2009年度日本建築学会
関東支部研究報告集

首都圏で実施工された鉄骨造および鉄筋コンクリート造建築物における資材利用・輸送時環境負荷評価

1.材料施工－15.地球環境・資源
首都圏，二酸化炭素排出，資材利用，輸送，

準会員 ○ 渡邊恭平*1　　正会員　田村雅紀*2
正会員　　名知洋子*3

1. はじめに

現在，温室効果ガスの削減が世界的な動きとなっている。中でも二酸化炭素（以下，CO_2）排出量の影響が重視され，その積極的な削減対策が実施されている。また，2009年12月に日本建築学会をはじめとする建築関連17団体により「建築関連分野の地球温暖化対策ビジョン2050」[1]において低炭素社会に向けたカーボンニュートラルへの取り組みの継続実施が宣言された。建築物のライフサイクルにおける各段階でより具体的な対応が求められている。特に，施工時の輸送段階の燃料消費に伴う温室効果ガス排出量の削減においては，各政策[2]を鑑みても輸送時環境負荷の評価，指標化といった点で，建築業界，特にコンクリート産業は他分野に遅れをとっていると想定される。今後のコンクリート構造物における低炭素化に向け，この問題の解決は急務である。

以上を踏まえ，本研究では，研究１として、既住の研究[3]を踏まえ，３月期・９月期の首都圏に流入したコンクリート用骨材の年間需給動向を調査，採掘地から東京までの輸送に伴う，CO_2排出量を試算し，輸送形態と季節変動が環境負荷量に及ぼす影響を分析する。続いて，研究２として，実施工されている建築物の資材投入量を構造種別に調査，コンクリート用骨材に加え，コンクリート全量および鉄骨，鉄筋の輸送に伴うCO_2排出量を試算する。（図１）

2. 研究概要

2.1 調査概要と試算条件の設定

表１－６に，研究１および研究２における首都圏に流入するセメントおよびコンクリート用骨材の需給調査の概要，骨材の輸送時環境負荷評価の試算条件ならびにモデル建築物の資材輸送に伴う環境負荷評価の概要を示す。

研究１では，国内の人口最大年であり，建築関連CO_2排出最大時期に該当する2005年の３月期（上期＋建築着工低下期7.4%／年）[4]と９月期（下期上期＋建築着工増加期8.0%／年）[4]を対象に，セメントおよび骨材の種類，構造用コンクリートの実圧縮強度の評価，平均水セメント比の仮定に基づく平均計画調合の算定と構造別着工統計により骨材の需要量を推定，採取地から東京までの陸路，航路によるコンクリート用骨材の輸送時環境負荷を地理情報システム(GIS)により試算する。平均計画調合は算定水セメント比が３月・９月期において同等であったため，同一の計画調合を使用した。

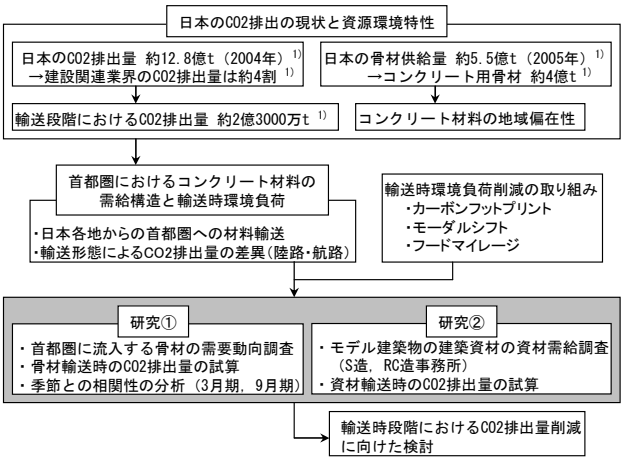


図１　研究概念図

研究２は，図３にモデル建築物の概要と輸送時環境負荷計算方法に示す。首都圏で実施工された建築物でS造およびRC造の事務所ビルをモデルに設定し，構造体におけるコンクリート，鉄骨，鉄筋を対象に，施工数量，配合計画より算出したセメントと骨材使用量，資材の輸送形態を踏まえた環境負荷量を試算する（写真１参照）。

