論文　コンクリートの圧縮強度と熱伝導率の関係に関する実験的考察

李　柱国*1・李　慶濤*2

要旨：本研究では，圧縮強度と熱伝導率の推定方法を開発する基礎研究として，コンクリートの圧縮強度と熱伝導率の関係およびその影響要因を定量的に考察した。その結果として，コンクリートの圧縮強度と熱伝導率の間には密接な相関関係があり，対数関数で表すことができる。圧縮強度が大きいほど熱伝導率は大きい。両者の相関程度は，高炉スラグ微粉末の使用によって影響されないが，骨材の種類によって異なる。

キーワード：コンクリート，圧縮強度，熱伝導率，骨材，水セメント比，混和材

1. はじめに

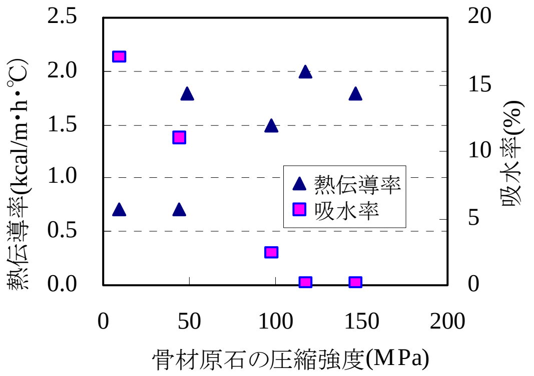
建築物は，その建設と運用に膨大なエネルギーを要するものとなってしまっている。省エネルギー基準に準じて建築物の生産と運用を行うために，部位ごとの熱貫流率の算定は断熱性の評価として必須となる。

現在，壁や屋根などの部位の熱貫流率を計算する際にコンクリートの熱伝導率は，強度レベルに拘わらず，一般に 1.6 W/(m·K) を用いている[1]。熱伝導率は，コンクリートの設計，生産および施工段階において，圧縮強度のように測定しなければならない性能ではなく，殆どの場合に測定しないことが主な原因である考えられる。しかし，混和材料や再生材料の使用によってコンクリートの種類と性能は多様化しつつある。建築物のコンクリートを使用した部位の断熱性を精確に評価するためには，コンクリートの熱伝導率の測定は必要となる。しかし，熱伝導率の測定には，高価な試験装置が必要であり，供試体の作製に手間がかかる。したがって，コンクリートの熱伝導率の推定方法が望まれている。

一方，構造体コンクリートの強度の最も信頼できる推定方法は，構造体から採取したコンクリートのコア供試体を用いて直接試験するコア抜き法である。しかし，直径が 25mm 程度の小径コアを使っても，50mm 以上の深さまで採取しなければならない。コンクリートのかぶり厚さは，3～6cm であるため，鉄筋位置の調査が必要であり，鉄筋を切断するおそれがある。

構造体コンクリートに損傷を与えない非破壊検査法の代表な方法は反発度法と超音波法である。反発度法は，測定結果の影響要因(打撃角度，乾湿状態など)が多く，圧縮強度の推定式が各研究者によって異なっており，一律に規格化できる状況にない。日本建築学会共同実験結果による普通コンクリートの圧縮強度と反発硬度の関係式の相関係数は 0.710 しかない[2]。また，超音波法は，測定結果が含水状態，コンクリート中の鉄筋方向・位置などの要因に影響され，推定精度が低く，理論的な根拠が欠如するため，普遍的に適用できる推定式が確立されていない。日本建築学会共同実験結果による推定式の相関係数は，0.5 より小さく，0.457 である[2]。また，引抜き法およびブレークオフ法などの局部破壊試験法は，殆ど既設構造物に適用できない。したがって，既設コンクリートの強度の微破壊試験法の開発は重要な課題である。

この研究背景を踏まえて，熱伝導率と圧縮コンクリートの推定方法を開発するための基礎研究として，本研究では筆者の開発した熱伝導率の簡易測定法を用いて，コンクリートの圧縮強度と熱伝導率の関係を定量的に考察し，影響要因を検討する。



図−1　骨材原石の強度と熱伝導率，吸水率の関係

2. コンクリートの熱伝導率に関する既往研究

コンクリートの熱伝導率は，骨材の岩種と単位量に依存する。骨材の熱伝導率が高いほど，コンクリートの熱伝導率は大きい[3), 4)]。骨材の常用岩種では，石英岩の強度が高く(153MPa)，石灰岩が小さい(104MPa)[6)]。強度の大小に対応して，石英岩の乾燥状態の熱伝導率(k =8.58 W/m·K) は，石灰岩(k=3.15 W/m·K)より大きい[3)]。また，石英岩の骨材を用いたコンクリートの熱伝導率 (k = 2.77 W/m·K)は，石灰岩の骨材を使用した場合 (k=2.03 W/m·K) より大きい[3)]。

