

構造物を題材とした設計変数空間と評価指標空間での 分類の対応付けによる概念設計に関する研究

A Study on Conceptual Design of Structures by Classification Mapping between Design Variable Space and Evaluation Criteria Space

○津本 燎 (大阪大学) *1 野間口 大 (大阪大学) *2 山崎慎太郎 (大阪大学) *3
矢地謙太郎 (大阪大学) *4 藤田喜久雄 (大阪大学) *5

*1 Ryo TSUMOTO, Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, tsumoto@syd.mech.eng.osaka-u.ac.jp

*2 Yutaka NOMAGUCHI, Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, noma@mech.eng.osaka-u.ac.jp

*3 Shintaro YAMASAKI, Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, yamasaki@mech.eng.osaka-u.ac.jp

*4 Kentaro YAJI, Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, yaji@mech.eng.osaka-u.ac.jp

*5 Kikuo FUJITA, Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, fujita@mech.eng.osaka-u.ac.jp

キーワード: 概念設計, 知識獲得, 橋梁構造物, 構造最適化, 深層生成モデル

1. 緒 言

概念設計では、抽象的な問題記述のもとで、要求に適合する設計解の基本となる原理とその構造を導き出すことが行われるとされている⁽¹⁾。そのプロセスでは、与えられた要求に対して何がしかの演算を行なって代替案を導出することだけでは設計解に至ることはできず、各内容に対して推敲を重ねながら、原理の探索やその構造としての合成を定めていきつつ、漠然とした要求を具体的に定めていくことも行われている。とは言え、現状での一連の内容に対する全般的な理解は、概して言えば、経験的なものに留まっている。そのような状況に対して、例えば、一般設計学⁽²⁾は概念設計を説明する基礎理論として広く知られているが、概念設計での操作を類概念のもとでの集合演算として形式化しているに留まっていて、いくつかの指導的な知見をもたらすものの、具体の概念設計を進めていく上での有用な原理にまでは至っていない。一方で、計算機で網羅的に代替案を生成させ、それらと比較・検討することによる概念設計法も提案されはじめている。例えば、Shea ら⁽³⁾をはじめとする Generative Design の枠組みは、パラメータの多様な組合せのもとで多様な代替案を生成し、それらを視覚化して比較することにより、設計者の判断を導くものとなっている。しかし、判断の前提となる要求の具体化や代替案の絞り込みは暗黙的に行われており、概念設計プロセスの全貌を対象とするものには至っていない。

本研究では、上記のような概念設計の課題に対して、内容が比較的単純である一方で、解の多様性が期待でき、また、設計解の計算による探索や定量的な評価が可能である構造物の概念設計問題を対象とすることを前提とした上で、設計変数空間と評価指標空間での分類の対応付けによる概念設計の枠組みを提案し、一例として橋梁構造物の例題への適用を通じて、その妥当性や可能性を考察する。具体的には、別報⁽⁴⁾で提案している網羅的な最適化計算による多

様な設計解の導出とそれらの設計変数空間での深層学習を用いた分類による新規な概念設計解の発見法に対して、各分類を規定している評価指標を、統計分析による支配因子の特定と設計者の判断による意味付けを通じて段階的に明らかにしていくことによって、要求の明確化と解候補の絞り込みを並行的に進めていくことによる概念設計の枠組みを提案する。あわせて、別報⁽⁴⁾でも例題とした橋梁構造物の概念設計での展開例を示して、同枠組みの基本的な有効性とより実践的な設計問題に展開していく上での課題を論じる。

2. 属性と機能についての分類の対応付けによる 概念設計

2.1. 一般設計学に基づく設計概念の理解

設計工学や設計学の分野では、従来、概念設計を支援するための手法や方法論が研究されてきた。その中でも、一般設計学⁽²⁾は、設計において人間の内部で行われている概念操作に焦点を当て、設計行為の理論的理解を進めるとともに、概念操作を集合操作として数学的に形式化している点に特徴がある。一般設計学では、実体に対応する実体概念と、実体の特徴である抽象概念の2つの概念を導入し、後者を前者の集合として定義する。ここでの実体とは、自然物と人工物の両方を含んでいる。抽象概念については、実体の持つ機能的価値に対応する機能概念と、性能や形態など実体の性質に対応する属性概念を導入する。機能概念集合と属性概念集合は、同じ実体概念集合を台集合とする異なる部分集合系である。そのうえで、設計は、要求として記述された機能概念集合から、設計解の特徴を表す属性概念集合への変換であるとする。

理想的な知識、すなわち、この世界の実体のすべての元に関する知識と各元を抽象概念で厳密に表現する知識を想定すると、機能概念集合と属性概念集合はそれぞれ異なる位相空間となる。このもとでは、設計は要求を記述した瞬

間に終了する。すなわち、理想的知識とはすべての設計解とその抽象概念を記述した究極のカタログであり、そのもとの設計とはそのカタログから設計解を選択することに他ならない。

一方で、現実にはそのような理想的知識を想定することはできず、不完全な知識のもとで、試行錯誤を通じて知識を獲得しながら概念操作を進めることになる。設計者は、自身の経験と学習を通じて、過去の設計解を含む様々な実体を、共通の特徴で分類し抽象化することで概念として記憶する。この分類が機能に対して行われた場合は機能空間上で、形態や色に関して行われた場合は属性空間上で、概念が構造化される。このように構造化された機能空間と属性空間は実体概念を介して対応しており、設計者はこの対応関係をもとに、要求を示す機能空間上の領域に対応する属性空間の点を定めることで設計を行っていると解釈することができる。

