

# 橋梁設計者の橋梁認知プロトタイプを 抽出する認知科学的実験方法の提案

石井 信行<sup>1</sup>・高橋 朗浩<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 博士(工学) 山梨大学大学院医学工学総合研究部社会システム工学系  
(〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11, E-mail:nobur32@yamanashi.ac.jp)

<sup>2</sup>非会員 山梨大学大学院医学工学総合教育部土木環境工学専攻  
(〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11, E-mail:g09mc006@yamanashi.ac.jp)

著者の一人は、優れた橋梁デザイナーが有する橋梁に関する情報が彼らの作品に特徴を与えていると考え、その情報を説明する理論として「構造物力動性認知モデル」を提案した。本論文では、このモデルに基づく、個人の橋梁認知プロトタイプを特定する方法について、先行研究の複雑な分析方法を改善した簡略な特定方法を構築することを目的とし、新たな方法を用いて中堅橋梁設計者に実験を行い、そのデータを分析、考察した。その結果、先行研究の問題点であった個人が有するプロトタイプの特定方法の複雑さが解決され、実際に先行研究と同等の橋梁認知プロトタイプを抽出できることを検証し、汎用性の高い方法論を確立できたことを示した。

**Key Words :** *Structure design, Cognitive science, Prototype, Psychological experiment*

## 1. はじめに

2008年度、国内初の橋梁を対象にした国際コンペが行われ、海外6カ国の7点を含む29作品の応募があった。世界的に橋梁コンペは珍しくないが、日本でこのような動きが見られたことは、今後の日本の橋梁分野においてもますます橋梁技術者のデザイン力が問われるようになるということを示している。

橋梁デザインに関する分野においては、加藤誠平を代表とする周囲の景観との情緒的調和に関する研究<sup>1)</sup>や、杉山和雄を始めとする図像や形態と力学的イメージに関する研究<sup>2)</sup>、近田康夫等を始めとする感性工学に基づく研究<sup>3)</sup>、また久保田善明等による橋梁の姿形を定量的に分類する試み<sup>4)</sup>は行われているが、人が構造物を認知するメカニズムに着目して構造に関する理解と心的なイメージを関連付けた研究は見当たらない。

著者等の一人は、構造物の視覚情報から力や動きのイメージが形成されると仮定した構造物力動性認知モデルを提案した<sup>5)</sup>。このモデルは橋梁のような構造物を目にした際の認知を、物としての理解(「橋である」「物を渡す」)、構造力学といったシステムの理解の組合せによって、個人個人の捉え方が異なっていること、またその捉え方で力や動きのイメージが形成される可能性について説明を試みた。これは個人が脳に抽象化された状態で保持している事物に対する認識(プロトタイプ)と対

象物を照合するという、認知科学におけるモデルに基づいている。

著者等の一人は、構造物力動性モデルの妥当性を検証するために、先行研究(2004)<sup>6)</sup>で視覚実験を行い、吊橋、斜張橋、アーチ橋の認知プロトタイプの存在を論理的に説明し、その後先行研究(2007)<sup>7)</sup>でアーチ橋において具体的な橋梁認知プロトタイプを特定した。これまでの一連の研究の目的の一つは、優れていると社会的に評価されている、橋梁デザイナーが有するプロトタイプの特徴を抽出し、彼らの作品にみられる特徴との関連性を分析し、さらに彼らが受けた教育や訓練との関連付けを行うことにより、橋梁設計者のデザイン力を高めるための方法論を提案することである。また一つの目的は、橋梁設計者教育において各自の橋梁に関する理解を客観的に確認するツールを提供することである。さらに、両者を組み合わせると、優れた橋梁デザイナーとの比較も可能となる。

先行研究(2007)では論理的に欠落の無い構成にすることを目標としたために、橋梁認知プロトタイプを特定するために実験、分析に時間と手間を要する方法論となった。今後橋梁認知プロトタイプを上にしたような教育・実務に生かすためには、容易に橋梁認知プロトタイプを特定する方法論を確立することが必要であると考えられる。そうならば、被験者に対する負担が現状と同じか少なくなくて、より多くの橋梁形式を実験できることから、被

験者の橋梁技術者としての特徴を総合的に示すことができるようになり、多くの場合極めて多忙な優れた橋梁エンジニアを対象に実験を依頼することが可能になる。

## 2. 目的・対象・研究手順

本論文では、「構造物力動性認知モデル」に基づく、個人が有する橋梁認知プロトタイプを特定する方法について、複雑であった著者等の先行研究(2007)の分析方法を改善した簡略な特定方法を提案し、その方法により実際に先行研究(2007)と同等の橋梁認知プロトタイプを抽出できることを検証することを目的とする。

対象とする橋梁形式はアーチ系とし、被験者は中堅橋梁設計者とする。橋梁形式をアーチ系とするのは、先行研究(2007)で橋梁認知プロトタイプの抽出内容を具体的に説明できているためである。また従来になかった橋梁形式を刺激試料として与えた場合、被験者の内でさらに異なる属性にわけて分析する手間が生じ、本研究の目的であるプロトタイプの特定方法の確立が煩雑となる。そのため本研究では広く橋梁設計者のプロトタイプの喚起が期待できる基本形式のみを扱うことにする。

本研究は次の手順で進められている。

- ① 先行研究(2007)の問題の分析と要因の抽出
- ② 要因の除去、または低減(提示・回答方法)
- ③ 改善された提示・回答方法に基づく分析方法の提案
- ④ 橋梁設計者に対して、新たな特定方法を用いた視覚心理学実験を実施
- ⑤ 実験結果から橋梁認知プロトタイプを特定
- ⑥ 先行研究(2007)と対照し、新たな特定方法により問題が改善されたかを検証

## 3. 橋梁認知プロトタイプ特定方法

ここでは紙面の都合上、先行研究(2007)で用いた特定方法を割愛し、今回用いた特定方法を示し、その後で、前回からの変更点とその理由を示す。

### (1) 認知プロトタイプ

先行研究(2007)の「構造物力動性認知モデル」では、構造物の認識、構造システムの認識の組合せにより次の3種類のプロトタイプが仮定されている。構造物の認識とは構造物の目的・意味、機能を理解していることであり、構造システムの認識とは、構造物の力学的関係を理解していることを意味している。