2.2 セメントおよびコンクリート用骨材の需給構造

図４－６に首都圏・３月期および９月期におけるセメント種類・適用割合，骨材混合比，骨材採掘地の分類を示す。

図４より，セメントは特定月に関わらず，N，M，BB，L種の順で用いられているが，３月期において70%程度を占めていたN種が９月期においては50%程度に減少して他種の使用割合が増し，特にM種の増加が顕著である。これは，現場でのセメントの水和熱

写真１　陸路・航路によるコンクリート用骨材輸送状況

表１　首都圏におけるコンクリートの需給動向調査概要（研究１）と
モデル建築物のコンクリート施工および資材輸送の調査概要（研究２）

	項目	内容
研究1	調査対象	関東一区（埼玉・千葉・東京・神奈川）で竣工した鉄筋コンクリートを使用した建築物を対象に，2005年３月期・９月期に第３者検査機関（東京都防災・建築まちづくりセンター）で評価された建築構造体コンクリート強度管理供試体評価データ.
	調査内容	①セメント種類および使用率（３月期：459件，９月期：408件） ②骨材種類および使用率（３月期：186件，９月期：408件） ＊９月期は測定量を増加 ③コンクリートの設計基準強度および管理材齢強度 （３月期：459件，９月期：408件）
研究2	調査対象	東京都江東区で建設したS造建築物をモデル建築物①とし，RC造建築物をモデル②とする. 所在地はともに東京都江東区役所に設定する.
	調査内容	①コンクリートの施工数量： 全体量，１階スラブ～基礎，２階～８階 ②セメント・骨材の種類および使用量： 全体量，１階スラブ～基礎，２階～８階 ③鉄骨・鉄筋の施工数量： 全体量 ③各資材の輸送経路，手段，形態
	調査内容	①コンクリートの施工数量： 全体量，１階～基礎，２階～３階，４階～PH階 ②セメント・骨材の種類および使用量： 全体量，１階～基礎，２階～３階，４階～PH階 ③鉄骨・鉄筋の施工数量： 全体量 ③各資材の輸送経路，手段，形態

低減に伴うコンクリートの耐久性向上への配慮が考えられる。

図５より，骨材の混合使用割合は細骨材 75%，全骨材 25%（３月期），細骨材 60%，全骨材 15%（９月期）が混合骨材であり，細骨材で２種類以上，全骨材で４種類以上が同時に使用されている。

図６より，特定月で採掘地の構成に大きな変化はなく，首都圏における骨材供給の体制は，粗骨材は遠方からの船舶輸送，細骨材は関東以内からのトラック輸送が主体となっている。

2.3 コンクリート用骨材の輸送時環境負荷

図７－９に，首都圏におけるコンクリート用骨材に関して３月期・９月期の陸路・航路による首都圏・年あたりの流入量，輸送状況，上記を踏まえた輸送に伴う環境負荷量の比較を示す。

図７より，特定月に関わらず，細骨材は 90%が陸路輸送だが，粗骨材は航路輸送の割合が大きく，特に９月期は航路が陸路を上回り，骨材全体での航路の割合も３月期よりも大きくなった。平均輸送距離は，陸路は航路の 7.5%程度の短距離だが，総輸送回数は航路が陸路の 0.07%（３月期），0.09%（９月期）程度で非常に小さな値で，総輸送距離（輸送回数×輸送距離）は，３月期で陸路が航路の 100 倍，９月期で 90 倍程度となり，輸送形態の差が著しくなる。

表２　首都圏に流入するコンクリートの平均調合の仮定条件（研究１）

項目	内容
セメント	全評価データ（3 月期 : 459 件，9 月期 408 件）における主たるセメントであった普通ポルトランドセメント（N）． セメントの平均密度は製造工場実績値を参考に 3.16g/cm^3 に設定．
骨材	全評価データ（3 月期 : 186 件，9 月期 408 件）における主たる骨材であった石灰石系，砂岩系骨材． 骨材の平均的特性は製造工場実績値を参考に設定．（想定平均表乾密度 2.67g/cm^3，想定平均粗骨材実積率 0.6）
計画調合	全評価データ（3 月期 : 186 件，9 月期 408 件）から平均圧縮強度を算出（3 月期 : F=49.8N/mm^2，9 月期 F=49.9 N/mm^2）．普通ポルトランドセメント－水セメント比算定式[X=51/(F/K+0.31)]，28 日圧縮強さ実績値（K= 60N/mm^2）より平均水セメント比を仮定． 日本建築学会・調合指針より単位粗骨材かさ容積 0.6(m^3/m^3)，細骨材率 44%を仮定し，平均計画調合を作成
流入量 （骨材全般）	全国生コンクリート工業組合・協同組合連合会における生コンクリート総出荷数量実績値（H18）による関東一区の総出荷量 0.288 億 m^3 を読み，平均計画調合をもとに平均流入量を仮定．（生コンクリート流入量 : 0.66 億 t/年）

