

環境負荷を考慮した橋梁形式選定支援システムの作成と利用に関する研究

伊藤 義人¹・平野 徹²・永田 裕規³・ハノマート アミン⁴・西土 隆幸⁵・加島 章⁶

¹フェロ- 工博 名古屋大学教授 理工科学総合研究センター (〒464-01 愛知県名古屋市千種区不老町)

²学生員 工修 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻

³学生員 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻

⁴正会員 工博 名古屋大学助手

⁵正会員 工博 川田テクノシステム

⁶正会員 工修 国際協力事業団

近年、環境問題は世界的な関心を集めており、その研究が進められているが、土木・建築の分野においても、環境負荷に対する検討を行う必要がある。本研究では、橋梁架設時における環境負荷に対する評価も行えるように、エネルギー消費量及びCO₂排出量の算出を行える橋梁形式選定支援システムを開発した。また、本システムを用いて各橋種の環境負荷を算出し、その比較を行い、現在の橋梁建設においてどの部分が最も大きな環境負荷を与えているかを示すとともに、どの橋種が環境に大きな負荷を与えているかを算出している。さらに、リサイクルを行うことによってどの程度環境負荷値を抑えられるかについても検討している。

Key Words : environmental impact, bridge selection system, energy consumption, CO₂ emission

1. 序論

近年、産業の発展とともに環境破壊は、地球規模のものとなってきている。そのため、環境破壊に対する対策も各国が別々に行うのではなく協力して行っていかなければならなくなっている。特にアジア・太平洋地域では、1990年代だけでなく2000年以降も高い経済成長が見込まれており¹⁾、これらの地域が環境保全を考慮することなく経済性のみを追求した開発を行っていくと、環境破壊は深刻なものになってくると考えられ、環境負荷を抑えた開発の研究は今後とも重要であると考えられる²⁾。

1992年に、ブラジルで「環境と開発に関する国連会議(地球サミット)」が開かれ、大気保全、技術移転及び資金援助など40章からなるアジェンダ21が採択されており³⁾、途上国に対する技術移転を行い環境破壊を抑える必要性が説かれている。日本は、ODAを通して発展途上国に対し開発援助を行っているために、援助を行った開発に対する環境

保全は特に重要な課題であると言える。しかし、土木・建築の分野では、環境問題に対する研究は始まったばかりであり、環境問題を扱えるシステムもあまり作成されていない。

そこで、本研究では従来の橋梁形式選定支援システム⁴⁾を橋梁架設時のエネルギー消費量及びCO₂排出量により環境負荷値の算出も行えるように発展させた。環境負荷については、エネルギー消費量やCO₂排出量のみでなく、建設廃材などに関する評価が必要であり、さらに橋梁の必要性やライフサイクルでの評価を検討する必要があるが、ここでは、研究の第一段階であるため建設時の環境負荷のみを考慮することとした。また、本研究では、グローバルな環境負荷のみを考えるが、地域環境などの評価も今後同時に考える必要もあるであろう。

橋梁分野では環境負荷の問題は研究が始まったばかりであり、橋梁架設のどの部分において最も環境に負荷を与えているのかがまだ把握されていない。そこで、本支援システムを用いて各種橋梁の環境負荷値の算出を行い環境負荷の少ない橋種を見つけ、

また、橋梁架設における各架設段階の環境負荷値の算出を行い、環境負荷値の内訳を求めた。また、環境負荷を抑える有効な方法としてリサイクル資源の利用が考えられており、今後リサイクル資源の利用は不可欠と考えられる。そこで、リサイクル資源を用いた場合の環境負荷値の算出も行い、リサイクル資源を用いることにより、どの程度環境負荷値が低減されるかの試算を行うと同時に、今後の課題についても示した。

なお、発展途上国援助として行われる橋梁建設のときに、本システムを適用するために、まだ初歩的段階ではあるが、発展途上国への技術移転を評価する項目も作った。また、今回試作したシステムそれ自体も単価などの内部データを発展途上国のものに変更することによって発展途上国の橋梁技術者が直接利用できる可能性があるので、本研究は橋梁技術の発展途上国への移転にも貢献できると考えられる。

2. 橋梁形式選定支援システム

(1)はじめに

本研究の橋梁形式選定支援システムのフローチャートを図-1に示す。文献4)で示した従来の支援システムでは、設計条件として、橋長、幅員、地盤条件などを入力し、それらの諸条件により橋梁形式の候補を選定するようになっていた。そのシステムでは、経済性、走行性及び景観が評価の対象となっている。そして、最終的に各項目について5点満点で評価し、それに各評価の重みを乗じて、総合評価を行うようになっている。

本研究ではこの支援システムに、図-1に示すように、新たに環境負荷を評価する項目をつけ加え、また、発展途上国への技術移転を評価する項目もつけ加えた。

(2)環境負荷評価

環境負荷評価を行う指標として、本研究では、エネルギー消費量(kcal)とCO₂排出量(t:炭素換算量)を用いている。エネルギー消費量は、橋梁を架設することによって消費されるエネルギー量を示す値であり、CO₂排出量は、橋梁を架設する時に排出されるCO₂の量を示す指標である。環境負荷評価を行う際には、まず、これら2つの指標に対し、ここでは同等の重みを持つものとしてそれぞれ最も値の低いものに2.5点、最も値の高いものに0点を与え、中間値については線形補完を行う。そして、2つの指標により得られた得点を足し合わせることで環境負荷評価を行っている。

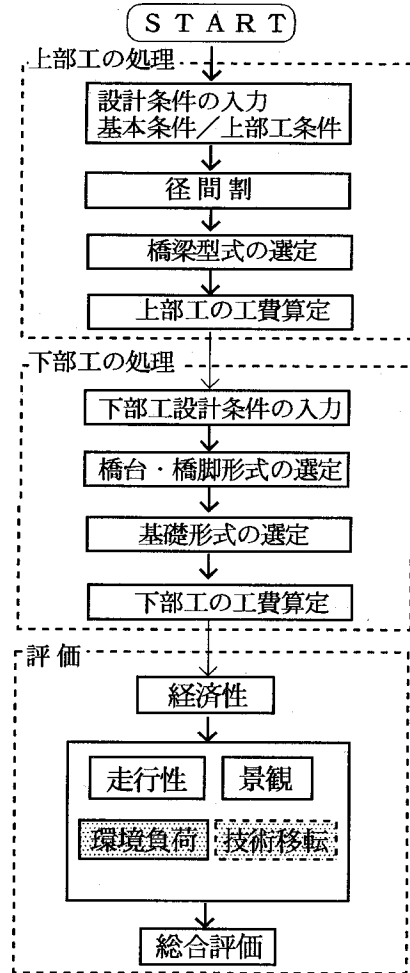


図-1 支援システムのフローチャート

エネルギー消費量及びCO₂排出量は、ともに橋梁架設時に使用される資材量及び架設機械の燃料消費量にエネルギー原単位(kcal/単位)及びCO₂原単位(t/単位)を乗じることにより算出する。これらの原単位は、本研究では産業連関表より求められたもの⁵⁾を使用している。そのため、算出される環境負荷値は、資材の精製による環境負荷値も含めた値となっている。原単位の求め方は、産業連関表によるものの他にも、積み上げ式による算出法など数種類考案されている^{6), 7)}が、産業連関表を用いて算出した原単位が、データとして比較的多くそろっているために、この方法により算出された原単位を用いて環境負荷値を算出することにした。

