

京都大学工学部 正会員 長尾 義三
 京都大学工学部 〇正会員 喜多 秀行
 京都大学大学院 学生員 笠島 勝治

1. 緒言

土木計画を策定する場合、土木施設に対する需要は絶えず時間的・空間的に変化しており、動学的な立場からの考察が必要である。ここで特に時間軸に注目して「何期までの需要を対象として計画するのがよいか」という需要予測の期間を計画目標期と呼ぶことにする。従来の研究においては、時間、空間を固定し必要なわく組を設定していることが多い。¹⁾ そしてこの固定された計画目標期の範囲内で最適投資時系列を論じてきた。しかし実際の需要は時間とともに変動するためにどの時期を計画目標期とするかによって投資時系列に差異が生ずる。長期の需要を見通せば、施設の規模の経済性はたらく効率のよい施設を構想し得たとしても需要予測の不確実性が大きくなり必ずしも有利には作用しない。また逆に、短期の計画目標期では不確実性は小さくなるが施設の効率の点で劣るようになる。したがって需要予測の不確実性を正しく評価し最適な計画目標期と投資時系列を同時に決定する方法が必要となってくる。

本研究においては、計画目標期設定を施設の規模の経済性による期待便益増大と、需要予測の不確実性による期待損失増大とのトレード・オフ問題として扱った。その際将来にわたって増大する需要予測の不確実性を確率的に表現し、投資にめめわる便益の期待値と投資額との差（純便益）の単位需要あたりの現在価値最大を最適性基準として、この不確実性が計画目標期及び投資時系列における投資規模とその実行時期をどのように規定するかを定式化した。事例研究としては港湾埠頭計画をとりあげ、計画のタイムミズムに影響を及ぼす要因（社会的割引率など）についての感度分析をも行なった。

2. 対象プロジェクトと便益・費用

2-1. 対象プロジェクト

道路・港湾のような土木施設計画を対象とする。このような施設計画、例えば港湾計画においては1バース、2バースなりを各期の需要にあわせて追加的に計画を実施していく場合と、相当長期を見通して大規模な施設を一体的に利用するべく目標をおき、一括または段階的に建設していく場合を規定する。そして幾つかの可能な建設方式を列挙しその優劣を比較することが行なわれる。実際の方法では、利益になる部分と損失部分を列挙して総合的な評価が行なわれるわけであるが、基本となるものは費用便益分析である。本研究の対象となるものは以上のようなプロジェクトであり次のような性質を持つ。

- 1) プロジェクトは施設計画を対象として施設の規模について最小分割単位が存在している。したがってプロジェクトを数多くの単位として一括して建設することもでき、また一部の建設投資の時期を遅らせることもできる。しかし分割を多くすることにより手戻り費用が増加することになる。
- 2) 施設の単位を合わせて一体利用することにより、最小分割単位の能力の単純合計よりも大きな能力を発揮させ得る。（施設利用における規模の経済）
- 3) プロジェクトは純便益の現在価値あるいは毎年等価値で評価することができる。
- 4) 需要が施設の能力を上まわれば供給不足に基づく費用を生ずる。（例えば混雑費用）
- 5) 需要が施設の能力を下まわれば没給過剰に基づく費用を生ずる。（例えば遊休費用）
- 6) 需要は時間とともに変動し一般に増加する。（需要の成長）その予測にあたっては不確実性が入り込む。

(需要予測の不確実性)

7) 増本は増値する。したがって異なる時期の価値の比較においては増進率で割引かねばならない。

(社会的割引率)

8) 施設には、物理的、経済的、社会的耐用年数があり、効用を提供する期間は有限である。

(サービスライフの存在)