なお、概念設計の結果を断定的かつ明確に表すことは容易ではないが、本研究では、上記のような理解のもと、設計解集合から分類によってこの対応関係を整理し、要求に応じて選択可能なように知識として取り出したものを概念設計の結果と位置付け、コンセプトと呼ぶことにする。

2.2. 計算機による概念設計支援の課題

近年、最適化技術やデータサイエンス技術の発展が目覚ましい。本研究では、それらを活用することにより前節で述べた設計概念空間を作り出し、そのもとの設計の支援を考えていく。それに向けた課題は以下の4点に集約される。

- (1) 概念空間の前提となる集合の元、すなわち、様々な実体概念を収集すること。
- (2) (1) で収集した実体概念集合に対して、属性概念による分類を行うこと。
- (3) (1) で収集した実体概念集合に対して、機能概念による分類を行うとともに、(2) の属性概念との対応付けを行うこと。
- (4) (3) の対応付けに対して、コンセプトを選択するための知識を獲得すること。

2.3. 属性と機能についての分類の対応付けによる概念設計に向けたアプローチ

本研究では、緒言でも述べたように、構造物の概念設計問題を題材として取り上げて、前節で述べた課題の解決を試みる。具体的には次のように取り組む。

まず、前提として、あらゆる構造物の実体は設計可能、すなわち設計代替案であり、その属性を設計変数 \mathbf{x} により表すことができるとする。構造物であれば、材料分布を設計変数とすることにより、自由度の高い表現が可能になる。一方、各代替案の機能は属性により発現することから、各評価指標を設計変数の関数 $f_i(\mathbf{x})$ として定めて評価できるものとする。つまり、属性空間を設計変数空間 $[\mathbf{x}]$ として、機能空間を評価指標空間 $[\mathbf{f}]$ として計算機上で表現し、概念設計の問題を設計変数空間 $[\mathbf{x}]$ と評価指標空間 $[\mathbf{f}]$ により規定できるとする。設計変数空間と評価指標空間での分類の対応関係を明らかにすることで概念設計に関する知識の獲得を試みる。

上記のもとで、前節の4つの課題に対応して、図1に示す概念設計の枠組みを構想する。まず、(1) に対応して、あ

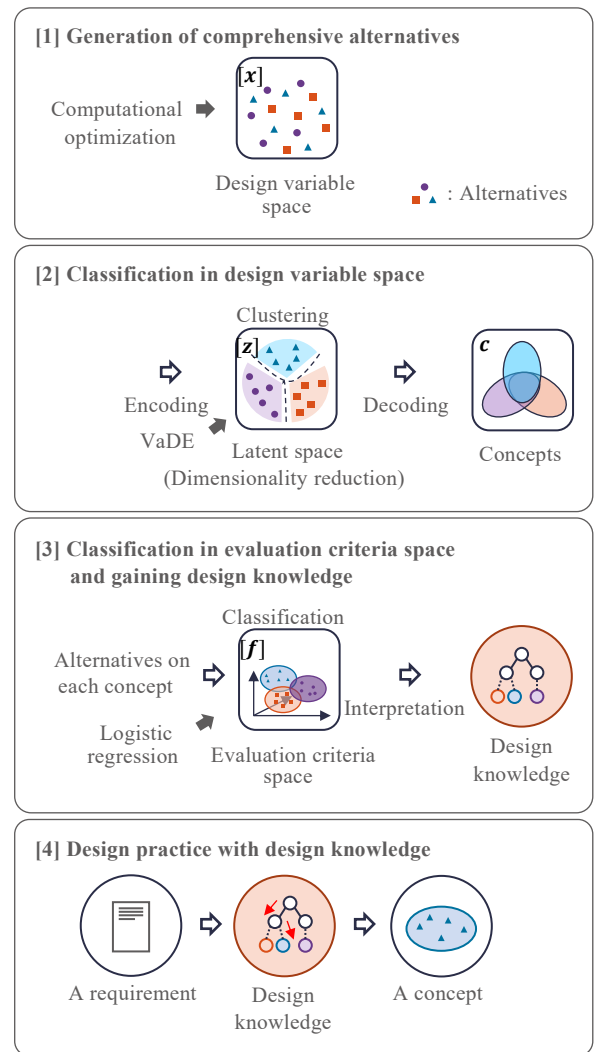


Fig.1 Outline of framework

る設計問題を想定した上で、トポロジー最適化⁽⁵⁾などにより多様な代替案を導出する(図1中[1])。次に、(2)に対応して、代替案の構造に注目して設計変数空間 $[\mathbf{x}]$ において深層学習により⁽⁶⁾代替案をクラスターに分類し、各クラスターにおいて支配的な特徴を抽出することで属性概念にあたる情報を獲得する([2])。続いて、(3)に対応して、設計変数空間 $[\mathbf{x}]$ での分類結果を教師データとする評価指標空間 $[\mathbf{f}]$ でのロジスティック回帰⁽⁶⁾による線形分類を繰り返し行い、設計変数空間での分類結果を説明する評価指標空間での分類を系統的に抽出する。その際に、(4)に対応して、線形分類における各分類面の評価指標に対する係数から、コンセプトを選択するための意思決定木を作成する([3])。上記の[1]~[3]に対して、特定の設計要求が与えられた際には、獲得した意思決定木の上で、与えられた要求が該当する部分空間を絞り込みつつ、絞り込みが不十分な場合には、絞り込むための要求の明確化を促しながら、特定のコンセプトを選び出すことにより、概念設計を実施する([4])。