#### a) 物システムプロトタイプ

対象とする構造物とその構造システムを認識している。

#### b) 物プロトタイプ

対象とする構造物は認識しているが、構造システムは認識していない。

#### c) システムプロトタイプ

対象とする構造システムは認識しているが、構造物は認識していない。

モデルの認知過程においては、視覚情報を受容し、橋梁形式の同定が試みられる。本研究では、橋梁の形態的特徴を手掛かりとして同定する場合を物プロトタイプによる認知、形態的特徴に加えて力学的理解や安定な物として解釈といった橋梁構造の理解によって同定が試みられる場合を物システムプロトタイプによる認知として扱う。なお本研究において橋梁技術者が橋梁図形を橋であると理解ができない可能性は極めて低いことからシステムプロトタイプによる認知は扱わないこととする。

## (2) 実験方法

### a) 内容

被験者に提示した橋梁図形の橋梁形式を認知させ回答させる視覚心理学的実験とする。

### b) データ

認知に要する時間(以下、反応時間)と、認知の結果(以下、形式判断)および判断の基準となった構造要素(以下、判断要素)をデータとして得る。ここでの認知は直接橋梁形式の名称等を回答させても被験者のプロトタイプの内容が分からないので刺激試料を基本図形と同定、基本図形以外と同定、及び同定不可のいずれかを選択することとする。また基本図形以外と同定を選択した場合、被験者に判断基準となった要素を指摘させる。

### c) 刺激

視覚試料として構造要素の形態を操作し、その組合せによって橋梁図形を作成する。その画面構成は2行2列に均等に4分割した画面の左上に橋梁図形の全景、左下、右上下には形態操作した構造要素の拡大図を表示する。

## (3) 実験方法に関する変更点

先行研究(2007)は認知プロトタイプが喚起されない可能性を残した実験方法であったため再構築する必要があり具体的に次の4点を変更した。

### a) 基本図形

先行研究(2007)では常に一定の視線入射角で提示していたが、視覚心理学的実験において基本図形を同一構図で提示することは記憶を促す可能性があるため、その効果を低減する目的で、次頁の図-1に示すように基本

図形の視線入射角にランダムなバリエーションを与えた。

また「基本図形→ブランク→刺激試料」という提示順序において基本図形が長く提示された場合、図像として記憶し、刺激試料と照合する可能性がある。これではプロトタイプへの喚起なしで同定が試みられてしまう可能性があるため、先行研究(2007)より基本図形の提示時間を可能な限り短縮した。橋梁形式の認知が可能であることを条件とし、事前に山梨大学土木学科の学生に実験を行い、実験プログラムの最小時間である0.1秒と決定した。

変更前



変更後

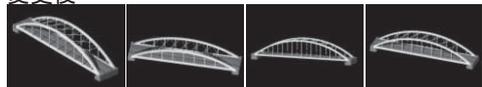
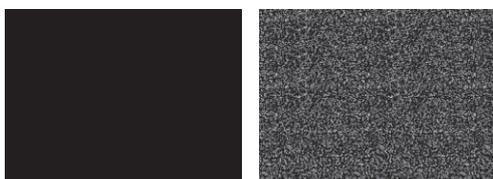


図-1 基本図形の視線入射角にバリエーションをつけた

#### b) ブランク

先行研究(2007)では黒のブランク画面を用いていたが基本図形が白ベースで作成されているため図像が網膜上に残りやすい。よって黒のブランク画面より網膜上に図像が残りにくいと期待できるノイズ画面(図-2)を採用した。



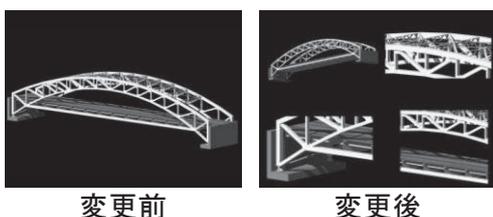
変更前(黒)

変更後(ノイズ)

図-2 ブランク画面の変更

#### c) 刺激試料

先行研究(2007)では刺激試料が基本図形と同じ、または鏡像の関係で提示されているため図像記憶によって照合しやすい。そこで本研究では図像記憶を防ぐため基本図形と異なる画面構成とした。判断の基準になりうる形態操作した構造要素を視覚情報として与えること、橋梁形式の認知を妨害しないことを考慮して橋梁の全景と形態操作した構造要素の拡大図を画面に映し出す構成とした(図-3)。



変更前

変更後

図-3 刺激試料の変更

また事前に刺激試料に不都合がないか検証するため予備実験とアンケートを行い、本研究で用いる刺激試料を決定した。

#### d) 判断要素

先行研究(2007)では橋梁図形を構成する構造要素の組合せによって同定内容が異なることから、構造要素によって認識の違いがあることが確認された。しかしながらその違いに関して具体的に説明できていないため、被験者が「異なる橋梁形式」と回答した後、その回答する要因となった構造要素を直接指摘してもらうプログラム仕様にした。

#### (4) 分析方法

視覚心理実験から得られる反応時間(以下、実測値)と形式判断を分析するのだが、既存研究<sup>8)</sup>と先行研究(2007)の実験結果を吟味すると実験の経過時間に伴い認知の促進・妨害といった、それ以前の試行の影響を受けている「慣れ」の現象が起きている可能性が考えられる。そのため分析手順として慣れの影響を除去した処理反応時間を求める必要がある。その後、処理反応時間と形式判断によって橋梁認知プロトタイプの抽出を試みる。

また橋梁認知プロトタイプを容易に特定するため分析の作業をシステム化することが望ましい。そこで数値計算ソフト(Microsoft Office Excel 2007)を用いてシステム化された分析プログラムを構築し、分析の手間を低減する。

#### a) 外れ値の除去

慣れの傾向から離れた値(以下、外れ値)は慣れの影響が小さいデータと考えられるため、慣れの有無を判断する分析から取り除く必要がある。本研究の外れ値とは慣れの傾向から離れた値であり、実測値の大きさでなく慣れの傾向と実測値の差の大きさを意味している。

そこで画像処理やコンピュータビジョンの分野において用いられているロバスト推定法<sup>9)</sup>により、全体から離れているデータを不備のあるデータとして影響を低減させることにした。これは回帰モデルのパラメータを重みつき最小二乗法によって推定することで外れ値の影響が考慮されるものである。

またロバスト推定法による理論値と実測値の差の大きさから外れ値を特定するため、グラブス検定<sup>10)</sup>を用いて相対的に離れた値を統計的に決定する。

またいくつかの外れ値が抽出された場合、それらの中で推定した回帰モデルとは別の慣れの影響が存在する可能性がある。外れ値として抽出されたデータ数が標本数の20%以上である場合は外れ値として抽出されたデータ群に別の慣れの影響が存在しないか検討する。なお、先

