

非集計ロジットモデルを用いた鋼斜張橋とPC斜張橋の橋式選択に関する研究

荒木義則*・古田均**・前田絵理子***・
古川浩平****

スパン 250 m 程度の斜張橋を例にとり、鋼橋、PC 橋の橋式選定に関してアンケート調査を行い、非集計ロジットモデルの理論を適用して、競合状態にある両者を同一基準で評価した。そして、現在の橋式選択においてどのような点が重視されており、将来の橋式選択確率がどのように変化して行くかを予測するとともに、今後どのような方面の研究開発を進める必要があるのかを明らかにした。

Key Words: *disaggregate behavioral model, cable stayed bridge, questionnaire survey, prestressed concrete bridge, steel bridge*

1. ま え が き

戦後、日本における橋梁の発達は目ざましいものがあり、鋼橋用の鋼材の開発に伴い数多くの鋼橋が架けられてきた。しかし、近年プレストレストコンクリート橋（以下 PC 橋と称す）の急速な発達によって、鋼橋と PC 橋の競争が激しくなっている。PC 橋は鋼橋に比べて一般に騒音が小さい、耐風性に優れている、日常の維持管理が容易であるといわれているが、特に斜張橋においては鋼橋に比べ経験は十分とは言えず、設計・施工・維持管理面において問題点も残されている。

現在の日本では、鋼橋と PC 橋の両者は架設業者という点からすると明らかに分野が異なり、そのため両者の長短所等について、同一の評価基準に基づいて比較検討を行った研究は非常に少ない。しかし両者の今後の発展性を明らかにするためには、このような研究が必要と考えられる。

本研究においては、鋼橋、PC 橋双方の今後の発展性を明らかにするために、競争状況にある両者を同一基準で評価し、現在の橋式選択において、どのような点が重視されているのか、今後どのような方面の研究開発を進める必要があるのか等を明らかにすることが主目的である。

そこで実際に橋梁の設計に携わっている技術者にアンケートを行うことにより、鋼橋か PC 橋かの両者のいずれかの橋梁形式を選定する際、どの様な要因を重視して選択しているかの検討を行い、その結果から上記の目的を明らかにする。

材料の信頼性や経済性を考慮すると、長大橋であれば鋼橋を、比較的短い橋であれば PC 橋を一般には選択すると思われる。そこで、本研究では近年の斜張橋架設例¹⁾を参考にし、両者とも選択可能なスパン長として 250 m 程度の斜張橋を例にとり、交通計画^{2),3)}によく用いられている非集計ロジットモデルの理論を利用して、橋式選択の際大きく作用している要因は何か、またその要因を変化させることにより将来の選択確率はどのように変化するかを計算し、その結果を用いて、今後の技術開発の方向を明らかにする。

非集計ロジットモデルは、個人が選択可能なものの中から最大の効用を与えるものを選ぶという合理的選択行動を仮定しており、人間の行動原理や意思決定構造が反映されている。またこのモデルは、交通機関選択だけではなく住宅立地選択⁴⁾や職業選択などのいわゆる選択行動問題に広く適用されている。

要因分析では影響力のある要因が抽出されるだけであり、また数量化理論Ⅱ類⁵⁾では回帰式を求めた後、どちらのグループに入るかが判定されるものの選択確率の予測までは行えない。それに対し、非集計ロジットモデルを用いた最大の利点は、特性変数の変化に伴う選択確率の予測ができることであり、現在、競合状態にある鋼斜張橋と PC 斜張橋を比較し、両者の今後の発展性を明らかにするためには最も有効な手法と考えられる。

2. 非集計ロジットモデルの作成とその手順

非集計ロジットモデルの基本的な前提は、「個人が行動の基本的な意思決定単位であり、個人はある選択状況の中から最も望ましい選択肢を選択する。」というものである。ある選択肢のもつ「望ましき」、あるいは「効用」は、その選択肢のもつ特性と、その個人の属性によって異なると考えられる⁶⁾。確率効用理論では、この効用が確率的に変動すると考えるもので、個人 n 選択肢 i の効

* 正会員 工修 山口大学助手 工学部社会建設工学科
(〒755 山口県宇部市常盤台2557)

** 正会員 工博 関西大学教授 総合情報学部

*** 元山口大学教員

**** 正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科

用 U_{in} を確率変数とし、これを確率的に変動する部分（確率項） ϵ_{in} と変動しない部分（確定項） V_{in} に分け、その線形性を仮定して U_{in} は、次式で表される。

$$U_{in} = V_{in} + \epsilon_{in} \dots \dots \dots (1)$$

非集計ロジットモデルの中で、選択肢が2つだけの場合を二項ロジットモデルと呼ぶ。二項ロジットモデルのパラメータ推定・検定の手順は、まず効用関数形の特定化と特性変数の選択を行い、この特定化に従ってデータの作成を行い、得られたデータに対して最尤推定法を適用してパラメータ値の推定を行う。同時に、推定量の共分散行列の推定を行い、これに基づいて t 値検定を行う。

(1) 効用関数 V_{in} の特定化

二項ロジットモデルは選択肢が2つであり、選択確率はそれぞれ次式で与えられる。

$$P_{1n} = \frac{1}{1 + e^{V_{2n} - V_{1n}}} \dots \dots \dots (2)$$

$$P_{2n} = 1 - P_{1n} \dots \dots \dots (3)$$

ただし、 P_{1n} 、 P_{2n} ：個人 n が選択肢（1、2）を選択する確率

V_{1n} 、 V_{2n} ：個人 n が選択肢（1、2）から受ける効用のうちの確定項

効用関数 V_{in} の特定化にとって重要な要素は、選択肢 i の特性を示す指標である。これらをまとめて特性変数と呼び、以下のように記号化する。

X_{ink} ：個人 n の選択肢 i の k 番目の特性

$$X_{in} = [X_{in1}, \dots, X_{ink}, \dots, X_{inK}]^T$$

：個人 n の選択肢 i の特性ベクトル

θ_k ：第 k 番目の未知パラメータ

$$\theta = [\theta_1, \dots, \theta_K]^T$$
：未知パラメータベクトル

パラメータの推定とは、データに基づいて未知のパラメータ θ の値を推定することであり、様々の特定化が考えられるが、ここでは最も簡単でよく利用される線形の特定化を用いることとした。この線形式は次式で表される。

$$V_{in} = \theta^T \cdot X_{in} = \sum_{k=1}^K \theta_k \cdot X_{ink} \dots \dots \dots (4)$$