スーエ、便益と費用

評価の基準となる便益は消費者余剰としてとらえることができ、図-1において斜線の部分として表わせる。すなわちある施設規模 K のもとでの便益 $B(K)$ は

$$B(K) = \int_0^{D^*} f_D(D) dD - f^* D^* \quad (1)$$

ここに D^* , f^* は需要曲線 $f_D(D)$ と供給曲線 $f_S(D)$ の交点。すなわち均衡状態における需要量と費用を表わす。

本研究では需要は費用に対して非弾力的であると仮定する。そのとき消費者の支払い対価(Willingness to Pay)は需要 D の大きさにかかわらず一定 U の値をとることになる。費用にかかわらず絶対に必要なものに対する需要であるならばこのような仮定は許される。主食、エネルギー等がこのような例であるが、公営財としての土木施設への需要はこの種の性質を持っている。また評価のために現在の便益と建設投資後の便益の差をとるようにすれば、 U の水準をどの程度にするかの影響は避けられる。したがって式(1)は D_t の需要を D_t とすれば

$$B(K, D_t) = \int_0^{D_t} U dD - f^* D_t \quad (2)$$

と書くことができる。

一方、施設を利用することによる単位利用者が負担する費用は利用量が増加するにつれて、混雑、あるいは待ちが生ずるにつれて増加する。この増加の度合いは施設規模が大きいほど小さい。また利用にあたっては、利用量もしくは施設規模に関係しない固定費用が存在する。こういふ条件を満足する(3)式を平均利用費用曲線として仮定する。

$$f_S(K, D_t) = \bar{F} + f_K(D_t) \quad (3)$$

ただし $\bar{F}$ は固定費用である。

したがって総便益は、式(2), (3)より

$$\begin{aligned} B(K, D_t) &= \int_0^{D_t} U dD - f^* D_t \\ &= D_t [U - \{\bar{F} + f_K(D_t)\}] \end{aligned} \quad (4)$$

更に平均利用費用に含まれない施設供給者の費用を考える。施設供給者側の費用とは建設費用、維持管理費用であり、これを I_t と表わす。以上より純便益 $NB(K, D_t)$ は

$$NB(K, D_t) = B(K, D_t) - I_t$$

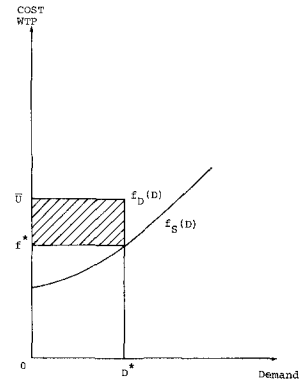


図-1 非弾性需要のもとでの便益

$$= D_t \cdot \{ \bar{U} - \{ \bar{P} + f_k(D_t) \} \} - I_t \quad (5)$$

と表現できる。

3. 需要予測の不確実性 2)

3-1. 需要モデル

将来の需要の予測には不確実性が伴い、これが施設計画に影響を与える。需要の変動を直接説明する要因を列挙することは困難であり、またその要因自体の予測にも不確実性が伴う。したがって本研究においては次のような自己回帰型のモデルを用いる。

$$D_{t+1} = \beta_1 D_t + u_t \quad (6)$$

ここに D_t, D_{t+1} は t 期, $t+1$ 期の需要, β_1 は回帰係数, u_t は各期で独立な誤差項で $N(0, \sigma^2)$ にしたがるものとする。このモデルは需要の変動を1期前の需要で説明する定常1次元マルコフ過程を表わしており、 $\beta_1 = 1$ のとき需要-時間関係は線形になり、 $\beta_1 < 1$ のときは指数型の曲線を表わす。したがって単調に増加するような需要を近似するには適当と考えられる。

3-2. 予測確率密度関数

いま、式(6)のパラメータ $\theta(\beta_1, \sigma)$ は未知であり事前分布を diffuse とし次のように与える。

$$\xi(\theta) \propto \frac{1}{\sigma} \quad (7)$$

これは β_1, σ がいづれも独立に $(-\infty, \infty)$ を変域とする一様分布にしたがっていることを示している。しかし時間が経過して需要のデータ D^0 が確保されれば、パラメータの事後分布はベイズの定理により次のようになる。

$$\xi(\theta/D^0) = \frac{P(D^0|\theta)\xi(\theta)}{\int P(D^0|\theta)d\theta} \quad (8)$$