先行研究 (2007) のデータを吟味すると外れ値として抽出されたデータ数は標本数の20%未満である。

#### b) 慣れの影響

慣れが実測値に及ぼす影響として、経過時間に伴い実測値が単調増加・減少傾向の分布を示す可能性が高いと考えられる。そのため分布から慣れを推定するモデルとして線形、対数、指数回帰による推定が妥当であると考えた。

3モデルの中から最適なモデルの選択を統計的に説明するためAICを用いた検定を行う。AICは、異なるモデルの善し悪しを、尤度に基づく客観的な基準によって比較するもので、AICの最小な値のモデルが最適であるとして表すことができる<sup>11)</sup>。

次に推定した回帰モデルの理論値が実測値を十分に説明できているか検定するため単回帰分析を行う。有意水準5%で棄却され、回帰モデルが慣れの推定として妥当であるか検討する。そして慣れの影響を除去するため、(1)に示す式に従い、最も先行するデータは慣れの影響が小さいと仮定すると、後続の理論値 ( $T_n$ ) と先行する理論値 ( $T_0$ ) の差が慣れの影響に相当し、その差の値を実測値 ( $t_n$ ) から引くことで慣れの影響を除去した処理反応時間 ( $RT_n$ ) として扱うことができると考えられる。

$$RT_n = t_n + (T_0 - T_n) \quad (1)$$

上で述べた、被験者の実測値から慣れの影響を除去する分析フローを図-4に示す。

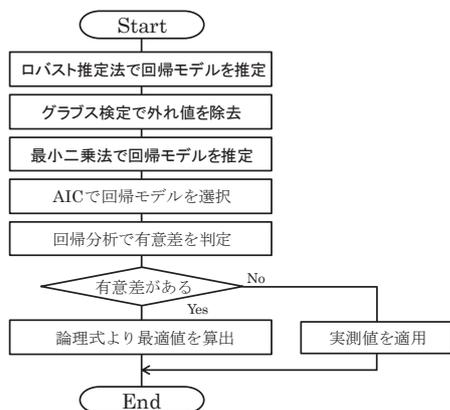


図-4 慣れの影響を除去するフローチャート

#### c) 認知に要する時間 (反応時間)

既存研究<sup>12)</sup> から人が物を目にした時点で物の形を認知し、その物に関する情報の理解が開始されると説明されており、本研究の実験条件においては物プロトタイプ (事物の形態認知により形成された情報) による照合の後、物システムプロトタイプ (事物の理解により形成された情報) の照合が試みられると解釈できる。

先行研究 (2007) の実験結果では、反応時間が刺激試料によって変化し、特徴的な長短を示すデータも存在している。

そこで本研究では反応時間が短いデータは物プロトタイプによる照合、長いデータは物システムプロトタイプによる照合が行われているとして関連付ける。また物システムプロトタイプによる照合では視覚刺激から受容される情報を基に、被験者自身が有している情報の入れ替え・組合せといった処理により事物が理解される場合には、同定が試みられる過程で新たなプロトタイプが形成されている可能性がある。

#### d) 認知の結果 (形式判断)

先行研究 (2007) では、主要素を形式判断において相対的上位に位置し、かつ無視することができない要素と定義し、主要素より形式判断において相対的に位置が低い場合、他の要素と関係が統合され認知される場合もあるが無視される場合もある要素を準要素と定義した。そして刺激試料に対する反応時間・回答の差異と刺激試料を構成する構造要素の組み合わせを比較することで、注目している構造要素を主要素、準要素または影響が無い要素のいずれかに位置付けた。

本研究では、これらの定義を再検討して3つの階層を定義した。

##### ・1次要素

本要素は、橋梁形式の認知に必ず影響を与える要素であるため、常に認知の結果に寄与する。

##### ・2次要素

本要素は、橋梁形式の認知に影響を与える場合と、与えない場合があるため、認知の結果に寄与する可能性を有する。

##### ・3次要素

本要素は、橋梁形式の認知に影響を与えない要素であるため、常に認知の結果に寄与しない。

## 4. 視覚心理学的実験

### (1) 被験者

#### a) 被験者数の設定

「構造物力動性認知モデル」に基づく橋梁認知プロトタイプは個人で異なるので、個人の橋梁プロトタイプを抽出することが目的である本研究では統計的な検定を行うことはしない。したがって、先行研究 (2007) と対照することを考慮しながら、被験者数は時間の制約の中で可能な人数とした。

#### b) 内訳

- ・A社：建設コンサルタント：4名 (男性)

- ・B社：建設コンサルタント：4名(男性)
  - ・C社：建設コンサルタント：4名(男性)
  - ・D社：建設コンサルタント：4名(男性)
  - ・E社：建設コンサルタント：5名(男性)
- 合計21名(全て設計業務に従事)

#### c) 被験者の選定条件

被験者が橋梁のプロトタイプを必ず有していることを前提とした視覚実験であるため、複数の橋梁の設計を経験している橋梁設計者を対象と定め、各社には中堅技術者以上と依頼した。実際には実務経験については3年から20年であり、3年目の被験者もアンケートで複数の橋梁形式の設計経験を有していることを確認している。また視力については裸眼または眼鏡・コンタクトレンズ装着で0.5以上が7名、1.0以上が11名、1.5以上が3名という内訳であった。尚、本研究の目的はプロトタイプの特定期間の確立であるため被験者の経験(実務年数や業務内容など)の違いによる分析は扱わない。

#### d) 性別

性別に関しては先行研究において特別な差が表れなかったため、今回は考慮しないこととした。(実際には全て男性。)

### (2) 実験装置と配置

#### a) 実験装置

パソコン：FMV-BIBLO NB55A

反応測定ソフト：「実験プログラム experiment」

山梨大学大学院医学工学総合研究部

コンピュータ・メディア工学専攻

木下 雄一朗 助教 作成

#### b) 配置

実験装置と被験者の配置は次の3点が考慮されている。

- ・被験者の前に机を設置し、その上に実験者のノートパソコンとPCキーボードを配置し、ノートパソコンのディスプレイに実験試料を表示する。
- ・被験者はノートパソコンに表示した画面の幅(0.32m)が視角40度になる位置に画面中心に対する視線が俯角8~10度になるように、ノートパソコンに正対して着座してもらう(被験者とディスプレイの距離は0.4~0.5mの間で調整)。
- ・PCキーボード上の矢印キー(←, ↓, →)を回答ボタンとする。今回の実験では、判断のしやすさを考慮して矢印キーの上には←印キーには「○」、↓印キーには「×」、→印キーには「?」の台紙を貼り付けた。