橋梁架設における資材及び架設機械は多種多様であり、また、施工条件によっても変化してくる。このため、すべての資材及び機械に対して環境負荷値

を算出するシステムの作成は非常に難しいと考えられる。そこで、資材に関しては、コンクリート橋では、大きな環境負荷値を占める、コンクリート、鉄筋、PC鋼棒及び型枠について評価を行うことにし、鋼橋に対しては、各種鋼材に対しての評価を行うことにした。これらの資材に関して環境負荷値の算出を行うことにより、全資材使用による環境負荷値の内、90%以上を評価することになる⁶⁾。コンクリート橋の各資材量の算出は、文献8)に示されている過去のデータを最小2乗法により3次式に近似した値を用いて算出している。鋼橋の資材量は、文献4)において作成されたシステムに用いられている近似式をそのまま用いて算出を行っている。

機械使用による環境負荷値の算出においては、文献9)と複数の橋梁技術者へのヒアリングの結果より、各工法の工程ごとに主に用いられる標準的な機械を決定した。そして、文献9)に示される積算法により算出された工程の日数より機械の使用時間を求めている。また、電力を用いて稼働する機器については、すべて発動発電機より電力を得ていると仮定して環境負荷値の算出を行っている。

環境負荷評価は、エネルギー消費量とCO₂排出量の2つの指標から行っている。エネルギー消費量とCO₂排出量はそれぞれの持つ意味が違っているが、エネルギー消費量の多い橋梁は、CO₂排出量についても多い傾向があるため、これら2つの指標を併せることにより、環境負荷評価値として用いることにした。

(3) 発展途上国への技術移転評価

本評価項目は、発展途上国援助として行われる橋梁建設に、本システムを適用するときを使うものである。筆者らの経験によると、発展途上国は、単に物(橋梁)の援助だけでなく、自立するための技術移転を強く希望している。そこで、まだ初歩的段階であり、十分な基礎データも入力されていないが、本システムをつけ加えた技術移転評価について、ごく簡単に述べる。

技術移転評価は、橋梁架設援助を行うことにより、発展途上国に対してどの程度の技術移転が行われるかを評価するものである。その考え方を図-2に示す。発展途上国の技術力に先進国の技術を少し加えるだけで架設が行える橋種に対しては、技術移転評価に高い点を与え、発展途上国の技術力のみで架設できる橋種や、先進国の技術を大量に必要とする橋種に対しては、技術移転評価は低い点を与える。これは、発展途上国の現在の技術レベルより少し高い技術レベルの橋梁架設を行うことが、最も効果的に

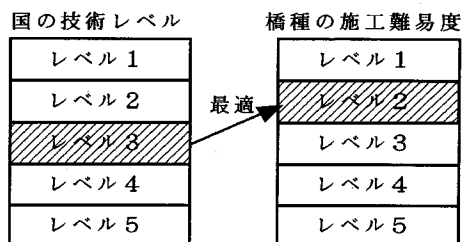


図-2 技術移転の考え方

発展途上国の技術レベルを上げ、逆に、すでに発展途上国において修得されている技術や、発展途上国においてそれまで全く用いられておらず、架設後にその国に残らないような技術を用いることは、技術レベルの向上につながらなくとも考えられるために、このように設定した。

技術移転評価では、橋梁架設に必要な技術力や発展途上国の技術力の設定を、過去に行われた発展途上国での橋梁架設のデータを基に5段階に設定してある。また、これらのデータは、時間とともに変化していくものであるため、簡単に修正及び追加が行えるようになっており、ユーザーがシステム使用時の対象国の状況に合わせて適切に設定できるようになっている。

なお、地震や洪水等の災害による復旧援助においては、技術移転を考慮するよりも早期の復旧が必要であるため、施工性に対する重みを大きくして、効率の良い橋梁の架設を行う評価も必要であり、今後、各国の諸事情をより反映した橋梁形式の選定が可能なシステムの作成が望まれる。

3. 橋梁架設時の環境負荷値の比較

(1)はじめに

橋梁架設時における環境負荷値を低減するためには、橋梁架設のどの部分が最も高い環境負荷値を示しているか、また、資材使用による環境負荷値と機械使用による環境負荷値とではどちらが大きいのかを知る必要がある。そこで、橋梁の各部分がどの程度の環境負荷値を示すかの試算を行うために、本研究で作成した支援システムを用いて橋梁上部工、橋脚・橋台及び杭の環境負荷値を算出し比較を行った。以下では、まず、上部工と下部工とを別々に環境負荷の算定を行い、その特徴を明らかにし、その後、上下部工全体の橋梁について橋種選定を行い、その環境負荷について考察する。

