

12. CO₂排出量と建設コストと施工条件を踏まえた 施工方法の選定手法の提案

大野 剛^{1*}・鈴木 伸²・藤原 靖¹

¹大成建設株式会社 技術センター 土木技術研究所（〒245-0051神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1）

²大成建設株式会社 土木本部 プロジェクト部（〒163-0606東京都新宿区西新宿1-25-1）

* E-mail: oongu-00@pub.taisei.co.jp

建設工事では、標準的なCO₂排出量の評価手法が整備段階であることや、CO₂排出量を入札時に反映する仕組みが整っていないことから、建設コストを優先した工事が行われる傾向がある。しかし、近い将来、CO₂排出量の評価が建設工事に導入されることは容易に想像できる。本研究は、施工方法をCO₂排出量を建設コストと施工条件を踏まえて評価し、工法を選定する手法（以下、本手法）を提案するものである。基礎杭の構築5工法を事例に本手法を適用したところ、評価項目間の相互関係を把握することができた。また、評価結果は評価項目間の重みが考慮されていないため、AHPによる重み付けを実施した。その結果、重みを考慮した評価結果を得ることができたが、AHPで設定する一対比較の値の決定方法が課題となった。

Key Words : CO₂ emission , construction costs, processing condition, efficient construction method, AHP

1. はじめに

地球温暖化をはじめ、環境への社会的な関心は高まりつつある。地球温暖化への対応として、2005年に京都議定書が発効され、我が国は2012年までに温暖化ガスの排出量を基準年である1990年比で6%削減することが義務付けられている。しかし、2010年の削減割合は基準年比で0.3%にとどまってい¹⁾。そのため、今後より一層の削減努力が求められてくる。

二酸化炭素の排出量の内訳を産業別にみると、輸送部門が全体の約20%、民生部門が約30%を占めている。建設部門は民生部門に区分され、建設工事全体のLCCO₂（施工時だけでなく、資機材の調達、資機材の運搬、施工、廃棄物の運搬処理を含める）は全産業の約14%を占めている²⁾。そのため、建設部門においてもCO₂排出量を評価する重要性が認識されている。

建築分野では、日本建築学会が作成した「建物のLCA指針」³⁾や国土交通省住宅局などが中心に作成したCASBEE⁴⁾などの標準的な評価手法が普及しており、CO₂排出量に配慮して施工が進められるケースがある⁵⁾。土木分野では、社会資本LCAに関する報告書²⁾から標準的なID（インベントリデータ）は入手できるが、評価手法が整備段階であることや、CO₂排出量を入札時に反映す

る仕組みや制度が整っていないことなどから、CO₂排出量に特段の配慮をせず、建設コストを重視して工事が行われる傾向がある。

また、施工時のCO₂排出量の算出における変動要因として、同一の構造物の施工であっても施工条件により算出値が異なることが挙げられる。特に土木工事では、地盤の硬さ、騒音・振動などへの制約の有無などの施工条件に応じて工法や数量などが決定される。施工時のCO₂排出量の算出・評価を行っている既往研究^{6) 7) 8)}はあるが、重要な変動要因である施工条件との関係について触れているものは少ない。

そこで本研究は、橋梁下部工の基礎杭の構築を事例にCO₂排出量と建設コストの関係を施工日数、工事中的騒音・振動の大きさ、排泥量などの施工条件を踏まえて評価し、最適な工法を選定する手法を提案することを目的としている。また、得られる評価結果は重みが考慮されていないため、AHP（階層分析法）を用いた重み付けを行い、本手法の有効性を考察した。

2. 実施手順

本手法は、(1)比較評価する施工方法の選定と制約条

件の整理，(2) 評価項目の決定，(3) 境界条件の設定，
(4) CO₂排出量と建設コストの算出，(5) 施工条件に関する値の決定，(6) ランク付け，(7) 結果の明示 の手順で実施する（図-1）．

