

論文 超高強度繊維補強コンクリートの強度特性に及ぼす養生条件の影響

柳井 修司^{*1}・松原 功明^{*2}・相澤 一裕^{*3}・芦田 公伸^{*4}

要旨：エトリングイト生成系超高強度繊維補強コンクリートを対象に、養生条件が圧縮強度に及ぼす影響について実験的な検討を行った。実験では、二次養生として実施する蒸気養生の温度と時間、蒸気養生前に実施する一次養生の温度と時間、練上り温度ならびに高性能減水剤の使用量を水準とした。その結果、 200N/mm^2 レベルの圧縮強度を得るための養生条件や一次養生条件と初期強度発現特性の関係が明らかになった。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート、養生温度、養生時間、圧縮強度、初期強度

1. はじめに

圧縮強度が 180N/mm^2 、引張強度が 8.8N/mm^2 を超える超高強度繊維補強コンクリートは、フランスから日本国内に技術導入されて以降、様々なコンクリート構造物やコンクリート製品に適用されている¹⁾。また、2004年9月には、土木学会からこの材料を対象とした「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)」²⁾が刊行され、この種のコンクリートは、今後、さらに多くの構造物に積極的に使用されていくものと考えられている。

現在、国内で使用されている超高強度繊維補強コンクリート(以下、既存 UFC と記す)は、主としてプレキャストコンクリート製品への適用を対象としており、その養生は 20°C で 48 時間の湿潤養生を行った後、 90°C で 48 時間の蒸気養生を行うことを基本としている³⁾。これに対して、著者らは、既存 UFC とは異なる材料構成によって短い養生期間で同等の強度特性、耐久性能が得られるエトリングイト生成系超高強度繊維補強コンクリート(以下、AFt 系 UFC と記す)の実用化を進めてきた。その一環として、AFt 系 UFC の圧縮強度に及ぼす養生条件の影響について実験的な検討を行った。検討においては、ま

ず、蒸気養生の温度と養生時間に着目した実験を行い、基本となる蒸気養生条件を設定した。次に、蒸気養生開始前の養生条件が蒸気養生後の圧縮強度に及ぼす影響について検討した。また、練混ぜ時の材料温度、環境温度および高性能減水剤の使用量が圧縮強度に及ぼす影響についても検討した。本報は、これらの検討結果をとりまとめたものである。

2. AFt 系 UFC の概要

AFt 系 UFC は、ポルトランドセメントとポゾラン材およびエトリングイト生成系混和材からなる結合材、粒径 2.5mm 以下の骨材、高性能減水剤ならびに水とで構成されるマトリクスに、引張強度が 2.0kN/mm^2 以上で直径 0.2mm の鋼繊維を混入した繊維補強セメント系材料である。既存 UFC と AFt 系 UFC が大きく異なる点は、前者が構成材料の粒子の大きさや形状を調整することで緻密な組織としている⁴⁾のに対し、後者は水和初期段階でのエトリングイトの生成とその後のセメントの水和ならびにポゾラン材の活性によって微細空隙を埋め、組織を緻密化している点にある。AFt 系 UFC の基本配合を表-1 に、結合材の化学組成を表-2 に示す。

*1 鹿島建設(株) 技術研究所 土木構造・材料グループ 主任研究員 工修 (正会員)

*2 鹿島建設(株) 技術研究所 土木構造・材料グループ 研究員 工修 (正会員)

*3 電気化学工業(株) 青海工場 無機材料研究センター 研究員 (正会員)

*4 電気化学工業(株) 青海工場 無機材料研究センター 主任研究員 工博 (正会員)

3. 二次養生条件が硬化物性に及ぼす影響

3.1 実験概要

AFt系UFCは、プレキャストコンクリート製品を対象とした材料であり、蒸気養生を行うことを前提とした。まず、基本養生パターンを決定するために、表-3に示す検討水準で実験を行った。養生は、蒸気養生前に実施する養生（以後、一次養生と記す）とその後に実施する蒸気養生（以後、二次養生と記す）を連続的に行うことを基本とした。一次養生は、一般的な環境条件であることを考慮して20℃60%RHの条件とし、養生時間は、製品の製作工程を考慮して暫定的に24時間とした。

