

土木構造物の維持管理計画におけるゲーム理論の適用に関する研究

著者	喜多 敏春
著者別表示	Kita Toshiharu
雑誌名	博士論文要旨Abstract
学位授与番号	13301甲第4054号
学位名	博士（工学）
学位授与年月日	2014-03-22
URL	http://hdl.handle.net/2297/38971



学位論文要旨

土木構造物の維持管理計画における
ゲーム理論の適用に関する研究

*The study on application of game theory in the
maintenance plan of civil engineering structure*

金沢大学大学院自然科学研究科

環境科学専攻

環境計画講座

学 籍 番 号 0823142407

氏 名 喜多 敏春

主任指導教員名 近田 康夫

Abstract

In this study, a fundamental study on game theory (Nash bargaining solution) approach to the bridge maintenance planning is presented. When a bridge is repaired at appropriate time, the gain of the bridge is maximized. Annual budget forces the repair schedule to be slid, so balanced modification of the repair planning is searched. Each bridge is considered as a player, and the bridge group gain is maximized at the same time as pursuing the maximization of an individual gain by adapting Nash bargaining solution with proper utility function. Also, priority of the repair is shown by using properly the concaved utility function and the convex utility function.

And a fundamental study on the game theory (Nash bargaining solution) based approach for giving a priority to anti-earthquake reinforcements of road structures is presented. When a road structure is reinforced at appropriate time, the gain of the road structure is maximized. Each road structure or road link is considered as a player, and the road network gain is maximized at the same time as pursuing the maximization of a road link gain by adapting Nash bargaining solution with proper utility function. Also, importance of each road structure is shown by using properly multiattribute utility function.

1. 緒 論

我が国では、戦後の高度経済成長期に社会資本（道路、橋梁、トンネル、河川、空港港湾等）の整備が大量に行われており、建設から50年以上経つものも多く、それらの公共施設の老朽化が安心して安全な社会の構築に対して大きな問題になっている。2012年12月の中央自動車道笹子トンネルの天井板崩落事故や、米国の2007年8月ミネアポリス高速道路ミシシッピ川橋崩落事故等の老朽化が原因の事故も顕在化し始めている。一方、少子高齢化等が一因で社会補償費の急激な増大により、国の財政が逼迫し、公共投資余力が年々減少してきている。そのため、今後増大する社会資本の老朽化対策のための維持管理や更新を、効率的・効果的に行うことが重要になる。

また、土木構造物の大規模地震による維持管理も重要な課題である。平成18年1月から平成25年4月に、震度6弱以上の地震が12回も発生している。特に、平成23年3月11日の東日本大震災はマグニチュード9.0、震度7の最大

規模の地震で、甚大な被害となった。

以上を踏まえ、本研究では、道路橋維持管理（劣化補修計画）における平準化の最適化について、経済学の理論であるゲーム理論（ナッシュ交渉解）を援用した。各橋梁（補修部位）をプレイヤーと考え、利得を効用に置き換え、対象橋梁群全体と各橋梁の効用を同時に最大化（ライフサイクルコスト（LCC）が最小となっている当初計画に対し、先送りや前倒しが最小となることで効用が最大化）する手法を提案した。また、道路のネットワークを構成する構造物（橋梁や高盛土）の耐震性能を効用関数に置き換え、ゲーム理論（ナッシュ交渉解）を援用し、道路ネットワークを考慮した道路構造物の耐震補強の優先順位を設定する手法を提案した。

2. ゲーム理論の概要

ゲーム理論には、非協力ゲーム理論（非定和ゲーム、定和ゲーム、展開形ゲームなど）と協力ゲーム理論（ナッシュ交渉解、コア、仁、シャープレイ値など）がある。非協力ゲームは、市場経済を反映した理論であり、非協力ゲーム理論の解としてパレート最適解とはならないナッシュ均衡が求められることがほとんどである。本論文には、非協力ゲームのひとつである囚人のジレンマなどを例にあげ、パレート最適解にならないことを説明している。一方、協力ゲーム理論では、ナッシュ交渉解、コア、仁、シャープレイ値の概要を示し、ナッシュ交渉解が、各プレイヤーが協力してパレート最適解となる解が求まるアルゴリズムが簡潔であることを確認した。