研究	計画調合	w/c (%)	s/a (%)	絶対容積（L/m^3）				質量（kg/m^3）			設定空気量 4.5(%) 単位粗骨材かさ容積 0.6(m^3/m^3) 粗骨材実績率 60(%) 単位容積質量 2.3 (t/m^3)
				水	セメント	細骨材	粗骨材	セメント	細骨材	粗骨材	
1		48	44	185	122	288	360	385	769	961	

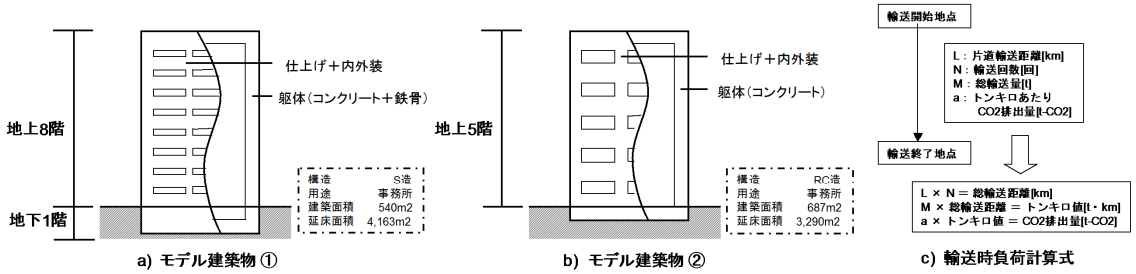
表３　陸路・航路輸送距離の試算値（研究１，２）

研究１				研究２		
片道陸路輸送距離		片道航路輸送距離		片道輸送距離		
都道府県	距離（km）	都道府県	距離（km）	出発地	目的地	距離（km）
栃木	106.3	大分	1215	（粗骨材）栃木県佐野市	A コンクリート F 工場	99.6
茨城	104.9	山口	1215	（粗骨材）埼玉県秩父郡		84.9
埼玉（秩父）	82.0	北海道	1056	（細骨材）千葉県君津市		78.0
東京（青梅）	46.7	高知	961	（細骨材）千葉県市原市		74.3
千葉	40.5	青森	814	（粗骨材）軽量骨材製造工場		19.6
その他	－	岩手	814	T セメント O 工場		814
平均	76.1	平均	1013	A コンクリート F 工場	東京都・江東区庁（現場）	2.9
				（鉄骨）　K 社　T 工場		75.3
				（鉄筋）　T 社　T 工場		75.1

表４　モデル建築物の使用コンクリートの調合計画・施工数量の試算値（研究２）

項目			打込み箇所	w/c (%)	s/a (%)	水	ｾﾒﾝﾄ	細骨材①	細骨材②	粗骨材①	粗骨材②	その他
研究 2	モデル ① S 造事務所ビル	調合計画	1 階スラブ～基礎	57.5	47.9	単位質量（kg/m^3）						
						170	296	348	521	486	486	普通 PC，空気量 4.5%
			2～8 階(ｽﾗﾌﾞ)	53.0	48.9	178	336	342	512	439	－	普通 PC，空気量 5.0%
		施工数量	1 階スラブ～基礎	－	－	施工数量（t）						総重量（t）
						107.7	187.6	220.6	330.2	308.0	308.0	1462.2
			2～8 階(ｽﾗﾌﾞ)	－	－	120.6	227.6	231.7	346.8	297.4	－	1224.1
			全体	－	－	228.3	415.2	1129.3		913.4		2686.2
	モデル ② RC 造事務所ビル	調合計画	1 階～基礎	42.0	48.7	単位質量（kg/m^3）						
						170	404	835	－	910	－	普通 PC，空気量－%
			2 階～3 階	45.0	49.5	170	378	859	－	907	－	普通 PC，空気量 4.5%
			4 階～PH 階	47.5	50.4	170	358	885	－	899	－	普通 PC，空気量 4.5%
		施工数量	1 階～基礎	－	－	施工数量（t）						総重量（t）
						188.7	448.4	926.9	－	1010.1	－	2574.1
			2 階～3 階	－	－	126.0	280.1	636.5	－	672.1	－	1714.7
			4 階～PH 階	－	－	108.5	228.4	564.6	－	573.6	－	1475.1
			全体	－	－	423.1	956.9	2128.0		2255.7		5763.8