また、X(エックス)キーには「修正」、スペースキーには「マーク終了」の台紙を貼り付け、その他の使用しないキーは誤って押さないように覆った。

### (3) 実験の流れ

本実験は被験者1人に対して次の流れで行った。

- ① 視力の確認
- ② 教示と手順の説明
- ③ 練習実験と質問受付
- ④ 本実験
- ⑤ アンケート

### (4) 実験の手順

実験は次の手順①~⑦を1セットとして行った。

- ① 被験者に提示番号を0.5秒間提示する。
- ② 被験者にブランクを0.5秒間提示する。
- ③ 被験者に基本図形を0.1秒間提示する。
- ④ 被験者にブランクを0.5秒間提示する。
- ⑤ 刺激試料を提示し、その提示された図形が、「基本図形と同じ橋梁形式である(○)」か「異なる橋梁形式である(×)」, または「どの橋梁形式に属するかわからない(?)」と判断した時点で、それぞれに対応するキーボード上の対応するキーを押してもらう。キーが押されず10秒が経過(時間切れ)した場合、また「基本図形と同じ橋梁形式である(○)」や「どの橋梁形式に属するかわからない(?)」に対応するキーを押した場合、自動的に⑦へ移行する。
- ⑥ ⑤で「異なる橋梁形式である(×)」と判断した場合のみ、マウスを使用して判別の基準となった要素を指摘してもらう。終了後、指定のキーを押してもらう。
- ⑦ 被験者にブランクを0.5秒間提示した後、次の提示番号を提示する。

①~⑦の過程をディスプレイ表示で48セット連続で行う。

### (5) 教示と手順の説明

印刷した資料を用いて教示を行ない、その後で質問を受け付けた。その際、被験者に実験の意図が読み取られないように注意をした。教示内容は次の通り。

「これから始まる実験は、はじめに数字が提示されます。この数字は提示番号です。次にある橋梁形式の図形が0.1秒間提示されます。これを基本図形と定義します。次に同じくある橋梁形式の図形が提示されます。その提示された橋梁図形を試料図形と定義します。ここで試料図形について説明させていただきます。試料図形は大きく4つの図で構成されています。1つは橋梁図形の全体像が映し出されている図です。残りの3つは全体像と同様の橋梁図形のある箇所を拡大させた図で構成されています。この試料図形が基本図形と同じ橋梁形式に属すると

判断した場合には『○ボタン』を、基本図形とは異なる橋梁形式に属すると判断した場合には『×ボタン』を、どの橋梁形式であるか判断できない場合は『?ボタン』をあなたが判断した時点で押してください。以上のことが1つのセットとなっております。ただし10秒経過すると自動的に次のセットに進みます。基本図形とは異なる橋梁形式に属すると判断した場合には、マウスを使用して判別の基準となった要素を囲んでください。終了しましたら『マーク終了ボタン』を押してください。これをディスプレイで48セット行います。」

## (6) 練習実験と質問受付

実験操作を確認してもらうため本実験では提示しない試料図形を使用して3セットの練習実験を行った。その後、質問を受け付けた。

## (7) 図形の作成

CAD ソフト (Auto CAD 2002) で3次元図形を作成し、陰線処理を行った後に、JPEG形式で保存した。さらに試料図形は、4つの図を1つの図に保存可能なソフト (Microsoft Office PowerPoint 2007) を使用して、JPEG形式で保存した。

## (8) 基本図形

### a) 橋梁形式

基本的な3つの下路アーチ系形式である、ランガー桁橋、ローゼ桁橋、ブレースドリブタイトアーチ橋を基本図形とした。基本図形に3形式のバリエーションを設けた理由は、1つの基本図形を繰り返し提示した場合、刺激試料の作図パターンが被験者に推測されやすくなること、基本図形の図像記憶による情報が増大する可能性があることを回避するためである。

### b) 視線入射角

1形式においてランダムに変化を持たせながら可能な限り全て異なる視線入射角とした。但し、橋梁形式が認知できない、また形態操作した構造要素が認知できない視線入射角は用いていない。

## (9) 刺激試料

### a) バリエーションの作成方法

基本図形 (ランガー桁橋、ローゼ桁橋、ブレースドリブタイトアーチ橋) をベースに構造要素の形態を操作した。

### b) 形態操作の対象となる構造要素

先行研究 (2007) において3種類の構造要素が判別の基準になる可能性が高いと示されたため、本研究でも同様の構造要素に形態操作を行う。各構造要素の形態操作を

次の操作要素略記号によって示すことにする。

- アーチリブ軸線 : A
- 基本構造 : B
- 吊材 (斜め) : C1
- 吊材 (鉛直と斜め) : C2
- 吊材 (無し) : C3

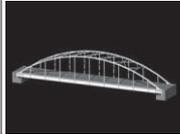
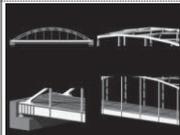
橋梁形式	ランガー桁橋 : la	ローゼ桁橋 : lo	ブレースドリブタイトアーチ橋 : br
基本図形			
判断要素	アーチリブ軸線 : A	基本構造 : B	吊材 (斜め) : C1 吊材 (鉛直と斜め) : C2 吊材 (無し) : C3
パターン別	la, base(操作無)	lo, A+C3	br, B+C1
刺激試料			

図-5 基本図形と刺激試料の例

また具体的な構造要素と変化のさせ方は次の通りである。括弧内に各構造要素のバリエーションを示す。

### ① アーチリブの軸線 (円, 三角)

輪郭線を構成する要素であり、形態知覚、図と地の関係において重要な役割を果たすと考えられる。

### ② 基本構造 (補剛桁構造, アーチ構造)

桁とアーチリブとの結合の有無であり、既存研究<sup>13)</sup>では視線誘引箇所として抽出されている。

### ③ 吊材の配置 (鉛直, 斜め, 鉛直と斜め, 無し)

水平成分が卓越する橋梁形態の中で、鉛直成分が卓越する要素であり、実際の橋梁においてもバリエーションがある。

### c) 画面構成

基本図形の図像記憶における単純照合を防ぐため刺激試料は異なる画面構成にする必要がある。橋梁形式の認知が可能であること、形態操作した各構造要素の認知が可能であることを考慮して画面構成を決定した。

