

学位論文題名

# 人間の振動感覚に基づいた歩道橋の振動使用性に関する研究

## 学位論文内容の要旨

従来の構造物の設計法で中心的に取り扱われているものは、主に強度に基づく安全性である。近年、これらの設計法は旧来の許容応力度設計法から限界状態設計法に移行しつつあるが、その定量的解析法の大半は安全性中心であり、設計の対象となる構造物の利便性や、景観等の環境との調和に言及あるいは定量的手法を導入した例は、極めて少ないと思われる。

特に歩道橋の設計を考えた場合、直接人間が歩行するその利用形態上、使用に際しての快適性、すなわち振動使用性の検討は非常に重要な設計項目の一つである。歩道橋の振動使用性は、およそ20年前に問題提起され、我が国のみならず各国で多くの研究がなされており、各種の照査法または基準等が提案されている。我が国においては、昭和54年に立体横断施設技術基準・同解説が制定され、今日においてもその効力を発揮している。

近年の我が国においては、社会資本の充実に伴い、横断歩道橋に代わって側道橋、人道橋、あるいは遊歩道橋等と称される、様々な目的に対応した歩道橋が数多く建設される傾向にある。これらの歩道橋の大部分は従来の横断歩道橋に比して長支間で幅員も広いため、現行の基準を満足することが困難な場合も生じつつあり、本来横断歩道橋のために制定された現行の基準による照査では、十分でない場合も生じてきている。一方、海外における照査手法は、照査の対象となる構造物の動的応答量を求め、振動許容量と比較する、いわば限界状態設計法的な手法が主に採用されている。

このような使用限界状態を考慮した照査法を用いる場合、問題となるのはその振動許容量、いわゆる振動限度と、動的応答量の求め方である。しかしながら、これらの検討は現状では十分ではなく、振動使用限界状態を考慮した歩道橋の合理的な使用性検討を可能にするためには、人間の振動感覚に基づいた振動許容量と、比較的簡便に動的応答量を求めることが可能な解析手法を、明確かつ理解しやすい形で示す必要があるであろう。

以上の観点より、本研究では、人間の振動感覚実験に基づき、振動感覚を数量化することによって歩道橋の設計時に用いる振動許容量、すなわち振動限度を明らかにし、また、歩道橋の振動測定ならびに固有振動解析、時刻歴応答解析を通じて動的応答量の求め方に関する検討を実施した。さらに、これらの結果から、歩道橋の使用限界状態を考慮した合理的な振動使用性照査法を提案するものである。

本研究は、主に人間の振動感覚に関して実験と解析を実施した第2章から第4章までと、歩道橋の動的応答特性について述べた第5章から第7章に大別される。以下に各章の概要を紹介する。

まず、第1章では序論として過去の研究および現行の照査基準を紹介し、その問題点、適用範囲等に関して検討することにより、本研究の目的を述べるとともに研究の内容と構成についてまとめた。

第2章では、人体に対する強制加振実験について解説する。振動感覚実験は、振動台を用いた実験と実橋における合計3回行われ、歩道橋における振動使用限界状態の検討を試みた。得られた実験結果は、過去の代表的な研究との比較検討より、歩道橋の使用性検討のための基礎的データとして十分妥当であることが判明した。

第3章では、第2章で得られた実験結果を解析するためにファジィ推論を導入し、従来行われていなかった閾値以外の、反応が生起する確率が25%、75%といった感覚量に対する解析を実施した。解析結果から、各カテゴリにおける感覚量が25%から75%に至る分布域等に関し、人間の刺激に対する反応について考察を行った。その結果、感覚量の分布域は意外と狭いこと、人間に振動感覚を生じさせる刺激のパラメータとして振動速度が妥当であること、また、ある振動刺激に対して歩道橋の振動として不適当であるとする人の確率は、 $0.7\text{cm/sec}$  ( $V_{\text{MAX}}=1.0\text{cm/sec}$ ) 程度までは比較的緩やかな増加にとどまっているが、 $0.85\text{cm/sec}$  ( $V_{\text{MAX}}=1.2\text{cm/sec}$ ) 程度から急激に増大する傾向が認められること等が明らかとなった。

第4章は、第2、3章の結果を踏まえて、振動感覚の数量化を試みたものである。数量化のパラメータとして、“振動の大きさのレベル”VGL(Vibration Greatness Level)および“振動の心理的な大きさ”VG(Vibration Greatness)を導入し、第3章で得られた振動感覚と感覚量および振動速度との明確な関連づけを実施した。この数量化に基づき、人間の振動感覚を電卓程度で簡単に計算できる代数式の提案を行なった。これらの結果を用いることにより、従来よりも非常に明確かつ柔軟な歩道橋の使用性判定が行えるものと考えられる。また、同時に新たな振動許容量、すなわち振動限度の提案を行った。

