

CO₂発生量に着目した鋼橋の環境負荷Environmental Impact of Steel Bridges Considering CO₂ Emission

米沢栄二*, 三輪恭久**, 中原勝也***, 中村俊一****
Eiji YONEZAWA Yasuhisa MIWA Katsuya NAKAHARA Shunichi NAKAMURA

* (株) オリエンタルコンサルタンツ 環境文化部 (〒213-0011 川崎市高津区久本 3-5-7)

** 工修 NKK 橋梁建設部 橋梁設計室 (〒230-8611 横浜市鶴見区末広町 2-1)

*** 住友金属 (株) 土木・橋梁技術部 新製品技術グループ (〒100-8113 千代田区大手町 1-1-3)

**** Ph.D. 東海大学 工学部 土木工学科 教授 (〒259-1292 平塚市北金目 1117)

Environmental impact of steel bridges has been studied from a viewpoint of CO₂ emission. Unit amount of CO₂ emission has been obtained by analyzing each process, when steel bridges are fabricated and erected. A steel two I-girder bridge is advantageous compared with a four I-girder bridge, and a steel box girder with orthotropic deck is not inferior to a four I-girder bridge considering its long span. Total emission of CO₂ depends mostly on steel and concrete materials and the fabrication and erection processes affects insignificantly. Steel members can be recycled as the electric furnace steel that produces only one-third CO₂ of the blast furnace steel. The total CO₂ emission would decrease 20-30% during the bridge life of 50 years, if all steel members are recycled.

Key Words : *Co₂ emission, environmental impact, steel bridges, recycle, bridge life*

CO₂発生量, 環境負荷, 鋼橋, リサイクル, 橋梁寿命

1. はじめに

21 世紀においては, あらゆる生産活動は「環境への配慮」を無視してはありえない。鋼橋も例外ではなく, 環境問題への積極的な取り組みが重要であると考えられる。とくに, 地球温暖化は, 人の活動に伴って発生する温室効果ガス(二酸化炭素, メタンなど 6 物質)により, 地表および大気の温度が上昇し, 生態系や気象に深刻な影響をおよぼす重要な問題である。気候変動に関する政府間パネル(IPCC)では, このままの状況が続けば, 100 年後には平均気温が 2℃上昇し, 海面が 50cm 上昇すると予測しており, 生物・水資源・食料生産・洪水・高潮・健康などの分野で大きな影響が懸念される。

この地球温暖化問題に対処するため, 先進国の温室効果ガスの排出量に関し, 法的拘束力のある数値目標を盛り込んだ「京都議定書」が採択され, 我が国においては「温室効果ガスの総排出量を 2012 年までに 1990 年レベルから 6%削減する」との目標が定められた。

橋梁の環境負荷については, 土木学会の環境負荷評価(LCA)委員会¹⁾や伊藤義人ら²⁾により研究されてい

る。数種類の橋梁形式について, それを建設するに要するエネルギー消費量と二酸化炭素排出量を比較している。これによれば, エネルギー消費量, 二酸化炭素排出量, 工費のいずれにおいても, 鋼橋は PC 橋と比較してやや劣っているとされている。比強度の関係があり, この比較のみから単純に鋼橋が不利とは言えないが, 鋼橋の環境負荷は少なくないと言える。

鋼橋の環境負荷を評価するためには, 建設時の材料・製作・施工のみならず, 完成後の維持管理・補修, さらには撤去およびリサイクルを考慮したライフサイクルにおける環境負荷, すなわち LCA (Life Cycle Assessment) を実施しなければならない。LCA は, 目的及び調査範囲の設定, インベントリ分析, 影響評価, 解釈の 4 つの段階で行うものであり, その手法は ISO14040 に規定されている。伊藤らの研究³⁾によれば, 部材劣化がやや早い場合には, 完成後の維持管理・撤去に関する環境負荷は建設時に匹敵するほどである。さらに, 伊藤らはミニマムメンテナンス橋および少主鋼 I 桁を適用する方が使用鋼材も少なく, 環境負荷も小さいことを見出している⁴⁾。

しかし, 既存の研究においては主に使用材料のみに着目しており, 工場製作や現場施工に伴う環境負荷は

十分には考慮されていない。本研究では、鋼橋の工場製作および現場施工の作業を分析し、各プロセスにおけるCO₂発生量を算出する。また、橋梁形式については、少主桁および多主桁鋼I桁の比較、および床版形式に着目しコンクリート床版と鋼床版箱桁の比較を実施する。さらに、鋼橋は鋼材のスクラップが電炉材として再利用できるためリサイクルが可能である。そこで、リサイクルを考慮した鋼橋のライフサイクルにおける環境負荷についても考察する。