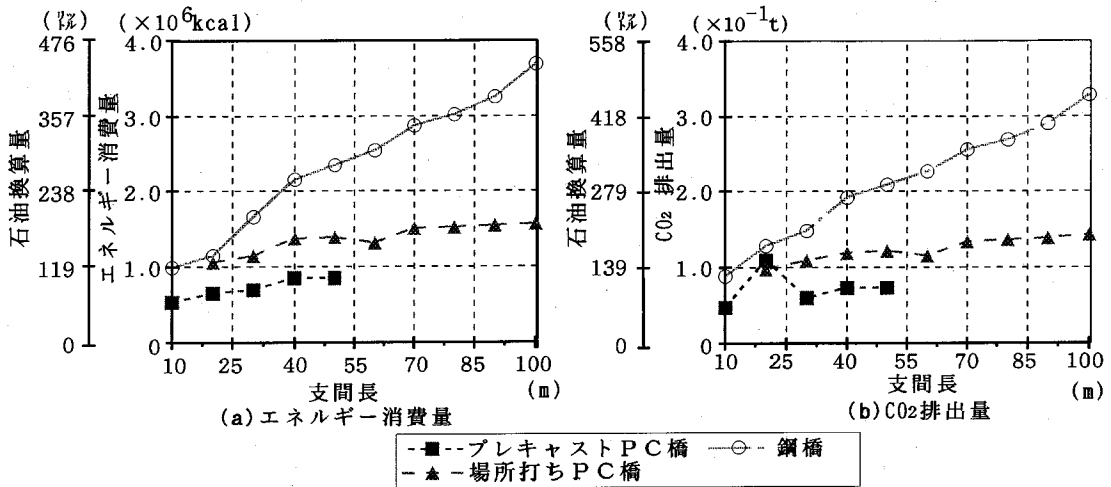


図-3 上部工の環境負荷値

(2) 上部工の環境負荷値

上部工の環境負荷値の算出では資材使用による環境負荷値の比較を行った。本来ならば、上部工架設時に使用する機械の使用量も加算して評価を行うべきであるが、使用する機械は、橋梁の径間数及び工法等により使用量にかなりの差が出るために、比較の組み合わせの数が多くなりすぎるので、ここでは、上部工の環境負荷の特徴を知るために資材使用量に対する環境負荷値の比較のみを行うことにした。ただし、橋梁上部工では、機械使用による環境負荷値は、資材使用による環境負荷値に対して2%~3%程度の値でしかないことを今回作成した橋梁形式選定支援システムによって確認しており、資材による環境負荷値の比較を行うことにより、大まかな傾向は十分つかむことができると考えられる。

図-3に橋種別の環境負荷値と理解しやすいように石油換算した値を示す。図-3に示した値は、橋種をプレキャストPC橋、場所打ちPC橋及び鋼橋の3種に分類し、各橋種別ごとの環境負荷値の平均の値を取ったものであり、橋面積1m²当たりの環境負荷値を示している。

図-3から分かるように、コンクリート橋は鋼橋に比べエネルギー消費量、CO₂排出量ともに低い環境負荷値を示している。特に、プレキャストPC橋は、他の橋種に比べ低い環境負荷値を示しており、環境に対してもあまり負荷を与えない橋種であると言える。プレキャストPC橋は工場で規格化された主桁を製作し、それを用いて架設を行うために、余分な資材や架設機材を使う必要がなく、すべてを現場で施工する場所打ちPC橋よりも低い環境負荷値を示

すと考えられる。

コンクリート橋は、支間長が延びても環境負荷値の増加が少ないのに対し、鋼橋は支間長の増加に伴って環境負荷値も大きく増加し、その差は広がっている。これは、コンクリート橋の主な原料であるコンクリートのエネルギー原単位が、約1900kcal/kgであるのに対し、鋼材のエネルギー原単位は4000~5000kcal/kg程度であるために、支間長が延び単位橋面積当たりの資材量が増加することにより、鋼橋とコンクリート橋の環境負荷値の差は広がっていくと考えられる。

(3) 橋脚・橋台の環境負荷値

橋脚・橋台の環境負荷値の算出は、1基当たりの環境負荷値を算出してその比較を行った。ただし、杭の環境負荷については(4)で考えるので、ここでは考慮していない。なお、今回の研究では、河川橋梁を対象としているために、橋脚・橋台はコンクリート製のもののみを対象とすることにした。

橋脚・橋台の環境負荷値は、1基当たりの製作における機械の使用量が施工条件によらずほぼ一定であり、上部工のように比較の組み合わせ数が多くなるので、機械使用による環境負荷値も加算して算出した。環境負荷値として、エネルギー消費量及びCO₂排出量の2つを算出したが、同じ様な傾向を示しているため、図-4に橋脚のエネルギー消費量とその石油換算量のみを示す。ここでは、橋脚の奥行幅を2.3m、幅員を12.5mと設定して橋脚1基当たりの環境負荷値の算出を行ったものである。

図-4より、T型橋脚の方が、ラーメン型橋脚よ

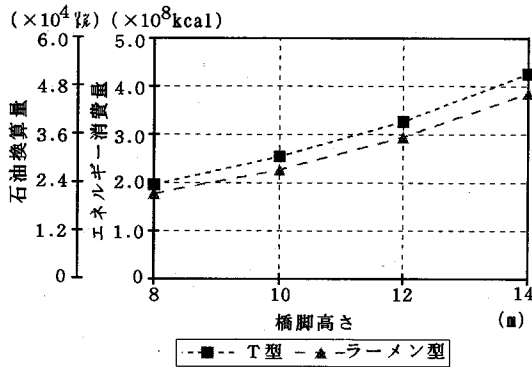


図-4 橋脚の環境負荷値

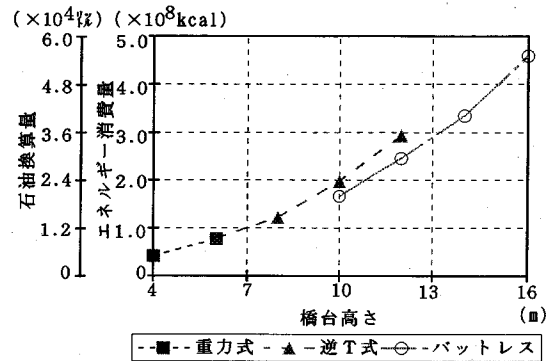


図-5 橋台の環境負荷値

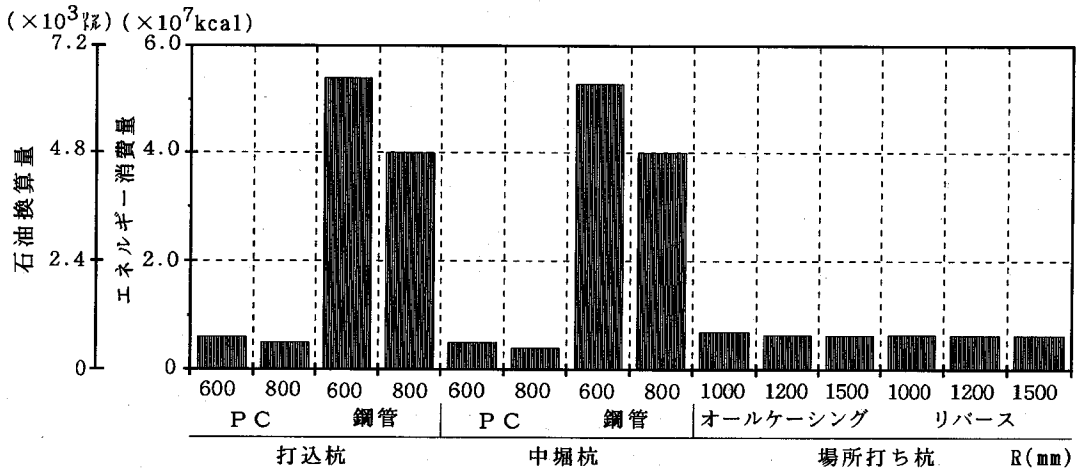


図-6 杭の環境負荷値

り高い環境負荷値を示しており、その差は橋脚高が大きくなるほど多少ではあるが広がっていることが分かる。これは、施工条件が同じ場合、ラーメン型橋脚の方がT型橋脚より1基当たりに使われる資材の量が少ないため、環境負荷値も小さくなるためであると考えられる。橋脚においても、機械使用による環境負荷値は、橋脚全体の環境負荷値の3%程度を占めるにとどまっているために、資材量により、環境負荷値の大小が決定されてしまい、機械使用による環境負荷値は全体に対してあまり影響を与えないという結果になった。