3. 協力ゲーム理論（ナッシュ交渉解）と効用関数

ゲーム理論（ナッシュ交渉解）を援用するにあたり、利得を効用（効用関数）に置き換えて援用した。効用関数の性質として、リスク下での単属性 x の効用関数 $u(x)$ が凸型（凹関数）の場合は、リスク回避型となり、凹型（凸関数）の場合はリスク選好型（愛好型）となる。一次関数の場合はリスク中立型となる。この性質を利用し、優先順位を設定する際の重付けに利用できることを示した。

さらに、属性が2つ以上の加法形の多属性効用関数の選考無差別となる確率 k は、重みを表す性質があり、各属性の k の値（ $\sum k_i=1$ ）により、優先順位の重み付けができることを確認した。

4. 橋梁維持管理計画（劣化補修計画）におけるゲーム理論の適用

地方自治体で橋梁の補修計画（長寿命化計画）を行った場合に、LCCが最小になる補修橋梁（補修部材）の補修時期が重なるため、予算制約に伴う予算の平準化を行う必要がある。本研究では、5橋で各橋梁2部材の10補修部材を対象に、予算の平準化を行うため、各補修部材をプレイヤーと考え、協力ゲーム理論（ナッシュ交渉解）を援用し、予算の平準化を行う際に、補修時期の前倒しや先送り最小となり、当初計画のLCCが最小となる補修時期に近く、各補修部材がバランスの良い補修時期になることを確認した。

劣化曲線は二次曲線とし、健全度は5から1までとし、5は最も健全な状態で健全度が小さくなるほど劣化が進むと設定した。また、健全度2で補修すれば最もLCCが最小となると設定した。各補修部材が健全度2で補修することが最も効用が高くなり、効用値1とし、劣化のない健全度5の効用は0とした。健全度2を管理目標と設定したため、健全度2を下回ると急激に効用が減少する関数を設定した。補修計画期間の50年間の健全度に対し、この効用関数により、50年間の効用関数に変換し、50年間の積分した効用値を各補修部材の効用とした。

予算制約による予算の平準化を行う場合の前倒しや先送りの補修時期の組合せが膨大になるため、ナッシュ交渉解により補修時期の組合せの最適解または準最適解を求める手法として遺伝的アルゴリズム（GA）により求めた。GAでは、各補修部材の補修可能時期と各補修部材を二次元配列の遺伝子配列とした。

また、効用関数を凸型や凹型にすることにより、各補修部材に対して補修の優先順位の重み付けをすることを提案した。さらに、補修計画期間の終点側の端部評価の方法を提案した。これは、例えば、前倒し回数が増えれば、補修計画期間が固定の場合、補修回数増え急激な評価関数の変化が生じ、正当な評価ができなくなることが考えられるためである。よって、補修時期を前倒しした場合には当初の補修計画期間から前倒しした年数を減じ、先送りした場合には先送りした年数を加え効用値を求めることを提案した。

以上の結果、個々（各橋梁、補修部材）の利得（効用）の最大化と全体（対象橋梁群全体）の利得（効用）の最大化を同時に図る手法を、ナッシュ交渉解を援用することで提示できたと考える。また、効用関数の形状を凹型（リスク回避型）や凸型（リスク選好型）とし、効用関数に重みをつけることにより、当初計画の適切な補修時期を守る橋梁や補修部材、または補修時期の変更を許

容する橋梁や補修部材の重要度（優先順位）を設定する手法の提案ができた．また効用関数の形状を微妙に凹型や凸型に変えることにより，個々の橋梁の重要度の順位づけが可能となった．さらに，LCC を考慮する補修計画期間を50年間や100年間などに設定した場合に，前倒しや先送り補修の影響（補修回数が増減によるLCCの急激な増減）による補修計画期間の終点側端部の評価関数の不整合を是正する方法を提案できた．現在まで土木分野でゲーム理論の援用が進んでいない要因は，各プレイヤーの利得を正当に設定することが難しいためである．本研究では，利得を健全度に対応した効用関数に変換し，利得を金額ではなく，どの時期に補修したらその橋梁(プレイヤー)にとって効用が高いかという効用値で表現したことで，ゲーム理論の援用の一手法を提示できたと考える．また，本研究では補修時期の先送りが選ばれにくい効用関数を設定したが管理目標を超えて補修の先送りを認める場合は，リスクを正当に評価した効用関数の設定が必要である．