2. モデル橋

本研究では、図-1、図-2、図-3 に示す3種類の橋梁をモデル橋として発生するCO₂量を把握する。モデル橋Aは4主桁の鋼I桁であり、現場添接位置で断面変

化させるなど加工量を抑えた合理化桁である。モデル橋Bは2主桁の鋼I桁であり、モデル橋Cは鋼床版箱桁である。これらの橋梁諸元は実際に建設された橋梁に基づいている。

下部工は、高さ15mのRC橋脚および厚さ2mのフーチングで構成されると想定した。橋軸方向のRC橋脚幅およびフーチング幅は、スパンに応じて変化させた。

これら3橋の主な構造諸元および数量を表-1に示す。モデルA橋はRC床版を、モデルB橋は横締めPC床版を用いているが、モデルC橋は鋼床版であるためコンクリート量が少ない。また、モデルC橋は鋼床版箱桁橋で、しかも最大スパンが長いいため単位橋面積あたりの鋼重・溶接延長・塗装面積が大きい。

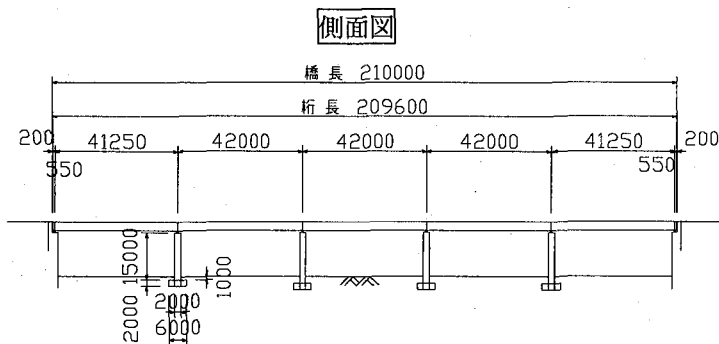


図-1 モデルA橋

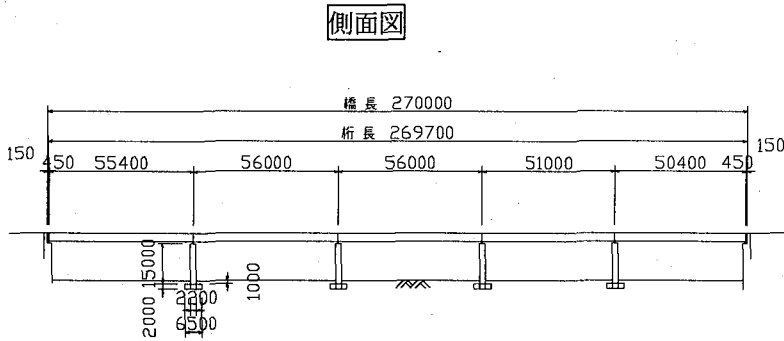


図-2 モデルB橋

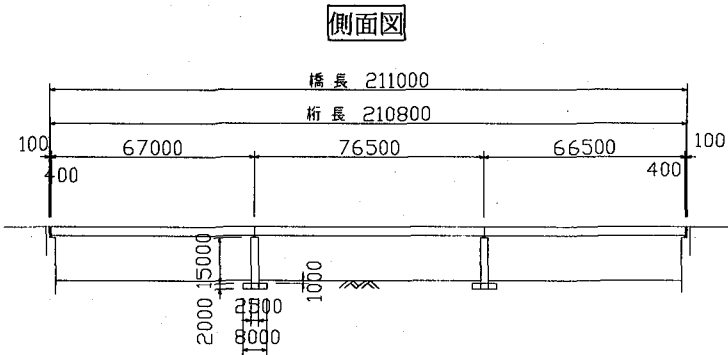


図-3 モデルC橋

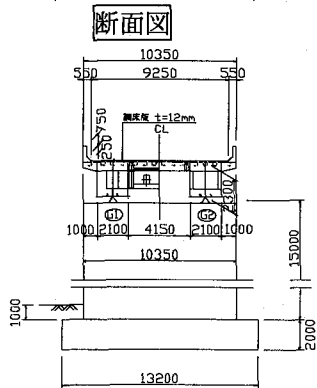
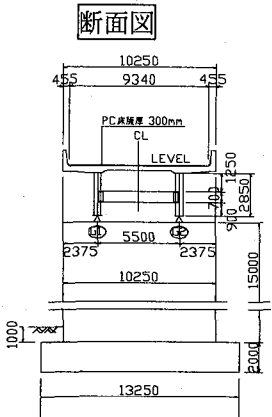
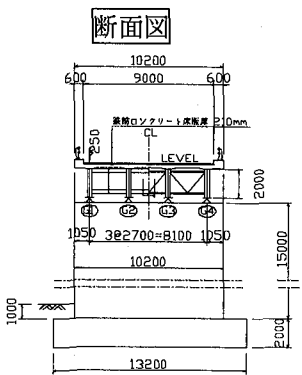