したがって過去の需要のデータ D^0 によって任意の t 期の需要の予測確率密度関数は次の如く求められる。

$$P(D_t|D^0) = \int_{\theta} P(D_t|D^0, \theta) \xi(\theta/D^0) d\theta \quad (9)$$

ここで $P(D_t|D^0, \theta)$ は現在の情報 D^0 とパラメータ θ が与えられたときの需要 D_t の確率密度関数である。

$$\begin{aligned} P(D_t|D^0, \theta) &= \int_{D_{t-1}} \cdots \int_{D_1} P(D_t, D_{t-1}, \dots, D_1|D^0, \theta) dD_1 \cdots dD_{t-1} \\ &= \int_{D_{t-1}} \cdots \int_{D_1} \prod_{i=0}^{t-1} P(D_{i+1}|D^0, \theta) dD_1 \cdots dD_{t-1} \end{aligned} \quad (10)$$

これは次のような正規分布を示す。

$$P(D_t|D^0, \theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_t} \exp \left\{ -\frac{(D_t - m_t)^2}{2\sigma_t^2} \right\} \quad (11)$$

ここに

$$m_t = \beta_1^t D_0 \quad (12)$$

$$\sigma_t = \sigma \cdot \sqrt{\sum_{k=0}^{t-1} \beta_1^{2k}} \quad (13)$$

式(8)により任意の t 期の需要の任意点における期待値が得られ後述する純便益の期待値演算が可能となる。

4. 計画目標期決定モデル

需要予測の不確実性は式(10)として予測確率密度関数 $P(D_t)$ で示される。一方純便益は式(9)で示され、これを各期ごとの需要に割り振れば単位需要あたりの純便益が求められる。そしてこの両者による期待値演算を行い、評価基準として単位需要あたりの毎年等価純便益最大化基準をとる。費用便益分析における評価基準としては現在価値あるいは毎年等価で表わされた純便益が一般的である。しかしこのような方法はある定ま、計画目標期のもとの最適投資時系列を決定する際には役立つが、本研究で求めようとしているのは計画目標期そのものであるために前述の評価基準では、計画目標期を長くするほど純便益が大きくなるために適切であるとはいえない。したがってここでは、各期の純便益を需要で割った単位需要あたりの純便益の毎年等価価値最大化基準を用いる。

その際に次の3つの仮定をおく。

<仮定1>

計画目標期を m 期、それ以降の耐用年数を l 期間とする。実際には m 期までに段階的に建設された施設によっても便益は発生しているので耐用年数が終了するまでの期間は建設投資時期の違いによって変化しているが本研究ではこのことを無視する。これは建設時期から計画目標期までの期間は耐用年数に比べて小さく、計画目標期の設定に与える影響の小さいプロジェクトのみを対象としていることになる。

<仮定2>

各期の需要は第1期以前に用意された施設 k_0 とその後建設された施設 k_t を一体利用 (k^+) する。一方、耐用年数 l 期間においては第 m 期での便益が発生し続けるものとしている。すなわち第 m 期での需要 D_m に対して第 m 期での k 規模の施設が l 期間サービスを提供していると仮定する。

<仮定3>

次に建設投資は実際には計画目標期 m 期までの間にしか行なわれないのであるが、施設は $m+l$ 年にかたって利用される。そこである時期に投資された建設費用は、各年度の需要量が施設費用として $m+l$ 期間の毎年等価費用に換算した額を負担するものと考え。したがって、ある年度の施設費用は各時期に建設された施設の建設費用の毎年等価費用の和となる。

以上のことから計画目標期 m 期の純便益 R_m は式で示される。

$$R_m = \max_{I_1, I_2, \dots, I_m} \left[\sum_{t=1}^m \int_{-\infty}^{\infty} P(D_t) \frac{B(k^+, D_t) - I}{D_t} \left(\frac{1}{1+i} \right)^t dD_t + \sum_{t=m}^{m+l} \int_{-\infty}^{\infty} P(D_m) \frac{B(k^+, D_m) - I}{D_m} \left(\frac{1}{1+i} \right)^t dD_m \right] \cdot \frac{i(1+i)^{m+l}}{(1+i)^{m+l} - 1} \quad (14)$$