3. 計算機による概念設計の枠組み

本章では、2.3 節で述べた提案する枠組みを行うための具体的な方法について説明する。

3.1. 多様な代替案の生成

多様な代替案の生成は、様々な設計条件のもとでトポロジー最適化によって最適解を求めることで行う。その際、想定する設計問題を数理的にモデル化することが求められる。

まず、設計領域と境界条件は、多様な代替案を得るために、想定する設計問題における本質的的確に表す簡潔な設定とする。これは、設定に副次的な事項が含まれて問題が複雑になると、解探索の範囲が狭まってしまい、引いては、多様な代替案の生成が難しくなるからである。

次に設計問題に対する数学的な定式化を導入する。任意に指定することができる設計条件ベクトル \mathbf{p} のもとで、設計解の実行可能性に関わる複数の制約条件 $g_j(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \leq 0$ [$j = 1, \dots, J$] を満たし、各評価指標に対応する複数の目的関数 $f_i(\mathbf{x}, \mathbf{p})$ [$i = 1, \dots, I$] を最小化するように、属性に対応する設計変数 \mathbf{x} を求める問題として以下のように定式化される数理計画問題を導入する。

$$\left. \begin{array}{l} \text{Find } \mathbf{x} \\ \text{minimizes } f_i(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \\ \text{subject to } g_j(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \leq 0 \\ \text{for given } \mathbf{p} \end{array} \right\} \quad (1)$$

なお、上記の数学的な形式に対して、多様な実体概念の元になる代替案を生成するためにトポロジー最適化を用いる場合には、設計変数 \mathbf{x} として材料分布をとり、設計領域内の任意の形態を表す。目的関数 f_i については、複数のものの中から特定のを目的関数として残して単一目的の最適化問題を形成する一方、残る f_i については、目標値を設定した上でそれ以上を意図する制約条件を導入することにより、解の多様性を確保する。

かたや、そもそもの $f_i(\mathbf{x}, \mathbf{p})$ に関しては、元々の概念設計におけるすべての評価指標が数的に記述できるわけではないし、また、数理的な処理の性質からも、トポロジー最適化の場合に限らず、最適化計算で明示的に取り扱うことができる $f_i(\mathbf{x}, \mathbf{p})$ は元々の評価指標の一部のものに限定される。加えて、 $f_i(\mathbf{x}, \mathbf{p})$ が多峰性を伴っている場合、全く異なる設計変数 \mathbf{x} の値をとっていても、似たような目的関数 f_i の値をとることがある。つまり、目的関数をもとに代替案を分類したとしても、その結果を属性と対応付けることは難しい事態が潜んでいることになる。一連の事情を受けて、多様な代替案をコンセプトとして分類するには、初めに設計変数空間での分類を行い、その後、その分類結果を説明できるような評価指標 f_i を追加しながら、属性と機能の対応付けを行う必要があることになる。

3.2. 設計変数空間での分類

前節での考え方のもと、生成された代替案集合を設計変数空間で分類することにより、抽象概念の獲得を行う。設計変数空間 $[\mathbf{x}]$ での分類には、データの事前のラベル付けを必要としないクラスタリング手法を用いることが適切であると考えられる。構造物を題材としてトポロジー最適化

により代替案を生成する場合には設計変数の次元が大きくなっていることから、深層学習により代替案の特徴を抽出しながら、設計変数空間での分類を行うことを考える。本研究では、前報⁽⁴⁾と同様に、深層学習の1種である Variational Deep Embedding (VaDE)⁽⁷⁾を用いて設計変数空間での分類を行う。各代替案 n の設計変数 $\mathbf{x}^{(n)}$ をエンコーダーにより、低次元の潜在変数 $\mathbf{z}^{(n)}$ ($\dim \mathbf{z} \ll \dim \mathbf{x}$) に落とし込みつつ代替案の持つ属性に関する情報に基づいて構造化された潜在空間 $[\mathbf{z}]$ を構成する。ここで変数の右肩の (n) は n 番目の代替案の値であることを示す。この次元圧縮は、デコーダーにより潜在変数 $\mathbf{z}^{(n)}$ から設計変数 $\mathbf{x}^{(n)}$ を復元できることによって保障されている。また、この潜在空間に混合ガウス分布を仮定することにより、確率的にクラスタリングを行うことができる。すなわち、VaDE の枠組みは、次元圧縮とクラスタリングの両方を同時に学習することで、高次元の設計変数を分類し属性概念として意味のある結果を得ることを可能にするものである。また、生成モデルでもあり、クラスタリング結果をクラスター中心の復元結果によって解釈することができる。

3.3. 評価指標空間での分類の対応付け

次に、設計変数空間 $[\mathbf{x}]$ での分類結果を踏まえて、評価指標空間 $[\mathbf{f}]$ で分類を行うことにより、各コンセプトがもつ機能を統計的に明らかにする。

設計変数空間での分類が行われた後では、生成された n 番目の代替案はその特徴量として、設計変数 $\mathbf{x}^{(n)}$ 、評価指標値 $f_i(\mathbf{x}^{(n)})$ 、所属コンセプト $\mathbf{c}^{(n)}$ を持っている。また \mathbf{c} は、設計変数空間での分類で k 個のコンセプトが導出された場合、 k 次元の変数であり、代替案が \hat{k} 番目のコンセプトに属するとき、 \hat{k} 成分のみが 1、その他が 0 となるような変数と定義する。

