

北海道大学工学部 小橋 卓司

北海道大学工学部 林川 俊郎

北海道大学工学部 渡辺 昇

1. まえがき

橋梁の振動による人間感覚は昭和40年代から注目され、現在までに優れた多くの研究が発表されている。これらの研究は、そのデータ解析手法に主として確率統計手法が用いられている。しかしながら振動に対する人間感覚は、感覚そのものにあいまいさが含まれており、事象の生起による不確かさ（確率またはランダム性）の問題ではないため、確率統計手法のみでこれらの解析を行うことは困難である。

近年、このようなランダム性以外の不確かさを取り扱う手法としてファジ理論が注目されている。ファジ理論では前述のようなあいまいさをグレード、帰属度または適合度と呼ばれる数値を与えることによって、定量的に解析することが可能である。

本論文では、平成元年5月に行われた上白石橋側道橋の実験データをファジ理論を用いて解析し、このような振動問題におけるファジ理論の応用の可能性を検討するものである。

2. ファジ理論の適用方法

ファジ理論の適用に際しては、その対象が事象の生起による不確かさ以外のあいまいさを含んでいるかどうかの判断がまず重要であり、さらにファジ理論をどのように適用するかが問題となる。

ファジ理論を適用する場合、対象となる事象の持つあいまいさをメンバーシップ関数で表す、つまりファジ集合を定義することが最も重要である。しかしながら、現在では一般にメンバーシップ関数は状況に応じて経験的に決められることが多く、汎用的な決定方法は確立されていない。したがってメンバーシップ関数を定義することはなかなか困難であるが、いったんメンバーシップ関数が定められれば、ファジ集合は正確に定義されたものとなる¹⁾²⁾。

本研究では以上の点をふまえて、2回の実験において計16名に対してアンケート調査を行った。これらの結果に基づき、それぞれの振動感覚に応じたグレードを決定し、メンバーシップ関数を作成してこのような体感振動問題についてのファジ化を行う。

3. 実験および解析

3-1. 上白石側道橋

実験は、5月30日と12月8日の2回、上白石側道橋で行われた。この上白石側道橋は、昭和63年12月に竣工した支間長43.40m+56.048mの2径間連続鋼床版箱桁の歩行者専用橋で、従来からあった上白石橋に平行して新設されたものである。図-1に上白石側道橋の一般図を示す。

一般に、支間長が40mを越える横断歩道橋または歩行者専用橋で、振動に対する適切な配慮を欠くと歩行者に不安感、不快感を与える恐れがあると言われてお

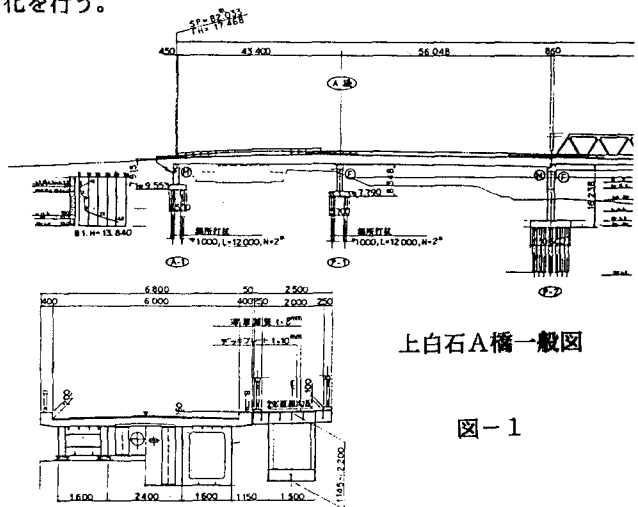


図-1

り、立体横断施設技術基準・同解説（昭和54年1月 日本道路協会）では、その固有振動数が1.5～2.3Hzにならないようにすることが規定されている³⁾。本橋梁の設計時の固有振動数は 約2.1Hzであり、当初からその振動性状が懸念されていた。

3-2. 実験方法及び実験結果

第1回目の実験では、まず実際の固有振動数を得るために高感度地震計を用いた人力加振による自由振動波形の測定を行い、固有振動数 約2.5Hzの結果を得た。図-2にその波形を示す。

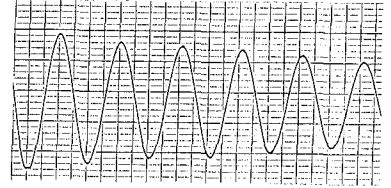


図-2

つぎに、使用性の照査の基礎資料を得るために、以下に示す実験方法によって計7名に対しアンケート調査を実施した。

実験方法は、まず表-1に示す各ケースについて所定の人数、ピッチで歩行または走行して橋梁に強制振動を加えた。ピッチについてはあらかじめカセットテープに各ケースの発振音を記録し、実験時にはその再生音に合わせて加振者全員が歩調を取って歩行または走行して所定の振動数を得た。