(1) 比較評価する施工方法の選定と制約条件の整理

a) 施工方法の選定

土木構造物の種類とその構造物を構築，または解体する際の工種を設定し，比較評価する施工方法を選定する．例えば，土木構造物をトンネル，工種をトンネル掘削時における掘削ブリの搬出工と設定した場合，比較評価する搬出方法は，ダンプトラック，ベルトコンベアおよびトロッコによる搬出方法となる．

b) 制約条件の整理

施工時の制約条件について整理する．例えば，埋設物の有無と埋設物の種類，振動・騒音への対策の必要性，使用可能な施工ヤードの広さ，施工場所の土質などが挙げられる．

(2) 評価項目の決定

評価項目をCO₂排出量，建設コスト，施工条件から決定する．施工条件は表-1を参考に選定する．表-1は国土交通省が示す土木工事の施工条件に関する手引きを参考に⁹⁾，環境，安全，工程，品質とその他の項目を整理して作成した．

(3) 境界条件の設定

土木工事の範囲は事業計画，設計，計画，施工，維持管理，解体まで広範である．本手法は，施工段階におけるCO₂排出量と建設コストの算出範囲を図-2から定め，境界条件とする．このとき，各段階における詳細な設定も決定する．例えば，CO₂排出量と建設コストの算出範囲を使用する資機材の搬入，施工，および不要資機材の搬出とした場合の境界条件は図-2の破線部となり，搬入時や搬出時の詳細設定として，材料および重機の積込，運搬，荷卸における重機や運搬車両の種類，積込み時間などを設定する．

(4) CO₂排出量および建設コストの算出

境界条件に従いCO₂排出量と建設コストを算出する．CO₂排出量の主な内訳は，資機材の製造，資機材の積込，運搬，荷卸，施工中の重機の稼働などに伴い発生する排出量であり，燃料消費量に燃料の原単位を乗じて算出する．建設コストの主な内訳は，労務費，材料費（購入料や賃貸料）および機械費（購入料や賃貸料）等である．

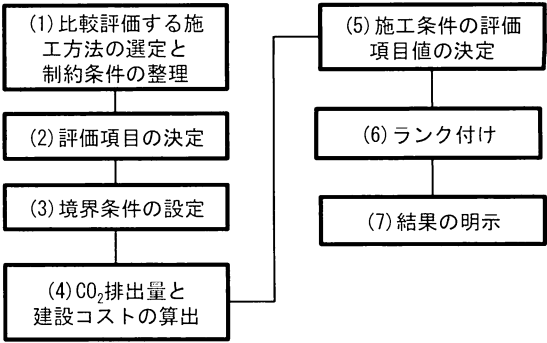


図-1 実施手順

表-1 評価項目に設定する施工条件例

環境	・公害(騒音、振動、粉塵、排出ガス等)の発生程度 ・建設副産物(建設発生土や建設汚泥など)の発生数量や発生頻度 など
安全	・鉄道、鉄塔などの近接作業への適応性 ・電話、水道、ガスなどの地下埋設物への影響 ・空頭条件への適応性 など
工程	・施工日数や施工歩掛 ・使用可能な搬入路への制限 など
品質	・施工精度 ・使用材料や構造物の耐久性 など
その他	・必要とする施工ヤードの広さ など

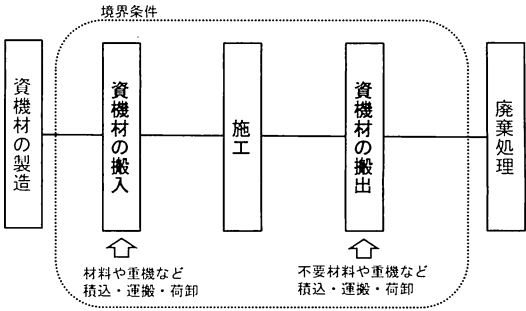


図-2 境界条件の設定

(5) 施工条件に関する値の決定

評価項目に設定した施工条件の値を決定する．施工条件に関する値は，国や地方自治体の積算資料や土木工事の専門書，工事用重機のカatalogなどに掲載されている値や，関係者からのヒアリングにより得た値などを使用する．例えば，比較評価する搬出手法を掘削ブリの搬出工，評価項目を搬出中の労災事故に対する安全性とし，関係者からのヒアリングにより得た情報を採用する場合，ダンプトラックおよびトロッコの事故に対する安全性は「中」，ベルトコンベアは「高」となる．

