示したものである。

本研究で得られた研究成果は、不合理な仕様規定に縛られて実現性や経済性を損なわないよう、振動に対する精度の高い性能照査方法の確立に大いに役立つものである。

本論文は、今後ますます重要となる、吊形式橋梁の振動使用性に対する性能照査方法の確立に貢献するところが大きく、工学上有用な知見を多く得ていることから、本申請者は博士（工学）の学位を受けるに値する、と判定した。

なお、申請者は国際会議での座長経験や発表経験が3回あり、また、参考論文以外でも5編の外国語論文の執筆があることから、外国語の能力も十分に有するものと判定した。