実験に供した配合は表-1に示すものであるが、マトリクスの特性を評価するために、補強用繊維は混入しないこととした。練混ぜには、水平二軸式強制ミキサ（容量50リットル、回転数60r.p.m.）を用い、練混ぜ量は30リットルとした。練混ぜは、結合材と表面乾燥飽水状態の骨材をミキサに投入して30秒間攪拌した後、水と高性能減水剤を投入して7分間攪拌した。

測定項目を表-4に示す。練混ぜ完了後、フレッシュ性状を確認するとともに、圧縮強度試験用供試体を採取した。圧縮強度試験は、各条件での養生が終了した後、直ちに実施した。空隙率は、φ50×h100mmの円柱供試体を作製し、養生終了後に寸法2.5～5.0mmの試験片に整形して水銀圧入ポロシメーターを用いて測定した。

3.2 実験結果および考察

(1) フレッシュ性状

フレッシュ性状の測定結果を表-5に示す。練上り直後のフロー値は280～315mm、空気量は3.8～4.3%の範囲であり、各ケースともほぼ同じ結果となった。練上り温度は27～29℃であり、練混ぜ時の環境温度、材料温度を20℃としたが、結合材量が極めて多く、練混ぜ時間も長いため、練上り温度が高くなったものと考えられた。

(2) 圧縮強度

圧縮強度の試験結果を図-1に示す。図中の数値は供試体3本の試験値の平均を示したもので

表-1 AFt系UFCの基本配合

フロー値 ^{*1} (mm)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)				補強用繊維 (kg)
		水 ^{*2}	結合材	骨材 ^{*3}	高性能減水剤	
250	2.0	195	1,287	905	32.2	137.4 (1.75vol%)

*1:フロー試験(JIS R 5201, 落下なし); 繊維を混入したときの目標値

*2: 高性能減水剤の水分を含む

*3: 砕砂; 表乾密度2.66g/cm³, 吸水率1.18%

表-2 結合材の化学組成

化学成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	R ₂ O
mass%	33.4	6.4	2.8	51.1	2.4	0.7

表-3 検討水準

Case	一次養生 (固定条件)	二次養生			
		昇温 速度	最高 温度	最高温度 保持時間	降温 速度
1	環境温度20℃ 相対湿度60%RH 封緘養生 養生時間24h	15℃/h	75℃	20h	2℃/h
2			85℃	20h	
3			85℃	48h	
4			90℃	20h	
5			90℃	48h	

表-4 測定項目

測定項目		測定方法
フレッシュ 性状	フロー	JIS R 5201(落下なし)
	空気量	JIS A 1128
	練上り温度	温度計による
硬化性状	圧縮強度	JIS A 1108 二次養生後に実施(n=3) 供試体寸法φ100×h200mm
	空隙率	水銀圧入ポロシメーターによる

表-5 フレッシュ性状の測定結果

Case	練上り温度 (℃)	フロー(mm) ()は平均	空気量 (%)
1	27.6	293×281 (287)	3.9
2	29.3	284×282 (283)	4.3
3	27.1	316×307 (312)	4.0
4	26.9	315×311 (313)	3.8
5	28.8	316×301 (309)	4.2

補強用繊維は混入せず

あるが、各ケースにおける試験値のばらつきは小さく、最大で6N/mm²であった(Case2)。図に示すように、今回の実験では、いずれの養生条件においても200N/mm²を上回る圧縮強度が得られた。二次養生後の圧縮強度は、90℃で48時間養生したものが最も高くなったが、今回の検討範囲においては、二次養生時の養生温度や養生時間が圧縮強度に及ぼす影響は小さいものであった。AFt系UFCの硬化体組織は、水和のごく初期段階でエトリンガイトの結晶が生成・成

長して大きな空隙が埋められ、その後のセメントの水和やポズラン反応による空隙充てんが効率よく行われる⁵⁾ことで緻密化される。二次養生条件が圧縮強度に及ぼす影響が小さい理由としては、20℃24時間の一次養生段階で、エトリンタイトの生成とセメント中のエアライトの水和によって緻密な構造が得られやすい細孔構造が形成されていたことによるものと推察された。