ここに

$$I = \sum_{t=1}^m I_t \left(\frac{1}{1+i} \right)^t \quad (15)$$

$B(k^+, D_t)$: t 期において施設 k^+ 、需要 D_t のもとでの便益

I_t : t 期における実際の建設投資

$P(D_t)$: t 期における需要 D_t の生起確率密度関数。式(10)で示される。

i : 社会的割引率

評価関数は式(14)を満足する m^* を求めることである。

$$R_m^* = \max_{m^*} [R_m] \quad (16)$$

5. 港湾計画への適用

本方法論を港湾計画におけるバース数決定問題に適用を考える。バース数決定にあたって一般に行なわれている方法は、計画目標期を与件として与えその時の需要量と港湾取扱貨物量を推計し、原単位を用いてバース数を求める。さもなくば港湾取扱貨物量を制約条件として、便益最大もしくは費用最小となるバース数を求める。いずれにしても計画目標期は与件とされており計画の持つダイナミズム性は考慮されていない。

次に港湾通過に要する単位あたりの費用には在港船費、港湾施設費、陸送費、沿岸荷役費、港湾諸掛り費、貨物に対する金利などがある。3) このうち施設規模と取扱貨物量に関係する費用は在港船費と港湾施設費であり残りの費用は関係しない固定費用で式(3)の予に相当する。また港湾施設費は施設供給側の費用であり、残りが利用側の費用である。このなかでも在港船費(すなわち混雑による費用)の占める割合が非常に大きい。

式(3)の中で在港船費は $f_k(D_*)$ であり次式により得られる。

$$f_k(D_*) = \frac{G_0 \left(\frac{1}{\mu_1} + t_w \right)}{\sum} \quad (17)$$

ここに

G_0 : 入港船1隻あたり1日あたりの関係費用

μ_1 : 入港船1隻あたり平均けい岸時間

t_w : 入港船1隻あたり平均バース待ち時間

λ : 入港船1隻あたりの荷物量

またバース待ち時間 t_w は船舶の港湾利用動態を待ち行列理論を用いてモデル化することにより次式で得られるとした。

$$t_w = \frac{\mu_1 s^k P_0}{(k-1)!(k\mu - \lambda)^2} \quad (18)$$

$$P_0 = \left[\sum_{m=0}^{k-1} \frac{s^m}{m!} + \frac{s^k}{(k-1)!(k-\rho)} \right]^{-1} \quad (19)$$

ここで λ は到着率, s は利用率で λ/μ , k はバース数である。式(17), (18)より需要1トニあたりの平均利用費用が年間需要 D と規模 k との間数となっていることがわかる。また図-5より需要 D が增大するほど混雑費用が増大し、バース数が増えるほどその傾きが小さくなることが明らかになる。

6. 計算結果及び考察

式(17)~(19)における1船あたりの荷物量 λ を 3000ト/日

1日あたりの本船の平均荷役量 μ_1 を 2,000ト/日

1日あたりの在港船費用を 80万円/日

とした場合を事例として数値計算を行なった。

その結果を表-1に示し、得られた定性的結果を列挙し考察を加える。

- 1). 需要予測の不確実性 (ρ_0) が大きいほど計画目標期は短くなる。

ρ_0 の値が 20% では計画目標期はせいぜい 2 年である。このとき、式(17), (18)によれば $\rho_{\max}$ の値は 5 年後、10 年後においてはそれぞれ 30%, 40% 以上になる。このように需要予測の不確実性が計画目標期に与える影響は相当大きいことが推察される。