図-5に橋台のエネルギー消費量及びその石油換算量を示す。ここでは橋台の幅員を12.5mと設定して1基当たりの環境負荷値の算出を行った。橋台は、高さによってその形式がほぼ決定されるために、広範囲での比較は行えないが、橋台高さの重なって

いる10m~12mを見てみると、逆T型よりもバットレス型の橋台の方が低い環境負荷値を示している。橋台についても、機械使用による環境負荷値の占める割合は低く、橋台1基当たりの環境負荷値の2%を占める程度であった。このことより、橋台についても環境負荷値の大小は資材使用量によって決定されると言える。

橋脚・橋台を経済性と環境負荷値の両面から見ると、環境負荷値の低いものの方が経済性においても優れているという結果が得られた。これは、橋脚・橋台ともに資材による環境負荷値が機械による環境負荷値よりも非常に大きいためであると考えられる。このため、資材量の少ない橋脚・橋台の方が経済的にも安く、かつ環境負荷値も小さくなると考えられる。このことより、現状では、橋脚・橋台については経済性を重視した従来の考え方を押し進めること

表-1 橋梁諸条件

橋種	工法	橋長	幅員	径間割	橋台	橋脚
PC単純プレテンT桁	トラックレール工法	150m	12m	18.8 × 8m	逆T式 高さ 6m	T型 高さ 10m
PC単純箱桁	固定支保工法			50.0 × 3m		
鋼単純非合成箱桁	ベント工法			50.0 × 3m		

によって、結果として環境負荷値も小さく抑えることができると考えられる。

(4) 杭の環境負荷値

杭の環境負荷値の算出及び比較を行う際、杭1本当たりの環境負荷値の比較を行ったとしても、杭1本当たりの許容荷重が異なるために、あまり意味がないと考えられる。そこで、同じ条件での杭の環境負荷値の比較を行うために、橋脚幅員当たりの反力を70tf/m、杭基礎上の橋脚高さを10mと仮定し、それを支えるのに必要な杭の本数を求めた。そして、その杭の本数より、杭の施工に対する環境負荷値の算出とその比較を行った。また杭長は一律に20mと仮定した。図-6に反力70tf/mを支えるのに必要な杭の環境負荷値を示す。

図-6より、鋼管杭が他の杭に対して非常に高い環境負荷値を示していることが分かる。他の杭に関しては、ほぼ同じ値を示しており、あまり差は見られなかった。鋼材を用いた杭が高い環境負荷値を示すのは、上部工の環境負荷値と同じであり、鋼材の精製時における環境負荷値が大きいことが原因と考えられる。また、同種の杭の径の大小の比較を行うと、径の大きい方が径の小さい方より低い環境負荷を示していることが分かる。これは、径が大きい方が、打ち込む杭の本数が少なくなるために、杭を打ち込むための機械使用量および場所打ち杭のときの掘削量が少なくなり、結果的に環境負荷値が低くなるためである。

上部工及び橋脚・橋台は、架設機械使用による環境負荷値の割合は、全体の2%~3%程度であったが、杭の架設機械使用による環境負荷値の占める割合は3%~34%であり、杭の種類によってはかなり高い値を占めている。これは、杭は使用資材量が比較的少ないのに対し、使用する機械による環境負荷値が大きな値を占めるためと考えられる。

(5) 橋梁の各部分の環境負荷値の比重

(2)から(4)において、橋梁を上部工、橋脚・橋台及び杭の3種に分けてそれぞれの環境負荷値の算出を行った。各データを見てみると、資材使用による環境負荷値が橋梁全体の環境負荷値において高い

割合を占めているという結果を得た。次に、これらのデータを基に橋梁全体に対する各部分の環境負荷値の占める割合を求める。表-1に比較を行う橋梁の諸条件を示す。ここでは、鋼管杭を除いて杭の占める環境負荷値の割合が全体の1%程度と非常に小さいため、下部工は直接基礎と仮定して、杭を含まない橋梁を仮定して試算を行うことにした。図-7に上部工及び橋脚・橋台の環境負荷値の占める割合を示す。

図-7より、支間長が20m程度と短いPC単純プレテンT桁橋では、橋脚・橋台の環境負荷値が上部工の環境負荷値よりも大きな値を示す結果となっている。これは、適用支間長が短いために径間割が他の橋種より多くなり、橋脚の数も多くなるため、橋脚の占める環境負荷値の割合が大きくなった結果である。

支間長が50mのPC単純箱桁橋では上部工の環境負荷値は橋脚・橋台の環境負荷値よりも大きな値を取っており、PC単純プレテンT桁橋と逆転した割合になっている。従って、支間長が長ければ長いほど、上部工の環境負荷値の占める割合は増加して行くことが分かる。また、PC単純プレテンT桁橋よりもPC単純箱桁橋のほうが橋梁全体の環境負荷値は小さくなっている。これは、PC単純箱桁橋は、上部工の環境負荷値ではPC単純プレテン箱桁橋よりも高い値を占めるが、支間長が長いために、PC単純プレテンT桁橋より橋脚の数を減らすことができるため、下部工の環境負荷値が小さくなり、結果として橋梁全体の環境負荷値も小さくなるからであると考えられる。

鋼単純非合成箱桁では、上部工の占める環境負荷値の割合が、PC単純箱桁橋の割合よりも大きくなっている。これは、下部工はコンクリートで施工されているのに対し、上部工はコンクリートより単位重量当たりの環境負荷値の大きい鋼材を用いて作成されているためである。

これらの結果より、橋梁架設時において支間長が長くなればなるほど、上部工の環境負荷値の占める割合は大きくなり、また、支間長が長いほど橋梁全体の環境負荷値は小さくなることが分かった。従って、環境負荷を削減するためには、支間長の長い橋