備考）普通 PC : 普通ポルトランドセメント



a) モデル建築物 ①　　b) モデル建築物 ②　　c) 輸送時負荷計算式

図３　モデル建築物の概要と輸送時環境負荷計算式

図８より，年あたりのトンキロ値（荷物荷重×輸送距離）を比較すると，両月換算ともに陸路は航路の 200 倍の値を示し，陸路の総輸送回数の増大が影響している。航路は大量長距離輸送のため，輸送回数が少なくなり，トンキロ値は小さく評価される。また９月期は，航路が増加，陸路が減少しているが，両月ともに航路の陸路に対する比率が非常に小さくなることから，トンキロ値による季節間での大きな差異はないといえる。トンキロ値換算－CO_2 排出量原単位（陸路：75.8g-CO_2/t・km，航路 39.7 g-CO_2/t・km）を用いて算定した総トンキロ値換算－年間 CO_2 排出量は。両月換算ともに陸路が総トンキロ値あたり 1 億 8000 万 t－CO_2 であるのに対し，航路の総排出量が 60 万 t－CO_2 程度であり，陸路は航路の 300 倍にも及ぶ。

図９より，月単位での CO_2 排出量も 1500 万以上の差があり，ほぼ一年間通じて同程度の差が生じる可能性がある。

2.4 モデル建築物のコンクリート材料輸送構造

図 10 にモデル建築物で使用された骨材の採掘地分類を示す。a）モデル建築物 ①（S 造事務所ビル）と，b）モデル建築物 ②（RC 造事務所ビル）において，全骨材すべて関東地域内の骨材を用いており，100km 以内の行程をトラックにより陸路輸送する場合が大部分である。岩石種は，c)に示すように，砂岩骨材と石灰岩系骨材で構成され，産地と使用材料が明確に整理される状況であった。