画面構成の視線入射角を決定するにあたり次の2点を考慮した。

- 橋梁の全体像は基本図形と同じ視線入射角でないこと、各セットで基本図形と全体像の角度差の違いによる影響を含ませないことを考慮して一定の角度差 (視線入射角 $\pm 30^\circ$ , 俯角 $\pm 30^\circ$ ) で変化をつけた。
- 3つの構造要素の拡大図は手前と奥の吊材が重ならず3次元形態が把握しやすいことを考慮して視線入射角 $50^\circ$ , 俯角 $10^\circ$ に決定した。

また予備実験を行い認知に不利な視線入射角を取り除いた視線入射角に決定した。

### d) 刺激試料の数

刺激試料の数は、形態を操作した組合せで作成可能な48図形とした。

#### e) 提示順序

被験者に実験の意図が読まれないことを考慮して乱数表を用いて、ランダム提示とした。

## 5. 認知データの分析手法

実験は2009年9月1日と3日に行った。実験結果の形式判断、反応時間、判断要素は自動保存される。

### (1) 一覧表の作成

試料図形の提示順番、図形番号、反応時間、形式判断、各構造要素に対する判断要素の有無を示した実験結果一覧表を作成する。

### (2) 統計的処理

測定した反応時間から、作成した分析プログラムを用いて、試行の繰返しに伴う慣れの影響を除去したものを、処理反応時間として分析に用いる。

### (3) 処理反応時間の差

処理反応時間を昇順にし、処理反応時間の変化が大きい値を抽出し、認知の差異の境界として特定する。但し、形式判断「時間切れ」は処理反応時間を特定することができないため、回答の制限時間である10秒とした。また処理反応時間に差異が見られない場合、常に物プロトタイプまたは物システムプロトタイプのどちらか一方で同定が試みられていると考える。

### (4) 構造要素の階層

形式判断の結果から、形態操作を行った構造要素を次のように位置付ける。

プロトタイプで同定（同じ橋梁形式）した場合、形態操作は橋梁形式の認知に寄与していないので、操作された構造要素は判断要素ではない。プロトタイプで同定できない（わからない・時間切れ）場合、形態操作は橋梁形式の認知を妨げているので、操作された構造要素は判断要素であるが、操作の内容は被験者にとって有意ではない。一方、プロトタイプ以外で同定（異なる橋梁形式）した場合、形態操作は橋梁形式の認知に寄与しているため、操作された構造要素は判断要素である。したがって、ある構造要素に形態操作を行うと常に判断要素となる場合にこの構造要素を1次要素、常にではないが判断要素となる場合にこの構造要素を2次要素、そして常に判断要素とならない場合にこ

の構造要素を3次要素と位置付ける。但し、形態操作していない構造要素が判断要素であると指摘された場合も同様とする。この方針に基づき分析を行い、構造要素の評価表を作成する。

### (5) 橋梁認知プロトタイプの特徴

処理反応時間の差、分析から導かれた構造要素の階層、そして被験者自身による判断要素の指摘を分析結果一覧表にまとめ、刺激試料に対して喚起されたプロトタイプの特定と、物プロトタイプと物システムプロトタイプのどちらかを優先して喚起する傾向があるかの特定を行う。また、構造要素の階層（1～3次要素）の分析において2次要素に特定された構造要素については、他の形態操作を受けた要素からの影響の有無を確認するため、当該構造要素のみを操作した刺激試料の結果と比較する。

以上、分析結果一覧表から導かれる橋梁認知プロトタイプの特徴を視覚的に理解できるようにモデル図として表現する。

## 6. 分析結果

分析は今回作成した分析プログラムによって慣れの影響を除去した処理反応時間を用いる。第1節では結果のみでなくプログラム内で行われる分析の流れを示す。また被験者全員の結果を掲載するスペースが無いので第1節に被験者Aの実験結果一覧表（次頁：表-1）と分析例を示す。

### (1) 統計的分析処理の流れ

経過時間に伴う慣れの影響で反応時間が促進・妨害されているか分析する。慣れの影響を分析する対象データは試料図形の捉え方として大別できる「全ての試料図形データ（48図形）」「橋梁形式（3形式16図形）」「形態操作した構造要素（4から8図形）」の範囲で行う。また各範囲で慣れの傾向が検出された場合は図形数が多い範囲の処理結果を適用する。これは慣れの影響は実験を通して存在するため、標本数が多いほど精度の良い慣れの傾向が推定できると考えたためである。

#### a) 外れ値の検討

慣れの影響を検討する前に慣れの傾向から外れたデータの存在を検討し、慣れの傾向の推定の前段階で取り除く必要がある。そこでロバスト推定法により回帰モデルを推定し、そのモデルによって導かれた値（以下、理論値）と実験から得られた値（以下、実測値）の差の内、全体から離れた値（以下、外れ値）をグラブス検定により特定し、取り除く。なお次頁の図-6でいくつかの外れ

表-1 被験者Aの実験結果一覧表

combination	Langer Bridge								Lohse Bridge								Braced-rib tide arch Bridge							
	No.	no.	RT(s)	Ans	Check				No.	no.	RT(s)	Ans	Check				No.	no.	RT(s)	Ans	Check			
					A	B	C	D					A	B	C	D					A	B	C	D
base	1	28	3.85	○					17	33	4.94	○					33	37	6.23	○				
C1	2	40	2.21	×			◎		18	14	4.42	○					34	13	4.49	○				
C2	3	15	3.93	×					19	35	7.11	×			◎		35	5	10.00	99				
C3	4	47	1.70	×			◎		20	24	1.60	×			◎		36	22	3.37	×				◎
B	5	11	3.75	×			◎		21	34	3.07	×			◎		37	32	5.29	○				
B+C1	6	4	4.27	×			◎		22	38	2.61	×			◎	◎	38	45	2.04	×				◎
B+C2	7	21	1.88	×			◎	◎	23	42	1.19	×			◎	◎	39	41	2.78	×				◎
B+C3	8	8	2.95	×			◎		24	17	2.69	×			◎	◎	40	6	5.23	×				◎
A	9	39	1.42	×	◎				25	44	1.48	×	◎				41	29	1.42	×	◎			
A+C1	10	36	1.25	×	◎		◎		26	3	1.76	×	◎				42	1	3.60	×	◎			
A+C2	11	30	1.19	×	◎		◎		27	19	1.70	×	◎			◎	43	10	4.32	×	◎			
A+C3	12	48	1.14	×	◎		◎		28	31	1.83	×	◎			◎	44	18	1.31	×	◎			◎
A+B	13	25	1.42	×	◎	◎			29	7	2.44	×	◎	◎			45	23	1.92	×	◎			
A+B+C1	14	20	1.67	×	◎	◎			30	26	1.19	×	◎	◎	◎		46	16	1.87	×	◎			
A+B+C2	15	12	2.44	×	◎	◎			31	9	1.61	×	◎	◎			47	46	1.59	×	◎			◎
A+B+C3	16	27	1.81	×	◎	◎	◎		32	2	4.85	×	◎			◎	48	43	1.44	×	◎			◎