(3) 空隙率

各条件で養生した試料の60μm以下の空隙率を図-2に示す。いずれの養生条件においても空隙率は4%以下であり、既存UFC²⁾と同等の極めて緻密な細孔構造が形成されることが分かった。測定で得られた空隙率は、二次養生における養生温度が高いものほど、また、養生時間が長いものほど小さくなる傾向を示した。ただし、20時間の養生時間では、養生温度75℃と85℃における空隙率の差に比べて、85℃と90℃の差が小さくなる結果となった。一次養生で形成される硬化体組織が同じであれば、二次養生時に85℃で20時間以上の養生を行うことでほぼ同等の硬化体を形成できると考えられた。

(4) 二次養生方法の決定

プレキャストコンクリート製品工場の養生設備や製品の工程を考慮すると、二次養生における養生温度は低い方が有用であり、養生期間も短い方が好ましい。今回の実験では、養生温度75℃、養生時間20時間という条件でも十分な圧縮強度が得られたが、空隙率については、養生温度85℃および90℃の場合に比べてわずかに大きくなる結果となった。これらのことを考慮すると、AFt系UFCの二次養生における最高温度は安全側の85℃とし、最高温度保持時間を20時間とすることが適切であると判断された。

4. 一次養生条件が圧縮強度に及ぼす影響

4.1 実験概要

一次養生条件が二次養生後の圧縮強度に及ぼす影響を把握するために表-6に示す検討水準で実験を行った。実験では、一次養生中の環境

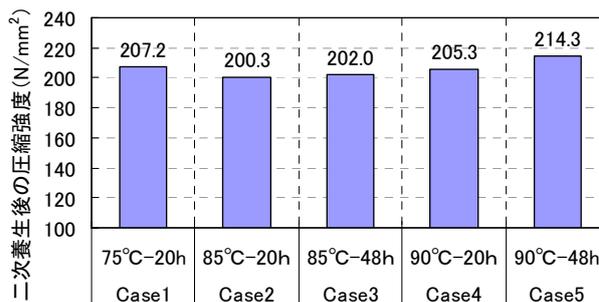


図-1 圧縮強度試験の結果

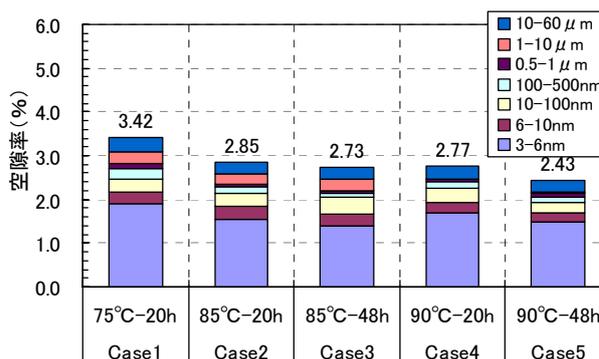


図-2 空隙率の測定結果

表-6 検討水準

Case	練混ぜ時 材料温度	一次養生		二次養生		
		養生温度	養生時間			
1	20℃	20℃	18h	昇温速度15℃/h 最高温度85℃ 最高温度保持時間20h 降温速度2℃/h		
2			24h			
3			48h			
4		30℃	18h			
5					40℃	24h
6						

温度を20℃、養生時間を24時間とする条件(Case2)を基準として、養生温度を3水準、養生時間を3水準変化させた。

実験に供した配合は表-1に示すものとし、補強用繊維を混入した場合について検討を行った。練混ぜにおける環境温度および材料温度は20℃とし、練混ぜ水には4℃の冷却水を用いた。また、補強用繊維は3.1に示す方法でマトリクスを練り混ぜた後に投入し、3分間の追加攪拌を行って均一に練り混ぜた。測定項目は、練上り温度、フロー値、空気量、および一次養生後と二次養生後の圧縮強度とした。

4.2 実験結果および考察

実験結果を表-7に示す。フロー値については、練混ぜバッチによって若干のばらつきが認めら

れたが、その値は $250 \pm 20 \text{mm}$ の範囲内であった。一次養生後の圧縮強度は、通常のコンクリートと同様、養生温度が高いものほど、また、養生時間が長いものほど高くなった。二次養生後の圧縮強度は $187 \sim 195 \text{N/mm}^2$ の範囲であり、検討の対象としたいずれの一次養生条件でも、