また被験者は、支間中央付近に立位で静止し、表-2に示す振動感覚の最も近いと思われるものを記入用紙に記入した。その結果を表-3に示す。

第2回目の実験では、第1回目のアンケート調査の解析結果から、データの不足分の収集とその解析結果の検証を主な目的として、計9名に対しアンケート調査を実施した。

実験方法は、第1回目と全く同様であるが、振動感覚については各項目に表-4のような細目を加えてより細かい解析が可能になるよう配慮した。表-5にその実験ケースと実験結果を示す。

表-1

ケース	載荷形態	ｂ'ｂ'(Hz)	人数
①	歩行	2.0	1
②	歩行	2.0	5
③	歩行	2.0	10
④	歩行	2.5	1
⑤	歩行	2.5	5
⑥	歩行	ランダム	13
⑦	走行	3.0	1
⑧	走行	3.0	5
⑨	走行	3.0	10
⑩	走行	ランダム	10

表-2

振動 強弱 感覚 判定
① 振動を感じない。
② 振動をようやく感じる。
③ 振動をはっきり感じる。
④ 振動を強く感じる。
⑤ 少し不快感を覚える。
⑥ 大いに不快感を覚える。

表-3

ケース	載荷形態	ｂ'ｂ'(Hz)	参加人数	実験結果（振動感覚、数字は人数）					
				①	②	③	④	⑤	⑥
①	歩行	2.0	1	0	1				
②	歩行	2.0	5	5	1	1			
③	歩行	2.0	10		2	4	1		
④	歩行	2.5	1		1	3	1	2	
⑤	歩行	2.5	5			2	2	3	
⑥	歩行	ランダム	13	2	2	1		2	
⑦	走行	3.0	1		1	6			
⑧	走行	3.0	5				5		2
⑨	走行	3.0	10					4	3
⑩	走行	ランダム	10				2	2	3

表-5

ケース	載荷形態	ｂ'ｂ'(Hz)	参加人数	実験結果（振動感覚）									
				①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
①	走行	1.5	1	9									
②	走行	1.5	5	2	5	2							
③	走行	1.5	10			1	1	1					
④	歩行	2.0	1	2	6	1							
⑤	歩行	2.0	5	2	3	1	1	1	1				
⑥	歩行	2.0	10					2				1	
⑦	歩行	2.5	1				1	7	1				
⑧	歩行	2.5	5						3	1	3	2	
⑨	歩行	2.5	10						1				2
⑩	走行	3.0	1		1	2	1	2	2	1			
⑪	走行	3.0	5					2	2	3		2	
⑫	走行	3.0	10						1			1	1
⑬	歩行	3.5	1	1	4	1	2	1					
⑭	歩行	3.5	5			1		3	4	1			
⑮	歩行	3.5	10						2	1			
⑯	歩行	4.0	1		4	2	3						
⑰	歩行	4.0	5			1	1	2	4	1			
⑱	歩行	4.0	10				1	2					
I	歩行	ランダム	1	9									
II	歩行	ランダム	5	3	6								
III	歩行	ランダム	10		1	2							
IV	走行	ランダム	1		1	1	1	3	3				
V	走行	ランダム	5						2	2	3	2	
VI	走行	ランダム	10						1			1	1

表-4

振動 強弱 感覚 判定	細目	No
① 振動を感じない。	全く感じない。	①-1
	何か少し感じる。	①-2
② 振動をようやく感じる。	①-2より少し強い。	②-1
	揺れを認識できる。	②-2
③ 振動をはっきり感じる。	②-2より少し強い。	③-1
	上下動をかすかに認識できる。	③-2
④ 振動を強く感じる。	上下動をはっきり認識できる。	④-1
	上下動がかなり大きい。	④-2
⑤ 振動がかなり強く 少し不快感を覚える。	強烈とした不快感を覚える。	⑤-1
	不快感をはっきり認識できる。	⑤-2
⑥ 振動が非常に強く 大いに不快感を覚える。	かなり不快である。	⑥-1
	非常に不快である。	⑥-2