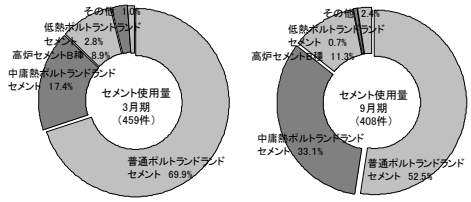
2.5 モデル建築物のコンクリートに関わる輸送時負荷

図 11－12 にモデル建物における各資材の投入量と輸送状況，上記を踏まえた輸送に伴う環境負荷量の比較を示す。

図 11 より，モデル建築物は，実態調査に基づき，実際に首都圏

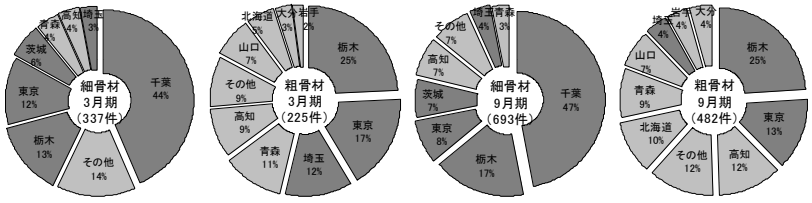
表６　輸送時負荷の試算条件（研究１，２）

項目		内容
研究１	評価データ	陸路，航路による骨材採掘地から消費地までの片道輸送時の環境負荷量（トンキロ値，CO_2 排出量）
	輸送距離の設定方法	**陸　路　：** 採掘地は関東地方以内，消費地は東京とし，10t トラックにより各県の県庁所在地（ただし，埼玉県は秩父市，東京都は青梅市に設定）から東京都・千代田区庁まで輸送した片道距離を GIS（インクリメント P 社ルート検索）を用いて，非高速道路・最短距離の条件で試算. **航　路　：** 採掘地は関東地方以外，消費地は東京都とする，国土交通省海事局・一般貨物流動調査結果（H18）[5] における国内の石灰石運搬船の輸送総トン数のデータをもとに，5000t 石灰石運搬船を仮定した片道距離を試算.
	環境負荷の算定方法	**陸　路　：** 10t トラック最大積載時運搬距離と年間総輸送回数の積によるトンキロ値を求め，総トンキロ値の CO_2 排出量（10t トラックの燃費 3.5km/L [6]，3.16kg-CO_2/軽油 L [7]，トンキロあたり CO_2 排出量 75.8g-CO_2/t・km）を算定. **航　路　：** 5000t 石灰石運搬船最大積載時運搬距離と年間総輸送回数の積によりトンキロ値を求め，内航船舶トンキロあたり CO_2 排出量原単位 39.7g-CO_2/t・km [8] により CO_2 排出量を算定.
		※　ロジスティック分野の CO_2 排出量算定方法共同ガイドライン [9] に沿い，陸路は改良トンキロ法，航路は従来トンキロ法に準じ算定した.
研究２ モデル① S 造事務所ビル ＋ モデル② RC 造事務所ビル	評価データ	実態調査に基づき，骨材採掘地からコンクリート工場及び，各資材の製造工場からモデル建築物の建設現場までの片道輸送時の環境負荷量（トンキロ値，CO_2 排出量）
	輸送距離の設定方法	**骨　材　：** 実態調査より，採掘地が関東地方以内のため，採掘地からコンクリート製造工場である A コンクリート F 工場まで，10t トラックによる陸路輸送時の片道距離を GIS を用いて，非高速道路・最短距離の条件で試算. **セメント　：** セメント製造工場である T セメント O 工場からコンクリート製造工場である A コンクリート F 工場までの航路輸送を，2000t 運搬専用タンカーにより輸送した片道距離を試算. **コンクリート：** A コンクリート F 工場からモデル建築物の建設現場である東京都・江東区庁まで，10t コンクリートミキサー車（4.5m^3）により陸路輸送した片道距離を GIS を用いて，非高速道路・最短距離の条件で試算. **鉄　骨　：** 鉄骨加工工場である K 社の T 工場からモデル建築物の建設現場である東京都・江東区庁まで，10t トラックにより陸路輸送した片道距離を GIS を用いて，非高速道路・最短距離の条件で試算. **鉄　筋　：** 鉄筋加工工場である T 社の T 工場からモデル建築物の建設現場である東京都・江東区庁まで，28t トラックにより陸路輸送した片道距離を GIS を用いて，非高速道路・最短距離の条件で試算.
	環境負荷の算定方法	**骨　材　：** 10t トラック最大積載時運搬距離と総輸送回数の積によるトンキロ値を求め，総トンキロ値の CO_2 排出量（10t トラックの燃費 3.5km/L [6]，3.16kg-CO_2/軽油 L [7]，トンキロあたり CO_2 排出量 75.8g-CO_2/t・km）を算定. **セメント　：** 2000t 運搬専用タンカー最大積載時運搬距離と総輸送回数の積によりトンキロ値を求め，総トンキロ値の CO_2 排出量（内航船舶トンキロあたり CO_2 排出量原単位 39.7g-CO_2/t・km [8]）を算定 **コンクリート：** 10t コンクリートミキサー車（4.5m3）最大積載時運搬距離と総輸送回数よりトンキロ値を求め，総トンキロ値の CO_2 排出量（燃費 3.5km/L [6]，3.16kg-CO_2/軽油 L [7]，トンキロあたり CO_2 排出量 75.8g-CO_2/t・km）を算定 **鉄　骨　：** 10t トラック積載率 70%時運搬距離と総輸送回数の積によるトンキロ値を求め，総トンキロ値の CO_2 排出量（10t トラックの燃費 3.5km/L [6]，3.16kg-CO_2/軽油 L [7]，トンキロあたり CO_2 排出量 127.3g-CO_2/t・km）を算定. **鉄　筋　：** 28t トラック積載率 90.75%時運搬距離と総輸送回数の積によるトンキロ値を求め，総トンキロ値の CO_2 排出量（10t トラックの燃費 3.5km/L [6]，3.16kg-CO_2/軽油 L [7]，トンキロあたり CO_2 排出量 52.6g-CO_2/t・km）を算定.
		※　ロジスティック分野の CO_2 排出量算定方法共同ガイドライン [9] に沿い，セメントは従来トンキロ法，それ以外は改良トンキロ法に準じ算定した.



