

第4章 レジンコンクリートの強度特性に関する温度依存性の改善

4.1 目的

熱硬化性の合成樹脂を結合材に用いた REC は、セメントコンクリートと比較して高い強度と化学的侵食に対する高い抵抗性が挙げられる。このため、高強度や耐酸性を有する下水道施設や高温の温泉施設などへの使用が期待される。しかし、高温環境下では硬化樹脂のガラス化による強度やヤング係数の低下が懸念される。このような REC の力学的特性の温度依存性に関して、小林ら¹⁾、岡田ら²⁾、高山ら³⁾は、検討を行ってきたが、その研究は温度依存性の現象面に着目したものが多く、その改善方法に関するものは、高山らのビスフェノール系ビニルエステル樹脂を用いた材料変更によるものが報告されているだけである。そこで本研究では REC の温度依存性の解決策として、製造段階の養生方法に着目し、養生温度と養生時間を変化させ、樹脂の縮重合反応を制御することで REC の温度依存性の改善を試みた。また、新たな樹脂としてビニルエステル樹脂よりも安価なビスフェノール系不飽和ポリエステル樹脂を用いて力学的特性の温度依存性を検討した。

4.2 実験概要

4.2.1 使用材料・配合

本実験で使用した樹脂の一覧を表-4.1 に示す。前述の小林ら¹⁾、岡田ら²⁾の実験で使用されている樹脂はオルソフタル酸、またはイソフタル酸系不飽和ポリエステル樹脂に分類されるもので、本実験では新たにビスフェノール系不飽和ポリエステル樹脂およびビニルエステル樹脂を追加している。硬化剤と硬化促進剤にはメチルエチルケトンパーオキサイドと2-エチルヘキサン酸コバルトを各樹脂共通に用いた。充填材および骨材の物性値とコンクリートの配合を表-4.2、4.3 に示す。

表-4.1 樹脂の種類

樹脂の種類		密度
		(g/cm ³)
不飽和ポリエステル樹脂(UP)	オルソフタル酸系	1.12
	イソフタル酸系	1.12
	ビスフェノール系	1.12
ビニルエステル樹脂(VE)	ビスフェノール系	1.13

表-4.2 使用材料

使用材料	種類	絶乾密度(g/cm ³)	吸水率(%)
充填材	スラグ粉末	3.35	-
細骨材	ケイ砂	2.53	1.2
粗骨材	碎石 1005	2.64	0.8

表-4.3 配合 (kg/m³)

結合材	充填材	細骨材	粗骨材	空気量(%)
272	409	1,130	453	1.0

4.2.2 試験方法

充填材および骨材を絶乾状態にし、所定量の樹脂と混練し JIS A 1181〔ポリエステルレジンコンクリートの強度試験用供試体の作り方〕に準拠して、7.5×15cmの円柱供試体を作成した。養生は乾燥炉内を 60 および 80 に保った槽内に供試体をセットし、1~8時間および18時間養生した。

圧縮強度、割裂引張強度および弾性係数の測定は、表-4.4に示す基準に準拠して実施した。温度依存性を調べるために試験時の供試体温度を 20、40、60 の3水準に変化させた。試験環境は、耐圧機を断熱ボードで覆い、供試体と同配合で熱電対を埋め込んだダミー供試体を設置し、温風ヒータで暖めダミー供試体の内部温度が所定の温度になったことを確認して各強度試験を実施した。

表-4.4 各試験の基準

試験項目	規 格
圧縮強度	JIS A 1182 ポリエステルレジンコンクリートの圧縮強度試験方法
引張強度	JIS A 1185 ポリエステルレジンコンクリートの引張強度試験方法
弾性係数	JIS A 1149 コンクリートの静弾性係数試験方法

4.3 試験結果

4.3.1 養生条件が温度依存性に及ぼす影響

(1) 各樹脂の温度依存性

養生温度を 60、養生時間を2時間とした場合の各試験温度における圧縮強度、引張強度および弾性係数の各試験温度における測定結果を図-4.1~4.3に示す。

使用した樹脂はオルソフタル酸系、イソフタル酸系の不飽和ポリエステル樹脂(UP)およびビスフェノール系のビニルエステル樹脂(VE)の3種類である。

試験時の温度を 20 から 60 に上昇させるといずれの樹脂も圧縮強度は低下しており、低下の大きなイソフタル酸系 UP で約 40%の低下を示している。既報³⁾で比較的耐熱性に優れていると報告されているビスフェノール系 VE も本実験では、約 30%の低下を示している。オルソフタル酸系 UP と同程度の低下率である。現段階では、この原因は不明である。