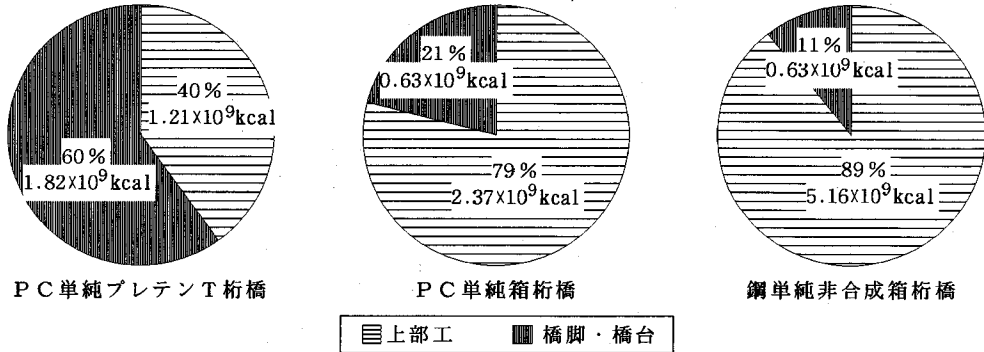


図-7 上部工及び橋脚・橋台の占める環境負荷値（エネルギー消費量）の割合

表-2 環境負荷値の削減と経済性の比較

橋長	項目	PC単純 プレテンT桁	PC単純箱桁
100m	エネルギー消費量 ($\times 10^9$ kcal)	1.92	1.89
	CO ₂ 排出量 (t)	204.6	190.6
	工費 (億円)	1.15	1.86
150m	エネルギー消費量 ($\times 10^9$ kcal)	3.03	3.00
	CO ₂ 排出量 (t)	322.9	289.6
	工費 (億円)	1.66	2.79
200m	エネルギー消費量 ($\times 10^9$ kcal)	3.91	4.03
	CO ₂ 排出量 (t)	490.4	413.3
	工費 (億円)	2.23	3.72

梁を架設した方が良く、その時に最も環境負荷値が大きくなる上部工施工時の環境負荷を削減する研究が、今後必要であると考えられる。

(6)環境負荷値と経済性の比重

一般には、環境負荷値を抑える開発を行うためには余分な費用がかかる。そこで、橋梁架設時には、環境負荷値を抑えるのにどの程度の費用が必須であるかを、試算してみた。橋梁形式としては、表-1に示されているものの内、PC単純プレテンT桁橋とPC単純箱桁橋を用いて比較を行った。橋長は、100m、150m及び200mの3種に対して比較を行った。その結果を表-2に示す。

表-2より、橋長100mでは、PC単純箱桁橋を架設することにより、PC単純プレテンT桁橋よりも工費としては、7100万円高くなるがエネルギー消費を 3×10^7 kcalだけ抑えることが分かった。従って、このケースでは、1 kcalのエネルギー消費を抑えるのに2.4円必要であるという計算になる。橋長150mにおいては3.8円/kcal、橋長200mでは1.2円/kcalの予算が環境負荷値を抑えるために

必要である。また、CO₂排出量に対しても同様な計算を行った結果、橋長100mでは500万円/㍉、橋長150mで300万円/㍉、橋長200mで200万円/㍉の予算が環境負荷値を抑えるために必要であるという結果になった。

ここでは、コンクリート橋どうしの比較しか行っていないが、鋼橋とコンクリート橋で環境負荷値と工費の比較を行った場合には、表-1に示してある鋼単純非合成箱桁（橋長150m）で、エネルギー消費量が 5.79×10^9 kcal、CO₂排出量が539.2t、そして工費が3.42億円であるため、環境負荷値及び工費の両方において鋼橋の方が高い値を示すという結果を得た。

一般に地球環境問題を扱うときに、試算により大きく異なるが、文献10)によれば、日本においてCO₂排出量を1トン抑えるのに必要な費用は約100ドルである。できれば経済原則によってCO₂排出を削減できればよいという考え方もある。今回得られた結果は、CO₂排出量を1トン抑えるのに上記の値と比較して200倍以上の費用がかかる結果となっており、橋梁架設は、経済性だけから見ると環境

表-3 径間割と環境負荷値の算出結果

橋種 (橋長 150m)	径間割法	径間割 (m)	エネルギー消費量 ($\times 10^9$ kcal)	CO ₂ 排出量 (t)	工費 (億円)
PC 単純プレテンT桁	等径間	18.8 × 8	3.03	322.9	1.66
	最大径間	21.0 × 6+12.0 × 2	3.02	322.1	1.69
PC 単純箱桁	等径間	50.0 × 3	3.00	289.6	2.79
	最大径間	55.0+47.5 × 2	3.00	289.4	2.81
鋼単純非合成箱桁	等径間	50.0 × 3	5.79	539.2	3.42
	最大径間	60.0+45.0 × 2	5.60	522.3	3.49

表-4 径間割のみを変化させた場合の算出結果

橋種 (橋長 120m)	項目	径間割 (等径間)		
		5径間	4径間	3径間
鋼単純非合成 I 桁	工費 (億円)	2.4	2.3	2.9
	エネルギー消費量 ($\times 10^9$ kcal)	3.90	2.82	3.08
	CO ₂ 排出量 (t)	304	288	301
PC 単純ボーステンT桁	工費 (億円)	2.0	1.9	2.0
	エネルギー消費量 ($\times 10^9$ kcal)	1.55	1.25	0.97
	CO ₂ 排出量 (t)	264	230	207

負荷を抑えることが難しい分野であると言える。しかし、橋梁架設における環境負荷は無視できず、経済性のために環境負荷に対する配慮を削除することはできないと考えられ、安い費用で環境負荷値を下げる研究が今後必要となってくると考えられる。

(7) 径間割ルールの違いによる環境負荷値の比較

従来の径間割は、経済性を重視しているために等径間割を基本としている。しかし、3.(6)の結果からも分かるように、径間数が少ない方が環境負荷値は小さくなる。そこで、本システムの径間割ルールを一部変更し、できるだけ適用最大径間長を用いるような径間割も行うように変更して、環境負荷値の算出を行った。

表-3に比較を行った諸条件と算出された環境負荷値を示す。表-3より、各橋種において、最大径間を基準とした径間割を行った方が、ごくわずかではあるが環境負荷値は低くなり、逆に工費は大きくなる結果となった。しかし、その差はわずかで、ほとんど両者に有意な差はないといえる。なお、鋼単純非合成箱桁については、同様の計算を橋長 200 mで行った場合には、環境負荷値、工費ともに、最大径間長を基準とした径間割を行った方が、約 4.5%程度高い値を示す結果となっている。環境負荷値の削減に必要な費用は、PC 単純箱桁では、CO₂排出量は 1000 万円/㏩となり、PC 単純プレテンT桁では 375 万円/㏩となった。この結果は、3.(6)で求