表-1 モデル橋の主要諸元および数量

	単位	モデル A	モデル B	モデル C
最大スパン	m	42.0	56.0	76.5
橋面積	m ²	2,142	2,768	2,161
鋼重	tf	480	620	892
単位橋面積あたりの鋼重	kgf/m ²	224	224	413
鉄筋	tf	146	88	16
コンクリート	m ³	613	1,062	144
アスファルト	m ²	151	189	147
溶接延長	m	10,070	11,350	30,300
切断長	m	12,898	20,104	33,997
ボルト孔	個	81,756	30,948	160,148
塗装面積	m ²	7,000	5,760	18,590
下部工コンクリート	m ³	1,858	2,042	1,187

3. 各プロセスにおける原単位

本章では、製作および架設、さらには解体作業にかかわる単位数量あたりの CO₂ 発生量、すなわち原単位を算出する。各プロセスを分析し、そのプロセスの原単位を算出したが、材料、電気、燃料などの原単位は土木学会の推奨値¹⁾を用いた。なお、本論文で説明されていない詳細な数値根拠については参考文献 7) を参照されたい。

3.1 材料

鋼材の原単位は、鋼材生産時の土木学会原単位 (0.411kgC/kg) に、製鉄メーカーから橋梁加工工場までの輸送に対する CO₂ の発生量を加える。輸送距離は 100km と想定し、燃料消費量、トレーラーの消耗費、排気ガスを加えた。燃料消費の原単位は参考文献 5) により、排気ガスに関する原単位は参考文献 6) によった。

コンクリートの原単位は 84.9kgC/m³ とし、アスファルト舗装の原単位は 0.0113kgC/kg とした。また、リサイクルを検討する際の電炉材の原単位は 0.128kgC/kg とした。いずれも土木学会の値である。

3.2 溶接

溶接による原単位は、脚長 6mm のすみ肉溶接を 1m 行う場合の CO₂ の発生量とする。ここでは、手溶接、半自動 CO₂ 溶接、サブマージアーク自動溶接の 3 種類の溶接方法に対してそれぞれ算出を行った。原単位の算出にあたっては、溶接材料によるもの、溶接施工時の CO₂ の発生量、溶接機の消費電力を加算した。

溶接施工時における CO₂ の発生量の算出には、心線の溶融による量は無視し、被覆材およびフラックスに

含まれる CaCO₃ が分解するときが発生する CO₂ を推定した。なお、橋梁製作会社により使用する溶接法が異なるため、モデル橋の CO₂ 発生量については、6mm すみ肉溶接に換算した溶接延長に最も一般的な溶接法である CO₂ 半自動溶接法による原単位をかけることにより算出した。

表-2 溶接の原単位 (kgC/m)

工程	手溶接	CO ₂ 溶接	サブマージアーク溶接
溶接材料	0.140	0.083	0.153
溶接施工	0.006	0.027	0
消費電力	0.110	0.061	0.043
合計	0.256	0.171	0.196

3.3 切断

鋼橋の製作の一部である鋼材の切断については、ガス切断、レーザー切断、プラズマ切断の 3 種類の方法が用いられることが一般的である。ここでは、主桁のフランジ・ウェブおよび鋼床版デッキプレートにはプラズマ切断が、横桁、横リブ、ダイアフラムなどの小物部材にはレーザー切断が、補剛材や付属物などにはガス切断が用いられると想定した。

CO₂ 発生量は、切断作業時に発生する量、切断機に使用される電力、機械そのものの消耗に関する量を合計した。

表-3 切断の原単位 (kgC/m)

	ガス切断	レーザー切断	プラズマ切断
切断	0.374	0	0
電力	0.057	0.312	0.143
機械消耗	0.035	0.010	0.009
合計	0.466	0.322	0.152

3.4 孔明け

ボルト孔には、付属物などを接合するための普通ボルト用の孔と主構造本体を接合するための高力ボルト用の孔がある。ここでは孔明け作業に際して、普通ボルト用の孔はボール盤による手穿孔、高力ボルト用の孔は NC 穿孔機による自動穿孔とした。

原単位の算出には、穿孔作業に要する電力消費量と機械の消耗に伴う原単位を合計した。

表-4 孔あけの原単位(kgC/個)

穿孔器具	部材	孔明け (kgC/個)	機械消耗 (kgC/kg)
ボール盤	付属物	0.00042	1.21
NC 穿孔機	本体	0.03628	1.21
	添接板	0.00645	1.21

3.5 運搬・移動

工場内での部材の運搬・移動では、トレーラー(20tf)およびクレーン(20tf)による稼働状況を想定し、CO₂の発生量を算出した。発生要因としては、燃料および電力消費量、機械消耗に関する量を考慮した。なお、機械類の耐用年数は10年とし、稼働日数は200日/年とした。