このとき、それぞれの選択確率は次式で与えられる。

$$P_{1n} = \frac{1}{1 + e^{\theta^T (X_{2n} - X_{1n})}} \dots \dots \dots (5)$$

$$P_{2n} = 1 - P_{1n} \dots \dots \dots (6)$$

(2) 特性変数 X_{ink} の選択

次に、特性変数 X_{ink} としていかなる変数を選択するか

表-1 特性変数

選 択 肢	1	経済性	1. 設計費	2. 上部工の建設費	
			3. 下部工を含めた建設費	4. 日常の維持管理費	
	総合的観点による経済性				
	2	信頼性	6. 材料	7. 工場管理	8. 架設工事
			9. 耐震性	10. 耐風性	11. 疲労
12. クリープ・リラクゼーション			13. 主桁の腐食		
総合的観点による信頼性					
3	施工性	14. 基礎地盤への対応	15. 環境への対応		
		16. 工事の容易さ	17. 工期		
		18. 施工誤差	19. 技術レベル		
総合的観点による施工性					
特 性	4	社会性	20. 色彩	21. 形状	22. 工事中の騒音
			23. 交通騒音	24. 低周波公害	25. 関連産業の育成
			26. 地域経済への波及効果	27. 住民の要望	
			総合的観点による社会性		
5	技術力	28. 日本での技術レベル	29. 日本での経験		
		30. 設計の容易さ	31. 設計の自由度		
		総合的観点による技術力			
個人特性	6	32. 経験年数	33. PC橋・鋼橋の架橋本数		

という問題が生じる。これは分析対象によって異なるが、上述したように、選択対象の特性と個人の特性とに分けることができる。本研究においては、前者には著者らが一般的に橋梁の計画・設計・施工において考慮する必要があると考えられる項目⁷⁾として経済性、信頼性、施工性、社会性、技術力といった特性を、後者には経験年数、架橋本数といった特性を変数として検討を行った。また、経済性の中にも設計費、建設費、維持管理費等多くの要因が考えられる。表-1にここで考えた特性変数を示す。

(3) パラメータ値の推定

最尤法では、選択結果 δ_{in} のみを確率変数であるとみなし、残りのデータ X_{ink} は確率変数でなく、 δ_{in} が実現する確率 P_{in} を説明する説明変数とするので、これは単なる実数となる。確率変数 δ_{in} の実現したパターンに注目すると最尤推定法では、サンプリングの結果が実現したのはその選択パターンが実現する同時確率が高いためと考え、そのパターンが実現する同時確率を最大にする θ の値が望ましい θ の推定量である。最尤推定量 $\hat{\theta}$ の計算にはニュートンラプソン法 (NR 法) を用いた。

最尤推定法によって未知のパラメータが推定されたならば、その推定値をどの程度信頼することができるかが問題となる。最尤推定法による統計量 $\hat{\theta}$ の性質の中で、実際の計算にあたって必要な値は、母共分散行列 $V(\hat{\theta}) = [-F^2 L(\theta)]^{-1}$ の推定値である。

(4) t 検定とモデルの適合度

t 値とは推定値 $\hat{\theta}_k$ をその推定標準偏差で除した値をいい、 $\hat{\theta}_k$ の推定分散は共分散行列 $[-F^2 L(\theta)]^{-1}$ の対角要素の k 番目の値 (v_k) として得られる。従って、次式で求められる。

$$t_k = \hat{\theta}_k / \sqrt{v_k} \dots \dots \dots (7)$$

この t 値の絶対値が 1.96 以上ならば、帰無仮説 $\theta_k = 0$ を 5% の有意水準で棄却してよい。従って、 $|t_k| > 1.96$ の時は、対応する特性 X_{ink} は 95% の信頼性で選択確率

に影響を与える要因であるとみなしうる。

一方、 $|t_k| < 1.96$ の時は、95%の信頼性でその特性 $X_{i,nk}$ は影響を与えない要因とみなすことができる。そこで $|t_k| < 1.96$ の時には、対象とする特性 $X_{i,nk}$ を要因からはずして、もう一度パラメータ推定をやりなおすことが望ましい。

適中率は、選択確率が50%以上であればその選択肢を選択するという仮定の基に推定選択結果を求め、実際の選択結果と一致しているかどうかを表したものである。100%になることはありえず、80%以上ならば極めて高い適中率とみなしてよい。

3. 専門家に対するアンケートと考察

(1) アンケート内容と回答者

二項ロジットモデルのデータ作成のために、橋梁の設計に携わっている専門家に対し、表-1で示した33項目に加えて、経済性、信頼性等の項目毎に総合的にみて鋼橋とPC橋ではどちらが優れているかのアンケート調査を行った。そのアンケートの一部を図-1に示す。図-1は表-1の経済性の部分のみを示し、最後の設問が総合的観点による質問である。

アンケートの配布先は公団・地方公共団体、鋼橋メーカー、PC橋メーカー、コンサルタンツである。回収されたアンケートは計375票あり、それぞれ64, 144, 82, 74の計364票が有効なデータとして利用できた。本来ならば、最尤推定法を用いるための大前提は、無作為標本抽出でなければならないが、アンケートの内容が専門的かつ高度であり、回答を行うにはその分野でのかなりの経験を必要とするため、無作為標本抽出を行うことが不可能であった。そこで、筆者らと関係のある上記の各事業所にアンケートを送付し、基本的に10年以上の設計経験をもつ技術者に回答してもらうこととした。返ってきた回答の7割がこれらの条件を満たしていた。残りの3割は設計経験10年未満であったが最小でも3年であり、これら全てをデータとして用いることができると判断した。

(2) アンケート結果と考察

本研究の目的は鋼斜張橋とPC斜張橋という2種類の橋梁形式の選択理由を明らかにすることであるが、経験や職業意識により鋼橋メーカーは鋼斜張橋を、PC橋メーカーはPC斜張橋を選ぶだろうと予想される。そこで、職業別に以下のグループ分けを行う。

グループ1：全データ (364票 → 302票)

グループ2：比較的中立な立場で選定と思われる公団・地方公共団体及びコンサルタンツ (138票)

グループ3：鋼橋のメーカー (144票 → 82票)

グループ4：PC橋のメーカー (82票)

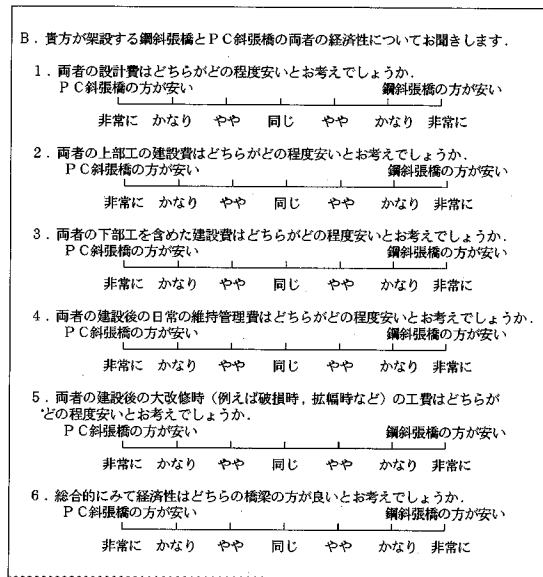


図-1 アンケート調査の一部

なお、鋼橋メーカーの回答数がPC橋メーカーのそれと比べて多いため、全データを扱うグループ1では、鋼橋メーカーサイドの影響が強く現れることが考えられる。そこで、鋼橋メーカーの中から無作為抽出を行いPC橋メーカーの数と一致させた。従って、各グループのデータ数はそれぞれ302, 138, 82, 82となる。また、総合的観点のみに着目した場合をケースA、経済性、信頼性、施工性、社会性、技術力といった項目に着目した場合をそれぞれケースB, C, D, E, Fとした。