図−1 は，文献 5）に示すデータに基づいて作成した原石強度と熱伝導率，含水率の関係を示すものである。骨材の強度は高いほど，吸水率は小さく，熱伝導率は大きい傾向

*1 山口大学大学院　理工学研究科　情報・デザイン工学系専攻　准教授　博士(工学)（正会員）
**2 中国礦業大学　建築工程学院　講師　博士(工学)

が見られる。また，骨材の強度が高いほど，コンクリートの強度は増大する傾向がある[6), 7)]。戸倉ら[8)]の実験結果は，砕石を用いた普通コンクリートの熱伝導率は，人工軽量骨材コンクリートより大きいことを示している。したがって，材質が緻密である高強度の骨材を使うと，コンクリートの熱伝導率と強度は共に高いと考えられる。

徳田ら[4)]は，水セメント比の増加につれて，セメントペーストの熱拡散係数は急に減少すると指摘している。水セメント比の増加に伴って，コンクリートの強度は小さくなるのが一般に知られている。土井らの実験結果[10)]は，コンクリートの熱伝導率はその強度が高いほど大きいことを示している。

以上の既往研究によって，コンクリートの使用材料および強度レベルなどが異なっても，コンクリートの熱伝導性は強度と密接に相関することが分かる。

また，徳田ら[4)]は，骨材の熱伝導率がセメントペーストより大きい場合は，コンクリートの熱伝導率は単位骨材量に依存し，単位骨材量の増加につれて増大すると指摘している。しかし，日本建築学会が刊行している「コンクリートの調合設計指針・同解説」によれば，水セメント比が 40～65%の常用範囲に変化しても，同一スランプのコンクリートにおいて，単位粗骨材嵩容積はほぼ一定である。スランプが変わっても，単位粗骨材嵩容積は大きく変化しない。

一方，単位細骨材量は，セメントペーストの量によって異なり，セメントペーストの減少につれて増加する。細骨材の熱伝導率がセメントペーストより大きい場合は，単位細骨材量が増加すると，コンクリートの熱伝導率は大きくなるはずである。また，単位細骨材量が多いほど、セメントペースト量を最小限以上に確保すれば，圧縮強度は一般に大きくなると思われる。これは，セメントペースト硬化体に比べ，細骨材の材質が強く，内部欠陥の確率が低いためである。したがって，コンクリートの単位骨材量が変わっても，コンクリートの熱伝導性は強度と密接に相関しうると考えられる。

筆者は，既に高温加熱を受けたコンクリートの残存圧縮強度と熱伝導率との相関性を明らかにし，熱伝導率による残存圧縮強度の推定方法を提案した[9)]。

表−1 用いた骨材の品質

骨材	種類	D_{max} (mm)	実積率 (%)	粗粒率	D (g/cm^3)	吸水率 (%)	D_b (kg/m^3)
粗骨材	石灰岩砕石 (LG)	13	63.1	6.39	2.60	1.21	1622
	硬質砂岩砕石 1 (HG1)	19	57.7	6.54	2.67	0.84	1537
	硬質砂岩砕石 2 (HG2)	25	59.5	6.67	2.73	0.40	1620
細骨材	石灰岩砕砂 (CLS)	5	64.6	2.43	2.68	0.52	-
	硬質砂岩砕砂 (HS)	5	66.0	2.73	2.62	1.45	-
	陸砂 (LS)	5	64.7	2.52	2.55	1.47	
	山砂 (MS)	5	55.7	1.85	2.55	1.28	
	川砂 (RS)	5	63.5	2.38	2.51	1.98	
	海砂 1(SS1)	5	65.1	2.50	2.55	1.65	-
	海砂 2(SS2)	5	62.7	1.90	2.56	1.43	-