めた結果より高い値であるために、最大径間割を基準とした径間割法の適用は、橋種の変更による環境負荷値の低減ほど有効でないことが分かる。

別の例として、環境負荷と径間割との関係を調べるために、橋長 120 m、幅員 12 m の橋梁を等径間割すると仮定して、3~5径間の場合の工費と環境負荷値を計算したものを表-4に示す。鋼単純非合成 I 桁の場合は、径間数が 4径間の時に工費最少となり、環境負荷も工費と同様に 4径間のときに最少となった。PC 単純ボーステンT桁の場合は、工費は径間割によってほとんど変化しないが、環境負荷は径間数が少なくなるに従って小さくなった。

このように本システムを弾力的に利用することにより、すなわち、径間割および上・下部工の選定方法などの各種ルールを変更することにより、現在の橋梁形式の選定方法に縛られることなく、様々な角度から橋梁形式の選定を行えることができ、より環境負荷値を低減し、さらに工費もあまりかからない橋梁形式の選定方法の検討に利用できる可能性を示した。

4. リサイクルを考慮した場合の環境負荷値の比較

環境負荷を抑えるための有効な手段として、リサイクル資源の活用が挙げられている。鋼橋の主な材料である鋼材は、資源のリサイクルが最も進んでい

るものの1つであり、鋼廃材の95%以上がリサイクルされ活用されている⁶⁾。鋼材をリサイクル資源として再生する場合は、溶かして再生するのみで良いため、鉄鉱石から製鋼する場合に比べてエネルギー消費量で表した環境負荷を約60%削減することが可能であると言われている¹¹⁾。

一方、コンクリート廃材については、現在では、骨材や路盤材料などとして利用されることが多い¹²⁾。仮に、コンクリートの製造において骨材を廃材から得た場合には、新骨材を使う場合より環境負荷を約86%程度に抑えることができることが骨材再生機械が必要とするエネルギー消費量などから分かった。

現在は、橋梁架設においてはリサイクル資源をほとんど用いていないが、ここでは、リサイクル資源を有効に活用することによって、どの程度まで環境負荷値を低減できるかを試算した。試算は、表-1に示した橋梁を用いて行った。また、リサイクルは、現状のリサイクル技術を用いた場合を仮定して試算を行った。従って、リサイクル資源を用いることにより、鋼材については、環境負荷が60%削減され、コンクリートについては14%の環境負荷の削減が行われると仮定して環境負荷値の算出を行っている。

本章での環境負荷値は、資材による環境負荷値に架設機械使用による環境負荷値を足し合わせた橋梁全体の環境負荷値である。図-8にリサイクル資源を考慮した場合の環境負荷値を示す。図-8より、リサイクル資源を利用することにより、環境負荷値をかなり低減することが可能であることが分かる。特に鋼橋は、リサイクル資源を用いることによって環境負荷値を半分程度まで削減することが可能である。鋼橋は、リサイクル資源を用いない場合は、コンクリート橋に比べ2倍近い環境負荷値を示していたが、リサイクル資源を利用することによりコンクリート橋とほぼ同程度近くまでの環境負荷値に抑えることが可能である。

図-8より分かるように、リサイクル資源を用いても鋼橋はわずかにコンクリート橋よりも高い環境負荷値を示している。しかし、資源消費の面から考えると鋼材は、「鋼材から鋼材へのリサイクル」が可能であるのに対し、コンクリートは、現在のリサイクル技術では、「コンクリートからコンクリートへのリサイクル」はできず、「コンクリートから骨材へのリサイクル」にとどまっている。このため、鋼橋は資源消費の面から考えた場合には、コンクリート橋より優れているといえる。そのため、リサイクル資源の利用を推進することにより、鋼橋はコンクリート橋よりも総合的に環境に対し負荷を与えない橋種となる可能性もあるといえる。

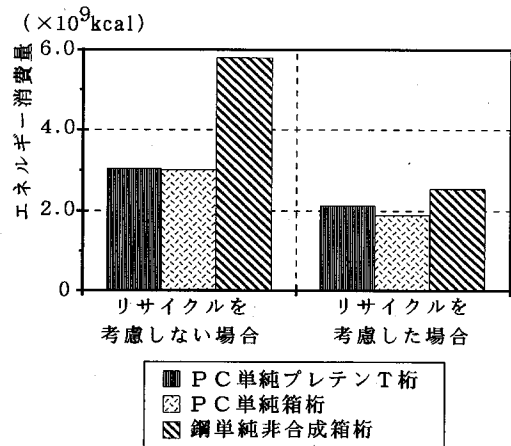


図-8 リサイクルを考慮した場合の環境負荷値

以上のことから、今後、鋼橋の分野では鋼材精製時の環境負荷を抑える研究とともに、リサイクル資源を用いて精製された鋼材をどのように橋梁架設に再利用していくかの研究が必要であると考えられる。

コンクリート橋の分野では、コンクリートは、セメントの不可逆反応により製造されるものであるため、一部未反応のセメントを取り出すことも考えられているが、「コンクリートからコンクリートへのリサイクル」は難しいと考えられる。そこで、より有効なコンクリートの再利用法の研究を進める必要があると考えられる。

5. 結論

本研究において、発展途上国援助にも対応した環境負荷を考慮した橋梁形式選定支援システムの試作を行い、同システムを用いて橋梁の環境負荷値の比較を行い、橋梁架設時のどの部分が最も高い環境負荷値を示すかを求めた。本研究により得られた結論を以下に示す。

- 1) 橋梁架設時における環境負荷を算出できる発展途上国援助にも対応した橋梁形式選定支援システムを試作した。
- 2) 橋梁上部工の環境負荷値の単位橋面積当たりの比較を行い、鋼橋がコンクリート橋に比較して高い環境負荷値をとることを示した。
- 3) 橋梁架設においては、資材による環境負荷値の方が架設機械使用による環境負荷値よりも大きな割合を占めることを示した。
- 4) 橋梁の各部分のうち、支間長が長くなるほど上部工の占める環境負荷値の割合が大きくなること

を示し、また、支間長が長いほど橋梁全体の環境負荷値は、小さくなることを示した。

- 5) 橋梁形式選定支援システムに環境負荷の項目を入れ、橋梁形式選定の各ルールを変更することなどにより、様々な角度から橋梁形式の選定を行えることを示し、環境負荷削減のための新たな手法の開発につながる可能性を示した。
- 6) リサイクル資源を用いることにより、橋梁架設時の環境負荷値をかなり削減できることを示し、リサイクル資源の利用の重要性を示した。