3.6 仮組立

仮組立に関しては、クレーンによる部材の運搬、ボルトの仮締め作業を考慮した。ボルト締め付け作業は電動工具を使用する。この際、インパクトレンチの締め付け能力は2,700本/日と想定した。これらの作業に伴う電力消費および機械消耗の2つの要因を加算し原単位とした。

3.7 塗装

塗装仕様は、鋼道路橋塗装便覧のC-2塗装系、すなわち工場にて上塗りまで施工する仕様を想定した。塗料の原単位は0.452kgC/kgとし、これを使用塗料量に乗じて発生量を算出する。

さらに、塗料生産所から加工工場までを200kmと想定し、運搬に伴う発生量も加算した。

3.8 桁架設

加工工場から架設現場までは400kmと想定して、部材の輸送に伴う発生量を算定した。

現場での施工法はベント架設を想定し、架設クレーンの稼働時の発生量、ベント材料とその輸送時の発生量、現場溶接時の発生量、高力ボルト締め時の発生量、現場塗装作業時の発生量を合計した。

3.9 橋面工

床版および地覆のコンクリートおよび鉄筋材料の原単位、鉄筋・コンクリート・型枠材料の輸送時の排出量、アジテータ車およびポンプ車の作業時および輸送時の発生量を合計した。

さらに、舗装アスファルトの材料の原単位、アスファルトフィニッシャーおよびロードローラの作業時および輸送時の発生量を考慮した。

3.10 下部工

下部工形状は図-1、図-2、図-3に示すとおりと想定した。

原単位は、土木学会の環境負荷(LCA)委員会⁹⁾においてコンクリート、型枠、鉄筋、足場工、支保工、土留工、掘削、埋戻しを考慮したCO₂発生量をコンクリートm³あたりで割り戻した値である148kgC/m³とした。

3.11 解体撤去

床版および桁本体の解体に要する高所作業車およびクレーンの稼働時および輸送時の発生量、足場材料およびその輸送、撤去物の輸送時の発生量を考慮した。

3.12 リサイクル

リサイクルの低減効果は、解体後のスクラップが電炉材として再利用されるものとし、次式の考え方に基づきCO₂の低減量を負の値として考慮した。

CO₂の低減量＝リサイクル重量

×(高炉材の原単位－電炉材の原単位)

4. 建設時のCO₂発生量

モデル橋の材料および作業プロセスを定量化し、前章で示した原単位をそれらに乗じることにより算出した建設時に発生するCO₂を表-5に示す。

総発生量を橋面積あたりで除した値を図-4に示す。上下部合計では、モデルA橋(4主桁橋)を1.0とすると、モデルB橋(2主桁橋)では0.91となり、モデルC橋(鋼床版箱桁)では1.05となる。上部工のみに着目すると、この順序は変わらないが、モデルC橋の発生比率が大きい。

しかし、3つのモデル橋は最大スパンが異なるため、このままでは橋梁形式を公平に比較できない。そこで、モデルB橋とモデルC橋の最大スパンを、モデルA橋の最大スパン42mに合わせたときの数値を推定する。すなわち、下部工の数量は3橋ともモデルA橋と同一とし、上部工の数量はモデルB橋とモデルC橋の最大スパンがモデルA橋の最大スパンに逆比例すると仮定する。

これを示したのが図-5である。上下部全体では、モデルBの2主桁が4主桁より17%低く、鋼床版橋も4主桁より18%低い。上部工のみでは、モデルBの2主桁が4主桁より28%低く、鋼床版橋も4主桁より29%低い。したがって、少数主桁橋が有利であること、長いスパンが必要な場合に用いられる鋼床版橋も必ずしも4主桁に劣るとは言えないことが理解できる。

以下、表-5の結果をさらに細かく分析する。上部工と下部工の比率を図-6に示す。モデルA橋とモデルB橋では下部工の占める割合が約1/3であるが、橋脚数の少ないモデルC橋では下部工は約1/4である。

上部工に関し、工場製作と現場施工の比率を図-7に示す。モデルA橋とモデルB橋では工場製作の占める割合が約1/2であるが、鋼床版を用いるモデルC橋では工場製作は約3/4である。

工場製作に係わる各プロセスの比率を図-8に示す。3橋とも、鋼材(材料)の占める割合が圧倒的に高く85-90%を占める。したがって、加工工場における発生

量はきわめて低く、CO₂発生に関しては橋梁加工は支配的な要因ではないと言える。

現場施工に係わる各プロセスの比率を図-9 に示す。モデル A 橋とモデル B 橋では床版・地覆が約 1/2 を占

め支配的であり、輸送・橋面工・桁架設がそれぞれ 15% 程度を占める。一方、モデル C 橋では輸送と架設の占める割合が高い。

表-5 単位面積あたりの建設時の CO₂ 発生量 (kgC/m²)