(6) ランク付け

複合評価に用いる値を算出するために、CO₂排出量、建設コスト、施工条件のランク付けを行う。ランク付けとは（個別の値－最小値）／（最大値－最小値）により0～1の範囲に換算することである。CO₂排出量および建設コストのランク付けは、(4)で算出した値を代入する。施工条件は、定性的な評価をしている項目については、定量的に再評価した値を用いてランク付けする。例えば振動の大きさが「大」・「中」・「小」で表現されている場合は、3・2・1の3段階に再評価した値を用いる。定量的な評価をしている項目はその値を用いる。なお、算出したランクに対する解釈の仕方は評価項目により異なることに留意が必要となる。例えば、掘削ブリの搬出工で評価項目にCO₂排出量と搬出中の労災事故に対する安全性を選定した場合、CO₂排出量はランクが小さい程CO₂排出量が少ないことを意味するため、小さい値が望ましい。しかし、労災事故に対する安全性はランクが大きい程安全であることを意味するため、大きい値が望ましい。このように、ランクの大きさと大きさが持つ意味合いは評価項目により異なってくる。

(7) 評価結果の明示

ランク付けした値をレーダーチャートにプロットして明示する。結果を図化するため、評価指標間の相互関係を把握することができ、現場の制約条件などを考慮して最適な施工方法を選定することが可能となる。

3. 評価事例～橋梁下部工の基礎杭の構築～

(1) 比較評価する施工方法の選定と制約条件の整理

a) 施工方法の選定

橋梁下部工の構築における基礎杭の構築工事を評価事例とした（図-3）。橋脚は、中央部の高さが11.3m、橋の延長方向（橋軸方向）の幅が約3.7m、橋の延長方向と直角の方向（橋軸直角方向）の幅が約11.8mである。構築する杭の仕様は施工方法により異なり、杭の種類は既成品（鋼管やコンクリート管）と現場構築（現場打ちコンクリート）、長さは約31m、直径は1.0m～2.0m、本数は6～12本である。

評価対象となる施工方法を表-2に示す。施工方法は鋼管ソイルセメント杭工法、回転杭工法、中堀杭工法（PHC杭・SC杭）、場所打ち杭工法および打込杭工法の5つの工法とした。

b) 制約条件の整理

地盤はN値10の砂質土であり、工事に障害となる架空

線、埋設物は無く、施工ヤードは十分広いこととした。また、振動・騒音に対する制約は無いものとした。

(2) 評価項目の決定

評価項目は、CO₂排出量、建設コスト、重機から発生する振動・騒音の大きさ、施工日数、および排泥量の5項目とした。施工条件に関する評価項目の選定には、各工法間で相違が見られる項目の中から抽出した。

(3) 境界条件の決定

境界条件は施工時および資機材の搬出入とした。境界条件および搬入、搬出時の諸条件を図-4に示す。CO₂排出量は、重機や搬出入の車両から発生する排出量とした。建設コストの主な内訳は、資機材の搬入、施工、資機材の搬出に分かれている。資機材の搬入に要するコストは、使用する杭材や重機の積込、運搬、荷卸のコストである。施工に要するコストは、杭基礎工事の労務、材料および