図-2に総合的観点の回答のみを用いたケースAにおいて、職業別グループ2, 3, 4の回答によるグループ別ヒストグラムを示す。P側(左側)はPC橋の方が、M側(右側)は鋼橋の方が優れていると答えたことを示している。この図より回答の一般的傾向は鋼橋のメーカーは鋼橋側、PC橋のメーカーはPC橋側が良いとする方に偏っていると思われるが、施工性については鋼橋の方が、社会性についてはPC橋の方が優れている、あるいは同じとメーカーを問わず答えていることがわかる。グループ2を見てみると、経済性、社会性はほぼ同じ、信頼性、施工性、技術力に関してはやはり鋼橋の方が優位であると、架設を発注あるいは設計する側は考えていることがわかる。

図-3~図-7は、経済性、信頼性といった項目をさらに詳細にみたグループ別のヒストグラムである。図の見方は図-2と同様である。

図-3から、経済性においては上部工の建設費、日常の維持管理費はPC橋が優位であり、大改修時の工費は鋼橋が優位であることがわかる。鋼橋は定期的な色の塗り替えという維持管理が必要となるが、大地震等による

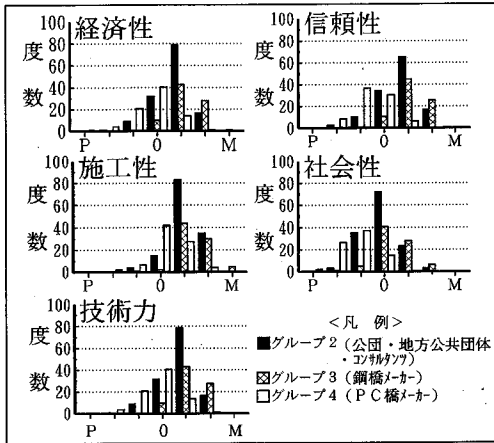


図-2 総合的観点に関するグループ別ヒストグラム

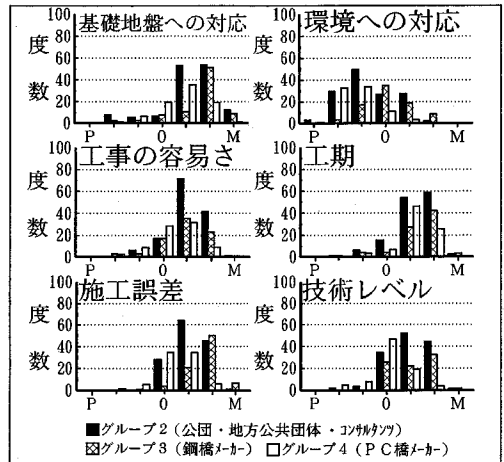


図-5 施工性に関するグループ別ヒストグラム

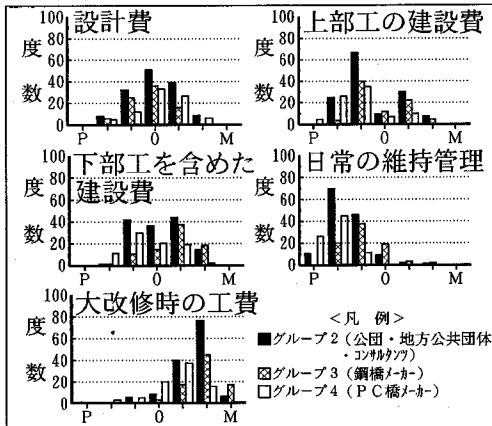


図-3 経済性に関するグループ別ヒストグラム

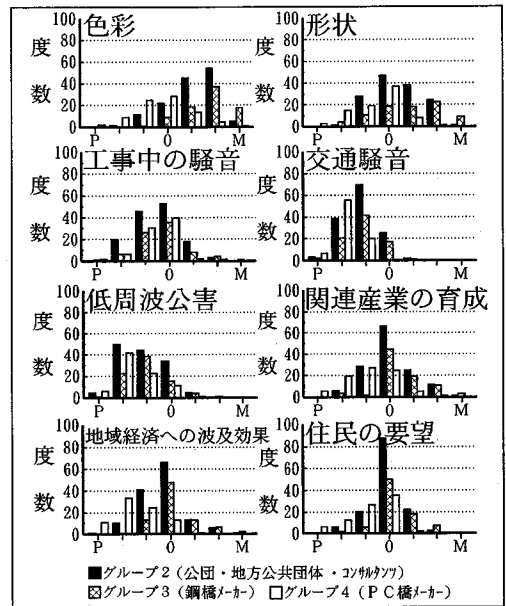


図-6 社会性に関するグループ別ヒストグラム

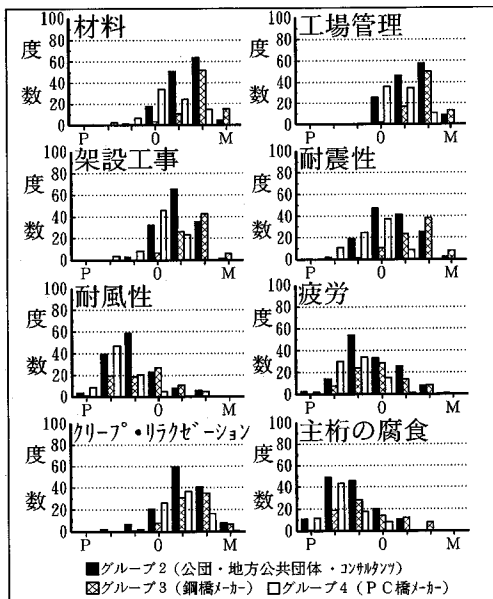


図-4 信頼性に関するグループ別ヒストグラム

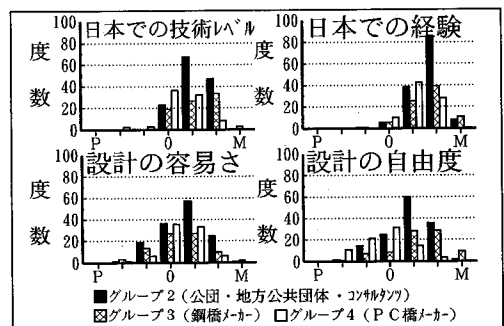


図-7 技術力に関するグループ別ヒストグラム

被害がでた場合等の大改修が必要な時は PC 橋より経済的に有利といえる。

図-4 から、信頼性においては耐風性、疲労、主桁の腐食に対する信頼性は PC 橋の方が優位であるが、コンクリートはクリープといった問題があり、材料面や工場管理、架設工事といった分野での信頼性は鋼橋の方が優位である。

