

I-39

ファジィ推論を用いた
体感振動解析について

北海道大学工学部 正 員 小幡 卓司
北海道大学工学部 正 員 林川 俊郎
北海道大学工学部 学生員 桑島 正樹
北海道大学工学部 金子 達哉

1. ま え が き

従来、歩道橋は一般の道路橋に比べ、設計荷重が小さく低剛性のため、振動しやすい構造であると言われている。また材料強度の向上によっても、歩道橋に限らず鋼構造物自体が低剛性化の道を歩んでいられると思われる。

近年、歩行者保護の観点から、側道橋あるいは人道橋と呼ばれる、主に河川に架けられる長支間の歩道橋が増えてきた。このような橋梁は従来の歩道橋よりも長支間で幅員も広いため、非常に揺れやすく、その使用性が問題となっている。このような使用性問題は昭和40年頃から、日本のみならず世界各国でも注目されるようになり、その照査方法も各国において設計基準として示されるようになってきた。その主なものとして、イギリスのBS5400(1978年)、カナダのOntario code(1983年)等があり、また日本においては立体横断施設技術基準・同解説(1979年)がある。

しかしながら、これらの照査方法をもってしても、依然として歩道橋の振動使用性問題は、少なからずあるように思われる。その主な原因としては

- ① 橋梁の動的解析結果は、静的解析と比較して、実際の測定結果と必ずしも一致しない。
- ② 人間の振動感覚量にばらつきがあり、定量的には扱いにくい。

等が上げられる。このうち①については、歩行者の床版への衝撃力、橋梁の全体剛性等を詳細に検討することにより、ある程度正確に予測することができる。また②については、過去においてISO基準をはじめとして多数の優れた研究があるが、人間の振動感覚を完全に定量化して取り扱うには至っていない。そのため、各国の基準・照査方法における振動じょう度も、それぞれ異なったものが採用されているようである。

近年、このようなランダム性以外の不確かさを含んだ問題を取り扱う手法として、ファジィ理論が注目されている。このファジィ理論では、前述の人間の振動感覚のような命題に含まれるあいまいさを、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。したがって、本研究では人間の振動感覚について、過去に行われた研究を参考にしながら、ファジィ理論に基づいて振動数、振幅および感覚量のメンバーシップ関数を定義し、これらを用いたファジィ推論機構を作成して、人間の振動感覚の定量化を試みるものである。

2. 解 析 手 法

2-1. ファジィ推論

ファジィ理論の応用手段の一つに、ファジィ推論がある。ファジィ推論とは、IF-THEN形式で表現された推論規則に基づいて、前件部(IF～の部分)の適合度を求め、それに応じた後件部(THEN～の部分)の適合度を得るものである。ここで、次のような規則があるとする。

規 則： もし振幅が大きくて振動数が高ければ不快感を感じる。

ファジィ推論は別名近似的推論と呼ばれるが、その理由は規則における'振幅が大きい'と、得られた事

実'振幅がやや大きい'が多少ずれていても、そのずれ具合に応じて推論結果を無理なく導けるからである。前述の規則を、IF-THEN形式で表せば次のようになる。

IF x is A and y is F THEN z is S

ここで A: 振幅のファジィ集合 F: 振動数のファジィ集合 S: 振動感覚のファジィ集合 である。したがって、このような規則を用意し、それに対応するファジィ集合を定義すれば、推論を行うことができる。現在、ファジィ推論には大きく分けて3つの方法があるが、ここではファジィ関係Rを用いた推論の合成規則に基づく方法(直接法)を用いることとする。その概念図を図-1に示す。また、規則数および定義されたファジィ集合の数が多くなれば、より詳細な解析を行うことが可能になる。以上より、本研究では25組の推論規則を用いて解析を行った。

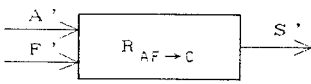


図-1

2-2. メンバシップ関数

上記のようなファジィ推論を行うためには、 A_n (振幅)、 F_n (振動数)、 S_n (振動感覚) のそれぞれのメンバーシップ関数を定義する必要がある。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。直接法によるファジィ推論では、図-2(a), (b)のようなメンバーシップ関数(ファジィラベル)が用いられ、またファジィ集合の台集合も図のように規格化したものを用いる場合が多い。本研究では、台集合の規格化は行わず、横軸に振幅についてはmm、振動数についてはHzの単位を持ったメンバーシップ関数を採用した。