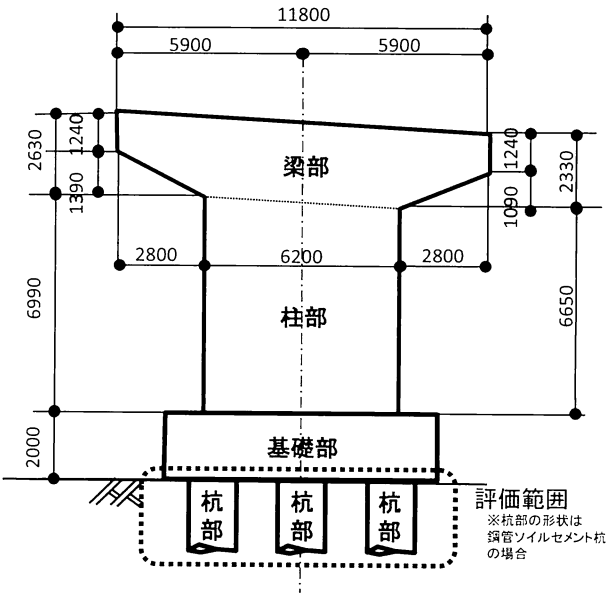


図-3 橋梁下部工の標準断面図

表-2 基礎杭の構築方法

施工方法	使用重機の仕様等	施工条件に関する値			
		杭本数 (本)	施工日数 (日)	騒音振動 (-)	排泥量 (m ³ y)
①鋼管ソイルセメント杭工法	杭打機(120tクラス, 110kw) クローラークレーン(60～65t吊) 他	6	4.2	小	103
②回転杭工法	全回転型オールケーシング(φ2000級) クローラークレーン(100t吊) 他	9	15.3	小	0
③中堀杭工法 (PHC杭・SC杭)	アースオーガ中堀機(90kw) クローラークレーン(80t吊) 他	12	8.3	小	117
④場所打ち杭工法	揺動式オールケーシング(φ2000級) クローラークレーン(50～55t吊) 他	12	19.9	小	505
⑤打込杭工法 (鋼管杭)	油圧ハンマ(ラム10.0～12.5t, リーダ21.0～33.0m, 45～50t吊) 他	12	4.4	大	0

機械のコスト、資機材の搬出に要するコストは重機の積込、運搬、荷卸のコストである。なお、搬入、搬出時の諸条件に用いる値は実測値を採用した。運搬では、運搬時間は3時間として、運搬車両の種類は資機材の重量が20t以上では20tセミトレーラー、20t未満ではその重量にあわせた運搬車を選定することとした。また積込、荷卸では、作業時間を資材10t当り1時間とし、積込機械は25tラフテレーンクレーンとした。なお場所打杭工法は、鉄筋籠はトレーラーで搬入し、コンクリートは杭構築時に必要量をコンクリートミキサー車で搬入する。

(4) CO₂排出量および建設コストの算出

CO₂排出量は、重機の燃料消費量¹⁰⁾に施工数量と燃料の原単位を乗じた。燃料の種類は各重機とも軽油であり、原単位は2.65kg-CO₂/L²⁾とした。建設コストは、標準歩掛り¹⁰⁾に施工数量と施工単価¹¹⁾¹²⁾を乗じて求めた。

鋼管ソイルセメント杭工法に対する各工法のCO₂排出量と建設コストの比率をプロットしたものを図-5に示す。結果から、5つの工法を2つのグループ(図-5のAとB)に分類できる。Aは鋼管ソイルセメント杭工法と比較してCO₂排出量、建設コストともに1~2倍程度であるが、Bの場所打杭工法は建設コストが約2倍、CO₂排出量が約4倍である。場所打杭工法で用いる揺動式オールケーシングの燃料消費量は、他の工法で用いる重機に比べて多く、構築する杭本数も12本であり、コンクリートの搬入車両も多いため、コストおよびCO₂排出量が大きくなっている。図-5から、CO₂排出量と建設コストの関係は読み取ることが可能だが、施工日数や騒音振動の大きさなどの施工条件との関係を読み取ることが困難である。

(5) 施工条件に関する値の決定

施工条件に関する値を表-2に示す。各値は標準歩掛¹⁰⁾や各工法に関する専門資料¹⁴⁾を参考に決定した。その結果、施工日数は、最短が鋼管ソイルセメント杭工法の4.2日、最長が場所打杭工法の19.9日となった。振動・騒音の大きさは、打込み杭工法のみが「大」、その他の工法は「小」となった。排泥量は回転杭工法と打込み杭工法が0 m³、鋼管ソイルセメント杭工法は103m³、中堀杭工法は117m³、場所打杭工法は505m³となった。

(6) ランク付け

CO₂排出量、建設コスト、施工日数、騒音・振動の大きさ、排泥量の各項目を0~1にランク付けした。CO₂排出量、建設コストは(4)で算出した値を用いた。施工日数と排泥量は(5)で決定した値を用いた。騒音・振動

の大きさは(5)で「大」と「小」で定性的に評価したため、「大」を1、「小」を0と再評価した値を用いた。

(7) 評価結果の明示

ランク値をレーダーチャートにプロットして可視化した。(図-6)。例えば、環境配慮の観点からCO₂排出量、排泥量、騒音・振動を抑えた施工方法を選定したい場合、各ランク値が小さい回転杭工法を選定することができる。また、CO₂排出量が小さくコストも安価な施工方法を選