[注] D_{max}：骨材の最大寸法，D：粗骨材の場合は表乾密度であるが，細骨材の場合は絶乾密度，D_b：骨材の単位容積質量

表−2 コンクリート調合と実験結果

Series	W/C (%)	細骨材の種類	粗骨材の種類	質量(kg/m^3)					S_p (C×%)	$Sl.$ (cm)	F (MPa)	k_{110} (W/m·K)
				W	C	BFS	S	G				
C1	62	SS1	HG1	170	274	-	841	982	0.3	14	29.3	0.960
C2	55			170	309	-	812	982	0.4	19	33.2	0.928
C3	50			170	340	-	757	1035	0.8	20	34.8	1.069
C4	47			170	362	-	770	982	0.9	22	33.0	1.051
C5	41			170	415	-	728	982	0.7	19.5	48.3	1.287
C6	35			170	486	-	670	982	1.0	19.5	51.4	1.364
C7	55	CLS		170	309	-	836	1000	0.3	14	45.5	1.187
C8	55	HS		170	309	-	855	962	0.6	13.5	46.0	1.204
C9	55	SS2		170	309	-	733	1068	0.4	12	43.5	1.074
C10	55	LS		170	309	-	807	989	0.4	18	37.4	1.039
C11	55	MS		170	309	-	724	1075	0.4	18.5	43.6	1.081
C12	55	RS		170	309	-	777	1007	0.4	17.5	31.7	1.025
C13	50	SS1	LG	170	340	-	712	1023	0.9	22	37.0	1.087
C14	41		HG2	170	415	-	696	1035	0.7	19	46.3	1.226
C15	41			170	373	42	696	1035	0.7	19.5	46.4	1.227
C16	41			170	290	125	696	1035	0.7	19	47.1	1.253
C17	41			170	208	207	696	1035	0.7	22	49.1	1.286

[注] W：単位水量，C：単位普通ポルトランドセメント量，S：単位細骨材量，G：単位粗骨材量，S_p：単位高性能 AE 減水剤量，Sl：スランプ，k_{110}：コンクリートの 110℃時の熱伝導率

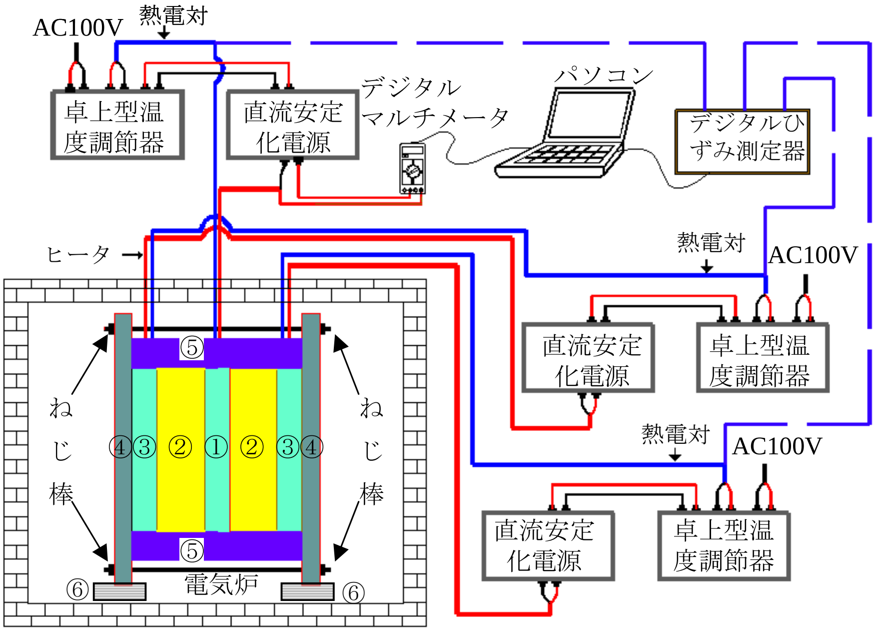
3. 実験概要

3.1 コンクリートの使用材料と調合

本研究では，コンクリートの使用材料と調合を変えて，圧縮強度と熱伝導率の関係を詳細に考察した。実験に普通ポルトランドセメントとポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤

の他，3 種類の粗骨材および 7 種類の細骨材を用いた。骨材の品質を**表-1** に示す。また，一部のシリーズに高炉スラグ微粉末(BFS)を利用した。高炉スラグ微粉末の密度と比表面積は，それぞれ 2.91g/cm^3 と 5920cm^3/g であった。水セメント比を 6 水準に変化させ，**表-2** に示すように 17 種類の調合とした。

コンクリートを容量 100L の強制型ミキサで練り混ぜた直後に，スランプを測定し，直径 100mm×高さ 200mm の圧縮試験用供試体を JIS A 1108:2006 に準拠して各々3 本作製した。また，圧縮供試体の型枠に 30mm の高さまでコンクリートを打込み，直径 100mm×厚さ 30mm である熱伝導率測定用円板供試体を各々2 枚作製した。供試体を作製するための締め固めは，テーブルバイブレータで行い，2 種の供試体の振動時間を同じとした。