評価指標空間 $[\mathbf{f}]$ での分類を行うにあたって、評価指標 f_i の再設定を行う。また、各評価指標の値域の偏りが分類の結果に影響を及ぼさないよう、各指標について平均が 0、分散が 1 と標準化したものを評価指標 f_i [$i = 1, \dots, I'$] と再定義して用いる。

設計変数空間 $[\mathbf{x}]$ での分類結果を踏まえた評価指標空間 $[\mathbf{f}]$ での分類には、各代替案の所属コンセプト $\mathbf{c}^{(n)}$ を教師データとし、統計的手法を適用することを考える。本研究では、一つの方策として、2 クラス線形分類器により分類面を特定することとする。例えば、代替案集合からあるコンセプト (\hat{k}_1 番目、 \hat{k}_2 番目、...) に属する代替案の分類面を求める際には、各代替案のクラスラベル y を、次式により定義するものとする。

$$y^{(n)} = \begin{cases} 1 & \text{if } \mathbf{c}_{\hat{k}}^{(n)} = 1 \\ 0 & \text{if } \mathbf{c}_{\hat{k}}^{(n)} = 0 \end{cases} \quad (\hat{k} = \hat{k}_1, \hat{k}_2, \dots) \quad (2)$$

また、分類面 s は次式により表されるとして、その係数 w_i を決定することによって特定する。

$$s^{(n)} = w_0 + w_1 f_1^{(n)} + \dots + w_{I'} f_{I'}^{(n)} \begin{cases} \geq 0 & \text{if } y^{(n)} = 1 \\ < 0 & \text{if } y^{(n)} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

本研究では、評価指標空間上で代替案が線形分類可能と

は限らないことから、収束性を考慮してロジスティック回帰を用いる。またロジスティック回帰による分類器の特徴として、分類面の学習後は同種のデータが与えられた際の確率的な予測モデルとして活用できる。式(3)の分類面のもとで、要求として、評価指標 f_i^* が与えられた際には、クラスラベル $y^* = 1$ となる確率を以下により求めることができる。

$$p(y^* = 1 | f_i^*) = \frac{1}{1 + \exp(-s^*)} \quad (4)$$

$$s^* = w_0 + w_1 f_i^* + \dots + w_l f_l^* \quad (5)$$

2つを超えるコンセプトが存在する際に2クラス分類器を用いる場合には、複数回の分類を行うことになる。このとき、分類の道筋は、学習の程度を表すコスト関数の最終値を参考に、最もよく分類できる組み合わせを選択し、分類の道筋と各分類面の式を記録する。また、選択すべきコンセプトの予測は、各分類面の予測モデルを組み合わせることにより行うことができる。

3.4. 分類の対応付けの解釈による知識獲得

分類結果に対する解釈は、分類の道筋と分類面の式に基づいて行う。ここで、線形分類面の解釈の方法の一例を示す。まず、各分類に対して影響の大きい評価指標 f_i を、分類面の係数の絶対値 $|w_i|$ により特定する。 $|w_i|$ が他と比べて大きい場合、 f_i の変動に対して s が大きく変動するので、その評価指標 f_i は分類への影響が大きいと考えられる。逆に $|w_i|$ が他と比べて小さい場合は分類への影響はほとんどないと考えられる。また、分類される代替案が持つ評価指標の傾向は、影響が大きい評価指標の係数 w_i により判断する。 $w_i > 0$ であれば、評価指標 f_i の値が増加したときに、 s の値も増加する。つまり、式(3)により分類される代替案はほかの代替案に比べて、その評価指標の値が大きい傾向にあることがわかる。当然、 $w_i < 0$ ではその逆のことが言える。

以上のようにして分類面を解釈していけば、評価指標空間での分類の結果を意思決定木等を書き下すことができるようになる。そのような意思決定木の内容では、コンセプトが持つ属性と機能の対応関係が紐づけられており、コンセプトを系統的に選択していくための設計知識と位置付けることができる。

3.5. 獲得した知識に基づく概念設計

本節では設計変数空間 $[x]$ と評価指標空間 $[f]$ での分類を対応付けることで得られた設計知識を用いてコンセプトを選択する方法について考える。それに際しては、式(4)に示したロジスティック回帰による予測モデルを活用する。

まず、与えられた設計要求に対応する評価指標 f_i について満たすべき設定値を設定する。その値は生成された代替案の10%値、中間値(50%値)、90%値等を参考に決定する。次に設定した評価指標をもとに、ロジスティック回帰により得られた予測モデルによって、各コンセプトの選択可能性を確率として求める。ここで、概念設計での設計要求はコンセプトを特定するには曖昧で不十分なものに留まっています。その過程を通じて段階的に要求を明確化していき、特定のコンセプトにたどり着くことが求められる。本研究では、そのようなコンセプトの絞り込みを以下のように