上 部 工	項目	内容	モデル A 橋	モデル B 橋	モデル C 橋
	工場製作	材料	92.1	92.1	169.6
		材料輸送	5.7	5.7	10.6
		塗装	3.1	2.0	7.8
		切断	2.0	1.9	5.3
		溶接	0.8	0.7	2.4
		穿孔	0.8	0.2	1.9
		工場内運搬	0.1	0.1	0.1
		仮組	0.0	0.0	0.0
		小計	104.6	102.7	197.8
	現場施工	輸送	17.0	17.5	31.5
		架設	16.9	16.7	30.9
		橋面工輸送	15.8	16.9	0.5
		床版・地覆	52.3	45.6	8.7
舗装		3.4	3.3	3.3	
小計		105.4	100.1	74.9	
上部工合計		210.0	202.8	272.7	
下部工合計		128.3	109.2	81.3	
上・下部工合計		338.4	312.0	354.0	

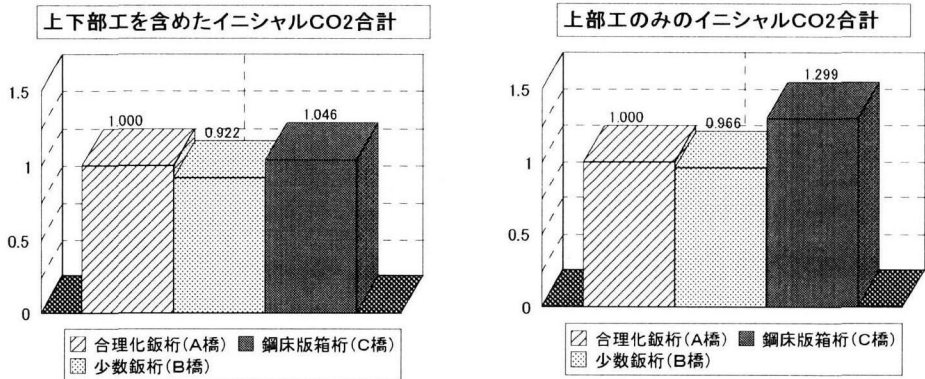


図-4 橋面積あたりの CO₂ 発生量