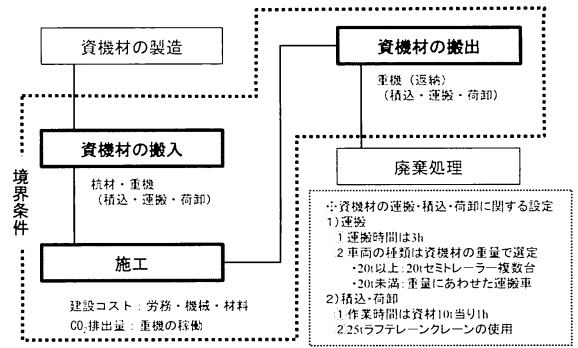


図4 境界条件

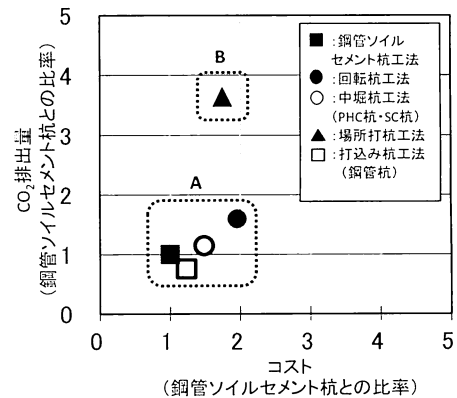


図5 CO₂排出量と建設コストの関係
(鋼管ソイルセメント杭との比率)

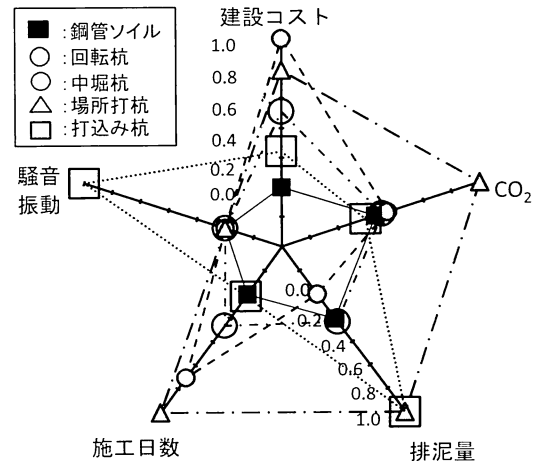


図6 評価結果

定する場合は、鋼管ソイルセメント杭工や打ち込み杭工を選定することになる。なお、場所打ち杭工法はコンクリートミキサー車の搬入車両が多いため、他の工法に比べてCO₂排出量のランク値が大きくなった。

4. 考察～AHPによる重み付け～

前章では、評価項目間の重みをすべて同等とした評価値を可視化した。様々な利害関係者が本手法を適用することを想定すると、評価項目間で重みを考慮することが必要と考えられる。そこで、評価基準が多数考えられる場合や主観的な判断が求められる場合などに有効な手法であるAHP(Analytic Hierarchy Process:階層分析法)を用いて重み付けを実施した。

AHPは、評価項目(判断基準)間の重要度(重み)を評価するものであり、一対比較により評価項目間の重要度を決定し、最終的な選定の対象となる複数個の代替案を一つにし絞り込む(重み付けで順位を付ける)手法である¹⁰⁾。

今回、3章の事例に対して、工法の選定者を発注者、請負者、周辺住民の3者と仮定してAHPにより重み付けを行った。工法の選定における階層構造を図-7に示す。レベル1は意思決定者の3者(工事の発注者、請負者、周辺住民)を、レベル2は評価項目、レベル3は施工方法を示している。各レベルの一対比較を表-3、表-4に示す。一対比較は、要素間の重み付を一つで行うものである。レベル1の一対比較は三者間の力関係を示したものであり、レベル2は各立場から見た評価項目の重要度を示したものである。一対比較の値は、1(同程度の重要)、3(少し重要)、5(かなり重要)、7(非常に重要)、9(極めて重要)で評価した。例えば、表-3中の破線部の9は、周辺住民は発注者に対して「極めて重要(強い)」な立場にあること、表-4中の破線部の7は、発注者にとって施工日数は、排泥量よりも「非常に重要」と考えていることをそれぞれ示している。今回、レベル1、レベル2の一対比較の値は、著者らが仮定した値を、レベル3は、3章のランク値を1～9に再度振り分けた値をそれぞれ採用した。レベル1、レベル2の仮定内容だが、レベル1は、周辺住民、発注者、請負者の順で力関係があるとした。レベル2は発注者、請負者は建設コストを、周辺住民は騒音振動を最重要視すると仮定した。具体的には、発注者は、建設コストを極めて重要とし、施工日数は非常に重要、その他は同程度重要とした。請負者は、建設コストを極めての重要とし、施工日数を非常に重要、排泥量および