① 高温ホットプレート，②供試体，③低温ホットプレート，④ ニッケル鋼板，⑤ 断熱層，⑥ 耐火れんが

図-2 簡易熱伝導率測定法の実験装置の構成

供試体は，24 時間で脱型し，20±2℃の標準水中養生を 28 日間行った後，圧縮試験を行った。また，3.2 節に述べる簡易定常法によって 110℃の熱伝導率を測定した。これらの測定の前に，円柱供試体の載荷面と円板の両面を研磨仕上げした。圧縮強度と熱伝導率の実験結果を**表-2** に示す。

3.2 熱伝導率の測定

現在，熱伝導率の測定方法は，保護熱板法(GHP 法)と熱線法が代表的である。GHP 法は定常法で測定原理が簡単であるが，試験体を伝播する熱流と温度差を正確に測定するために，実験装置は，非常に複雑な構成と制御システムを有し，高価なものである [11]。

一方，熱線法は，ヒータ(熱線)の発熱量と温度上昇量から熱伝導率を求める非定常法である。測定結果は，試料表層の組成と構造のみに対応し，厚さ方向と水平方向を区別が出来ないため，非均質材料や異方性のある材料には適用し難い。コンクリートの切断面に熱線センサーの放置位置（粗骨材やマトリックスモルタルの上）によって，測定した熱伝導率がかなり異なっている [9]。したがって，Zach ら [12]は，コンクリートの熱伝導率を熱線法によって測定する場合，測定誤差を 5%以下に抑えるために，30 箇所以上の測定が必要であると指摘している。

そのため，本研究では，熱伝導率の測定は，筆者の提案した簡易定常状態試験法 [8] によって行った。この測定法の装置を**図-2** に示す。装置は，2 枚のニッケル鋼板，3 枚のホットプレート，3 個の温度コントローラー，3 つの直流安定化電源（出力電圧：0～30V，出力電流：0～1.5A），デジタルマルチメータ，断熱材，デジタルひずみ測定器およびパソコンで構成される。

2 枚の正方形ニッケル鋼板④(寸法：300×300×5.5mm)を 4 隅において長ステンレスねじ棒できつく繋いで，耐火れんが⑥に置く。供試体②およびホットプレート①，③は 2 枚のニッケル鋼板の間に設置されて鋼板の拘束で保持される。3 枚の円形ホットプレート(直径 100mm×厚さ 12mm)は，110V の交流電源使用時の出力が 300W であった。各ホットプレートには，1 点の K 型熱電対が取り付けられた。ホットプレートを直流安定化電源に接続し，K 型熱電対を卓上型温度調節器に接続した。温度調節器は，低温ホットプレートの温度によって，直流安定化電源に電力供給を On/Off した。高温ホットプレートの電流と電圧をデジタルマルチメータとパソコンによってモニタリングした。

なお，供試体とホットプレートの外周に巻き付けた断熱材は，厚さが 10cm のカオウールブランケットであり，20℃時の熱伝導率が 0.04W/m･K である。予備実験によって，厚さを 10cm にすれば，供試体とホットプレートの外周からの熱流出は少なく，試験結果を殆ど影響しない。

図-2 に示すように，ホットプレートおよび試験体などの制御機器と測定機器以外の部分をマイコン付き電気炉内に放置した。

計測過程として，まず電気炉を作動させて，炉内温度を 95±2℃に保持した。次に，低温と高温ホットプレートの恒温温度をそれぞれ 100℃と 120℃と設定して通電

した。低温ホットプレートの設定温度は，温度調節器の制御による直流安定化電源の On/Off で保持された。高温ホットプレートの直流安定化電源の電圧と電流を調節して，その設定温度を保持させた。高温ホットプレートの発熱量を計算するために，高温ホットプレートが設定温度になった時の安定電流と電圧を記録した。

低温と高温ホットプレートがともに設定温度に達して安定し，かつ高温ホットプレートへの電流が持続する状態になると，供試体中の熱の流れは定常状態になると考えられる。ホットプレートと供試体の周辺からの熱流出を無視すれば，熱伝導を一次元のものと見なし，熱伝導率を**式**(1)によって計算した。

$$k_{110} = \frac{U \cdot I \cdot s}{2A \cdot \Delta T} \qquad (1)$$

ここに，k_{110}：供試体の 110℃時の熱伝導率(W/m・K)，
ΔT：供試体両側の温度差，即ち高温と低温ホットプレートの温度差， I, U：それぞれホットプレートのリード線の影響分を除いた高温ホットプレートへの電流と電圧，s：供試体の厚さ(m)，
A：供試体の面積(m^2)