表-6 に示す二次養生を行うことで高い圧縮強度が得られることが分かった。なお、Case2 の二次養生後の圧縮強度は、3. に示す同一条件のものよりも約 5N/mm^2 低い値となったが、補強用繊維の混入による影響ではなく、材料ロットの違いによる影響であることを別途確認している。

一次養生後の圧縮強度と二次養生後の圧縮強度の関係を図-3 に示す。練上り温度を 20°C とした今回の実験では、一次養生後の圧縮強度が高いもの、すなわち、一次養生温度が高く、養生時間が長いものは、二次養生後の圧縮強度がわずかに低下する傾向が認められた。これは、強度発現がある程度進行した段階で給熱を行っても、一般のコンクリートと同様、その後の水和反応が抑制されてしまうこと⁶⁾に起因するものと考えられる。しかしながら、AFt系UFCでは、その影響は非常に小さく、練上り温度が 20°C 程度、一次養生温度が $20 \sim 40^\circ\text{C}$ の条件では、打込みの翌日から二次養生を行うことで所定の圧縮強度が得られるものと判断された。

5. 一次養生条件の設定方法

5.1 実験概要

AFt系UFCをプレテンション部材として使用する場合、脱型時やプレストレス導入時に必要な圧縮強度を得るための一次養生方法を適切に設定することが重要となる。ここでは、4.の結果を踏まえて、AFt系UFCの一次養生中の強度発現特性を明らかにし、一次養生条件の設定方法について検討した。若材齢時の強度発現に影響を及ぼす要因として支配的なものは、練上り温度と高性能減水剤の使用量であり、特に高性能

表-7 実験結果

Case	練上り温度 ($^\circ\text{C}$)	フロー(mm) ()は平均	空気量 (%)	圧縮強度(N/mm^2)	
				一次養生後	二次養生後
1	23.2	246×235 (241)	2.9	53.5	193.0
4				78.6	188.0
5				93.1	187.0
3	23.1	261×250 (256)	3.1	91.0	190.3
2	24.3	257×252 (255)	3.9	73.9	194.2
6	22.9	269×264 (267)	3.6	108.3	189.0

各試験値は、補強用繊維を混入した後のもの
Caseの順序は、一次養生の時間ごとに並び替えた

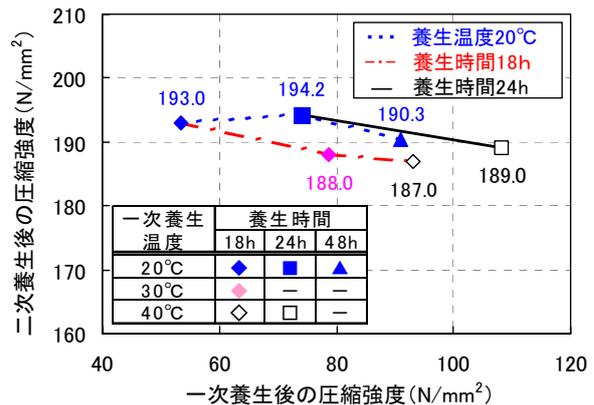


図-3 各養生後の圧縮強度の関係

表-8 検討水準

Case	材料温度	高性能減水剤	一次養生	
			養生温度	養生時間
1	20°C	32.2 kg/m^3	20°C	各養生温度に 対して 14h, 16h, 18h
2		38.6 kg/m^3		
3		45.0 kg/m^3		
4	5°C	38.6 kg/m^3	40°C	
5		45.0 kg/m^3		

減水剤の使用量については、水粉体比が極めて小さいため、ミキサの練混ぜ性能、練混ぜ時間、環境温度等によって所定のコンシステンシーを得るための使用量が大きく変化することが想定される。そこで、高性能減水剤の使用量、材料温度ならびに養生温度が、一次養生中の圧縮強度の発現に及ぼす影響について検討した。ここでは、冬期～標準期における施工を想定して、表-8 に示す検討水準で実験を行った。なお、一次養生の条件は、4. に示した二次養生後の圧縮強度に悪影響が及ぼさない範囲で設定した。

実験に供した配合は表-1 に示すものとした。測定項目は 4. と同様とし、一次養生中の環境温度を 3 水準変化させて、14, 16, 18 時間後に圧縮強度試験を実施した。