図-5 から、施工性においては環境への対応を除き鋼橋の方が圧倒的に優位であると考えていることがわかる。

図-6 から、社会性においては色彩、形状は、鋼橋の方が優れており、工事中の騒音、交通騒音、低周波公害といった公害面に対しては PC 橋の方が優れているといえる。また、今後考慮しなければならないと思われる関連産業の育成や地域経済への波及効果、住民の要望といった項目は両者同じと答えている人が多い。

図-7 から、技術力においてはこれまでの経験からしどの項目も鋼橋が優位であると答えている。設計の容易さの項目については、鋼橋のメーカー（グループ3）の形が他の項目と比べて O から P 側に若干であるが片寄っていることが注目される。また、設計の自由度はグループ3はM側、グループ4はP側と実際に携わっている設計に自由度があると考えており、これからますます新しい形式の橋が架設されていくことが考えられる。

4. 非集計ロジットモデルによる解析結果と考察

(1) 二項ロジットモデルによる解析アプローチ

二項ロジットモデルにおいては、式(2)からわかるように個人 n の選択確率 P_{1n} は、その効用 V_{1n} ($i=1, 2$) の水準そのものではなく効用差 $V_{2n} - V_{1n}$ に依存する。従って効用差に影響を与える特性の選択とその影響方法の特定化が重要となる。たとえば交通機関選択^{8), 9)}でよく取り扱われているマイカー（選択肢1）とマストラシット（選択肢2）問題においては、燃料が選択肢1の、運賃が選択肢2の選択肢固有変数であり、所要時間は選択肢共通変数としている。システムのモデル構築のためのアプローチとして、まず特性変数の影響分析を t 値検定により行う。具体的には、総合的観点のみを用いたケースAのデータに個人属性としてメーカーを考え、橋式選択結果に対してモデル化を行い、特性変数がシステムに与える影響を調べるとともに職業別グループ間での違いを見る。また、経済性(B)、信頼性(C)、施工性(D)、社会性(E)、技術力(F)といった項目毎のデータに個人属性として経験年数や架橋本数を考え、総合的観点による評価を選択結果として解析し、総合的観点に与える影響を見る。以上の結果を踏まえて、全システムのモデル化を行い、最終的な特性変数を決定するこ

表-2 個人属性にメーカーを考えた解析結果

説明変数	λ^2 パラメータ θ	t 値	分散 $V(X_i)$	$\frac{\theta^2 V(X_i)}{V(v)}$
ダミー	0.148	0.34	0.19	0.3%
経済性	0.481	1.87	0.07	1.6%
信頼性	0.893	2.69	0.11	8.6%
施工性	0.305	0.80	0.15	1.4%
社会性	1.297	4.04	0.10	16.4%
技術力	1.352	3.53	0.15	26.8%
メーカー	1.412	2.94	0.23	44.9%
サンプル数	302	適中率	92.1%	

とにより最適モデルを構築する。

本研究のデータ作成においては、PC 橋（選択肢1）と鋼橋（選択肢2）で、個人 n が PC 橋を選択したなら、選択結果 δ_{1n} には $\delta_{1n}=1, \delta_{2n}=0$ 、鋼橋を選択したなら $\delta_{1n}=0, \delta_{2n}=1$ となる。選択肢固有ダミー変数 $X_{i,n}$ には常に $i=1$ の時 $X_{1,n}=1$ を $i=2$ の時は $X_{2,n}=0$ をいれる。その他の特性変数においては PC 橋が優れていると答えた場合には選択肢1の変数にデータの値 ($0 < X_{1,n,k} \leq 3; k=2, \dots, K$) を記入し、他方の選択肢2の値はゼロ ($X_{2,n,k}=0; k=2, \dots, K$) を記入することにした。これは先のマイカー・マストラ問題の選択肢固有変数とは意味合いが異なるが、求めるパラメータ θ は効用差の確定項であることから問題はないとして解析を行った。

(2) 特性変数の影響分析

特性変数に総合的観点のみを用いたケースAに、個人属性としてメーカーを考え、橋式選定結果を用いて解析した結果を表-2に示す。メーカーという変数のデータ記入は、PC 橋メーカーならば選択肢1に1の値を、鋼橋のメーカーならば選択肢2に1の値を、それ以外はすべて0の値を記入した。また、変数選択と変数の影響力を調べるために従来から用いられてきた t 値の他に $\theta^2 V(X_i)/V(v)$ の値を用いることにした¹⁰⁾。ここで、説明変数 X_i の特性が X_i の平均値 $E[X_i]$ 、分散 $V[X_i]$ で与えられており、 X_i と X_j ($i \neq j$) は相互に独立であるとすれば、効用関数 v の分散は次式で表される。

$$V[v] = \theta_1^2 V[X_1] + \theta_2^2 V[X_2] + \dots + \theta_k^2 V[X_k] \dots \dots (8)$$

表-2より、どちらの値も社会性、技術力、メーカーの値が大きいことが分かる。施工性の t 値は0.80と低くなり、個人属性にメーカーを考えた場合、施工性は説明変数から削除した方がよいという結果となった。また $\theta^2 V(X_i)/V(v)$ の値からはメーカー、技術力、社会性がそれぞれ全体の44.9%、26.8%、16.4%を占め、取り込んだ6変数によって説明される変動の88.1%がこの3変数によって説明されることが分かる。

次に、総合的観点のみを用いたケースAに個人属性として経験年数、架橋本数の2要因を取り入れて、グループ別に解析を行った結果を表-3に示す。これよりグル

表-3 グループ別の解析結果 (t値)

説明変数	グループ1	グループ2	グループ3	グループ4
ダミー	0.690	0.811		1.866
経済性	2.112	1.104		-0.295
信頼性	2.552	0.209		1.706
施工性	1.173	2.189	発散	-0.222
社会性	4.439	3.617		-0.530
技術力	3.931	3.238		0.203
経験年数	0.136	0.780		-1.068
架橋本数	3.191	2.776		0.567
サンプル数	302	138		82
適中率	92.4%	89.9%		95.1%

表-4 経済性 (B) データによる解析

項目 (経済性)	グループ1 (全データ)		グループ2 (公務員等)	
説明変数	パラメータ	t値	パラメータ	t値
ダミー	0.159	0.24	0.093	0.12
設計費	0.176	0.72	-0.172	-0.55
上部工の建設費	0.476	1.77	0.063	0.20
下部工の建設費	1.791	5.17	2.050	4.49
日常の維持管理費	2.072	5.49	1.615	3.58
大改修時の工費	1.299	4.03	0.859	2.00
経験年数	-0.053	-1.56	-0.040	-1.00
架橋本数	0.000	0.05	-0.003	-0.26
適中率	88.9%	261	84.3%	115

ープ1, 2において, PC橋, 鋼橋のどちらかを選択する要因には, t値より社会性, 技術力, 架橋本数が大きく影響を与えていることが分かる. またグループ1, 2の違いとしては, 上記項目の次に影響を与える要因として, グループ1では信頼性, 経済性が, グループ2では施工性となっていることが挙げられる. 従ってメーカーの意見が加わると信頼性, 経済性が大きく影響すると言うことがわかる. また適中率は92.4%でかなり高い.