- 2). 需要予測の不確実性が大きくなると施設の建設時期が早くなる。

港湾における利用者の費用は混雑費用がその大部分を占める。不確

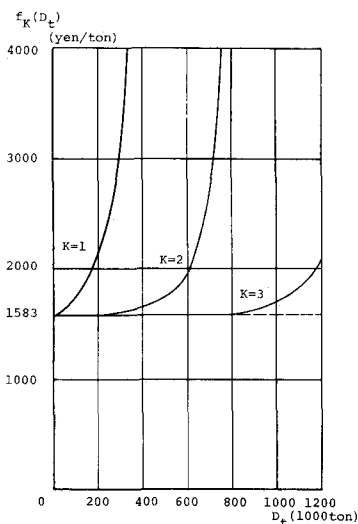


図-2 平均利用費用曲線

実性が大きくなると将来に施設不足をきたす確率が大きくなり、早めに次の建設を促す方向に作用するため、計画目標期も短くなる。

3). 初期ストック(S_0)が小さいほど計画目標期は長くなる。

本研究においては、計画目標期の設定は継続的になされる（すなわち、一つの計画目標期が終了した時点で次の計画目標期設定を行なう。）ものとしているため、計画目標期を設定する際の当初の施設量(S_0)を、前の計画の終わった時点での施設量にとっている。 S_0 は結果的に過剰投資であったり、不足していると判断される場合があり、このことは計画目標期にも影響を及ぼす。そこで S_0 と D_0 の大小関係と、計画目標期の長短との関連を検討した。 S_0 による供給能力が D_0 に対して十分大きく、さらに次年度の予測需要 D_1 に対しても不足する確率が小さいと判断された場合には、次年度まで建設を見合わせ、次年度にあらためて同様の検討を行なうことが常に有利となるため計画目標期は1年となる。また現在、不足ないしはごく近い将来に不足の状態になることが予想される場合には、不足量が大きいほどまとめて建設することによる建設時の規模の経済を享受する可能性も高くなるため、計画目標期を長くする方向にはたらく。

4). 初期需要(D_0)が大きいほど計画目標期は短くなる。

初期需要が大きいときには各期の需要の増加量 ΔD_t も大きくなる。このとき施設1単位の能力と ΔD_t とを比較して、 ΔD_t がかなり大きければ施設を建設してもすぐに混雑をきたさようになるために長期を見通した計画はたてにくくなる。

$D_0 \backslash C/D_0$		1%	5%	10%	20%
50	$C=10$ $\alpha=10$ $i=7$ $\beta_1=1.07$ $S_0=1$	$N=13$ 2,0,0,0,0,0,0,0,1,0 0,0,0	$N=12$ 2,0,0,0,0,0,0,1,0,0 0,0	$N=5$ 2,0,0,0,0	$N=2$ 2,0
	$C=10$ $\alpha=10$ $i=7$ $\beta_1=1.07$ $S_0=2$	$N=5$ 1,0,0,0,0	$N=5$ 1,0,0,0,0	$N=4$ 1,0,0,0	$N=2$ 1,0
	$C=10$ $\alpha=10$ $i=7$ $\beta_1=1.07$ $S_0=3$	$N=1$ 0	$N=1$ 0	$N=1$ 0	$N=1$ 0
	$C=10$ $\alpha=10$ $i=7$ $\beta_1=1.07$ $S_0=1$	$N=8$ 3,0,0,0,1,0,0,0	$N=7$ 3,0,0,1,0,0,0	$N=2$ 3,0	$N=1$ 3
	$C=10$ $\alpha=10$ $i=7$ $\beta_1=1.07$ $S_0=2$	$N=3$ 2,0,0	$N=2$ 2,0	$N=2$ 2,0	$N=1$ 2
	$C=10$ $\alpha=10$ $i=5$ $\beta_1=1.07$ $S_0=1$	$N=13$ 4,0,0,0,0,0,0,0,1 0,0,0	$N=7$ 4,0,0,0,0,0,0	$N=2$ 3,0	$N=1$ 3
100	$C=10$ $\alpha=50$ $i=7$ $\beta_1=1.07$ $S_0=1$	$N=9$ 4,0,0,0,0,0,0,0,0	$N=7$ 4,0,0,0,0,0,0	$N=2$ 3,0	$N=1$ 3
	$C=20$ $\alpha=10$ $i=7$ $\beta_1=1.07$ $S_0=1$	$N=9$ 3,0,0,0,0,1,0,0,0	$N=7$ 3,0,0,0,1,0,0	$N=2$ 3,0	$N=1$ 3
	$C=10$ $\alpha=10$ $i=7$ $\beta_1=1.07$ $S_0=2$	$N=6$ 3,0,0,1,0,0	$N=2$ 3,0	$N=1$ 3	$N=1$ 3
	$C=10$ $\alpha=10$ $i=7$ $\beta_1=1.07$ $S_0=3$	$N=2$ 2,0	$N=2$ 2,0	$N=1$ 2	$N=1$ 2
	$C=10$ $\alpha=10$ $i=7$ $\beta_1=1.07$ $S_0=4$	$N=1$ 1	$N=1$ 1	$N=1$ 2	$N=1$ 2