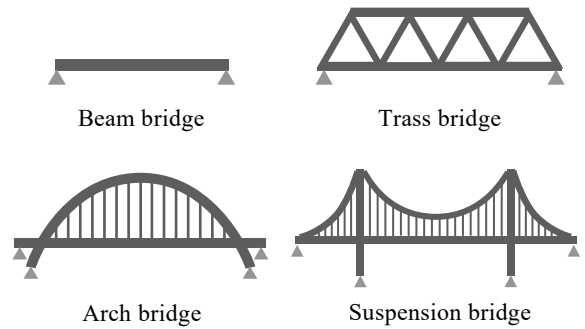


Fig.2 4 main forms of bridge structures

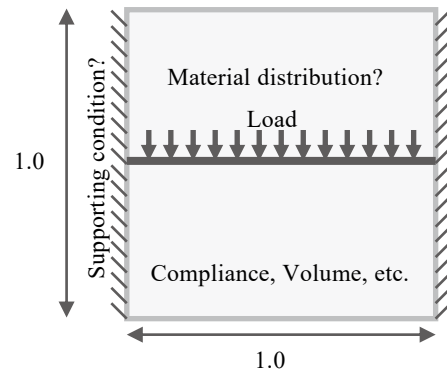


Fig.3 Design space of bridge structures

に進めることを考える。

最初に獲得した設計知識から基本となる評価指標の値をいくつか定める。次に、ロジスティック回帰による予測モデルを用いて、選択しなかった評価指標についてはすべての設定パターンを考えながらコンセプトの選択確率を計算する。そして、求めた確率の平均を提示することで、のちにその評価指標を設定した時を見通したコンセプトの選択確率を示す。提示された確率と設計知識を照らし合わせて、選択確率が1に近い選択すべきコンセプトが判明した場合は手続きを終了する。判明しなかった場合でも、選択確率から何らかの有望なコンセプトは予測できる。この有望なコンセプトに対して、設計知識をもとにさらに要求を絞り込み、再び選択確率を求める。この手続きを繰り返すことで、体系的に、具体的に定まっていなかった要求を明確化しながらコンセプトを絞り込み、解を選択することができる。

4. 橋梁構造物を例題とする枠組みの検証

本章では、経験的に代表的な形態がよく知られている橋梁構造物の概念設計を例題として取り上げ、提案した枠組み(図1)の可能性や妥当性を検証する。

4.1. 橋梁構造物の概念設計

橋梁構造物とは川や谷などを横切るための構造物であり、主に横切るための道路構造とそれを支える構造によって構成される。その概念設計では大まかな構造を表す橋梁形式を決定することが行われる。代表的な橋梁形式として、桁橋、トラス橋、アーチ橋、つり橋が存在し⁽⁸⁾、それぞれの形態は大きく異なる(図2)。また、経験的に要求される支間長に対する適切な橋梁形式が整理されている⁽⁹⁾。これは形式により荷重を支える効率が異なるからである。しかし、支

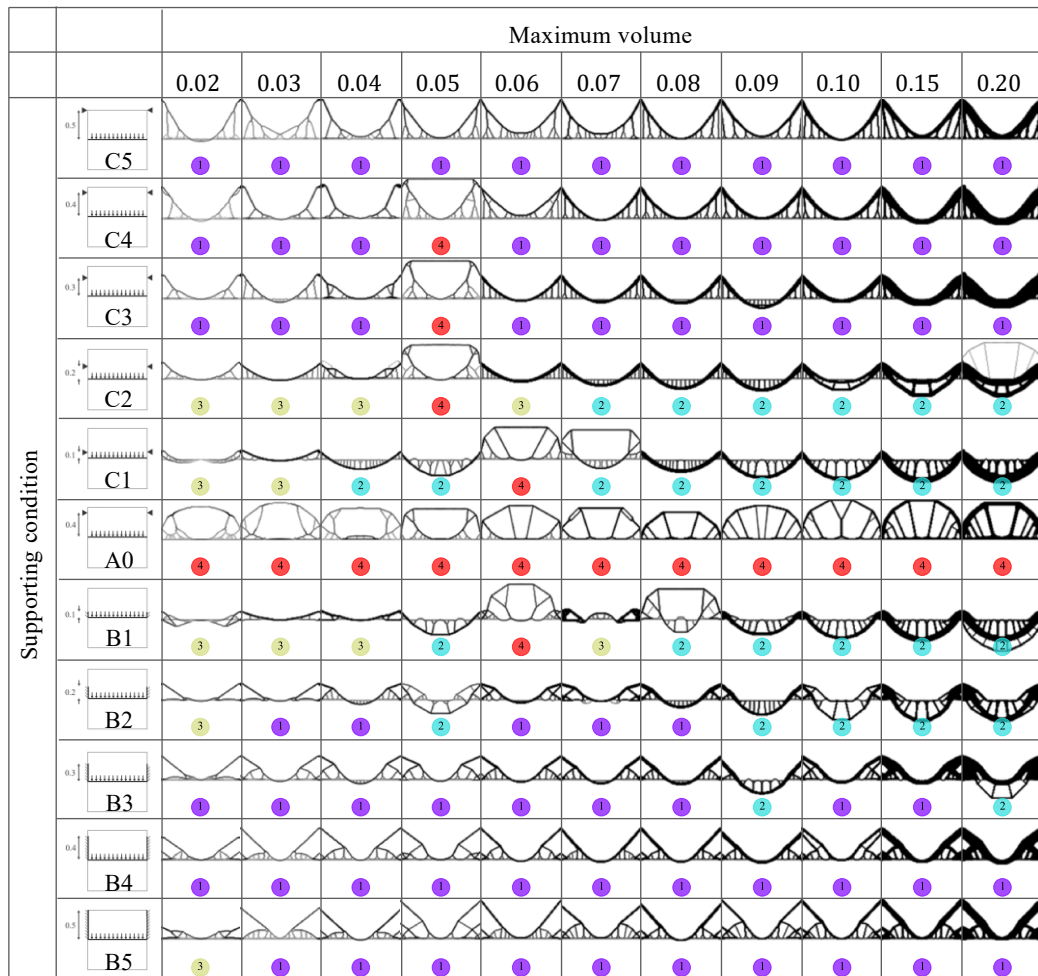


Fig.4 Generated alternatives

間長のみによって適切な橋梁形式が決まるわけではないため、橋梁構造物の概念設計では、機能性、安全性、施工性、経済性、美観性、耐久性、環境への影響など様々な観点から設計空間を広く探索した上で、適切な形式を選択する必要がある。