供試体の含水率は，熱伝導率の測定値に大きな影響を与える。含水率が大きいほど，熱伝導率の測定値は大きい[13), 14)]。常温熱伝導率を正確に測定するためには、測定前に供試体の乾燥処理が必要である。しかし、完全な乾燥に至るまでには時間を要し、供試体の質量変化の測定による絶乾状態の判断は手間がかかる。本研究では，前述した簡易方法によって 110℃の熱伝導率を熱の定常状態において測定したため，供試体の乾燥を必要とせず，含水率の影響を排除する利点がある。供試体は絶乾状態にならないと，水が蒸発しつつあり、熱の定常状態にならないためである。

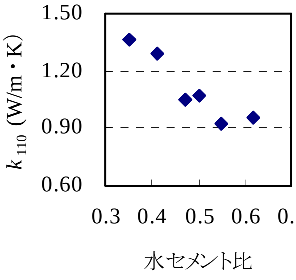
4. 実験結果および考察

4.1 コンクリートの高温熱伝導率の影響要因

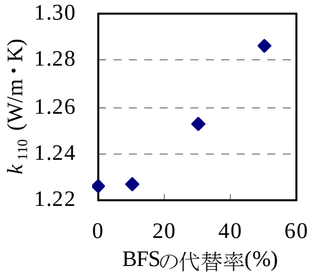
図-3 に，各要因がコンクリートの 110℃熱伝導率 k_{110} に与える影響を示す。同図(a)では，水セメント比の増加に伴って，k_{110} は小さくなることが認められる。また，**図-3** (b) に示すように，高炉スラグ微粉末(BFS)の代替率が大きいほど，k_{110} は大きい。これは，本研究で用いた BFS の粉末度が 4500cm²/g 以上で，BFS の代替率の増加につれて硬化セメントペーストの緻密性が高くなるためである。文献 15）によれば，粉末度が 4500cm²/g 以下の BFS を使用する場合は，未使用の場合に比べ，代替率に拘わらず，モルタルの強度は小さくなる。

シリーズ C7～C12 の水セメント比，セメントペーストおよび粗骨材の種類が同じであった。単位粗骨材量と単位細骨材量は異なったが，骨材の絶対容積は一定とした(0.687m³/m³)。**図-3** (c) に示すように，コンクリートの熱伝導率は細骨材の種類によって異なり，硬質砂岩砕砂(HS)を用いた場合（シリーズ C8）の熱伝導率は最も大きかった。

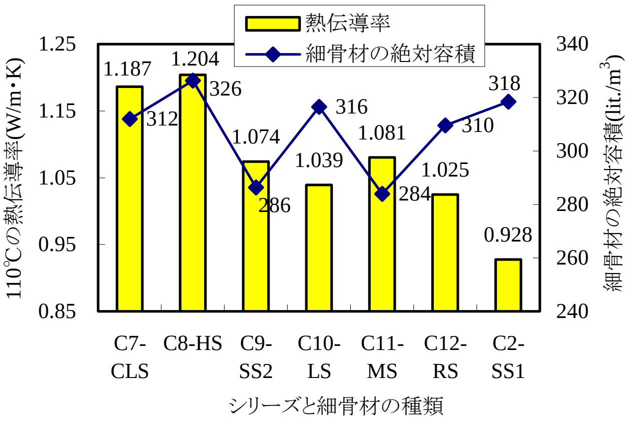
第 2 章に述べたように，骨材の種類が同じであれば，単位骨材量が多いほど，コンクリートの熱伝導率は大きい。**図-3** (d) に示すように，石灰石砕石を用いた C13 の骨材の絶対容積(0.673 m³/m³)が硬質砂岩砕石を用いた C3(0.685m³/m³)より少ないが，C13 のほうが k_{110} は大きい。C8 と C13 の熱伝導率の測定結果より，石灰石骨材に比べ，硬質砂岩骨材は高い熱伝導率を有する。また，硬質