5. 道路ネットワークを考慮した道路構造物耐震補強の優先順位設定へのゲーム理論の適用

阪神大震災や東日本大震災の教訓から，地震被災時の緊急輸送道路などの道路ネットワークを確保するために，道路構造物のレベル2地震動に対する耐震補強が急務になっている．道路のネットワークを確保するためには各道路構造物（橋梁や高盛土など）が等しくレベル2地震動対応になっている必要がある．

本研究では，各構造物や路線や道路リンクをプレイヤーと考え，協力ゲーム理論（ナッシュ交渉解）により，各戦略を設定し，道路ネットワークを考慮した各種道路構造物をレベル2地震動対応の耐震補強の優先順位設定方法を提案した．

ナッシュ交渉解を援用する際の効用関数は，レベル2地震動対応の耐震性能があれば効用を1とし，レベル1地震動対応であれば効用0.5，常時対応であれば効用を0.25や0.30などとし，構造物ごとに効用関数を設定した．また，道路ネットワークの対象構造物は，橋梁と高盛土とした．

道路ネットワークは，3路線並列で構成されたリンク1区間とそれに接続する2路線並列のリンク2区間と，それに接続する3路線並列のリンク3区間の並列と直列で構成された単純なネットワークとし，各路線に耐震性能の違う橋梁と高盛土を構造物の配置を設定した．

本研究では，戦略1として，各構造物をプレイヤーと考えた場合は，耐震性

能の低いものから耐震補強をすることになることが判った。ただし、戦略1では、耐震性能が同じ(レベル1地震対応)ものが残った場合にはそれ以上優先順位を設定できなくなる。戦略2として、各リンクをプレイヤーと考えた場合は、ネットワークを繋ぐことを優先した各構造物の耐震補強の優先順位が決まることが判った。また、戦略1と戦略2の併用戦略を戦略3とし、まず戦略1で耐震性能の低いものから耐震補強し、その後、戦略2で道路ネットワークを繋ぐ耐震補強の優先順位となる戦略を提案した。

また、戦略2において多属性効用関数の加法形の場合の性質（選考無差別となる確率 k が重みを表す）を利用し、橋梁（ $k=0.6$ ）と高盛土（ $k=0.4$ ）の重要度を設定し計算結果を示した。

また、戦略2において各路線に交通量の最大フローを設定し、最大フローもプレイヤーと考え、最大フローの正規化したものを効用値とした。ここでは、スケジューリング問題を解く遺伝子配列を考慮したGAにより耐震補強の優先順位を求めた。

以上の結果として、本研究では、耐震レベルに応じた効用関数を設定することによりゲーム理論（ナッシュ交渉解）を援用し、耐震レベルの低い構造物から耐震補強する戦略（戦略1）や道路ネットワークを繋ぐことを優先する戦略（戦略2）やそれらの併用戦略（戦略3）など戦略ごとに耐震補強の優先順位を設定する方法を示すことができた。また、多属性効用関数により、道路構造物ごとに重み付けをし、優先度を変更できることが示せた。さらに、最大フローを同時に考慮することで、交通量の違いによる耐震補強の優先順位の変化を検討することができた。最大フローの代わりに、緊急輸送路などの路線別の重要度の値を使うことにより、路線の重要度を考慮することもできることを示した。