4.2. 多様な代替案の生成と設計変数空間での分類の実施

代替案の生成と設計変数空間での分類は、前報⁽⁴⁾での方法により、それぞれ、トポロジー最適化と深層学習により以下のようにして行う。

まず、橋梁構造物の目的が、設計領域を横断するように設置される道路構造にかかる荷重を支えることであり、また橋梁形式が2つの橋脚間の構造とその2次元の断面図により決まると考え、橋梁構造物の設計問題を、図3のように、2次元の矩形領域の上下中央の横断線に一様分布荷重があつて、それを両側から支える高剛性の構造物を設計する問題として設定する。そのもと密度法に基づくトポロジー最適化により代替案を生成する。4.1節で述べたように、橋梁形式は荷重を支える効率により分化しているという考えのもと、目的関数として剛性と経済性に関する指標を設定し、設計条件として様々な体積制約と支持条件を与え、剛性に関して最適化を行うことで多様な代替案を生成する。前報⁽⁴⁾で生成された121個の代替案を図4に示す。

設計変数空間での分類は、深層学習の一つである Variational Deep Embedding (VaDE) により行う。生成された

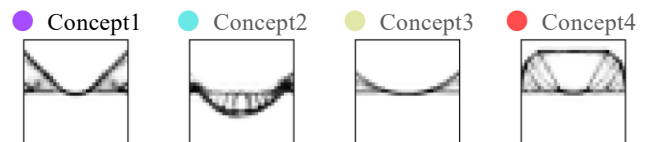


Fig.5 Four decoded concepts

代替案の材料分布を 32×32 ピクセルの画像として扱い、1024次元の入力データとして VaDE に学習させた。VaDE の潜在空間の次元、クラスター数については実験的に選択した。最終的に、4つのガウス分布からなる混合ガウス分布を仮定した3次元の潜在空間に代替案を落とし込み、代替案を4つのクラスターに分類した。前報⁽⁴⁾で得られた分類結果を図4中に色付きの丸印で示す。また、VaDE のデコーダーにより各クラスターの中心における画像を抽出した結果を図5に示す。図5に示す4つの形態は多様な代替案に潜んでいた代表的な属性のもとで規定されるコンセプトである。それらは、図2に示した橋梁形式と比較すると、コンセプト1が吊り橋に、コンセプト2がアーチ橋に、コンセプト3が桁橋に、コンセプト4がトラス橋に対応する。

4.3. 評価指標空間での分類の対応付け

評価指標に関して、4.2節の代替案の生成では、橋梁構造物の形態は荷重を支える効率により分化しているとの考えから、剛性、経済性に関する指標を用いた。しかし、橋梁

Table.1 Evaluation criteria for design of bridge structures

Evaluation criteria	Viewpoint		Small value	Large value
f_1	Stiffness		High stiffness	Low stiffness
f_2	Efficiency		Low material consumption	High material consumption
f_3	Material distribution		Below the design region	Above the design region
f_4	Ratio of tensile to compressive material	Mean	High percentage of tensile material	High percentage of compressive material
f_5		Variance	Small variance	Large variance
f_6	Supporting point		Low support point	High support point

構造物の概念設計では、4.1節でも述べたように、様々な観点からの評価が重要である。そこで、剛性、経済性に関する指標に加えて、材料分布の重心、引張材と圧縮材の割合、支持点の高さに関する指標を考える。各指標を同時に考慮した際、与える影響に偏りが発生しないように、平均が0、分散が1に標準化されたものを評価指標として用いることにする。以上により本研究で想定する評価指標は、剛性 f_1 、経済性 f_2 、分布の重心の高さ f_3 、引張材と圧縮材の割合の平均 f_4 、分散 f_5 、支持点の高さ f_6 となり、各評価指標の値の大小の意味は表1のようになる。

上記のもと、まず、図5のように求めた4つのコンセプトに属する代替案を、ロジスティック回帰による2クラス分類器により分類する。コンセプト1,2,3,4に属する代替案の分類を試行してみたところ、次式のカテゴリ面による分類が最も有意なものとなった。

$$-10.4 + 0.92f_1 - 1.46f_2 + 9.75f_3 - 2.09f_4 + 2.45f_5 - 3.71f_6 = 0 \quad (6)$$

上式はコンセプト4に属する代替案とそれ以外を分類するものあることから、次にコンセプト1,2,3に属する代替案の分類を行なってみたところ、次式のカテゴリ面により96.2%の代替案が正しく分類された。

$$-5.24 - 8.50f_1 + 1.81f_2 - 3.38f_3 + 2.06f_4 - 1.03f_5 - 2.72f_6 = 0 \quad (7)$$

上式はコンセプト2に属する代替案とそれ以外を分類するものであることから、さらにコンセプト1,3に属する代替案の分類を行なってみたところ、次式のカテゴリ面により98.7%の代替案が正しく分類された。

$$-11.6 + 0.10f_1 - 7.84f_2 - 11.4f_3 + 1.50f_4 - 4.29f_5 + 0.61f_6 = 0 \quad (8)$$