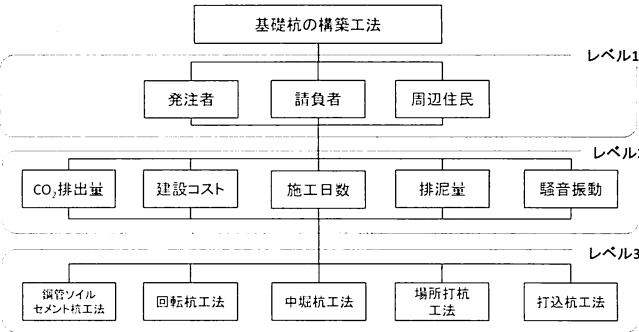


図-7 階層構造

表-3 レベル1の一対比較

	発注者	請負者	周辺住民
発注者	1	9	1/9
請負者	1/9	1	1/5
周辺住民	9	5	1

表-4 レベル2の一対比較

a) 発注者による一対比較

	CO ₂	建設コスト	排泥量	施工日数	騒音振動
CO ₂	1	1/9	1	1/7	1
建設コスト	9	1	9	3	9
排泥量	1	1/9	1	1/7	1
施工日数	7	1/3	7	1	7
騒音振動	1	1/9	1	1/7	1

b) 元請者による一対比較

	CO ₂	建設コスト	排泥量	施工日数	騒音振動
CO ₂	1	1/5	1	1/3	1/5
建設コスト	5	1	5	3	1/9
排泥量	1	1/5	1	1/3	1/5
施工日数	3	1/3	3	1	1/7
騒音振動	5	9	5	7	1

c) 周辺住民による一対比較

	CO ₂	建設コスト	排泥量	施工日数	騒音振動
CO ₂	1	7	7	1	1/3
建設コスト	1/7	1	1	1/7	1/9
排泥量	1/7	1	1	1/7	1/9
施工日数	1	7	7	1	1/3
騒音振動	3	9	9	3	1

CO₂排出量をかなり重要とし、騒音振動を同程度とした。周辺住民は、騒音振動を極めて重要とし、施工日数とCO₂排出量を非常に重要、その他を同じ程度重要とした。

AHPは、一対比較から最大固有値と固有ベクトルを算出し、各評価項目の重要性を示す重みを計算する。レベル1、レベル2から求めた重みの値と、重みを3章の結果

(図-6)に乗じたものを図-8に示す。重みが考慮された図-8の値は、全評価項目に共通した値として扱うことが出来る。本事例では、騒音振動や建設コストに対する重みが大きく、騒音振動の評価値も大きいことが読み取れる。図-9は全階層（レベル1からレベル3）を踏まえて算出した各工法の重みであり、工法の順位を示している。設定した仮定のもとでは、鋼管ソイルセメント杭が最も有効であり、以下、打込杭、中堀杭であった。

このように、本手法にAHPを用いることで、①評価項目間の重み付けが可能であること、②重み付けした評価値は全評価項目に共通の評価値として扱うことが出来ること、③設定した条件に対する工法の順位付けが可能であることを確認した。ただし、各レベルの一対比較の値は著者らが仮定した値である。今後の課題は、一対比較の値の決め方や値と重みの関係などの検討と考えている。