また, グループ3 (鋼橋のメーカー) においては解析ができず, またグループ4 (PC橋のメーカー) においては解析はできたもののt値の絶対値はどの要因も1.96以下であった. グループ3, 4においてこのような結果が得られた理由として, 最尤推定法の考えによれば, 選択パターンに偏りが多く, そのパターンが実現する同時確率を最大にするθの値が求まらないためと考えられる. よってメーカーのみを扱うグループ3, 4の解析は以後は行わないことにする.

表-4~表-8は前述の経済性 (B), 信頼性 (C), 施工性 (D), 社会性 (E), 技術力 (F) といった項目毎のデータを用いたグループ1, 2の解析結果である. これらの解析に用いた選択肢は, どちらの橋を架設するのではなく, 総合的観点から見てどちらが優れているかの評価値を用いている.

表-4より, ケースBの経済性に影響を与えている要因は, 下部工の建設費, 日常の維持管理費, 大改修時の工費といえる. またt値よりケースAでは影響が大きか

表-5 信頼性 (C) データによる解析

項目 (信頼性)	グループ1 (全データ)		グループ2 (公務員等)	
説明変数	パラメータ	t値	パラメータ	t値
ダミー	-0.976	-0.89	-2.260	-1.21
材料	1.359	3.35	1.155	1.55
工場管理	0.691	1.51	0.989	1.45
架橋工事	0.521	1.20	0.197	0.29
耐震性	0.975	2.62	0.568	1.08
耐風性	0.735	1.64	1.609	1.58
疲労	1.322	2.96	1.069	1.65
クリープ等	0.744	1.82	0.539	0.98
主桁の腐食	0.773	2.01	0.692	1.24
経験年数	0.047	0.89	-0.004	-0.06
架橋本数	0.013	1.15	0.012	0.83
適中率	94.0%	233	94.2%	104

表-6 施工性 (D) データによる解析

項目 (施工性)	グループ1 (全データ)		グループ2 (公務員等)	
説明変数	パラメータ	t値	パラメータ	t値
ダミー	-1.486	-1.36		
基礎地盤への対応	0.648	1.83		
環境への対応	0.495	1.26		
工事の容易さ	1.153	3.30	発散	
工期	0.736	2.14		
施工誤差	0.323	0.71		
技術レベル	1.555	2.90		
経験年数	0.037	0.69		
架橋本数	0.000	0.06		
適中率	96.1%	259		132

った架橋本数はここでは全く効いていないことがわかる. この考察については, 以下の表-5~表-8も関係するので後にまとめて行うことにする.

表-5より, ケースCの信頼性においては, グループ1の結果から材料, 耐震性, 疲労, 主桁の腐食に対する信頼性が影響を与えていることがわかる. しかし, グループ2の結果を見てみると, ダミーのパラメータ値が大きく, t値はいずれも1.96%以下で影響を与えない要因とみなされるが, 適中率は94.2%と高い値をとっている.

表-6より, ケースDの施工性においては, グループ1の結果から工事の容易さ, 技術レベル, 工期が影響を与えていることがわかる. また, ダミーのパラメータ値が大きいため他の要因が影響していると思われるが, 適中率は96.1%と非常に高い. 一方, グループ2では, 全132データのうち128データが総合的に見た施工性は鋼橋の方が有利であると判断しており, 選択結果に偏りが大きいことから解析ができなかった.

表-7より, ケースEの社会性においては, グループ間で若干の違いが認められる. 両グループにおいて影響を与える要因として地域経済への波及効果, 住民の要望が共通して挙げられる. 次に影響力が強い要因として, グループ1は形状であるのに対し, グループ2は関連産

表一七 社会性 (E) データによる解析

項 (社会性)	グループ 1 (全データ)		グループ 2 (公務員等)	
	パラメータ	t 値	パラメータ	t 値
説明変数	パラメータ	t 値	パラメータ	t 値
夕ミ	-1.695	-1.12	-0.709	-0.40
色彩	0.495	0.98	0.065	0.09
形状	0.862	1.92	0.308	0.47
工事中の騒音	0.368	0.81	0.318	0.47
架設後の交通騒音	1.269	1.56	-0.073	-0.06
低周波公害	0.129	0.22	1.170	1.02
関連産業の育成	0.792	1.50	1.590	2.26
地域経済への波及効果	2.082	3.38	2.064	2.49
住民の要望	2.803	3.29	4.231	2.65
経年数	0.065	1.04	-0.029	-0.36
架橋本数	0.014	0.88	0.004	0.17
適中率 サンプル数	94.2 % 189		93.3 % 75	

表一八 技術力 (F) データによる解析

項 (技術力)	グループ 1 (全データ)		グループ 2 (公務員等)	
	パラメータ	t 値	パラメータ	t 値
説明変数	パラメータ	t 値	パラメータ	t 値
夕ミ	-0.458	-0.75	-1.317	-1.41
日本での技術レベル	1.485	4.12	1.126	2.05
日本での経験	0.160	0.47	-0.431	-0.76
設計の容易さ	-0.094	-0.36	0.239	0.68
設計の自由度	1.118	4.54	1.194	3.03
経年数	0.046	1.23	0.038	0.73
架橋本数	0.004	0.80	0.005	0.42
適中率 サンプル数	89.5 % 237		91.4 % 116	

業の育成となっている。グループ 2 において t 値が低く、グループ 1 において t 値が高い色彩、形状、架設後の交通騒音、経年数といった項目は、メーカーの技術者が影響大と考えている項目であり、逆に低周波公害、関連産業の育成といった項目はメーカーの技術者は影響を与えない要因と考えていることがわかる。適中率はいずれも高い。

表一八より、ケース F の技術力に関しては、グループ間の差はあまり見られず、設計の自由度、日本での技術レベルといった要因が影響を与えていることがわかる。適中率はいずれも高い。

個人属性である架橋本数は、経済性、施工性に影響を与えなかった。信頼性、社会性、技術力において、どちらかの橋を架設するとした場合は、やはり実際に携わった架橋本数の影響が避けられない。一方、経済性、施工性においては、架橋本数に関係なく比較的一般に言われている回答が得られていると思われる。