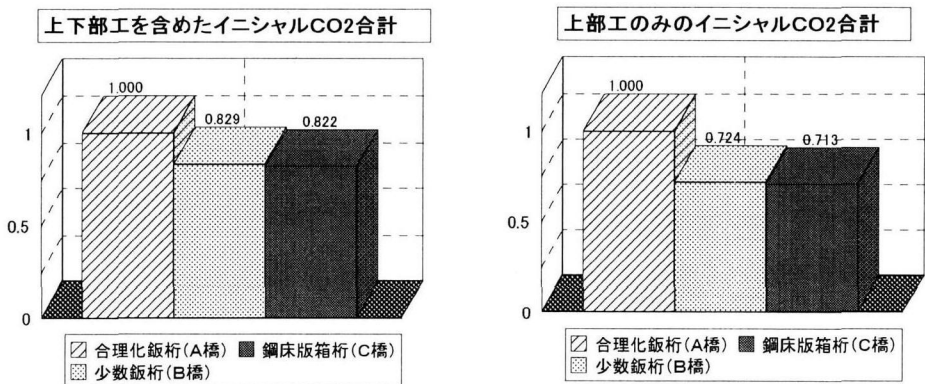


図-5 最大スパン長を考慮した橋面積あたりの CO₂ 発生量

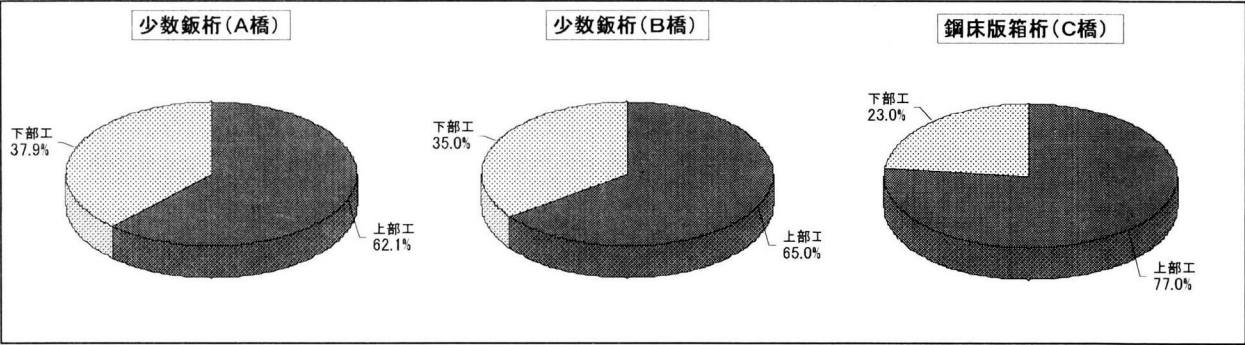


図-6 上部と下部の比率

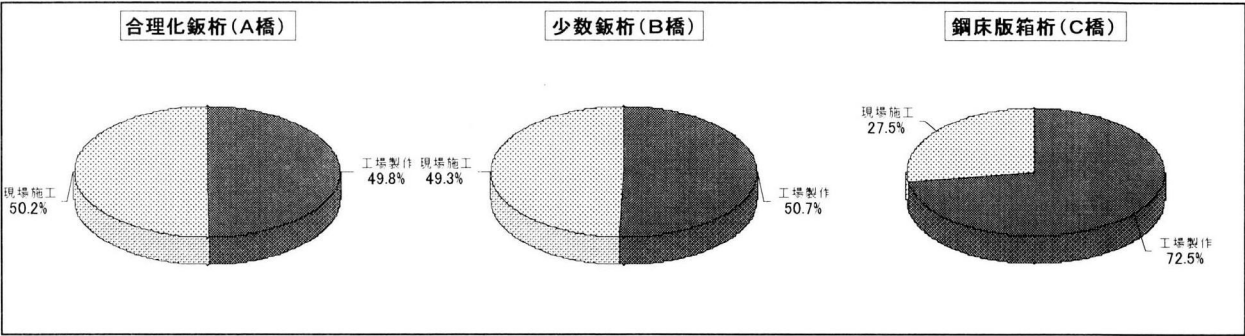


図-7 工場製作と現場施工の比率

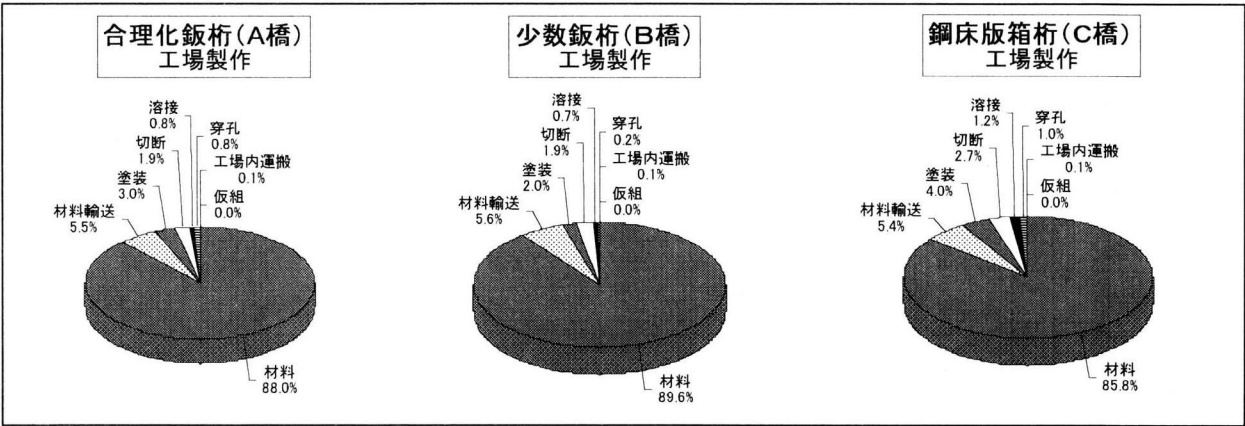


図-8 工場製作の内訳

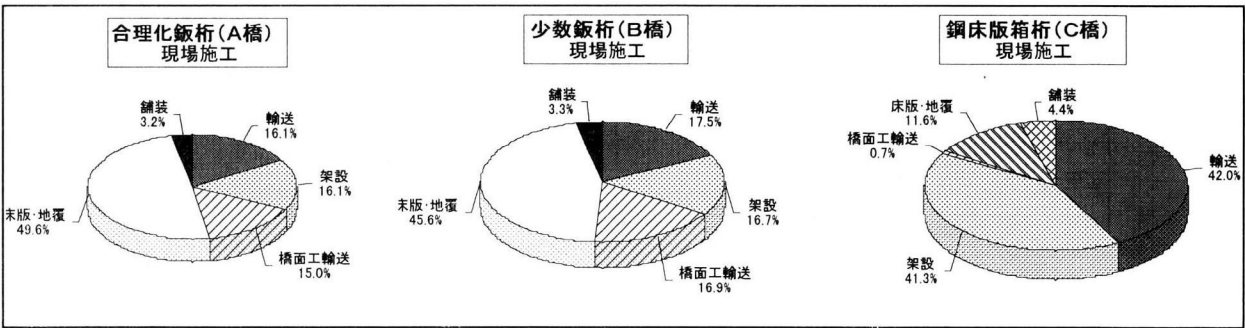


図-9 現場施工の内訳

5. ライフサイクルにおける CO₂ 発生量

鋼橋の利点は、リサイクルが可能であることである。橋を架け替える場合、橋そのものを改造し再利用することができる。また、解体する場合にも、鋼材は電炉材料として再利用できる。しかも、電炉材の CO₂ 排出量は、高炉材の約 30% と環境負荷の低い材料である。このように、コンクリートが廃棄物として処理されることにに対し、鋼材はリサイクル性の高い材料と言える。