5. おわりに

CO₂排出量と建設コストの関係を施工条件を踏まえて評価し、最適な工法を選定する手法を提案した。本手法を橋梁下部工の杭の構築工事に適用したところ、各工法のCO₂排出量、建設コスト、施工条件の関係を把握することができたため、施工現場の条件に相応しい施工方法を選定できる可能性があることを確認した。また、AHPにより重み付けを行い、本手法の有効性を考察したところ、評価項目の重要性を可視的に把握し、設定した条件下における工法の順位付けが可能であることを確認した。ただし、重みはAHPの一対比較の値により異なるため、一対比較の値と重みの関係について、検討を進める。

参考文献

- 1) 国土交通省総合政策局環境政策課：国土交通省における地球温暖化対策について【概要】，
http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000006.html.
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所：社会資本のライフサイクルをととした環境評価技術の開発に関する報告，2012.
- 3) 社団法人日本建築学会：建物のLCA指針，
<http://news-sv.aij.or.jp/tkankyo/s0/site/arc08.html>.
- 4) 建築環境・省エネルギー機構：CASBEE 建築環境総合性能評価システム，<http://www.ibec.or.jp/CASBEE/index.html>.
- 5) 伊香賀俊治：建築物のLCA・LCC 同時評価ツールの国・自治体・企業での活用状況，第1回日本LCA学会研究発表会

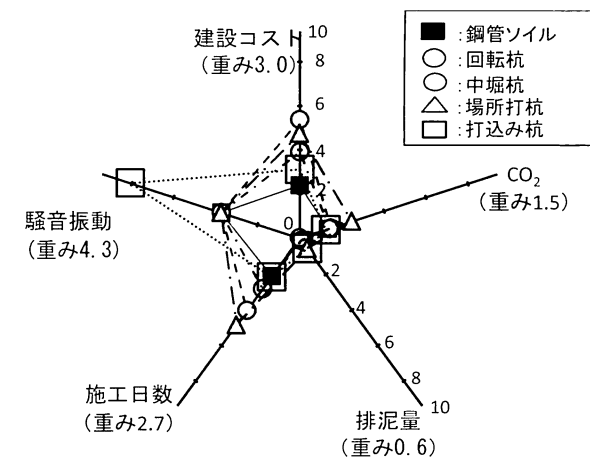


図-8 重み付けした評価結果

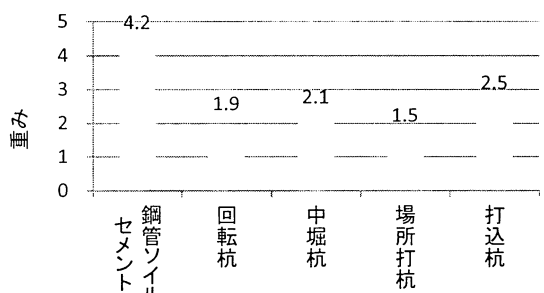


図-9 各工法の重み付け

講演要旨集，pp.6～9，2005.

- 6) 奈良松範，吉田一真，吉川繁，千田光：橋梁解体工事のオンサイト環境負荷調査研究，土木学会地球環境研究論文集，Vol. 18，pp13-18，2010.
- 7) 瀧加藤真紀，三浦秀一，外岡豊：建築工事及び土木工事におけるCO₂排出量の地域特性に関する研究，第62回日本建築学会東北支部研究報告集，pp.347-350，1999.
- 8) 水守隆司，瀧下芳彦，草木貴巳：建設現場の環境負荷算出ツールの開発，第2回日本LCA学会研究発表会講演要旨集，pp.206-207，2011.
- 9) 国土交通省北陸地方整備局：条件明示の手引き（平成20年4月改訂），
<http://www.hrr.mlit.go.jp/gijyutu/kiyun.html>.
- 10) 日本建設情報総合センター：平成23年度国土交通省土木工事標準積算基準書（共通編），2011
- 11) 日本建設機械化協会：平成23年度版建設機械等損料表，2011.
- 12) 建設物価調査会：建設物価 2011年12月，2011.
- 13) 鹿島建設土木設計本部：基礎構造物/地中構造物，pp2-156，鹿島出版会，1993.
- 14) 刀根薫，関口吉男：AHPによる地盤改良工法の合理的な選定法，第21回土木情報システム講演集，pp.73-76，1996.
- 15) 入門AHP―決断と合意形成のテクニック，日科技連出版社，2000.