3-3. データ解析及び解析結果

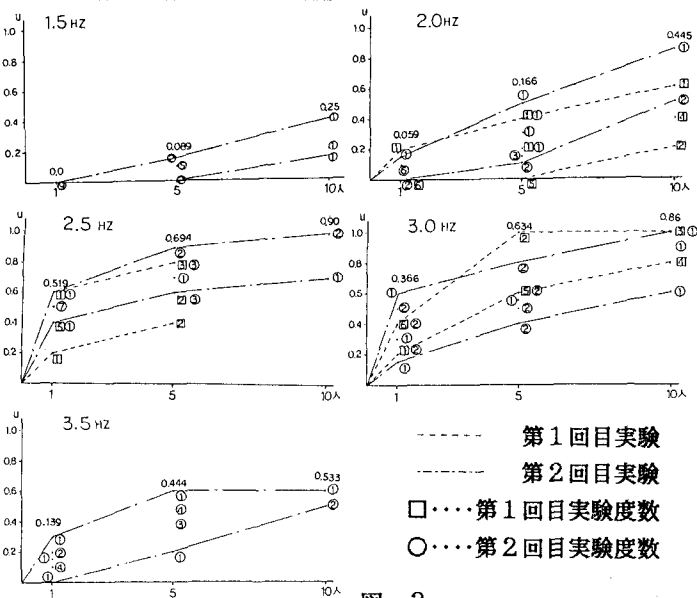
以上のようにして得られたデータをファジィ化するために、それぞれの振動感覚に表-6のようなグレードを与え、個々のアンケート調査結果を数値化した。これを縦軸にグレード、横軸に加振人数をとり、各振動数別に表すと、図-3のようになる。ここで点線は第1回実験における最大値-最小値ライン、1点鎖線は第2回実験における最大値-最小値ラインであり、各点の横にその度数を記入してある。また、最大値ラインの上部に記入された数値はそれぞれの加振人数におけるグレードの算術平均である。これらのグラフに着目すると、どの振動数においてもかなりのばらつきが認められるが、その度数の最大値は、ほぼ、ばらつきの中央付近に集中している。したがって、これらのばらつきを含めたメンバーシップ関数を作成するために、各ケースにおける算術平均をファジィグレードとしたタイプ2ファジィ集合を用いて表現した。表-7に振動感覚とタイプ2ファジィ集合の換算表を示す。

以上のようにして得られたタイプ2ファジィ集合をグラフ化すると、図-4のようになり振動感覚のファジィ化が可能であることがわかる。

表-6

振動 感覚 状態	グレード
① 振動を感じない。	0.0
② 振動をようやく感じる。	0.2
③ 振動をはっきり感じる。	0.4
④ 振動を強く感じる。	0.6
⑤ 少し不快感を覚える。	0.8
⑥ 大いに不快感を覚える。	1.0

説明	目	No	グレード
全く感じない。	①-1	0.0	
何か少し感じる。	①-2	0.1	
①-2より少し強い。	②-1	0.15	
揺れを認識できる。	②-2	0.2	
②-2より少し強い。	③-1	0.3	
上下動をかすかに認識できる。	③-2	0.4	
上下動をはっきり認識できる。	④-1	0.5	
上下動がかなり大きい。	④-2	0.6	
漠然とした不快感を覚える。	⑤-1	0.7	
不快感をはっきり認識できる。	⑤-2	0.8	
かなり不快である。	⑥-1	0.9	
非常に不快である。	⑥-2	1.0	



----- 第1回目実験
 - · - 第2回目実験
 □····第1回目実験度数
 ○····第2回目実験度数

図-3

表-7

振動 感覚 状態	説明	目	No	1.5 Hz			2.0 Hz			2.5 Hz			3.0 Hz			3.5 Hz		
				1人	5人	10人	1人	5人	10人	1人	5人	10人	1人	5人	10人	1人	5人	10人
				0.0	0.1	0.25	0.05	0.15	0.4	0.5	0.7	0.9	0.4	0.65	0.85	0.15	0.4	0.5
振動を感じない。	全く感じない。	①-1		1./0.0	.8/0.0		.9/0.0	.8/0.0								.8/0.0		
	何か少し感じる。	①-2		.5/0.1	1./0.1	.7/0.1	.9/0.1	.9/0.1								.9/0.1		
振動をようやく感じる。	①-2より少し強い。	②-1			.8/.15	.8/.15	.8/.15	1./1.15								1./1.15		
	揺れを認識できる。	②-2				.9/0.2	.7/0.2	.9/0.2	.8/0.2	.7/0.2			.7/0.2			.8/0.2	.7/0.2	
振動をはっきり感じる。	②-2より少し強い。	③-1				.9/0.3		.7/0.3	.9/0.3	.8/0.3			.9/0.3			.7/0.3	.8/0.3	
	上下動をかすかに認識できる。	③-2				.7/0.4		.6/0.4	1./0.4	.9/0.4	.8/0.4		1./0.4	.7/0.4		1./0.4	.8/0.4	
振動を強く感じる。	上下動をはっきり認識できる。	④-1						.9/0.5	1./0.5	.7/0.5			.8/0.5	.8/0.5		.9/0.5	1./0.5	
	上下動がかなり大きい。	④-2						.8/0.6	.8/0.6	.9/0.6			.9/0.6	.7/0.6		.7/0.6	.9/0.6	
振動がかなり強く	漠然とした不快感を覚える。	⑤-1						.7/0.7	1./0.7	.8/0.7			.9/0.7	.8/0.7			.8/0.7	
少し不快感を覚える。	不快感をはっきり認識できる。	⑤-2						.9/0.8	.9/0.8				.8/0.8	.9/0.8				
振動が非常に強く	かなり不快である。	⑥-1						.8/0.9	1./0.9				.7/0.9	.9/0.9				
大いに不快感を覚える。	非常に不快である。	⑥-2							.9/1.0					.8/1.0				