そこで、50 年を橋の寿命と想定し、ライフサイクルでの CO₂ 発生量を把握した。この期間に、2 回の塗装塗り替え、2 回のアスファルト補修を想定した。床版の補修または打ち換えはないとした。

表-6 に単位面積あたりの維持管理、解体工事、リサイクルに関する発生 CO₂ 量を示す。鋼板はスクラップとして 100% 利用し、次世代の橋梁に電炉材として再使用されるものとした。これによれば、合計数値はい

ずれも負になり、ライフサイクルとして見た場合には鋼材のリサイクルが鋼橋の CO₂ 発生による負荷を大幅に軽減することがわかる。

建設時、維持管理および解体工事の発生量の比率を図-10 に示す。ライフサイクルを 50 年と短く設定したため、今回の試算では、建設時が支配的となっている。

維持管理に関し、その内訳を図-11 に示す。舗装補修が 70-80% 以上を占め支配的である。しかし、モデル C 橋では、塗装の塗り替えの比率が他のモデル橋に比較して高い。

リサイクルの効果を図-12 に示す。いずれの橋も、ライフサイクルでの CO₂ 発生量は、リサイクルを考慮すれば 20% 程度低くなる。とくに、鋼材を多く使うモデル C 橋では 30% 程度の効果がある。

表-6 単位面積あたり維持管理・解体工事・リサイクルに関する CO₂ 発生量 (kgC/m²)

項目	内容	モデル A 橋	モデル B 橋	モデル C 橋
維持管理	塗装塗替 (2 回)	2.4	3.1	5.5
	舗装補修 (2 回)	14.2	14.1	14.1
解体工事	床版撤去	17.5	22.6	3.8
	桁・付属物撤去	20.3	18.6	36.0
リサイクル	床版鉄筋	-19.3	- 9.0	0.0
	桁・付属物	-63.9	- 64.4	- 116.8
合計		-28.8	-15.0	-57.4