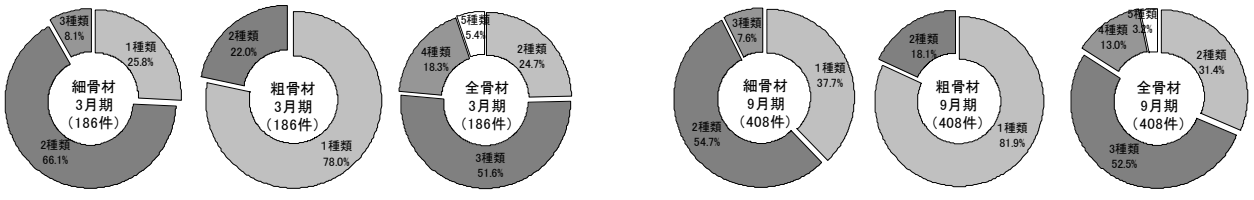
a）３月期　　b）９月期

図４　首都圏におけるセメント種類の需要構成と年変化



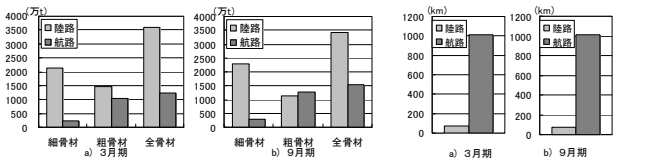
a）３月期　　b）９月期

図６　首都圏における骨材採掘地分類と年変化



a）３月期　　b）９月期

図５　首都圏におけるコンクリート用骨材混合割合と年変化



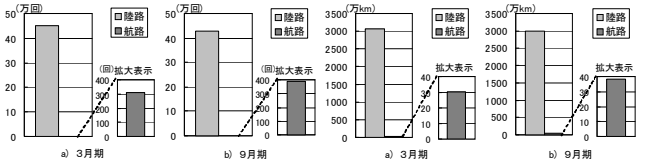


図7　首都圏への陸路・航路による骨材流入量と総輸送回数・総輸送距離

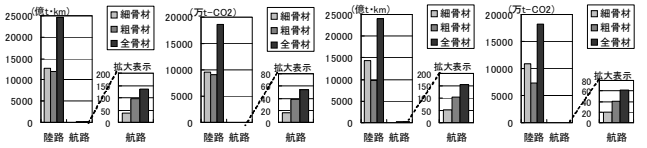


図8　首都圏への陸路・航路による年あたり輸送時環境負荷量

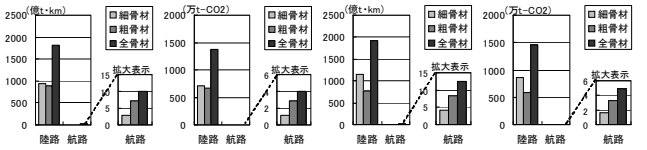
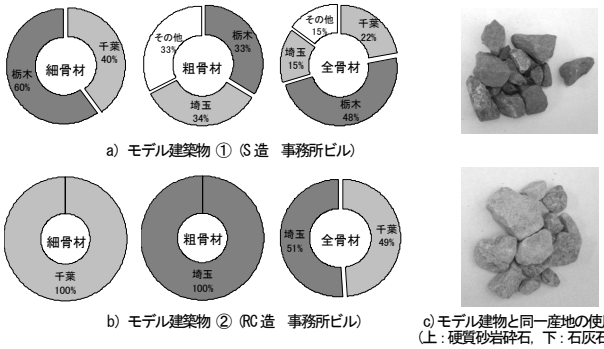