5.2 実験結果および考察

フレッシュ性状の測定結果を表-9に示す。同一の温度条件では、高性能減水剤の使用量の増加に伴ってフロー値、空気量が大きくなった。また、今回のケースでは練上り温度がフレッシュ性状に及ぼす影響は、比較的小さいものであった。

各ケースにおける積算温度（-10℃を基準）と圧縮強度の関係を図-4に示す。同図に示す積算温度と圧縮強度の関係式は、高性能減水剤の使用量ごとに整理したものであるが、積算温度が900℃・h以下、圧縮強度が120N/mm²以下の範囲では、養生温度によらず両者の間に高い相関が認められた。このことから、この範囲における一次養生中の圧縮強度は、高性能減水剤の使用量と積算温度によって推定することができ、また、この関係式を用いることで、脱型時やプレストレス導入時に必要とする圧縮強度を得るための一次養生温度と養生時間の設定が可能であると判断された。

表-9 フレッシュ性状の測定結果

Case	材料温度 (°C)	高性能減水剤 (kg/m ³)	練上り温度 (°C)	フロー(mm) (平均)	空気量 (%)
1	20°C	32.2	23.2	246×235 (241)	2.9
2		38.6	24.3	273×261 (267)	3.7
3		45.0	23.1	284×254 (269)	4.0
4	5°C	38.6	15.1	276×262 (269)	4.3
5		45.0	16.1	280×259 (270)	4.6

各試験値は、補強用繊維を混入した後のもの

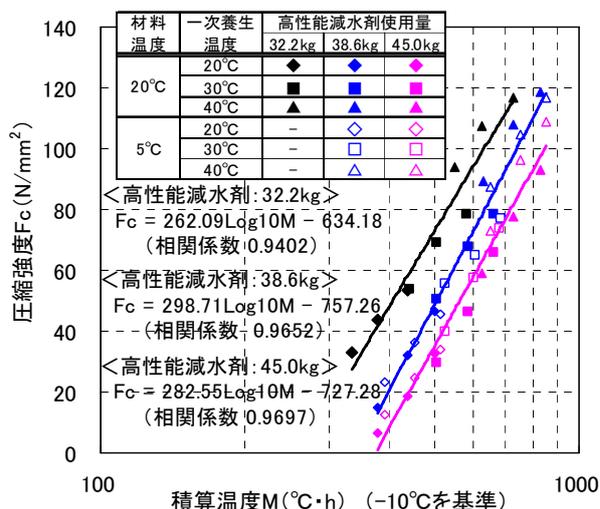


図-4 一次養生中の積算温度と圧縮強度の関係

6. 練上り温度が圧縮強度に及ぼす影響

6.1 実験概要

実際の施工では、一次養生条件は施工条件に応じた設備や装置によって設定することができるが、練上り温度は、環境温度や材料温度に応じて自然に変化する。そこで、練上り温度と一次養生条件が圧縮強度に及ぼす影響について表

-10に示す検討水準で実験を行った。

実験に供した配合は表-1に示すものであるが、環境温度40℃でのフレッシュ性状を考慮して、高性能減水剤の使用量を全ケース38.6kg/m³とした。測定項目は、4と同様とした。

6.2 実験結果および考察

実験結果を表-11に示す。フレッシュ性状に関しては、練上り温度が高くなるほどフロー値が小さくなる結果となった。また、その変化の割合は、練上り温度10℃の差に対して15~20mm程度であった。

表-10 検討水準

Case	目標練上り温度	一次養生		二次養生		
		養生温度	養生時間			
1	15°C	5°C	24h	昇温速度15°C/h 最高温度85°C 最高温度保持時間20h 降温速度2°C/h		
2		20°C				
3		40°C				
4	20°C	5°C			20°Cまで降温して終了	
5		20°C				
6		40°C				
7	35°C	5°C				20°Cまで降温して終了
8		20°C				
9		40°C				

一次養生後の圧縮強度と二次養生後の圧縮強度の関係を図-5に示す。練上り温度が20℃および15℃の場合には、4と同様、概ね一次養生後の圧縮強度が高いほど二次養生後の圧縮強度が低くなる傾向を示した。これに対し、練上り温度が35℃の場合には、二次養生後の圧縮強度はほぼ一定であり、また、他のケースに比べて圧縮強度が低くなる結果となった。この理由については、練上り温度が養生温度よりも高い場合には練上り温度が高温になるほどコンクリートの圧縮強度が低下する⁶⁾、との報告もあり、別