上式はコンセプト3に属する代替案とそれ以外、すなわち、コンセプト1に属する代替案を分類するものであり、以上により4つのコンセプトに属する代替案を評価指標に基づいて系統的に分類できたことになる。

4.5. 分類の対応付けの解釈による知識獲得

得られた分類面の式(6),(7),(8)の各評価指標に対する係数に注目し分類結果を解釈する。各分類面で係数の絶対値

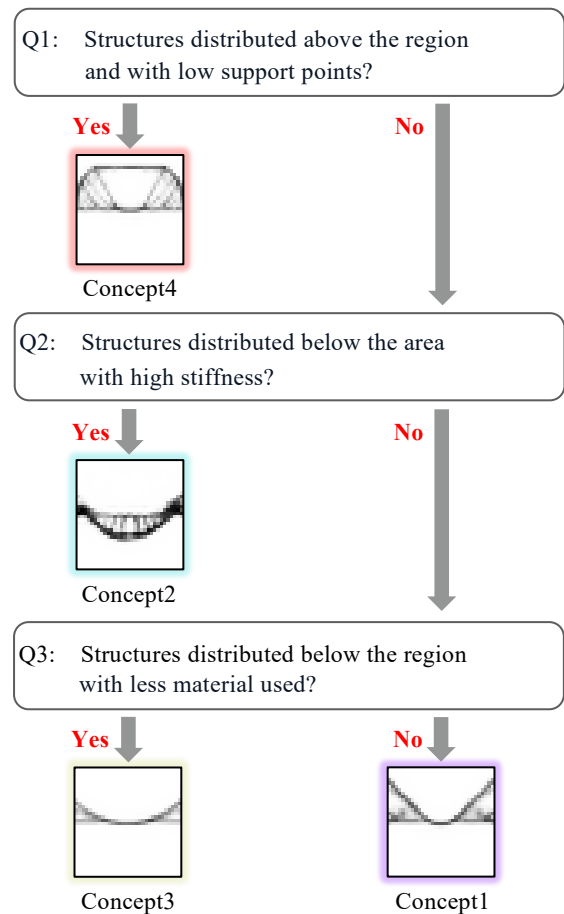


Fig.6 Decision tree for conceptual design of bridge structures

が大きい2つの評価指標が分類に対して支配的であると考え、またその係数の符号をもとに各分類の解釈を行った。1回目の分類は式(6)より、設計領域の上方に分布するかつ支持点の低い構造としてコンセプト4とコンセプト1,2,3を分類していると解釈できる。2回目の分類は式(7)より、設計領域の下方に分布するかつ剛性の高い構造としてコンセプト2とコンセプト1,3を分類していると解釈できる。3回目の分類は式(8)より、設計領域の下方に分布するかつ使用材料の少ない構造としてコンセプト3とコンセプト1を分類していると解釈できる。以上の分類の手順と解釈結果は図6のような意思決定木としてまとめることができる。

4.6. 獲得した知識に基づく設計の実施

最後に、図6に示す意思決定木とロジスティック回帰に

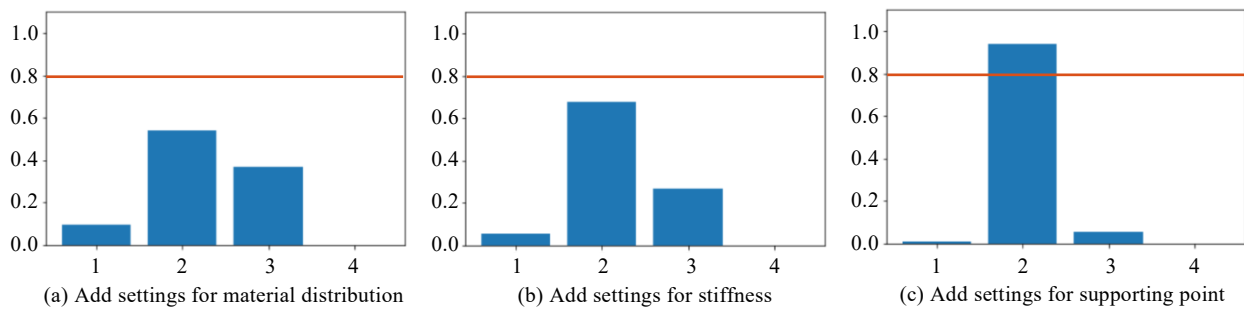


Fig.7 Probability of each concept when a requirement is set

よる予測モデルを用いた概念設計を試行してみる。

まず、試行にあたっては、以下の考え方を前提とすることにする。ロジスティック回帰による予測モデルは、特定の評価指標の値が与えられたときに、コンセプトの選択確率を予測する。本研究では、学習に用いた代替案の傾向を反映すべく、各評価指標の設定は、10%点、中間値(50%点)、90%点から行う。また、明示的な設計要求として設定していない評価指標に対しては、3つの値をそれぞれ選択した場合の全てに対して確率を求め、その平均値を表示することで、後にその評価指標を設計要求として設定した時を見通した予測を行う。これにより、評価指標をすべて選択しなくても有望なコンセプトが予測できるようになり、要求を明確化しながら選択すべきコンセプトの絞り込みを行うことができるようになる。と考える。

上記の考え方のもと、簡単な例題として、山の中を走る高速道路の谷を渡る橋の概念設計を想定し、得られた意思決定木と予測モデルを用いて、選択すべきコンセプトを絞り込む。選択確率が0.8を超えるコンセプトが判明した時点で手続きを終了することとする。