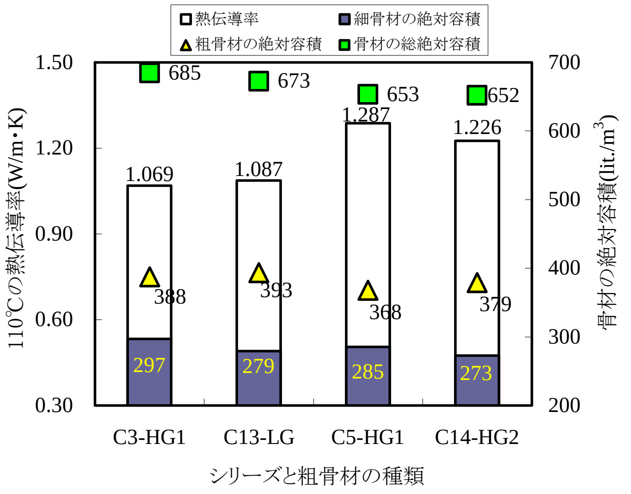
(a) 水セメント比の影響



(b) BFS 代替率の影響



(c) 細骨材種類の影響



(d) 粗骨材種類の影響

図-3 コンクリートの熱伝導率 k_{110} に及ぼす各要因の影響

砂岩砕石 2 (HG2)を用いたシリーズＣ14 の骨材の絶対容積(652m^3/m^3)が硬質砂岩砕石 1 (HG1)を使用したシリーズＣ5(0.653m^3/m^3)よりわずかに小さいが，C14 とＣ5 の k_{110} の差は 0.061W/m･K であった。これらの結果より，骨材種類がコンクリートの熱伝導率に大きいな影響を及ぼすことが認められた。

4.2 圧縮強度と熱伝導率の関係

シリーズ C14～C17 のコンクリートの圧縮強度と 110℃熱伝導率 k_{110} の関係を**図-4**(a)に示す。高炉スラグ微粉末の代替率はそれぞれ 0%，10%，30%および 50%であった。**図-4**(a)を見ると，一部のセメントが高炉スラグ微粉末に代替される場合でも，コンクリートの圧縮強度は k_{110} の増加に伴って大きくなる傾向が見られ，混和材の使用は圧縮強度と高温熱伝導率の相関性に影響を与えないことが認められた。

図-4(b)に，水セメント比が異なるコンクリートの圧縮強度と高温熱伝導率 k_{110} の関係を示す。圧縮強度 F が大きいほど，k_{110} は高く，両者の関係はほぼ直線関係であることが認められた。水セメント比が小さくなると，高温熱伝導率 k_{110} と圧縮強度 F は共に増大するためである。

図-4(c)，(d)に，異なる種類の骨材を用いたコンクリートの圧縮強度と高温熱伝導率 k_{110} の関係を示す。これらの図に示すように，k_{110} は，圧縮強度 F の増加につれて増大する傾向が見られた。これは，骨材の熱伝導率が大きいほど，作ったコンクリートの熱伝導率が大きいためである。一方，骨材の熱伝導率は大きいほど，**図-1** に示すように，その強度は一般に大きい。しかし，骨材が強くても，マトリックスセメントペーストが弱ければ，コンクリートの強度は骨材の強さに比例して増加せず，マトリックス材料の強度に主に依存する。したがって，**図-4**(c)，(d)に示すように，圧縮強度 F と高温熱伝導率 k_{110} の関係には線形関係が見られない。

17 シリーズの実験結果をまとめて示すと，**図-5** が得られた。コンクリートの 28 日圧縮強度は 110℃の高温熱伝導率と密接に相関していることが認められた。回帰分析によって，**式**(2)が得られた。

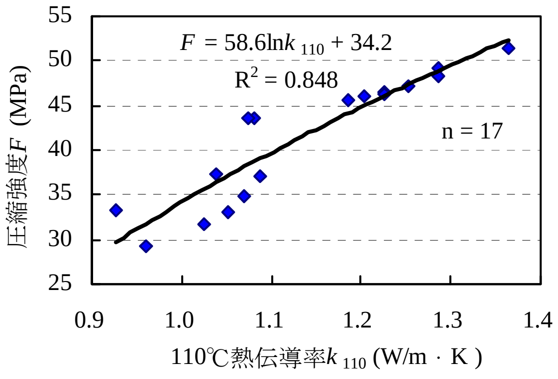
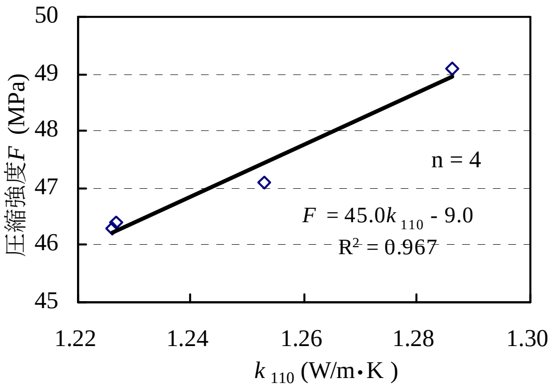
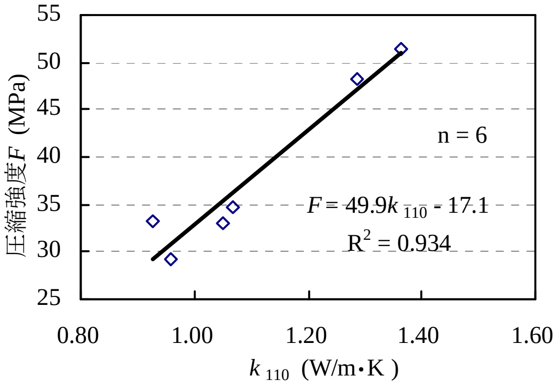