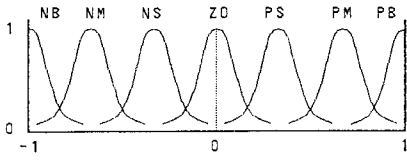


図-2 (a) つり鐘型メンバーシップ関数

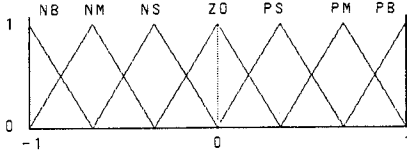
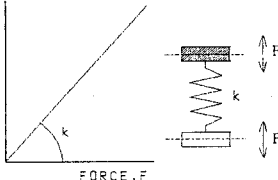


図-2 (b) 三角型メンバーシップ関数

3. 解析およびその結果

3-1. メンバシップ関数の作成

一般に、刺激と感覚の関係は、例えば振動モデルにおける入力と応答の関係とは異なり、小さな刺激は経路中に吸収されてしまい感覚として現れない範囲が存在する。図-3にその関係を示す。(b)図の S_0 は閾値と呼ばれるものである。また、これらの関係の特性として、刺激と感覚が一次的な関係ではなく、刺激 S とその増分 dS との比が一定であるという Weberの法則により、感覚的増分 dR と dS は比例的に変化すると考えられる。これらを式で表せば、



(a) 振動

$$dR = C (dS/S) \dots\dots\dots (1)$$

dS : 刺激 S に対する刺激関 C : 定数

式(1)を微分方程式として考えるならば、感覚量 R は、

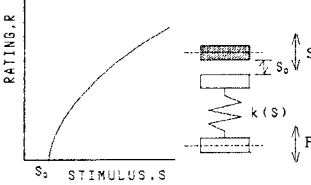
$$R = C \log_e S + A \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 A は刺激閾($S=S_0$)で $R=0$ となるから、 $A = -C \log_e S_0$ とおくと

$$R = C \log_e (S/S_0) \dots\dots\dots (3)$$

S_0 を単位として、自然対数を常用対数で表せば

$$R = K \log_{10} S \quad (K = C \log_{10} 10) \dots\dots\dots (4)$$



(b) 感覚

図-3

式(4)はFechnerの法則と呼ばれるものである。以上より、刺激 S と感覚量 R は対数関係にあることがわかる。したがって、本研究では振幅および振動数とグレード、またはグレードと振動感覚の関係が対数関係にあると考え、横軸に対数座標を用いた三角型メンバーシップ関数を採用した。それぞれの台集合は、対称が人道橋であることを考慮して、振幅は0~4mm、振動数は0~9Hzとし、感覚量の台集合につい

ては、百分率（例えば10人のうち 5人が不快であると
 感じた場合、50%とする）を用いた。図-4にメンバ
 シップ関数を示す。なお、それぞれの台集合は

振 幅 (mm)

$X = \{0.25, 0.35, 0.5, 0.71, 1.0, 1.41, 2.0, 2.83, 4.0\}$

振 動 数 (Hz)

$Y = \{1.0, 1.32, 1.73, 2.28, 3.0, 3.95, 5.2, 6.84, 9.0\}$

振動感覚 (%)

$Z = \{12.5, 25.0, 37.5, 50.0, 62.5, 75.0, 87.5, 100.0\}$

である。

3-2. 推論規則と合成規則によるファジィ推論

前述のように、ファジィ推論を行うためには、IF-
 THEN形式の推論規則とそれに対応したファジィ関係を
 作成しなくてはならない。規則数は定義された前件部
 のメンバーシップ関数の数に応じて決定され、本研究
 では前件部がそれぞれ5個のファジィ集合であるため
 全規則数は25組となる。後件部については、9個のフ
 ザジィ集合から前件部の各振幅、振動数に対応したも
 のを選定し推論規則を作成した。表-1に本研究におけ
 る推論規則を示す。

次に、推論規則から個々のファジィ関係を作成し、
 それらを最終的なファジィ関係Rにまとめる必要があ
 る。ファジィ関係の作成方法はいろいろ知られている
 が、ここでは代表的なMamdaniによる方法を用いる。

ファジィ関係 $R_i = A \rightarrow F \rightarrow S = A \times F \times S$

$= \{u, v, w (\mu_A(u) \mu_F(v) \mu_S(w)) / (u, v, w) \dots (5)$

ここで、A, F, S: 各規則におけるファジィ集合、
 u, v, w: A, F, Sの台集合、 μ_A, μ_F, μ_S : A, F, S
 におけるグレード、また $\{$ は積分記号ではなくファ
 ジィ理論におけるセパレーターである。