本研究では橋梁の建設時のグローバルな環境負荷の特性について、エネルギー消費量とCO₂排出量を指標として明らかにした。しかし、環境負荷を考えると、必ずしも両者の指標だけで良い訳ではなく、建設廃材に対する評価、橋梁の寿命を考えたライフサイクルでの評価、さらには地域環境に与える影響なども同時に考慮する必要がある、今後の研究課題であると考え。

付録1 上部工及び下部工の環境負荷値の算出フローチャートと算出例

a) 上部工環境負荷値算出フロー

図-A.1 に上部工環境負荷値の算出フローチャートを示す。

b) 下部工の環境負荷値の算出フロー

図-A.2 に下部工の環境負荷値の算出フローチャートを示す。

c) 橋梁形式選定支援システムの算出例

橋梁の諸条件として、橋長 150m、幅員 12m、橋台の高さ 6m、橋脚の高さ 12m を設定した。また、橋種の選定において異種の橋種を組み合わせた橋梁の選択を行った場合には、非常に組み合わせ数が多くなってしまいうために、ここでは、1 橋梁に対し 1 種の橋種しか選定できないように設定した。その結果、30 種以上の橋梁が選択された。表-A.3 に選択された橋梁の一部を示す。

一般には、3 橋種程度について詳しい評価を行うが、ここでは本文との関連を付けるために、表-A.1 で示された橋梁の内、PC 単純箱桁及び鋼単純非合成箱桁についての経済性、走行性、景観性についての各評価結果を表-A.2 に示す。表-A.2 の中には各評価値に重み（経済性：走行性：景観性 = 1:0.4:0.5）をかけ、加算した合計値も示す。

表-A.3に、PC 単純箱桁及び鋼単純非合成箱桁に

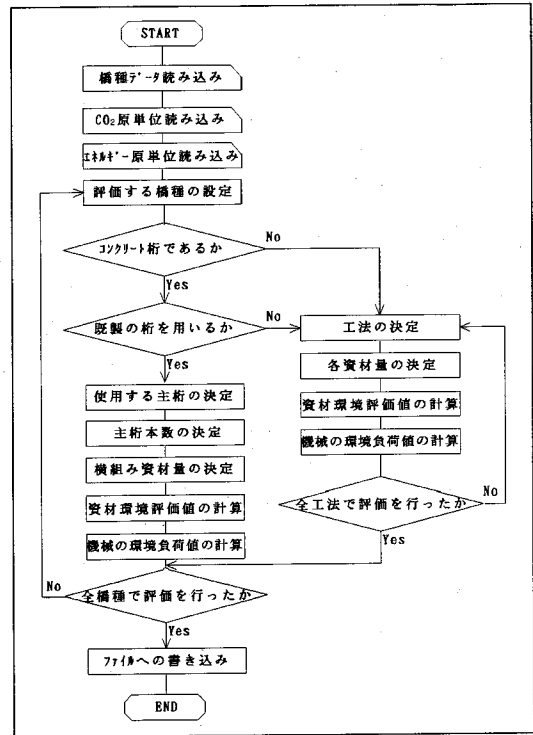


図-A.1 上部工の環境負荷値算出フローチャート

ついて橋梁形式選定システムを用いて算出した環境負荷値を示す。環境負荷値は、エネルギー消費量とCO₂排出量の両者を指標としており、両者の算定手法は同じであるが、原単位は異なるものを用いる。

資材の環境負荷値は、橋梁の諸条件より資材の使用量を算出し、それに各資材の原単位をかけ合わせるによって算出する。機械の環境負荷値の算出は、まず橋梁架設の工法を決定し、一般的に使用される機械を対象として、橋梁架設時に使用する総燃料の算出を行う。そして、燃料に各原単位をかけ合わせるによって環境負荷値を算出する。

表-A.2で求めた評価値の合計に、環境負荷値による評価値に環境負荷値の重みをかけ合わせて加えることによって橋梁の総合評価値が算出される。環境負荷値の重みを1.0とし、経済性と同じ重みを与えた総合評価値は、PC 単純箱桁は12.3ポイント、鋼単純非合成箱桁は、7.6ポイントとなる。ここでは、本文に関連した例を用いているために経済性の優れたものが環境評価値においても優れたものとなっているが、表-A.1に示された形式全てについて環境評価値による評価を加えた場合には、経済性のみによる評価値の順位と総合評価値による順位の逆転が生じているものもある。

付録2 橋梁形式選定支援システムの適用例

文献4)で示した橋梁形式選定例について、環境負荷評価を考慮したものを示す。表-A.4には、橋梁形式選定例の条件と環境負荷の推定値を示す。また、

表-A.5に評価結果を示す。従来の経済性、走行性および景観のみの総合評価と、さらに環境負荷も加えた場合の総合評価では、鋼ローゼ橋と2径間連続鋼床版箱桁橋の順位は逆転した。ただし、ここでは走行性、景観および環境負荷の評価の重みは、すべて0.6とした場合である。

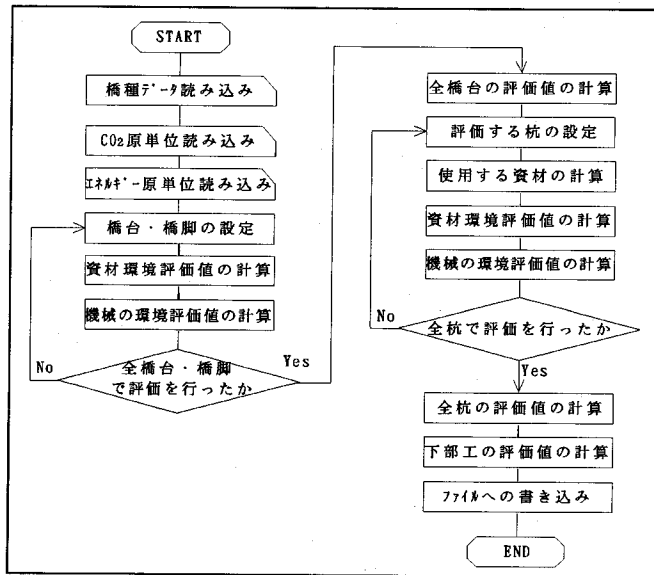


図-A.2 下部工の環境負荷値算出フローチャート

表-A.1 選択された橋梁の例

橋梁形式	径間割 (m)
PC 単純箱桁	(50.0,50.0,50.0)
鋼単純非合成箱桁	(50.0,50.0,50.0)
鋼単純合成 I 桁	(50.0,50.0,50.0)
.....
PC 単純箱桁	(37.5,37.5,37.5,37.5)
PC 単純ホーステン T 桁	(37.5,37.5,37.5,37.5)
.....
鋼単純非合成 I 桁	(30,30,30,30,30)