6. 結論

1) 本論文のまとめ

本研究での適用例で示した公共事業を対象にゲーム理論を援用する場合は、非協力ゲームのような市場競争原理を表現するゲーム（非協力ゲームの解はナッシュ均衡であり、パレート最適ではない）ではなく、ナッシュ交渉解のような協力ゲームを援用する方が、与えられた予算（税金）をパレート最適解として配分できるため非常に効率がよい。よって、協力ゲーム理論のひとつであるナッシュ交渉解は、さまざまな公共事業の分野の効率的な予算配分決定や優先順位決定には有効な解析ツールとなると考える。近年、笹子トンネル事故をは

じめ、土木構造物の老朽化に伴う事故がみられるようになってきている。国の財政難から公共投資余力が減少する中、予防保全型の維持管理を行い、構造物の長寿命化を図り、LCC を最小化するような維持管理計画の施策が重要である。また、予防保全による補修と点検を繰り返し、PDCA (Plan : 計画, Do : 実行, Check : 評価・検証, Action : 改善) サイクルを回しながら、より良い維持管理を実行し続けることが重要であると考えます。

2) 今後の課題と展望

本研究において、ゲーム理論を援用するために、利得を効用に置き換えて適用している。効用関数を定性的に設定しているが、社会情勢（経済環境、生活環境、自然環境など）や土木構造物の維持管理者の意思をもとに、定量的に効用関数を求める手法が必要であると考えます。ナッシュ交渉解は、対象となる構造物が多くなると、目的関数の Π の値が大きくなるため、対数に変換することや、効用の積分値を正規化することなどが必要であると考えます。また、劣化補修計画問題では、現実の劣化曲線や橋梁数に合わせた実証研究が必要であると考えます。一方、道路ネットワークの耐震補強問題では、現実の複雑な道路ネットワークにも対応できるようにする必要があると考えます。今後は、補修計画と耐震補強計画を同時に考慮し、土木構造物の補修・補強計画を立案することが必要であり、この場合もゲーム理論の援用が有効であると考えます。経済学のゲーム理論の協力ゲームのひとつであるナッシュ交渉解は、アルゴリズムが単純であることや、限られた予算をパレート最適とする必要のある公共事業への援用には有効であると考えられる。また、利得や効用関数の設定が定性的や定量的に表現できれば、ナッシュ交渉解の援用範囲が広がると考えます。本論文は、道路構造物を事例としてゲーム理論の適用について述べているが、河川や港湾やライフラインなどの土木構造物にも適用できると考えます。

学位論文審査報告書（甲）

1. 学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

土木構造物の維持管理計画におけるゲーム理論の適用に関する研究

2. 論文提出者 (1) 所 属 環境科学 専攻 環境計画 講座

(2) 氏 名 喜多 敏春

3. 審査結果の要旨（600～650 字）

提出学位論文に対して各審査委員が個別に審査を行った後、第 1 回論文審査委員会において、審査方法を決定するとともに、論文内容の検討を行った。さらに、平成 26 年 1 月 31 日に実施された口頭発表の後に、第 2 回論文審査委員会を開催し、慎重に審議した結果、以下のように判定した。

本研究は、喫緊の課題となっている社会資本の維持管理に関して、協力ゲーム理論（ナッシュ交渉解）の適用の可能性を検討したものである。橋梁長寿命化計画において、実行可能な予算計画策定のために補修費用の平準化が必要となるが、既存の研究では、健全度などを評価指標とした総和型の目的関数を用いた最適化を行っているため、特定の橋梁に予算調整のしわ寄せが集中するなど弊害が除外しきれず、解の一意性も確保できない場合が多かった。本研究ではナッシュ交渉解を適用するために評価指標を効用値として表現することにより、個々の橋梁の計画最適化と橋梁群としての計画最適化を同時に行うことが可能であること、また、優先橋梁が設定可能であることを計算例により示した。さらに、道路網における、複数の異種構造物の耐震補強順序の決定に対してもナッシュ交渉解を適用して、構造物の健全性・道路の接続性・交通容量の最大化を同時に考慮することの可能性を数値計算により示した。いずれも、現在の課題に対応できる方法論を展開しており、工学的価値が高いことから、本審査委員会は本論文が博士（工学）に値すると判断した。

4. 審査結果 (1) 判定（いずれかに○印）合格・不合格

(2) 授与学位 博士（工学）