また、信頼性においては架橋本数の t 値がグループ 1, 2 でそれぞれ 1.15, 0.83 とあまり差がないものの、社会性、技術力においてはグループ 2 では非常に小さい t 値であるのに対し、メーカーを含めたグループ 1 においては t 値は 0.88, 0.80 大きくなっている。このことから、架橋本数が社会性や技術力に影響を与えるのは、メーカーの意見が強く反映されているからだと考えられる。

表一九 特性変数の決定と解析結果 (モデル 1)

項 説明	変数	第 1 段階		第 2 段階		第 3 段階	
		パラメータ	t 値	パラメータ	t 値	パラメータ	t 値
ミ	計	-2.120	1.90	1.810	2.30	1.934	3.00
経済性	上部工の建設費	-0.933	-2.40				
	下部工を含めた建設費	0.718	2.06	0.539	2.34	0.544	2.66
	維持管理費	-0.305	-0.76				
	大改修時の工費	0.251	0.69				
	総合的経済性	0.547	1.48	0.553	2.10	0.567	2.42
信頼性	材料	0.898	2.22	0.884	2.78	1.012	3.69
	工場管理	-0.097	-0.23				
	架設工事	0.295	0.67				
	耐震性	0.003	0.01				
	耐風性	0.462	1.32	0.513	1.88		
社会性	疲労	0.349	1.22	0.295	1.24		
	リフレッシュ等	0.446	1.18	0.138	0.47		
	主桁の腐食	0.227	0.67				
	総合的信頼性	-	-				
	基礎地盤への対応	-0.274	-1.04				
施工性	環境への対応	0.815	1.10	0.407	1.82		
	工事の容易さ	-0.199	-0.53				
	工期差	0.421	1.26	0.295	1.11		
	施工レベル	0.100	0.22				
	総合的施工程度	0.732	1.94	0.594	2.12	0.500	2.02
社会性	色彩	0.222	0.76				
	工事騒音	-0.018	-0.06				
	交通騒音	0.423	1.23	0.335	1.34		
	低周波公害	0.141	0.38				
	関連産業の育成	-0.527	-1.59				
技術力	地域経済への波及効果	0.358	1.17	0.218	0.81		
	住民の要望	1.044	2.79	1.125	3.35	1.168	4.18
	総合的社会性	0.260	0.60				
	日本での技術レベル	-0.367	-0.84				
	日本での経験	1.287	2.59	0.884	2.38	0.447	1.48
技術力	設計の容易さ	0.811	1.83	0.031	0.11		
	設計の自由度	0.520	1.67	0.606	2.51	0.745	3.51
	総合的技術力	-	-				
	経年数	0.023	0.55				
	架橋本数	0.027	2.25	0.026	2.25	0.033	2.67
適中率		92.7 %		92.1 %		89.1 %	

(3) 特性変数の決定 (要因の抽出)

モデル内の変数が多くなると有意にならない変数も増加するので、要因の数をできるだけ減らす必要がある。そこで、次のモデルを考えこの解析結果から t 値によって変数の是非を決定する試行錯誤的な方法により最終的な特性変数を決定することにした。

モデル 1 : 考えた全ての要因から総合的観点からの評価の項目を除いた 31 項目を採用

モデル 2 : 36 項目全て採用

モデル 3 : 経済性、信頼性など (B) ~ (F) データで重視されている要因を採用

各モデルとも 3 段階まで変数を削減していった。モデル 1, 2 においては、まず要因全てによる解析を行ったものが第 1 段階、そのうち t 値が 1.0 以下のものを変数から外して解析を行ったものが第 2 段階である。さらに t 値が 2.0 以下のものを変数から外し、変数の総数が数項目程度になるように減らしたものが第 3 段階である。モデル 3 においては表一四 ~ 表一八 の解析結果を第 1 段階として用いることにする。ここでは、各項目毎の解析結果を用いるため各変数の t 値が大きくなる。そこで第 2 段階から t 値が 2.0 以下のものを変数から除外して、モデル 1, 2 の第 3 段階と同様に解析を行った。モデル 1, 2, 3 の解析結果を表一九 ~ 表一一に示す。

モデル 3 は他の 2 つのモデルと少し性質が異なるの

表一10 特性変数の決定と解析結果 (モデル2)

項 目	説明変数	第1段階		第2段階		第3段階	
		パラメータ	t値	パラメータ	t値	パラメータ	t値
経済性	設計費	4.685	2.77	2.498	2.66	0.791	1.37
	上部工の建設費	-1.173	-2.20	0.613	2.30	0.564	2.53
	下部工を含めた建設費	-0.430	-0.67				
	維持管理費	-0.347	-0.65				
	大改修時の工費	0.752	1.51	0.516	1.92		
信頼性	総合的経済性	-0.205	-0.33				
	材料費	0.626	1.07	0.728	1.82		
	工場管理費	0.134	0.24				
	架設工事費	-0.018	-0.03				
	耐震性	-0.008	-0.02				
施工性	耐疲労性	1.155	2.04	0.376	1.30		
	リブ腐食性	0.630	1.38	0.327	1.16		
	主桁の信頼性	0.872	1.50	0.234	0.67		
	基礎地盤への対応	-0.378	-0.73				
	環境への容易	0.066	0.09				
社会性	基礎地盤への対応	-0.622	-1.53				
	環境への容易	0.016	0.04				
	工事の容易	-1.044	-1.66				
	工期差	1.203	2.20	0.498	1.52		
	技術レベル	-0.197	-0.27	-0.133	-0.34		
技術力	総合的施工程度	0.315	0.48				
	色彩	0.273	0.74				
	騒音	-0.165	-0.37	0.360	1.31		
	交通騒音	1.080	2.19				
	低周波公害	-0.205	-0.37				
適中率	低周波公害	-0.990	-2.12				
	関連産業の育成	0.303	0.67				
	地域経済への波及効果	0.756	1.34	0.657	1.80		
	住民の要望性	-1.782	-2.03				
	総合的社会的要因	2.777	3.14	1.299	3.34	1.638	5.16
適中率	日本での技術レベル	-1.541	-2.23				
	日本での経験	2.192	2.79	0.912	2.05	0.688	2.01
	設計の容易さ	0.706	1.14	0.174	0.55		
	設計の自由度	0.344	0.75				
	総合的技術力	2.842	3.27	1.908	3.96	2.031	5.45
適中率	経年本数	0.037	0.62				
	架橋本数	0.059	2.85	0.048	3.05	0.069	4.46
適中率		95.7%		94.0%		92.1%	

表一11 特性変数の決定と解析結果 (モデル3)