まず、意思決定木より、分類に対応するすべての質問で材料分布の重心に関する質問が含まれていることから、初期要求として、材料分布の重心について考える。設計対象は谷を渡る橋であり、架橋位置が高くなるため見た目の安定感が重要となる。そこで、材料分布の重心は設計領域の下方に位置するのが好ましく、分布の重心に関する評価指標 f_3 として、10%点を設定する。予測モデルにより求められる選択確率は図7(a)のようになり、コンセプト2か3が有望であるという予測結果が得られ、コンセプト1と4は候補から外れる。次に、コンセプト2か3を選択するために、さらなる要求の具体化を行う。コンセプト2と3を分類する図6のQ2に注目し、剛性に関する要求を設定する。高速道路であるのでより高度な安全性が求められるとして、剛性は高い方が望ましく、剛性に関する評価指標 f_1 として10%点を設定する。選択確率は図7(b)のようになり、コンセプト2の方が有望であるという予測結果が得られる。さらなる要求の具体化を考え、支持点の高さについて検討する。山の中であるから支柱を建てるのが難しく、支持点の高さは低い方が良い。そこで、支持点の高さに関する評価指標 f_6 として10%点を設定する。選択確率は図7(c)のようになり、コンセプト2を選択すべきであるという結果が得られる。

よって提案する枠組みによる概念設計により、山の中を走る高速道路の谷を渡る橋の概念設計では、材料分布の重心、剛性、支持点の高さの順に要求を具体化していき、コ

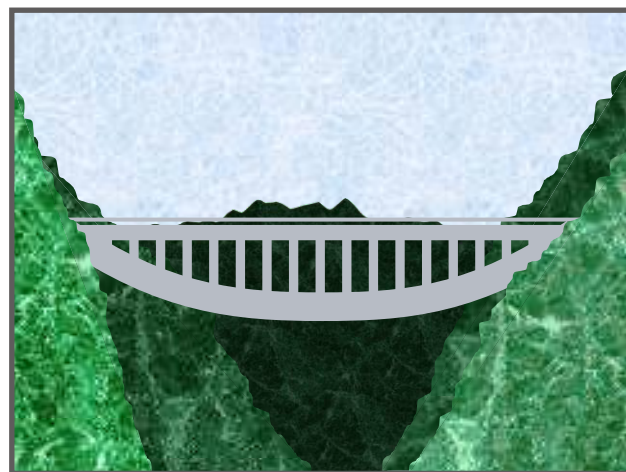


Fig.8 Results of a conceptual design example

ンセプト2を選択すべきであるという結果、すなわち、図8に例示するような概念設計案が得られた。

5. 結 言

本研究は、一般設計学を基礎となる理論に据えつつ、属性を表す設計変数空間と機能を表す評価指標空間での分類の対応付けによる計算機上での概念設計の枠組みを提案し、橋梁構造物の例題へ適用することで、その基本的な妥当性を示した。

枠組みによって得られた結果の可能性を検証するために、例題として、山の中を走る高速道路の谷を渡る橋の概念設計を想定し、得られた意思決定木と予測モデルを用いて、選択すべきコンセプトの絞り込みを行った。その結果、材料分布の重心、剛性、支持点の高さの順に要求を具体化していき、解候補を絞り込むことで特定のコンセプトを選択できることを例証し、提案する枠組みによって概念設計が可能であることが確認できた。

その一方で、提案した枠組みには、多様な代替案の生成における目的関数、支持条件などの問題設定、設計変数空間での分類の際の潜在空間の次元数、クラスター数、考慮する評価指標など、既知の情報をもとに設定せざるを得ない部分が含まれている。そのため、提案する枠組みをより一般的な設計問題、例えば代表的な形態が知られていない設計問題等に適用するためには、プロセスの後戻りによって枠組み内で設定を検証する方法、実験的に設定を検証する方法などを確立することにより、提案手法を発展させていくことが、今後の課題であると考えられる。

文 献

- (1) Pahl, G. and Beitz, W., Wallace, K., Engineering Design, Design Council, 1984
- (2) 吉川弘之, 一般設計学序説, 精密機械, Vol.45, No.8, 906-912, 1979
- (3) Shea, K., Aish, R., Gourtovaia, M., Towards Integrated Performance-Driven Generative Design Tools, Automation in Construction, 14 (2 SPEC. ISS.), pp. 253-264., 2005
- (4) Minowa, K., Fujita, K., Nomaguchi, Y., Yamasaki, S., Yaji, K., Variational Deep Embedding Mines Concepts from Comprehensive Optimal Designs, Proceedings of Ninth International Conference on Design Computing and Cognition (DCC'20), Paper No. 94, 2020
- (5) Bendsoe, M. P., Sigmund, O., Topology Optimization: Theory, Methods and Applications, 2nd edition, Springer, 2003
- (6) Bishop, C. M., Pattern Recognition and Machine Learning, Springer, 2012
- (7) Jiang, Z., Zheng, Y., Tan, H., Tang, B. and Zhou, H., Variational Deep Embedding: An Unsupervised and Generative Approach to Clustering, Proceedings of the 26th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'17), 1965-1972, 2017
- (8) 橋善雄, 中井博, 北田俊行, 橋梁工学 第5版, 共立出版, 2000
- (9) 赤木新介, 設計工学 (上), コロナ社, 1991.