\*combination: 形態操作した構造要素の組合せ(括弧内は変化内容)    \*No.: 橋梁図形番号    \*Ans: 形式判断の結果    \*Check: 判断要素の有無  
A: アーチリブの軸線(三角)    \*no.: 提示順番    ○: 同じ橋梁形式    □: 形態操作有り  
B: 基本構造(Langer, Lohse→アーチ構造/Braced-rib→補剛桁構造)    \*RT(s): 反応時間    ×: 異なる橋梁形式    A, B, C: combinationの説明と同様  
C: 吊材    ? : わからない    D: 形態操作無し(無しの構造要素)  
C1: (斜め) / C2: (鉛直と斜め) / C3: (無し)    99: 時間切れ    ◎: 判断要素

値が存在するが、標本数(48図形)に対して20%未満(5図形)であり抽出されたデータ数が少ないことから、外れ値同士で別の慣れの影響を受けていないとして扱う。

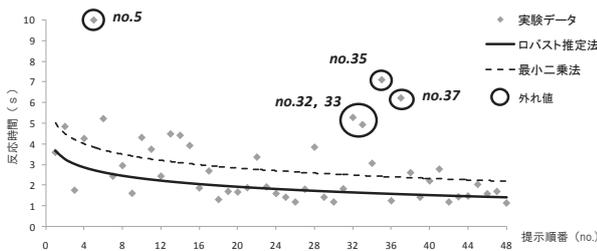


図-6 外れ値の検出

b) 回帰モデルの推定

慣れの傾向は単調増加・減少を示すことから線形、指数、対数回帰モデルによって推定する。ここで存在するデータは全て等しく有効に扱うため回帰モデルのパラメータを最小二乗法によって推定する。

c) モデル選択

3つの回帰モデルから最適なモデル選択を行うためAICを用いた検定を行う。理論値と実測値の差の二乗(残差平方和)と標本数とパラメータ数からAICの値が最小となる回帰モデルが3つの中で最適として評価される。表-2に示す結果から3モデルの内、対数回帰モデルが選択される。

表-2 AICによるモデル選択結果

回帰モデル形式	係数α	係数β	R <sup>2</sup>	標本数	残差平方和	AIC	選択
線形	-0.048	3.58	0.3311		62.38	144.03	
指数	-0.018	3.41	0.3278	43	62.97	144.43	
対数	-0.753	4.62	0.3313		62.00	143.77	○

d) モデルの妥当性

理論値が実測値を十分に説明できているか検討するた

め単回帰分析を行った結果、有意差が認められた(p<0.05)ため、本モデルは妥当であることから慣れ(今回は単調減少を示しているため認知が促進されている)の影響を受けているため、実測値から影響を取り除く処理を行う。

e) 最適な反応時間への処理

推定された回帰モデルが慣れの影響を示し、最も先行する試料図形は慣れの影響を受けていないと仮定すると、最も先行する試料に対する反応時間の理論値から経過時間によって変化する増減分は慣れの影響の増減分であると説明できるため、その増減分を慣れの影響を受けている実測値から引くことで慣れの影響を取り除いた処理反応時間を推定することができる。

表-3 処理反応時間の計算例(一部)

n	T <sub>n</sub>	Δ(T <sub>1</sub> -T <sub>n</sub> )	t <sub>n</sub>	RT <sub>n</sub>
1	3.35	-	3.60	<b>3.60</b>
2	3.29	-6.0.E-02	4.85	<b>4.91</b>
3	3.24	-5.9.E-02	1.76	<b>1.82</b>
⋮				
47	1.47	-2.7.E-02	1.70	<b>1.73</b>
48	1.44	-2.6.E-02	1.14	<b>1.17</b>

n: 提示順番 / T<sub>n</sub>: 理論値  
T<sub>1</sub>: 最も先行する試料に対する反応時間(慣れの影響なし)  
Δ(T<sub>1</sub>-T<sub>n</sub>): 慣れの影響差  
t<sub>n</sub>: 実測値 / RT<sub>n</sub>: 最適反応時間(=t<sub>n</sub>-Δ(T<sub>1</sub>-T<sub>n</sub>))