次に第5章においては、札幌市内の歩道橋11橋に対して減衰自由振動ならびに強制加振実験を実施し、歩道橋の動的応答特性に関して考察を加えたものである。振動実験から、まず固有振動数については床版形式、高欄等の付属物の影響が非常に大きく、設計に際しては十分な配慮が必要であること、1次固有振動数の半分の振動数で加振した場合にも比較的大きい応答値が得られること、非共振歩行時においては、2次固有振動が卓越するケースが比較的多いこと等が確認された。また実験結果から、照査を必要とすべき振動数の範囲として、 $1.5\text{Hz}\sim 2.2\text{Hz}$  および $4\text{Hz}$ 、ジョギングコース等に設けられる歩道橋の場合には上記に加えて $3\text{Hz}$ が適当であること、また使用性照査の際の荷重状態に関しては、共振歩行1名での照査を行えば十分であることが判明した。

第6章は、実験対象の歩道橋に関して固有振動解析を行い、設計時に固有振動数を求める際の曲げ剛性の評価法に検討を加えたものである。前述のとおり、歩道橋は主桁の剛性が比較的小さく、高欄、舗装等の影響が無視できない。そこで、設計時の固有振動数を求める際に用いる曲げ剛性を算定するために、桁剛性、主桁の応力余裕等に関するいくつかの新たなパラメータを導入し、従来よりも正確に固有振動数が得られる曲げ剛性の推定法を示した。

第7章においては、ニューマーク $\beta$ 法による時刻歴応答解析を実施し、解析結果の精度、動的応答性状等について実験結果との比較検討を行った。また、遺伝的アルゴリズムを用いることにより、実験結果に基づいた歩行外力の逆解析を実施して、歩道橋の設計時における動的応答解析に用いるための歩行外力について提案を行なった。また、本研究の各章で得られた知見を総合的に検討し、使用限界状態を考慮した歩道橋の合理的な振動使用性照査手順に関して、照査を必要とすべき振動数の範囲、振動限度と動的応答量の求め方等の具体的な手法に関する新たな提案を行った。

最後に、第8章において、本研究によって得られた新たな知見について要約し、また今後の課題についても考察を加えるものである。

以上のように本研究では、従来明確でなかった歩道橋の振動使用限界状態に関して検討を行

い、また、歩道橋の動的応答特性との比較により歩道橋の設計時における合理的な振動使用性判定法について考察を加えたものである。これらの結果より、従来の照査方法のように振動許容値や避けるべき振動数の範囲をいかなる場合も遵守するのではなく、歩道橋の立地条件、あるいは通行量等を十分に考慮した非常に柔軟かつ有効な、設計時における振動使用性照査が可能になるものと考えられる。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 佐 藤 浩 一  
副 査 教 授 角 田 興 史 雄  
副 査 教 授 三 上 隆  
副 査 教 授 石 山 祐 二  
副 査 助 教 授 林 川 俊 郎

## 学 位 論 文 題 名

### 人間の振動感覚に基づいた歩道橋の振動使用性に関する研究

歩道橋の振動使用性は、およそ 20 年前に問題提起され、各国において設計基準に取り入れられている。我が国では昭和 54 年に制定された立体横断施設技術基準・同解説（以下基準と称す）が、今日においてもその効力を発揮しているが、近年の社会資本の充実に伴って、従来の横断歩道橋に代わり、人道橋、遊歩道橋等と称される大規模な歩道橋が盛んに建設されつつある。このような大規模な歩道橋においては、現行の基準による使用性照査では十分でない場合も多く、合理的な照査方法の新たな提案が望まれているものと考えられる。

本論文では、上記を踏まえて、人間の振動感覚に基づいた歩道橋の振動使用限界状態を検討し、また歩道橋の動的応答特性から、設計時における固有振動解析あるいは動的応答量の算定法について考察を加えた。さらにこれらの結果から、限界状態設計法による振動使用性照査法の提案を試みたものである。

具体的には、まず人体に対する振動感覚実験を実施し、使用限界状態を検討するための基礎的データを得た。その結果から、人間に振動感覚を生じさせる刺激のパラメータとして振動速度が適していること、振動速度の実効値で  $V_{RMS}=0.85\text{cm/s}$  付近を境界として、歩道橋の振動として不相当と答える人の割合が急激に増大する傾向を有すること等が判明した。また、実験結果をファジィ推論または計量心理学で用いられる評価尺度を導入することにより、振動感覚の数量化を行った。その結果、振動速度で表現された振動量と人間の振動感覚の関係を電卓程度で簡単に計算が可能となる代数式を誘導した。この代数式による計算結果から、人間の刺激と反応の関係について検討を行い、歩道橋の振動使用限界状態を考慮した許容最大動的応答量、すなわち振動怒限度を明らかにした。

次に、歩道橋の実態調査を実施してその動的応答特性を把握し、まず照査を必要とすべき固有振動数の範囲を明らかにした。また固有振動解析及び時刻歴応答解析を通じて、設計時において正確に固有振動数あるいは動的応答量の計算が可能となる、曲げ剛性の推定法や歩行外力等を示した。さらに上記の振動怒限度ならびに動的応答特性の解析手法を総合的に検討することにより、従来よりも柔軟かつ簡便に使用性の評価が可能となる、限界状態設計法に基づいた実用的な歩道橋の振動使用性照査手法の新たな提案を行ったものである。

これを要するに、著者は、設計時における合理的な歩道橋の振動使用性照査手法の新たな提案を目的に、人間の振動感覚ならびに歩道橋の動的応答特性に関して実験及び解析を行い、多くの新見を得ており、橋梁工学の進歩に寄与するところ大である。

よって、著者は北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。