さらに、式(5) によって作成された各規則のファジィ
 関係 R_i は、

$R = R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_n \dots (6)$

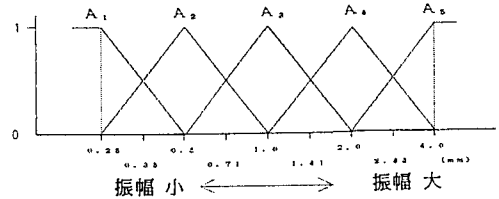
によって最終的なファジィ関係Rにまとめることによ
 り、ファジィ推論が可能となる。

したがって、この最終的なファジィ関係Rから、あ
 る入力A', B'に対する出力C'は、max-min合成を行
 うことにより以下の式で得ることができる。

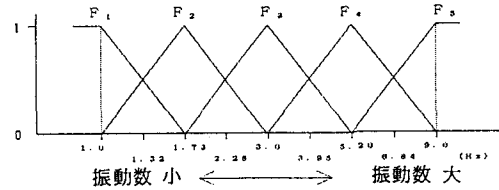
$S' = (A' \cap F') \cap R$
 $= A' \cap F' \cap R = F' \cap A' \cap R \dots (7)$

式(7)で得られるS'はファジィ集合であるので、非ファジィ化を行って確定値を出力する操作を行う。

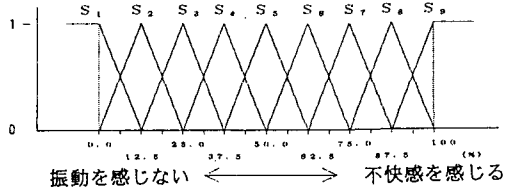
非ファジィ化の方法もまた多数あるが、ここでは得られたS'の重心を求めることによって確定値とする



(a) 振幅のメンバーシップ関数



(b) 振動数のメンバーシップ関数



(c) 振動感覚のメンバーシップ関数

図-4

表-1 推論規則

規則 1:	IF x is A ₁ and y is F ₁ THEN z is S ₁
規則 2:	IF x is A ₁ and y is F ₂ THEN z is S ₂
規則 3:	IF x is A ₁ and y is F ₃ THEN z is S ₃
規則 4:	IF x is A ₁ and y is F ₄ THEN z is S ₄
規則 5:	IF x is A ₁ and y is F ₅ THEN z is S ₅
規則 6:	IF x is A ₂ and y is F ₁ THEN z is S ₂
規則 7:	IF x is A ₂ and y is F ₂ THEN z is S ₃
規則 8:	IF x is A ₂ and y is F ₃ THEN z is S ₄
規則 9:	IF x is A ₂ and y is F ₄ THEN z is S ₅
規則 10:	IF x is A ₂ and y is F ₅ THEN z is S ₆
規則 11:	IF x is A ₃ and y is F ₁ THEN z is S ₃
規則 12:	IF x is A ₃ and y is F ₂ THEN z is S ₄
規則 13:	IF x is A ₃ and y is F ₃ THEN z is S ₅
規則 14:	IF x is A ₃ and y is F ₄ THEN z is S ₆
規則 15:	IF x is A ₃ and y is F ₅ THEN z is S ₇
規則 16:	IF x is A ₄ and y is F ₁ THEN z is S ₄
規則 17:	IF x is A ₄ and y is F ₂ THEN z is S ₅
規則 18:	IF x is A ₄ and y is F ₃ THEN z is S ₆
規則 19:	IF x is A ₄ and y is F ₄ THEN z is S ₇
規則 20:	IF x is A ₄ and y is F ₅ THEN z is S ₈
規則 21:	IF x is A ₅ and y is F ₁ THEN z is S ₅
規則 22:	IF x is A ₅ and y is F ₂ THEN z is S ₆
規則 23:	IF x is A ₅ and y is F ₃ THEN z is S ₇
規則 24:	IF x is A ₅ and y is F ₄ THEN z is S ₈
規則 25:	IF x is A ₅ and y is F ₅ THEN z is S ₉