ただし C : 1バース建設費用(億円) β_1 : 需要の平均成長率
 α : 手戻り率(%) S_0 : 当初の施設ストック
 i : 社会的割引率(%)
 D_0 : 当初需要量(万トン) N : 計画目標期(年)

表-1. 需要予測の不確実性の計画目標期に与える影響

7. 結語

計画目的は普通であつても計画行動の規模を想定する計画目標は時間とともに変動する。どの時期に計画目標を設定するかによつて計画の内容、すなわち施設の種類、規模、配置が著しく変化する。長期を見通せば長い将来にわたる好ましい結果が得られることばかりでなく、計画をとりまく環境によつては短期の計画目標を設定せざるを得ない場合もある。

本研究では、計画目標期を左右する要因のうち、特に需要予測の不確実性と施設の規模の経済に注目して計画目標期を選定させる評価基準との関係構造を明らかにした。計画目標期が与件とされていればどのような建設方式を選択すればよいかの研究はなされている。この研究成果をとり入れ最適な建設方式がなされるという前提で計画目標期を設定する方法論を提案した。その結果需要予測の不確実性が大きいとき、計画目標期を短くさせることが明らかにされた。ところで計画を策定する際には、長期的な視野にたったものが有利な結果をもたらすことが多い。しかし本研究の結果から需要予測の不確実性の存在がこれを阻害することもわかった。これらのことから需要予測の不確実性を小さくして規模の経済をはたらせるため計画目標期を長くすることが計画者に課せられた一つの課題といえる。

次に本研究における今後の課題としては次のようなことが挙げられよう。

1). ダイナミズムの正確な定式化、特に需要予測の不確実性の表れし方である。需要は洪水予測のように自然状態としてのランダム性が確保できないので表現が困難である。このことが計画目標期設定の問題をあいまいにしている。

2). 次々に建設される施設をすべてまとめて一体化利用を行なうという仮定は必ずしも現実的であるとはいえない。たとえば道路建設においてはせいぜい6車線までであり、その容量を上まわる需要は全く別の施設で受け持たせることを考える必要がある。

3). 計画目標期までのサービスの使用、すなわち計画目標期が長くなればこの間の価値の減少はたらくわけであり、このことをモデルに取り込む必要がある。

このように今後に残された課題は多いが、本方法論を適用することによつてダイナミズム性の存在する計画において適正な計画目標期を設定することの可能性が明らかになった。

参考文献

- 1). 長尾義三, 森杉寿芳, 吉田哲生: 非弾力性需要のもとにおける段階建設について, 土木学会論文報告集, 第250号, 1976年6月
- 2). A. Zeller: An Introduction to Bayesian Inference in Econometrics, Chapter III, The Univariate Normal Linear Regression Model
- 3). Nagao, Y & Kanai, M: A Study on the Method of Port Improvement by Physical Distribution Cost Analysis Proceedings in PIANC. 1969