(2) 橋梁認知プロトタイプ抽出

処理反応時間と形式判断を用いて橋梁認知プロトタイプを抽出する。

a) 喚起されたプロトタイプの特定

次頁の図-7は降順に並べ替えた処理反応時間を折れ線グラフで、処理反応時間の差を棒グラフで示したものである。



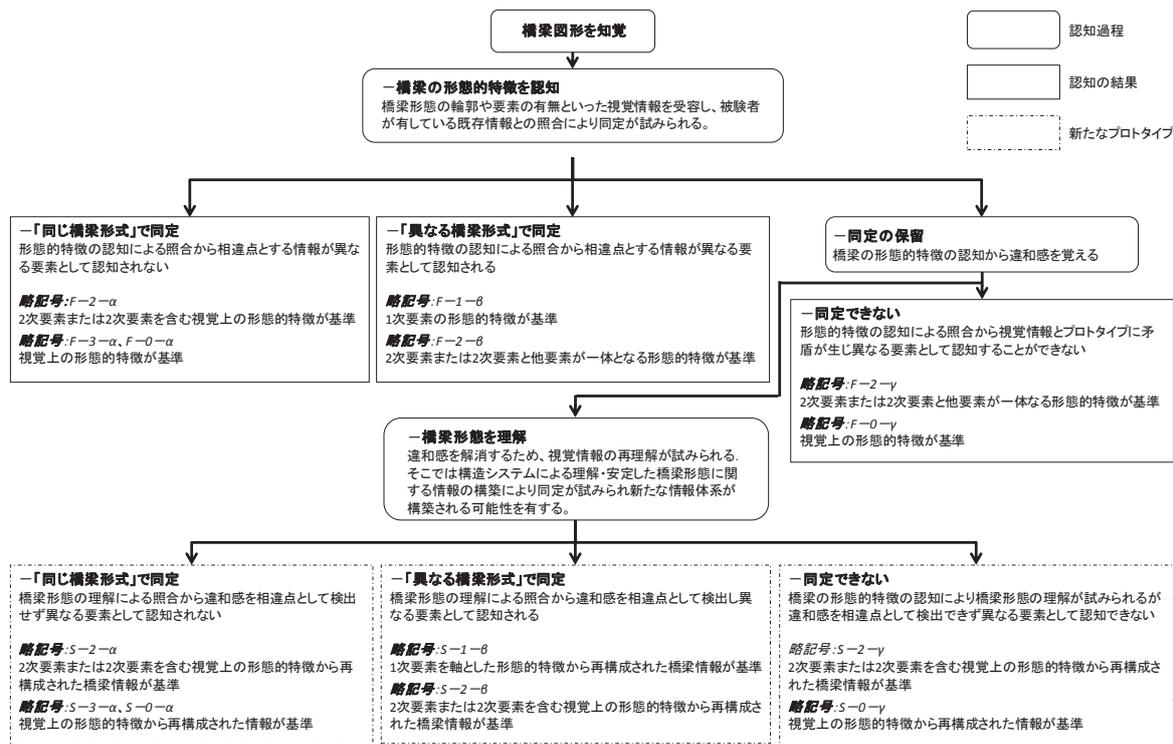


図-8 認知過程図

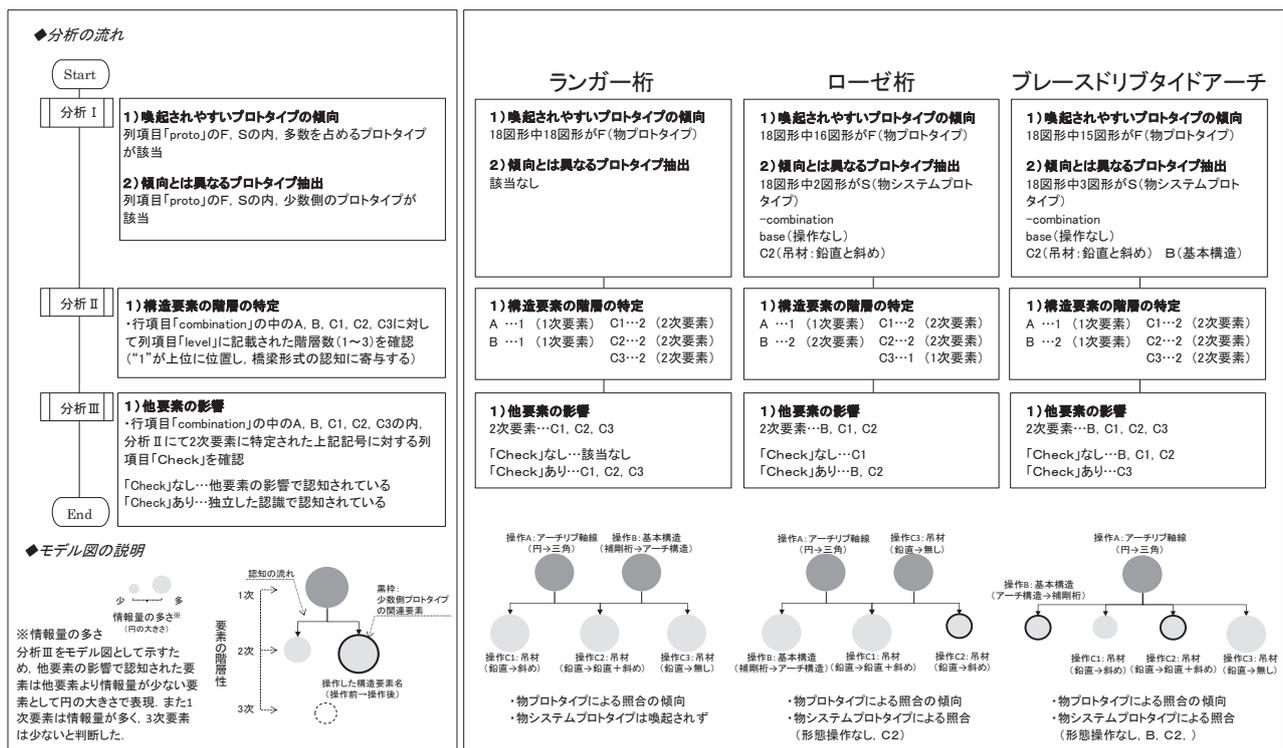


図-9 分析の流れとモデル図

## 7. 検証

以上の結果から、本研究で行った変更により先行研究(2007)で用いたプロトタイプ特定方法の複雑さが改善されたことを検証する。

### (1) 刺激試料の変更

先行研究(2007)では、基本図形の図像記憶による照合、反復表示による記憶情報の蓄積により実験の過程でプロトタイプ自体が変化する可能性が残る実験方法であったので、分析の過程でそれらの問題を取り除く

ため、全ての実験結果を対照し、矛盾が生じていないか確認する手間を要する分析方法を用いた。

本研究では認知科学の知見に基づき「基本図形の視線入射角を多様化」「基本図形の提示時間を短縮」「ブランク画面をノイズ画面へ変更」「刺激試料の画面構成を分割」することで、プロトタイプによる照合が行われていることを論理的に説明した実験方法に改善することができ、分析の過程を単純化できた。この結果から先行研究(2007)よりプロトタイプの特定に要する分析が容易になったと評価できる。

## (2) 慣れの影響の統計処理

先行研究(2007)では、橋梁図形の認知に要する時間(反応時間)に対して被験者の慣れの影響を考慮するために、同じ試料図形を間をあけて2回提示し、両者の反応時間の違いから慣れの影響を推測した。そのため1回の実験における試行回数が倍になると共に、統計処理を行うことができなかった。

本研究では認知科学の知見に基づき実験内で起こりうる慣れの影響を明らかにし、ロバスト推定法とグラブス検定を併用してその影響を統計的に処理することで、慣れの影響を排除する方法をシステム化することが可能となった。

実際には21名の被験者に対して慣れの有無を分析した結果、19名の反応時間に対して慣れの現象がみられ、本分析手法によりそれらを発見、除去した処理反応時間を算出した。

この結果から先行研究より精緻な分析方法に改善することができ、さらに実験・分析に要する手間を低減することができたと判断できる。

## (3) 被験者による判断要素の指摘

先行研究(2007)では判断要素を特定するため、着目する構造要素と全ての試料図形に対する反応との関係を対照して分析し、その結果から判断要素であるかどうかを間接的に判断し、被験者に対する実験後のインタビューで回答を得た判断の仕方との整合性を確認していた。