方法を用いることにする。以下にその式を示す。

$$z_0 = \int \mu_s'(z) z dz / \int \mu_s'(z) dz \dots\dots\dots (8)$$

3-3. 解析結果

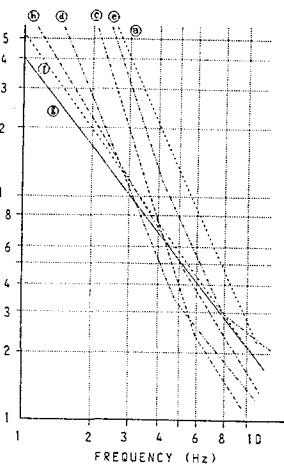
表-2 計算結果

以上の手法をパソコンを用いてプログラム化し、数値解析を行った。その計算結果を表-2に示す。なお、本計算例では図-4のメンバーシップ関数における台集合についてのみ計算を行ったが、任意の振幅、振動数についても入力ファジィ集合A'、B'を設定することにより計算が可能である。したがって、使用性検討

mm / Hz	1.00	1.32	1.73	2.28	3.00	3.95	5.20	6.84	9.00
0.25	4.17	12.5	12.5	18.8	25.0	31.3	37.5	43.8	50.0
0.35	12.5	18.8	18.8	25.0	31.3	37.5	43.8	50.0	56.3
0.50	12.5	18.8	25.0	31.3	37.5	43.8	50.0	56.3	62.5
0.71	18.8	25.0	31.3	37.5	43.8	50.0	56.3	62.5	68.8
1.00	25.0	31.3	37.5	43.8	50.0	56.3	62.5	68.8	75.0
1.41	31.3	37.5	43.8	50.0	56.3	62.5	68.8	75.0	81.3
2.00	37.5	43.8	50.0	56.3	62.5	68.8	75.0	81.3	87.5
2.83	43.8	50.0	56.3	62.5	68.8	75.0	81.3	87.5	93.8
4.00	50.0	56.3	62.5	68.8	75.0	81.3	87.5	93.8	100.0

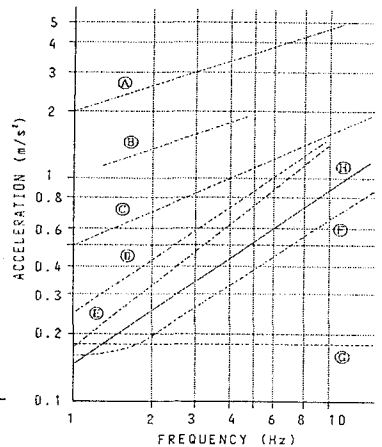
の対象となる橋梁の動的応答性が把握できれば、利用者の振動感覚を簡単に明らかにすることができると思われる。

また図-5(a),(b)は、従来の主な研究および現在よく用いられるじょ限度との比較図である。図-5(a)は、'不快'の閾値(反応が起きる確率が50%)のグラフであり、本研究は3.5 Hz以下では全体の下位に、3.5Hz以上では全体の下位から中位にある。さらに図-5(b)においても本研究は全体の下位にあり、これらの結果から本研究の解析手法、特に図-4におけるメンバーシップ関数の定義はほぼ妥当であると思われる。



① Reither-Weister
② Melberg-Sperling (F=2.5)
③ Jonesey
④ Nilsa-Yonkass
⑤ I.S.O.
⑥ Kobori-Kajikawa
⑦ 本研究

(a)



⑧ Reither-Weister (不安)
⑨ Smith
⑩ 0.5 f^{1/3}
⑪ Ontario code
⑫ Wheeler after Kajikawa
⑬ Leonard
⑭ Reither-Weister(強い揺動)
⑮ 本研究

(b)

図-5

以上の結果より、本研究における解析結果は従来の研究と比較してほぼ妥当であり、このような使用性問題におけるファジィ理論の応用は非常に有効であると思われる。また、今回は'不快'のじょ限度のみ解析したが、推論規則とメンバーシップ関数を変更することによって、例えば'振動を感じない'等のじょ限度も簡単に得ることができる。さらに、前述のように人道橋の動的応答性を把握することによって、設計段階で利用者の振動じょ限度を予測することも可能であると思われる。

<参考文献>

- 1) 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 P15～23, 1974, 2
- 2) 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 P23～31, 1974, 10
- 3) 梶川康男：振動感覚を考慮した歩道橋の使用性照査法に関する考察，土木学会論文報告集第325号 P23～33, 1982, 9
- 4) 梶川康男・加藤雅史：歩道橋の振動と使用性設計，振動制御コロキウムPARTB 論文集 P9～14, 1991, 7
- 5) 三輪俊輔・米川善晴：振動の評価法1，2，3，日本音響学会誌27巻1号 P11～39, 1971
- 6) 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
- 7) 菅野道夫：ファジィ制御，日刊工業新聞社, 1988
- 8) 日本道路協会編：立体横断施設技術基準・同解説，昭和54年