項 目	説明変数	第1段階		第2段階		第3段階	
		パラメータ	t値	パラメータ	t値	パラメータ	t値
経済性	設計費	0.176	0.72	0.525	0.69	1.694	3.45
	上部工の建設費	0.476	1.77				
	下部工を含めた建設費	1.791	5.17	0.272	1.14		
	維持管理費	2.072	5.49	0.446	1.55		
	大改修時の工費	1.299	4.03	0.598	2.27	0.573	2.56
信頼性	総合的経済性	-	-				
	材料費	1.359	3.35	0.772	2.58	0.939	3.47
	工場管理費	0.691	1.51				
	架設工事費	0.521	1.20				
	耐震性	0.975	2.62	0.094	0.34		
施工性	耐疲労性	0.735	1.64				
	リブ腐食性	1.322	2.96	0.355	1.60		
	主桁の信頼性	0.744	1.82				
	基礎地盤への対応	0.773	2.01	0.389	1.56		
	環境への容易	-	-				
社会性	基礎地盤への対応	0.648	1.83				
	環境への容易	0.495	1.26				
	工事の容易	1.153	3.30	0.156	0.55		
	工期差	0.736	2.14	0.184	0.70		
	技術レベル	0.323	0.71				
技術力	総合的施工程度	1.555	2.90	0.730	2.40	0.660	2.75
	色彩	0.495	0.98				
	騒音	0.862	1.92				
	交通騒音	0.368	0.81				
	低周波公害	1.269	1.56				
適中率	低周波公害	0.129	0.22				
	関連産業の育成	0.792	1.50				
	地域経済への波及効果	2.082	3.38	0.941	3.23	1.063	4.09
	住民の要望性	2.803	3.29	0.191	0.57		
	総合的社会的要因	-	-				
適中率	日本での技術レベル	1.485	4.12	0.090	0.24		
	日本での経験	0.160	0.47				
	設計の容易さ	-0.094	-0.36				
	設計の自由度	1.118	4.54	0.599	2.61	0.745	3.62
	総合的技術力	-	-				
適中率	経年本数	-	-	0.015	0.43		
	架橋本数	-	-	0.027	2.28	0.036	2.89
適中率		-		92.4%		88.1%	

で、モデル1と2を比較してみると、経済性と信頼性は第2段階まで同じ変数が決定されているが、第3段階では、モデル1では上部工の建設費、大改修時の工費、材料の信頼性が変数となり、モデル2では上部工の建設費が挙がっている。施工性においては、モデル1では技術レベルが主要因となるのに対し、モデル2ではt値はいずれも低く要因としては残らない。社会性は、モデル1では地域経済への波及効果が残る、モデル2では総合的社会性が要因として残っている。技術力においては、モデル1では日本での経験、設計の自由度が、モデル2では日本での経験、総合的技術力が主要因となっている。モデル2においては、表一3で示した総合的観点のデータのみを用いた解析で最も説明力の大きかった総合的社会性と総合的技術力が高いパラメータ値を示しており、総合的判断も重要な要因であるといえる。

また、総合的観点からのデータを入れれないという点ではモデル1と3は同じであると考え、これらを比較すると、大改修時の工費、材料の信頼性、技術レベル、地域経済への波及効果、設計の自由度といった項目が共通な変数として残っており、t値も高いことがわかる。また、架橋本数はどのモデルにおいても影響を与える要因であることがわかる。モデルの適合性については、適中率はどのモデルも高く問題は無い。中でもモデル2の適中率は92.1%と最も高い。ダミーの値に注目するとモ

デル1、3ではダミーのt値が他の特性変数のt値と同程度の値を示すのに対し、モデル2のダミーは他の特性変数と比べて低く、モデルの中で最も小さな値をとることから、決定した特性変数が良くモデルを反映していることが伺える。

5. 選択確率の予測

パラメータ値の推定を行い、適中率も非常に高く、信頼性のあるモデルであることが確認されたところで、非集計の最大の特徴である選択確率の予測を行う。現状での橋式選択確率は、PC斜張橋38.7%、鋼斜張橋61.3%となり、鋼斜張橋の方が優位である。そこで現状をレベル0とし（これは、鋼橋とPC橋が現段階で同レベルというのではなく、どちらが優位であっても現状をレベル0とする。）、今後PC橋の架設本数が増加し、経験をつむとPC橋のレベルは上がり、現在のPC斜張橋の選択確率38.7%がどのようになるかを予測することは、非常に興味深い。

「レベル1」がどれ程の重みであるか、定義しにくいところではあるが、先述したとおり、非集計ロジックモデルでは効用差を用いているため、アンケート調査の1目盛分、すなわち「レベル1上がる」というのは、例えば、「鋼橋がかなり優位」→「鋼橋がやや優位」に変化した、あるいは「同じ」→「PC橋がやや優位」に変化

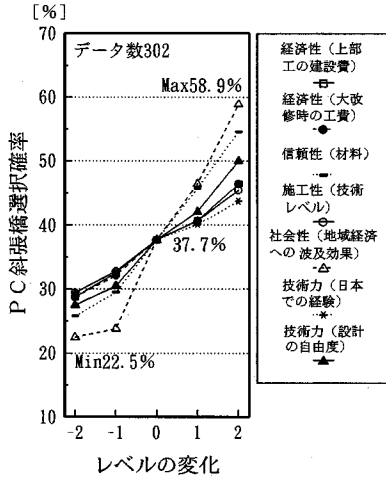


図-8 選択確率の予測 (モデル1)

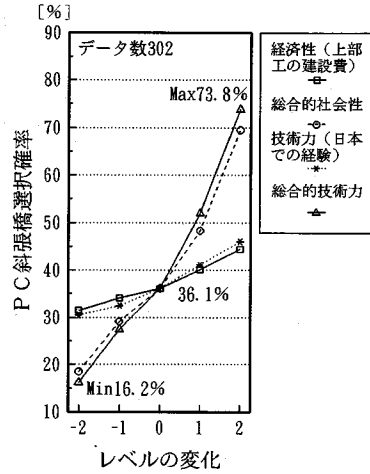


図-9 選択確率の予測 (モデル2)

した、と考えればよい。

そこで、各特性変数のレベルを-2 (鋼橋がかなり優位) から2 (PC橋がかなり優位) まで変化させて選択確率の予測を行ってみた。

モデル1, 2, 3の最終段階の要因を用いて選択確率の予測を行ったものを図-8~図-10に示す。レベルを-2から2まで変化させたときの、PC斜張橋選択確率の変動を上位2項目について見てみると、モデル1では地域経済への波及効果、材料の信頼性、モデル2では総合的技術力、総合的社会性、モデル3では地域経済への波及効果、材料の信頼性となる。ここでモデル1, 3は総合的観点の項目を除外したモデルであり、要因の上位項目と順序が一致している。また、モデル2は総合的観点を含むモデルであり、総合的項目の変動が他の項目と比べて大きいことがわかる。これは、効用関数の特定化を線形で行ったために、パラメータ値の大きい要因ほど選択確率の変動が大きくなることから説明できる。次に各モデル毎の特徴を見てみると、適中率が最も高いモデル2では、PC橋の総合的技術力、総合的社会性が現状より「レベル2」向上するとPC橋の選択確率が70%程度となる結果が得られた。ここで、レベル0の場合は本来ならば、実際のPC橋の選択確率38.7%になるはずであるが、予測モデルでは36.1%となっている。これは、実際の選択結果と予測モデルにより推定されたそれとの適中率による相違と考えられる。