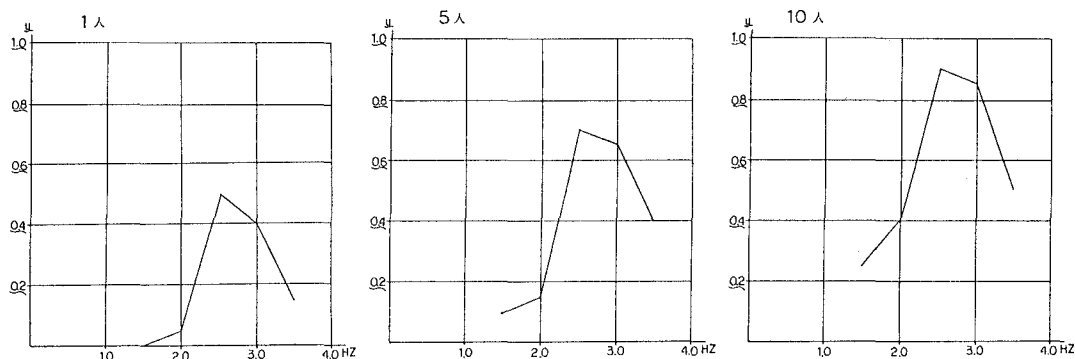


図-4

4. 考 察

4-1. 従来の研究との整合性

このような振動感覚を比例尺度上に数量化しようとした研究の一つに、小堀・梶川の研究⁴⁾⁵⁾がある。小堀・梶川の研究では、マグニチュード推定法による鉛直変位と振動数に対する振動感覚の実験において振動数が高いほど小さい変位で振動を認識することが報告されている。本研究においても、図-4に示すように共振振動数をピークとしてその前後 0.5Hzでは振動数が高い場合に、より強く振動を感じており、この傾向は加振人数が多いほど顕著である。また振動数が 3.5Hzの場合でも依然としてそのピークに対し中程度の振動感覚となっている。したがって、本研究は小堀・梶川の実験とよく一致し、図-4のメンバーシップ関数はある程度の客観性を持つものと思われる。

4-2. 実橋設計に対する一考察

前述の通り、従来の設計指針では、固有振動数が1.5～2.3Hzにならないようにすることが規定されている。しかしながら本研究のファジィ集合に基づいて考察すると、固有振動数2.3～3.0Hz程度の時に最も揺れを感じるようである。また固有振動数が1.5～2.0Hz程度の場合でも、図-4のグラフは若干低振動数側に移動するが、その固有振動数でグレードが最大にはならず、概ね 2.5Hz程度で最大になると思われる。したがって、一般の設計においても、上記の規定は参考程度にとどめておき、その橋梁の使用条件等をよく検討し、より柔軟に主桁剛度を決定するべきであろう。

5. あとがき

以上のように、本研究では人間の体感振動と言う問題にファジィ理論の概念を導入したが、この様な不確定かつ主観的な問題を取り扱うのにファジィ理論の考え方は非常に適しており、実際の設計に役立てることも十分に可能であると思われる。

最後に、本研究を進めるにあたり、第1回目の実験データを快く提供して下さったアリヤス設計コンサルタント㈱、田所洋一氏に感謝する。また寒い中、第2回目の実験に参加していただいた北海道大学工学部土木学科橋梁学講座、佐藤浩一助教授、及川昭夫技官、ならびに同講座大学院生、4年生の諸氏に感謝する。以上の方々のご協力に対し、ここに記して深い謝意を表す。

(参考文献)

- 1) 三矢直城, 田中一男: C言語による実用ファジィブック: ラッセル社, 1989
- 2) 水元雅晴: ファジィ理論とその応用: サイエンス社, 1988
- 3) 立体横断施設技術基準・同解説: 日本道路協会, 昭和54年
- 4) 小堀為雄, 梶川康男: 道路橋の振動とその振動感覚: 土木学会論文報告集第222号, 1974, 2
- 5) 小堀為雄, 梶川康男: 橋梁振動の人間工学的評価法: 土木学会論文報告集第230号, 1974, 10
- 6) 西脇威夫: 歩道橋における振動感覚の数量化と設計への応用: 土木学会論文報告集第257号, 1977, 1
- 7) 古川浩平, 古田均, 中尾絵里子, 浅津直樹: ファジィ理論に基づく美観を考慮した橋梁設計に関する一考察: 土木学会論文集第410号, 1989, 10