表-A.2 各種評価値

橋種	経済性		走行性 評価値	景観性 評価値	合計値
	工費(円)	評価値			
PC 単純箱桁	2.79	3.6	3.0	5.0	7.3
鋼単純非合成箱桁	3.42	2.7	3.0	2.5	5.2

表-A.3 環境負荷値による評価

橋梁形式	環境負荷	上部工		下部工		合計	評価値
		資材	機械	資材	機械		
PC単純箱桁	エネルギー消費量	23	0.64	6.2	0.13	30	2.5
	CO ₂ 排出量	205.4	5.6	77.46	1.1	289.6	2.5
鋼単純 非合成箱桁	エネルギー消費量	51	0.89	6.2	0.13	58	1.1
	CO ₂ 排出量	452.9	7.7	77.46	1.1	539.2	1.3

注：エネルギー消費量 (× 10⁸ kcal), CO₂排出量 (t)

表-A.4 橋梁形式選定例の条件と環境負荷推定値

項目	鋼ニルセン橋	鋼ローゼ橋	2径間連続 鋼床版箱桁橋	3径間連続 鋼床版箱桁橋
径間割 (m)	116.0	116.0	58.0 + 58.0	28.0 + 60.0 + 28.0
主桁・主構・アーチ リブ間隔 (m)	17.2	17.2	10.16	10.16
橋脚形式	—	—	コンクリート逆 T型	コンクリート逆 T型
橋脚高 (平均 水位から) (m)	—	—	2.8	3.0
橋脚幅 (m)	—	—	2.8	2.0
各橋梁形式特有 の条件 (m)	補剛材高 1.2 アーチリブ高 1.4 アーチライズ高 18.0	補剛材高 1.2 アーチリブ高 1.4 アーチライズ高 14.0	橋脚上の桁高 2.8 側径間端部の 桁高 1.7	橋脚上の桁高 2.6 中央径間中央部の 桁高 1.3 側径間端部の桁高 1.3
基本条件 周辺環境：都市部もしくは市街地で住民も多く建物も目立つ 付属環境：見通しのよい平地 橋梁形式はスカイラインを横切る 橋梁を目立たせる 河川敷のない河川 橋梁特性：直橋 全幅員：15.8m 有効幅員：15.0m				
エネルギー消費量 (kcal)	6.15 × 10 ⁹	6.65 × 10 ⁹	5.14 × 10 ⁹	7.33 × 10 ⁹
CO ₂ 排出量 (t)	592	637	511	726

注) 環境負荷値は上下部工すべてを考慮したものであるが、本システムにおいては、アーチ橋の上部工の建設機械使用のデータが不十分であるので、ここでは上部工の建設機械使用分は含めていない。ただし、その量は本文で示したようにわずかである。

表-A.5 評価結果

評価項目	重み	鋼ニルセン橋	鋼ローゼ橋	2径間連続 鋼床版箱桁橋	3径間連続 鋼床版箱桁橋
1) 経済性 (工費 百万円)	1.0	2.08 (1170)	2.00 (1190)	3.00 (950)	2.00 (1190)
2) 走行性	0.6	2.50	2.66	2.83	3.00
3) 景観	0.6	3.00	3.00	1.00	1.89
4) 環境負荷	0.6	2.74	2.40	3.47	1.91
1)+2)+3) の評価	得点	5.38	5.40	5.30	4.93
	順位	②	①	③	④
1)+2)+3)+4) の総合評価	得点	7.02	6.84	7.38	6.08
	順位	②	③	①	④

参考文献

- 1) 環境庁編：環境白書（総説）平成7年度版，大蔵省印刷局，1996年6月。
- 2) Singh, R.B. : *Global Environmental Change*, A.A.Balkema/ Rotterdam, 1995.
- 3) 空気調和・衛生工学会 地球環境に関する委員会編：地球環境時代における建築設備の課題，社団法人 空気調和・衛生工学会 地球環境に関する委員会，pp. 1-24, 1995年3月。
- 4) 西土隆幸，伊藤義人：異なる形式の河川橋梁に対する景観の評価支援システム，土木学会論文集，No.474/VI-20, pp. 95-104, 1993年9月。
- 5) 建設省土木研究所編：資源・エネルギー消費，環境負荷の算定手法の開発と実態調査報告（その2），1994年3月。
- 6) 伊香賀俊治，外岡豊，石福昭：建築物のライフサイクル CO₂分析用 CO₂原単位に関する研究その1・産業連関分析による消費支出と資本形成分 CO₂原単位，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.881-882, 1995年8月。
- 7) 酒井寛二，漆崎昇：建設業の資源消費量解析と環境負荷の推定，環境情報科学，第21巻，第2号，pp.130-135, 1992年5月。
- 8) プレストレスト・コンクリート建設業協会編：PC道路橋計画マニュアル，プレストレスト・コンクリート建設業協会，1989年11月。
- 9) 橋梁架設工事積算委員会編：橋梁架設工事の積算，日本建設機械化協会，1995年5月。
- 10) James, P.B., Hoesung, L. and Eric, F.H. : *Climate Change 1995 - Economic and Social Dimensions of Climate Change*, Intergovernmental Panel on Climate Change, pp. 301-366, 1996.
- 11) 社団法人日本鉄源協会：わが国鉄くずの供給見通しについて，鉄鋼界，社団法人 日本鉄鋼連盟，pp. 5-8, 1991年3月。
- 12) Tresouthick, S.W. and Mishulovich, A. : *Energy and Environmental Consideration for the Cement Industry*, *Energy and Environment in the 21st Century*, MIT Press, pp. 97-104, 1993.

(1996.4.9 受付)

STUDY ON BRIDGE TYPE SELECTION SYSTEM CONSIDERING ENVIRONMENTAL IMPACT

Yoshito ITOH, Toru HIRANO, Hiroki NAGATA,
Amin HAMMAD, Takayuki NISHIDO and Akira KASHIMA

Recently, there is a worldwide interest in environmental problems, especially in developing countries where rapid economic growth is expected. In this research, an available system for bridge type selection is further developed for considering problems specific to developing countries such as assessment of the environmental impact of the bridge and technology transfer requirements. The environmental impact of each candidate bridge type is evaluated by the volume of energy consumed and CO₂ emission from the material and construction equipment. In addition, the effect of recycling construction materials is also considered.