モデル1, 3では、地域経済への波及効果、材料の信頼性が「レベル2」向上するとPC橋の選択確率が50%を超えることがわかる。また逆に経済性は、モデル1, 2, 3ともレベルの変化に鈍感であり、経済性重視という従来の考え方に変化が起きていることが伺える。

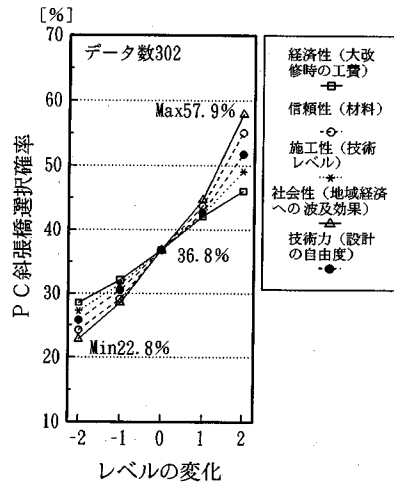


図-10 選択確率の予測 (モデル3)

逆に鋼橋の方が現状より「レベル2」向上すると、どのモデルで予測してもPC橋の選択確率は30%以下になることも分かる。

6. あとがき

本研究では、スパン250m程度の斜張橋を例にとり、鋼橋、PC橋双方の橋式選定に関して、現在どのような点が重視されており、今後どのような方面の研究開発を進める必要があるかを明らかにするため、非集計ロジットモデルの理論を適用し、競争状況にある両者を同一基準で評価した。そして得られた*t*値から影響力のある要因を抽出し橋式選択確率の予測を行った。なおアンケート調査は、本来ならば無作為標本抽出でなければならないが、アンケートの内容が専門的かつ高度であるため、かなりの経験を有する技術者に回答してもらった。以下

に、本研究で得られた結論を列記する。

- 1) 総合的観点のうち橋梁形式の選択に大きく影響を与えているのは総合的技術力、総合的社会性である。
- 2) PC橋、鋼橋の選択行動にはメーカー、架橋本数といった要因が高い値を示しており、職業意識は免れない。
- 3) 経済性の中で特に影響を及ぼす項目は、上部工の建設費と大改修時の工費である。
- 4) 信頼性の中で特に影響を及ぼす項目は、材料である。
- 5) 施工性の中で特に影響を及ぼす項目は、技術レベルである。
- 6) 社会性の中で特に影響を及ぼす項目は、総合的社会性と地域経済への波及効果である。
- 7) 技術力の中で特に影響を及ぼす項目は、総合的技術力と設計の自由度と日本での経験である。
- 8) 特性変数の決定においては、総合的評価を含む36項目全ての要因から t 値検定により項目を決定していく方法がモデルの適合性が高いといえる。
- 9) 選択確率の予測では、PC橋の総合的技術力と総合的社会性が現状より「レベル2」向上すれば、PC橋の選択確率が70%程度となることから総合的な技術力や社会性への取り組みが重要といえる。また、総合的観点を除いて考えた場合、地域経済への波及効果、材料の信頼性が「レベル2」向上するとPC橋の選択確率が50%を超えることがわかる。特に、材料の信頼性については今後の技術開発によるところが多く期待される要因である。一方、経済性はレベルの変化に鈍感であり従来の経済性重視という考え方に変化が起きていると考えられる。要因抽出により得られた非集計ロジットモデルは、斜張橋の橋式選定において将来の需要予測として利用できる。本来この予測モデルは、鋼橋かPC橋かの2項選択モデルであり、複合斜張橋等その他の橋梁形式

については再度システムを構築する必要がある。

また、非集計ロジットモデルは、個人ごとの行動を予測すべく構成されているが、すべての個人についての特性変数の将来値を得ることは困難である。そこで、個人データをそのまま用いてモデル化し、このモデルに対する特性変数の将来値を効用差として-2から2まで変化させることにより予測している。したがってモデルそのものは非集計であるが、予測に際して集計化を行っている。これは、いわゆる「非集計の集計化」という問題であり、近似的に求めた集計値と将来の厳密値との間に集計誤差が生じるが、実用上は問題ないと考えられる。

本研究を行うにあたり、アンケートに回答して下さった方々に厚く感謝を表します。

参考文献

- 1) 日本橋梁建設協会：橋梁年鑑，1992年，1993年。
- 2) 太田勝敏・原田 昇：非集計モデルとその応用（1），交通工学，Vol. 17，No. 5，pp. 45-50，1982年8月。
- 3) 太田勝敏・原田 昇：非集計モデルとその応用（2），交通工学，Vol. 17，No. 6，pp. 48-57，1982年10月。
- 4) 森杉寿芳・岩瀬 広：住宅立地行動の予測と主環境の便益評価の統合手法の提案，土木計画学研究・論文集，No. 1，pp. 131-138，1984年1月。
- 5) 五十嵐日出夫：土木計画数理，朝倉書店，1983年。
- 6) 土木学会土木計画学研究委員会編：土木計画学講習会テキスト，No. 15，非集計モデルの理論と実際，1984年11月。
- 7) 篠原洋司・稲葉紀昭：橋梁の計画と管理，土木学会，新体系土木工学，No. 40，1987年。
- 8) 鈴江和好・近藤光男・青山吉隆：非集計ロジットモデルによる明石海峡大橋開通後の交通機関選択特性の分析，第44回土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集，pp. 518-519，1992年5月。
- 9) 原田 昇：非集計行動モデルによる多次元選択行動の分析，土木計画学研究・論文集，No. 4，pp. 15-27，1986年10月。
- 10) 田村 享：地方中小都市における自家用車選択構造の分析，土木計画学研究・論文集，Vol. 1，pp. 19-26，1984年1月。

(1994.1.10受付)

A STUDY ON THE SELECTION OF STEEL OR PRESTRESSED CONCRETE CABLE STAYED BRIDGE BY USING DISAGGREGATE BEHAVIORAL MODEL

Yoshinori ARAKI, Hitoshi FURUTA, Eriko MAEDA and Kohei FURUKAWA

A questionnaire survey was carried out regarding the form of bridge of steel or prestressed concrete cable stayed bridge with a span about 250 meters long. By applying a theory of disaggregate behavioral model, both were evaluated with the same standard for competition. What kind of point is important in the selection of the present bridge form and what is the prediction of change for the selection probability in the future were studied. From the analysis, we could determine the need to promote research development in any problematic area.