途、詳細な検討が必要であると考えている。なお、一次養生温度が5°Cの条件で二次養生後の圧縮強度が高くなったことから、初期の養生温度が5°C程度の低温であっても、エトリンガイトの生成による緻密化が可能であると考えられた。

今回の実験においては、練上り温度が35°C程度と高い場合、一次養生を5~40°Cのいずれの温度で実施しても、二次養生後の圧縮強度が低くなる傾向が認められた。このことから、暑中コンクリートとなるような場合には、材料温度を下げるなどの対策が必要であると考えられた。

7.まとめ

本検討で得られた知見をまとめると以下のようになる。

- (1) 二次養生の最高温度を85°C、最高温度保持時間を20時間とすることで、200N/mm²レベルの圧縮強度が得られる。
- (2) 一次養生の養生温度を20°C、養生時間を24時間程度とすることで圧縮強度は60N/mm²程度に達し、その後の二次養生によって200N/mm²レベルの圧縮強度が得られる。
- (3) 一次養生後の圧縮強度が高いほど二次養生後の圧縮強度が低くなる傾向が認められる。ただし、その度合いはわずかである。
- (4) 一次養生中の強度発現は、-10°Cを基準とする積算温度で整理することができる。
- (5) 練上り温度が高い場合には、二次養生後の圧縮強度が小さくなる傾向にある。

参考文献

- 1) 例えば、萱嶋誠，篠崎洋三，飯塚崇文，大和矢麻起：F_c200N/mm²級の超高強度繊維補強コンクリートを用いた連絡橋の設計・施工，コンクリート工学，Vol.43，No.7，pp.65-69，2005.7
- 2) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案），コンクリートライブ

表-11 実験結果一覧

Case	練上り温度(°C)		フロー(mm) ()は平均	空気量 (%)	圧縮強度(N/mm ²)		
	目標値	測定値			一次養生後	二次養生後	
1	15	16.8	296×273 (285)	3.4	3.2	5°C	204.3
52.0					20°C	188.0	
108.3					40°C	194.3	
4	20	22.9	279×274 (277)	3.6	5.7	5°C	200.0
53.6					20°C	193.0	
110.7					40°C	189.0	
7	35	34.0	262×247 (255)	3.4	3.7*	5°C	179.5
40.3					20°C	184.3	
106.3					40°C	185.3	

各試験値は、補強用繊維を混入した後のもの
*:24時間では強度試験が不能。数値は31時間強度

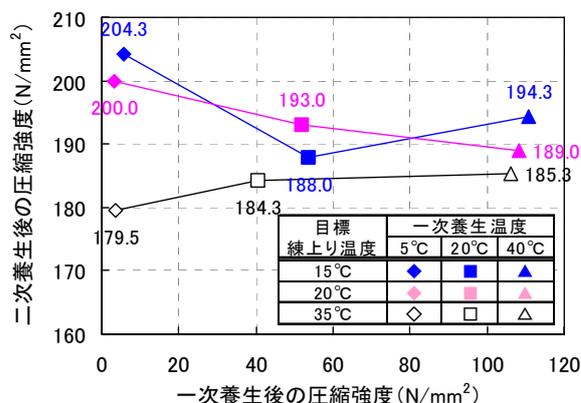


図-5 各養生後の圧縮強度の関係

ラリー113，2004.9

- 3) 下山善秀，武者浩透，中村裕：200N/mm²級セメント系新素材ダクタールを用いた国内初のPC歩道橋 酒田みらい橋プロジェクト，セメント・コンクリート，No.671，pp.36-42，2003.1
- 4) P.Richard and M.Cheyrezy: COMPOSITION OF REACTIVE POWDER CONCRETES, Cement and Concrete Research, Vol.25, No.7, pp.1501-1511, 1995
- 5) 渡邊芳春，友澤史紀，川瀬清孝，坂井悦郎：エトリンガイト生成系混和材を用いた高強度セメントペーストの水和，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.1，pp.359~364，1994.6
- 6) 仕入豊和，地濃茂雄：コンクリートの初期強度に及ぼす温度条件（20~90°C）の影響，日本建築学会論文報告集，第320号，pp.1-11，1982.1