図9　首都圏への陸路・航路による当該月の輸送時環境負荷量



c）モデル建物と同一産地の使用骨材
（上：硬質砂岩砕石，下：石灰石砕石）

図10　モデル建築物の骨材採掘地分類

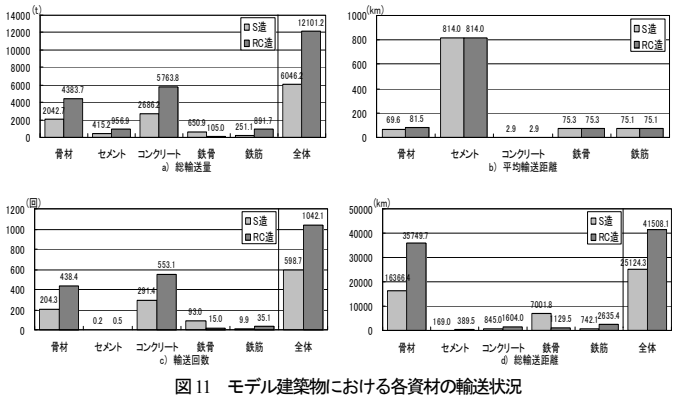


図11　モデル建築物における各資材の輸送状況

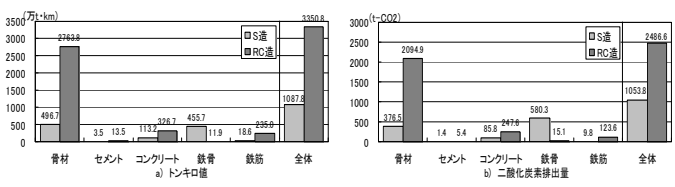


図12　モデル建築物における各資材のトンキロ値とトンキロ値換算－二酸化炭素排出量

で実施工されている同一用途，同等規模の建築物（S造：総延床面積 4163m², RC 造：総延床面積 3290m²）であるが，構造種の違いにより，使用材料の総輸送量に違いが生じ，S造の方が 50%程度小さくなっている。骨材とコンクリート，鉄骨と鉄筋は陸路により少量で多数回輸送，セメントは航路により多量で少数回輸送している。総輸送距離は，両構造において骨材がコンクリート全量の約 95%を占め，構造体全体でも 65%（S 造），85%（RC 造）を占める。コンクリートについては，骨材と同様にコンクリートアジテータ車による陸路の輸送形態を取るが，JIS A 5308 レディーミクストコンクリートにおける輸送の規格条件である，練り混ぜ開始から，1.5 時間以内に荷卸しをする点が影響し，平均的な輸送距離は短く，輸送回数を含めた総輸送距離についても小さくなっている。

図 12 より，モデル建築物のコンクリート系材料全体でのトンキロ値はモデル①で約 613 万 t・km，モデル②で約 3100 万 t・km である。総トンキロ値換算－二酸化炭素排出量については，構造体に使用された資材全体で，モデル①では 1054 t－CO_2，モデル②では 2487 t－CO_2 であり，S 造が RC 造の２倍程度になっている。骨材と鉄骨の輸送の影響が大きく，特に骨材は構造種別に関わりなく輸送時環境負荷量の比率が大きくなっている。

３．結論

本研究より，以下の知見が得られた。

1）セメントは，特定月に関わらず N，M，BB，L 種の順で用いられているが，９月期には N 種の減少し，M 種が増加している。

2）骨材は，年間を通じ，細骨材は７割程度が混合使用，９割程度は関東地方以内から供給，粗骨材は２割程度が混合使用，７割程度が関東地方以外から航路で輸送されている。

3）骨材の輸送に関わるトンキロ値および二酸化炭素排出量は，年間を通してほぼ変化はないが，様々な要求を加味し，航路への移行が実施できれば CO_2 排出量抑制が期待できる。

4）実施工されている S 造と RC 造のモデル建築物の調査・分析により，コンクリート用骨材は関東地域以内からの陸路輸送，セメントは関東地域外からの航路輸送により成立している。

5）両モデル建物において，骨材輸送の影響が大きく，中でも RC 造建築物の場合，S 造建築物と比較して，輸送時環境負荷がコンクリート系材料で５倍程度，構造体全体で２倍程度大きくなる。

参考文献

1）建築関連分野の地球温暖化対策ビジョン 2050
2）経済産業省：カーボンフットプリント制度の実用化・普及推進研究会
3）田村，阿部：首都圏に流入するコンクリート用骨材の需要動向調査と輸送時環境負荷評価，日本建築学会技術報告集，第 31 号，2009.9
4）国土交通省：建築着工統計調査結果，2006
5）国土交通省総合政策局：一般貨物流動調査結果，2006
6）産業環境管理協会：JEMAI-LCA 解説マニュアル，2005
7）地球温暖化対策の推進に関する法律施行令，2002
8）国交省総合政策局：交通エネルギー要覧，2005
9）経済産業省資源エネルギー庁：ロジスティック分野における CO2 排出ガイドライン，2006

謝辞

平成 21 年度工学院大学、都市減災センターpj(中課題３　震災廃棄物の再資源化と高機能化：阿部道彦・田村雅紀)の支援を受けた。

*1　工学院大学建築都市デザイン学科・学部４年
*2　工学院大学大学建築都市デザイン学科準教授・博士(工学)
*3　清水建設(株)技術研究所