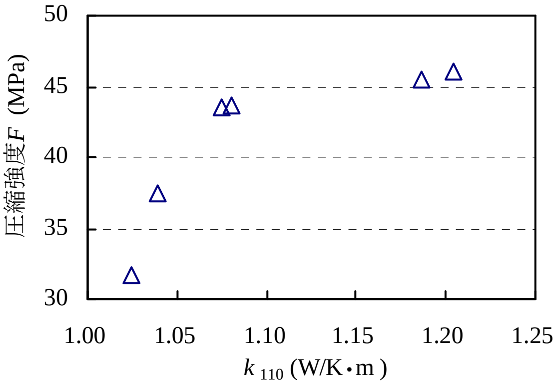
図-5 コンクリート C1～C17 の圧縮強度と熱伝導率の関係



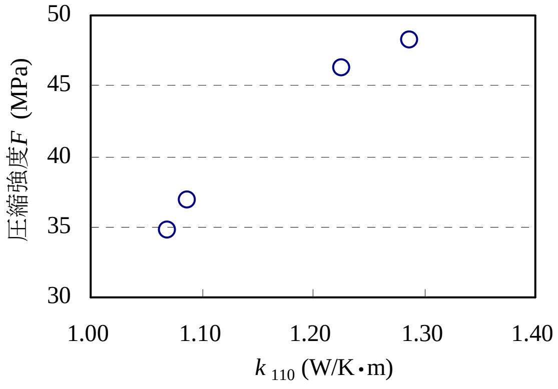
(a) 混和材料を使用した C14~C17



(b) 水セメント比が異なる C1~C6



(c) 細骨材の種類が異なる C2 と C7~C12



(d) 粗骨材の種類が異なる C3, C13, C5 および C14

図-4 コンクリートの圧縮強度と熱伝導率の関係および使用材料，調合の影響

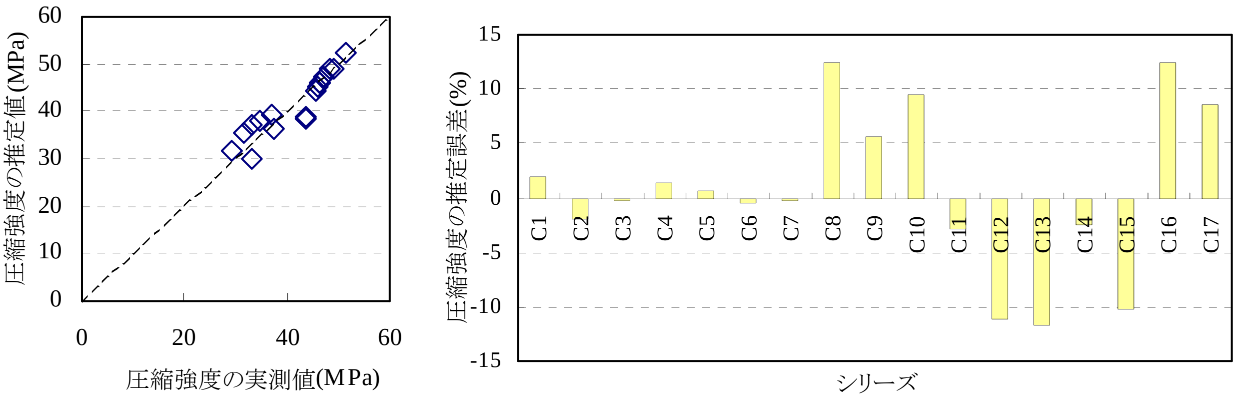


図 6 熱伝導率によるコンクリートの圧縮強度の推定値と推定誤差

$$F = 58.6 \ln k_{110} + 34.2, \quad R^2 = 0.848 \qquad (2)$$

図-6 は，コンクリートの圧縮強度の実測値と 110℃熱伝導率による推定値の関係および推定誤差を示すものである。圧縮強度の推定値は，±12%以内の誤差で，実測値と一致している。