本研究では実験の1試行毎に被験者自身に判断要素を指摘させる作業を加える実験方法にすることで、形式判断の結果と合わせて全ての試料図形に対して具体的な判断要素の特定を可能にし、判断要素の階層性を説明することができた。

具体的には、被験者21名について各構造要素を1~3次要素のいずれかに特定可能であった。その内3名で形態操作を行わなかった構造要素(例えば横つなぎ材)を判断要素として指摘(2次要素として特定)し

た場合もあり、他の要素が認知に影響していることを確認できた。

この結果から、被験者の1試行当たりの負担は若干増加したが、先行研究(2007)の総当たりの分析方法よりも少ないデータと少ない作業で同じ内容かつより精度の高い結果が得られるよう改善できた。

## (4) 反応時間の分類

先行研究(2007)では橋梁認知プロトタイプを特定するために1人の被験者に対して20以上の表を使用して、関連する橋梁図形に対する反応と矛盾や問題がないか分析する作業を要した。

本研究では事物に対する認知過程とプロトタイプの性質から反応時間と橋梁プロトタイプの種類とに相関があることに着目し、各被験者の反応時間を長短に分類し、それぞれに対応する橋梁認知プロトタイプの種類を物システムプロトタイプ、物プロトタイプとした。この方法は、慣れの影響を統計的に処理することで採用可能となった。

具体的には、被験者21名中20名で分類の境界となる反応時間の差異が確認された。その差異の大きさは個人差があり、認知過程における情報処理の違いによるものと考えられる。残りの1名に関しては、同程度の差異が複数出現したため、境界を特定できなかったが、これは実験を通して一方のプロトタイプのみで照合が行われたためであると推測できる。

この結果から、試行回数を半分に削減したことで被験者の負担が軽減されたこと、および分析の作業が大幅に削減したことで試験者の負担が軽減されたことの2点が先行研究(2007)に対して改善された。

## 8. 結論

本研究では、次に挙げる成果を得た。

- 基本図形の図像記憶による照合、および学習効果による記憶情報の増大に伴う橋梁プロトタイプの変化という実験方法に起因する問題の要因を除去した。
- 分析における手間を除去・低減するために、試行の繰返しが被験者の認知に与える影響を明らかにし、それらを統計的な手法でシステムティックに処理をする分析方法を構築した。
- 先行研究(2007)の分析で用いた一覧表を使用せず、個人のプロトタイプの特徴となる判断要素と橋梁認知プロトタイプを特定することができた。
- 抽出されたプロトタイプの特徴をモデル図で表現したことで個人のプロトタイプとその特徴を視覚的に

理解できるようにした。

以上のことから、新たに提案した橋梁認知プロトタイプの特定方法は、喚起されるプロトタイプの種類（物・物システムプロトタイプの特定）と構造要素の階層をより精緻に説明可能とした点で先行研究(2007)と同等以上であり、プロトタイプを特定する作業の内容と手順が先行研究(2007)よりも簡略であることから、本研究の目的を達成できたと考える。

## 9. 今後の課題

本研究で残された、また本研究により明らかになった課題は次の通りである。

- ・系統的に構築した分析方法を用いて、分析プログラムを開発する。
- ・社会的に評価されている橋梁設計者が有するプロトタイプの抽出、またそのプロトタイプと作品との関係を明らかにする。
- ・本研究はプロトタイプ特定方法の汎用性（実験環境を制限しないなど）を考慮した方法論であったが、脳波といった生理的状態とプロトタイプとの関連付けをすることで、より具体的なプロトタイプを特定する。

**謝辞：**本研究を進めるにあたり、実験プログラムを作成して頂いた木下雄一朗 助教（山梨大学大学院医学工学総合研究部コンピュータ・メディア工学専攻）、被験者としてご協力して頂いた方々に厚くお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 加藤誠平：橋梁美学，山海堂，1936.
- 2) 杉山和雄：橋梁形態の観照と評価に関する基礎的研究，東京大学博士学位請求論文，1987.
- 3) 近田康夫，宮崎洋，城戸隆良：斜張橋に対する視点場嗜好の世代依存性に関する研究，構造工学論文集Vol. 50A, pp.199-206, 2004.
- 4) 久保田善明，岸本貴博，中村良夫：橋梁形式の力学的相関性の定量的手法，構造工学論文集Vol. 51A, pp.429-435, 2005.
- 5) 石井信行：構造物の視覚的力学，鹿島出版会，2003.
- 6) 石井信行，臼倉 誠，鈴木美穂，行場次朗：視覚心理実験による橋梁の認知プロトタイプ存在の検討，構造工学論文集Vol. 50A, pp.303-313, 2004.
- 7) 石井信行，奥田隆啓：橋梁専門家が有する橋梁認知プロトタイプの特定方法，構造工学論文集Vol. 53A, pp.246-277, 2007.
- 8) 井上毅：意味記憶における属性の顕著性とプライミング効果，教育心理学研究，pp.264-270, 1988.
- 9) 築澤宗太郎，杉本晃宏，松山隆司：装着型視覚センサを用いた対象の3次元形状復元，情報処理学会研究報告，pp.71-78, 2002.
- 10) 浅田昌彦，吉田治典，宮田征門：スマイルノフ・グラフス検定を用いた不具合判定手法，社団法人日本建築学会，pp.1457-1458, 2004.
- 11) 野口和博，樋口忠彦，玉川英則：AIC回帰モデルを利用した距離・時間認知とイメージに関する研究，第28回日本都市計画学会学術研究論文集，pp.421-426, 1993.
- 12) 行場次朗，箱田裕司：知性と感性の心理学，福村出版，pp.80-84, 2000.
- 13) 杉山和雄：橋の造形学，朝倉書店，pp.97-100, 2001

(2010.4.14 受付)

## A STUDY OF AN EXPERIMENT METHOD TO DETERMINE THE COGNITIVE BRIDGE PROTOTYPE OF A BRIDGE DESIGNER BASED ON THE COGNITIVE SCIENCE

Nobuyuki ISHII and Tokihiro TAKAHASHI

One of the authors thought that the information about the bridge which superior bridge designers had gave their work a characteristic and suggested "a structure force dynamics recognition model" as a theory to explain the information. In this article, it was intended to improve and simplify the complicated analysis method of the precedent study about a method to identify the personal bridge recognition prototype based on this model and tested it to experienced bridge designers using an improved method, and analysis considered the data. As a result, the complexity of the precedent prototype identification method had was solved and inspected what could extract the bridge recognition prototype that was really equal to a precedence study and showed that high methodology of the versatility was established.