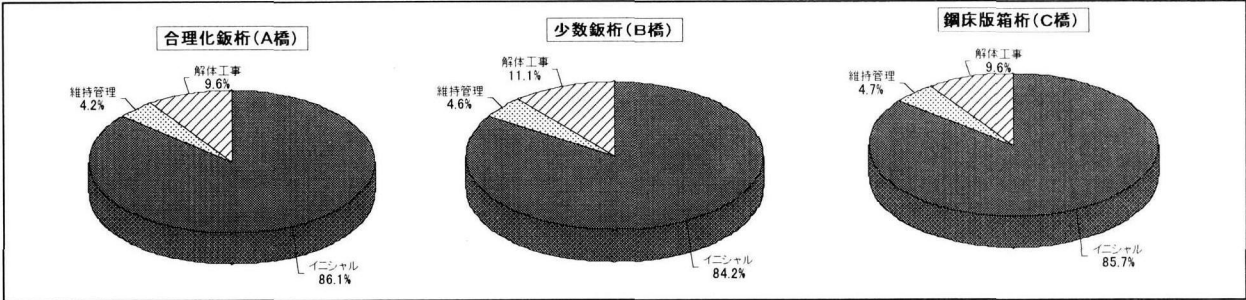


図-10 建設時・維持管理・解体工事の比率

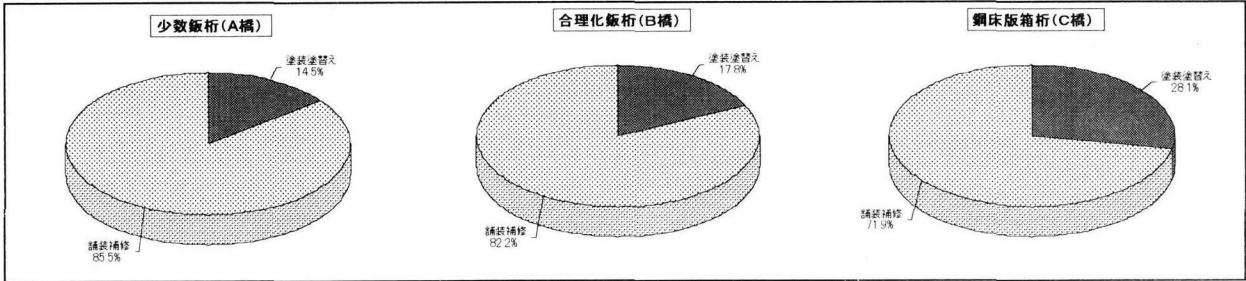


図-11 維持管理の内訳

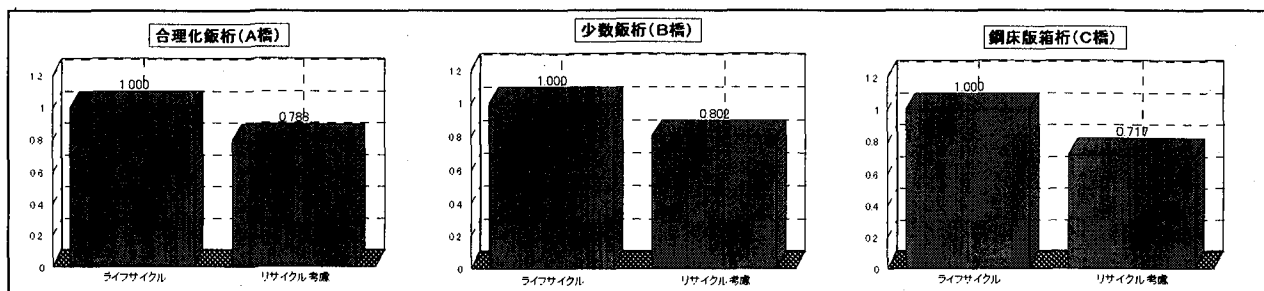


図-12 リサイクルの効果

6. まとめ

本論文では、CO₂の発生量に着目した鋼橋の環境負荷について研究した。得られた主な成果は以下である。

- 1) 製作および架設作業を分析し、これらのプロセスにおけるCO₂の発生原単位を算出した。
- 2) 3種類の橋梁形式についてCO₂発生量を算出した。4主鋼I桁に比較し、2主鋼I桁の方がCO₂の発生量が少ないこと、また、最大スパンを考慮すれば鋼床版箱桁のCO₂の発生量は必ずしも多くはないことを見出した。
- 3) 鋼材およびコンクリートのCO₂発生量が支配的であり、鋼橋製作および架設作業にかかわるCO₂発生量の比率は低いことを見出した。
- 4) 鋼橋の寿命を50年として、ライフサイクルでのCO₂発生量を算出した。鋼橋を撤去する際、解体された鋼材は電炉材として再利用したが、リサイクルを考慮しない場合よりCO₂の発生量を20～30%低減できることを見出した。

鋼橋のCO₂発生量を抑制するために望まれる方策を以下に示す

- 1) 使用材料はなるべく少なくする。すなわち、少数主桁の採用、長支間化による下部工材料の低減、材料の高強度化、材料最小化設計などである。
- 2) 各生産過程の省エネルギー化やCO₂発生量の抑制を図る。すなわち、低燃料や低排気ガスの工場設備および輸送車両、運搬距離の最短化、ISO 14001等の環境マネジメントの導入などである。
- 3) 維持管理が少なく長寿命化に有利な材料や構造を選ぶ。たとえば、省補剛桁、亜鉛メッキ橋、耐候性鋼材の利用、上下部一体構造により伸縮装置や支沓を避ける、などの方策が考えられる。
- 4) 資源のリサイクルを図る。電炉材の利用、コンクリートの再利用、橋そのものの再利用などが考えられる。

今後は、鋼橋のみならず、建設業界としてCO₂発生量抑制に取り組む必要がある。本研究がそれらのLCA手法確立の足がかりの1つとなることを期待する。

本研究は、鋼橋技術研究会・環境問題部会(部会長：中村俊一)で実施したものであり、著者以外にも以下の各位が研究分担した：井原務(片山ストラテック)、吉田康治(佐藤鉄工)、田谷英嗣(東京鉄骨)、中澤孝史(トビー工業)、山川雅敏(BMC)、植田良孝(松尾橋梁)、福原理子(三菱重工)、館石和雄(名古屋大学)。また、鋼橋技術研究会の伊藤学会長、技術委員会の阿部英彦委員長には研究にあたり助言いただいた。ここに、謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 土木学会地球環境委員会、環境負荷(LCA)評価検討小委員会：土木建設業における環境負荷評価(LCA)検討部会、平成7年度調査研究報告書。
- 2) 伊藤義人ら：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、土木学会論文集、No.553 / VI-33, 187-199, 1996。
- 3) 伊藤義人ら：地球環境負荷削減のための橋梁ライフサイクル評価に関する研究、構造工学論文集、Vol.45A, 1295-1305, 1999。
- 4) 伊藤義人ら：少数主桁橋梁と従来型橋梁のライフサイクル環境負荷とコストの比較研究、構造工学論文集、Vol.46A, 1261-1272, 2000。
- 5) 日本建設機械課協会：建設機械等損料算定表、建設省建設機械課監修。
- 6) 環境庁地球環境部環境保全対策課地球温暖化対策室：地球温暖化対策の推進に関する法律に基づく地方公共団体の事務及び事業に係わる温室効果ガス総排出量算定方法ガイドライン、1999。
- 7) 鋼橋技術研究会：環境問題部会報告書、2000。

(2000年9月14日受付)