5. まとめ

本研究では，圧縮強度より熱伝導率の推定方法，熱伝導率より圧縮強度の推定方法を開発する基礎研究として，コンクリートの圧縮強度と熱伝導率の関係を定量的に考察した。得られた主な知見は以下のようである。

1) コンクリートの圧縮強度と熱伝導率の間には，**式(2)** のように非常に良好な相関関係があり，相互に推定することが可能である。圧縮強度が大きいほど，熱伝導率は大きい。
2) コンクリートの熱伝導率は，水セメント比の減少に伴って比例的に増大する。骨材の種類によって圧縮強度と熱伝導率の相関程度が低下する。高炉スラグ微粉末の使用は，圧縮強度と熱伝導率の相関性を影響しない。
3) 簡易定常測定法で 110℃の熱伝導率を測定する場合，供試体の乾燥処理が不要である。また，熱伝導率による圧縮強度の推定は，薄い供試体を利用可能であるため，構造体コンクリートから供試体を採取する時に鉄筋を切断する恐れがなくなり，微破壊試験法と位置づけられる。

今後，各種のコンクリート用材料を利用し，調合が異なる軽量・普通骨材コンクリートの圧縮強度と 110℃の熱伝導率の関係をより詳細に考察する。また，コンクリートの圧縮強度と熱伝導率の相関程度に与える熱伝導率の測定温度の影響を調べるに予定である。

参考文献

1) 一般社団法人 日本サステナブル・ビルディング・コンソーシアム(JSBC)：特定建築物（住宅）の省エネ措置の届出ガイド，講習テキスト，p.138, 2009.8
2) 小阪義夫：最新コンクリート技術，森北出版株式会社，pp.93-95, 1991.8
3) M.I. Khan : Factors affecting the thermal properties of concrete and applicability of its prediction models, *Building and Environment*, Vol.37, pp.607-614, 2002
4) 徳田弘・庄谷征美：コンクリートの熱特性値の測定と二，三の考察，土木学会論文報告集, No.212, pp.89-97, 1973.4
5) 太平洋セメント株式会社：図表で見るコンクリートの基礎知識, p.40, 2000.5
6) 柿崎正義・枝広英俊：Effect of coarse aggregate characteristics on mechanical properties of ultra high-strength concrete, 日本建築学会構造系論文報告集, No.451, pp.19-32, 1993.9
7) 鶴田浩章・松下博通・陶佳宏：粗骨材の破砕値が及ぼす高強度コンクリートの圧縮強度への影響，コンクリート工学年次報告論文集, vol.20, No.2, pp.991-996, 1998
8) 戸倉毅・寺井俊夫・上田哲夫ほか：コンクリートの高温時の熱物性に関する実験的研究(その 2. 実験結果)，日本建築学会学術講演梗概集（近畿）, pp.755-756, 1987.10
9) 李柱国・李慶涛：高温加熱を受けたコンクリートの残存圧縮強度の推定方法，日本建築学会技術報告集, Vol.17, No.37, pp.791-796, 2011.10
10) 土井・太田福男・斉藤辰彦：超高強度コンクリートの熱的性質に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.109-114, 1993.7
11) 田坂太一：環境に配慮した建材の試験・評価-省エネルギー型建材，建材試験情報, No.1, pp.26-26, 2009
12) J. Zach, et al.：Possibilities of determination of thermal conductivity of lightweight concrete with utilization of non stationary hot-wire method, *Proc. of The 10th Inter. Confer. of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing: Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering* (Slovenia), pp.207-213, 2009.9
13) J. Toman・R. Černý : Thermal Conductivity of High Performance Concrete in Wide Temperature and Moisture Ranges, *Acta Polytechnica*, Vol. 41, No.1, pp.8-10, 2001
14) 恩村定幸ほか：強度の異なるコンクリートの熱・湿気物性，GBRC(一財団法人日本建築総合試験所機関誌), No.119, pp.24-32, 2005.1
15) 辻幸和・小林信一・大塚義則：高炉スラグ微粉末を用いた流動化モルタルの諸性状，第 8 回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.285-288, 1986.