引張強度(図-4.2)は、岡田らの報告²⁾と同様に 20 ~ 40 の範囲でピークを示す傾向が認められ、40 ~ 60 の範囲で引張強度が低下している。岡田らは、縮重合反応中の硬化収縮による内部応力が温度の上昇に伴い開放されたことがこの原因であると推測しており、今後これを確認するために硬化収縮量と残留応力の評価が必要になると考えられる。

弾性係数(図-4.3)の温度依存性は圧縮強度のそれと似た傾向を示し、イソフタル酸系 UP を用いたものが最も大きな低下を示し、ビスフェノール系 VE を用いたものは比較的低下量が小さくなっている。高山らの報告³⁾でもビスフェノール系 VE は高温環境下においても、不飽和ポリ

エステルを用いたコンクリートよりもクリープひずみが小さいとされており、ビスフェノール系VEは変形に対する耐熱性を有していると考えられる。

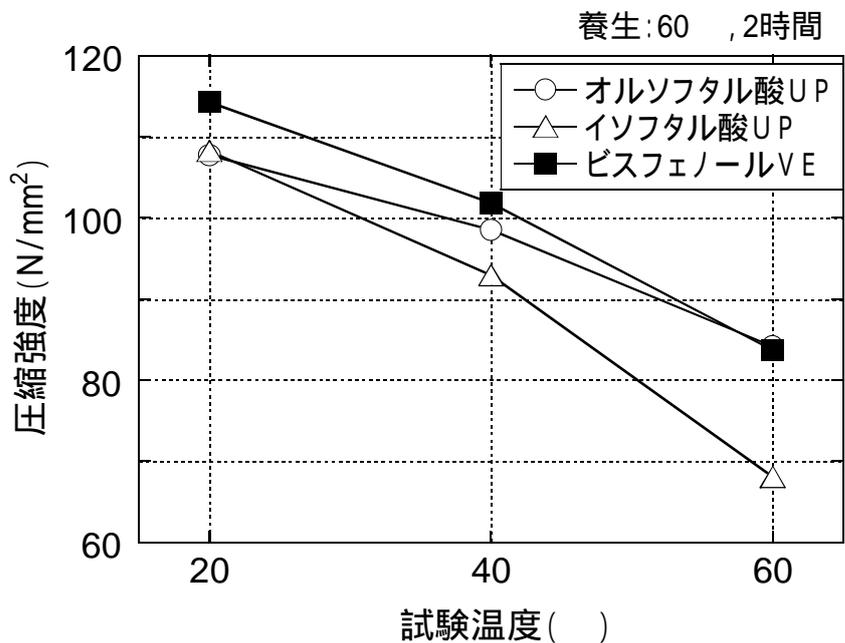


図-4.1 試験温度と圧縮強度

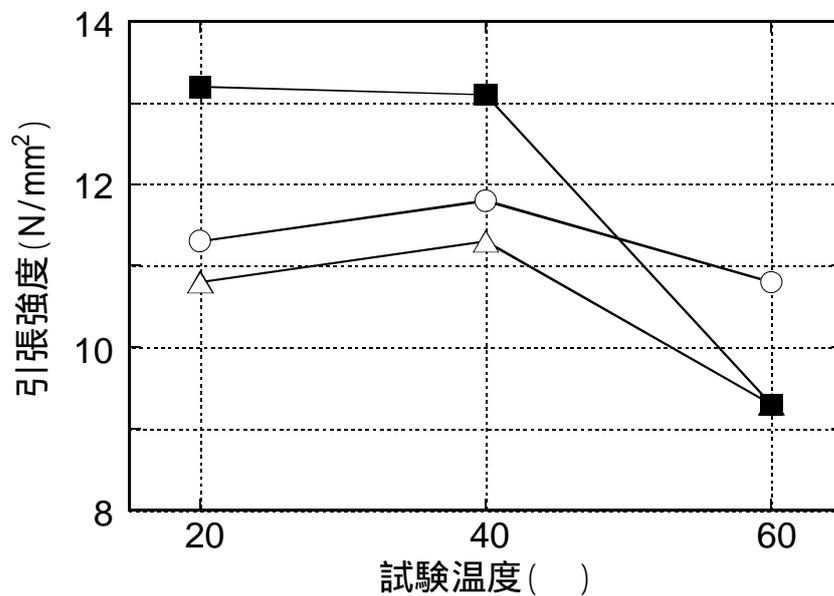


図-4.2 試験温度と引張強度

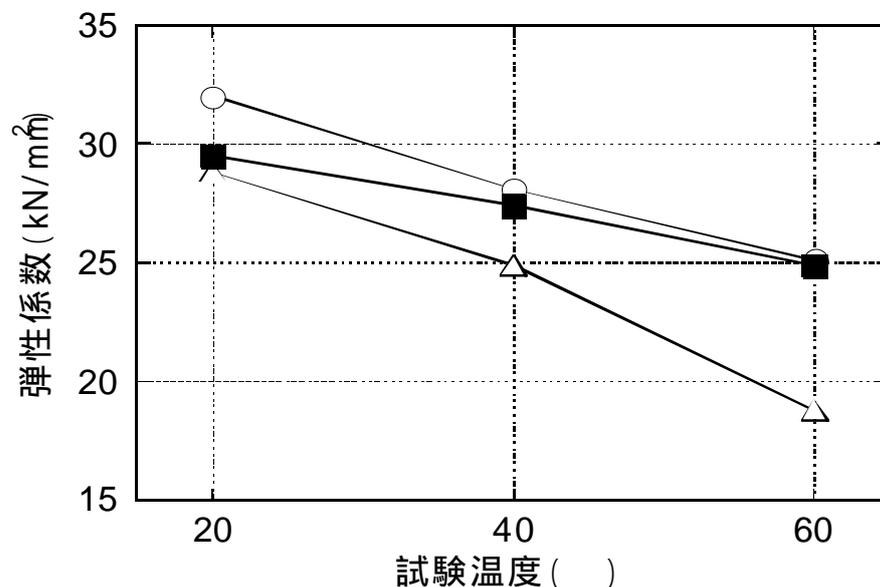


図-4.3 試験温度と弾性係数

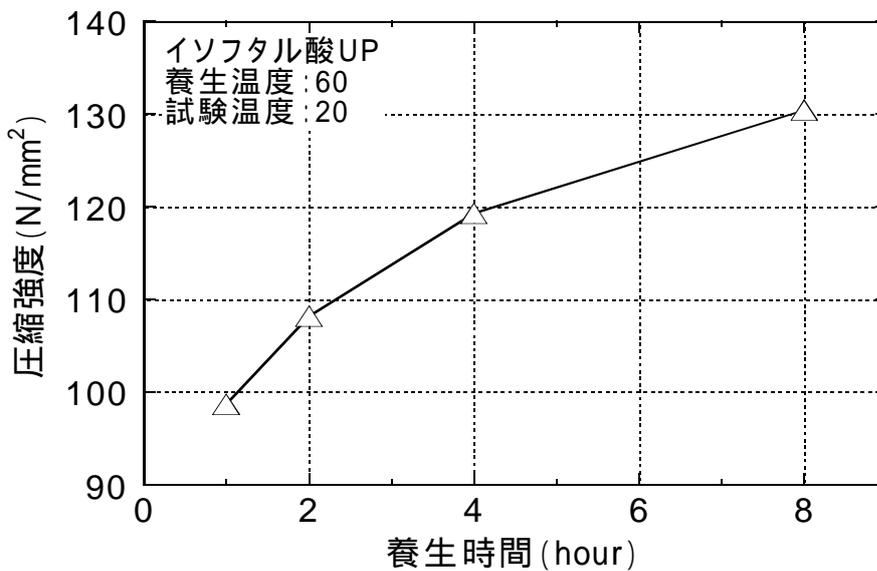


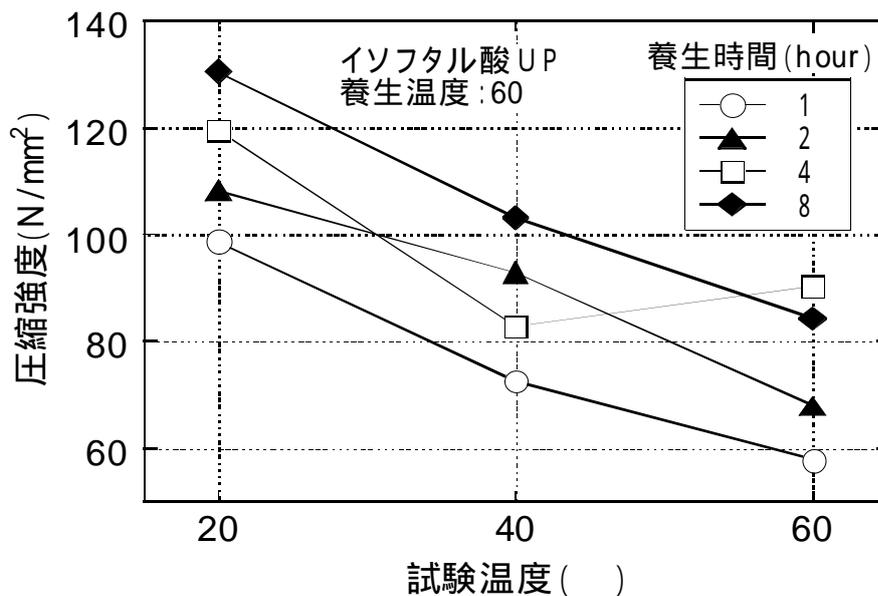
図-4.4 養生時間と圧縮強度

(2) 養生時間が温度依存性に及ぼす影響

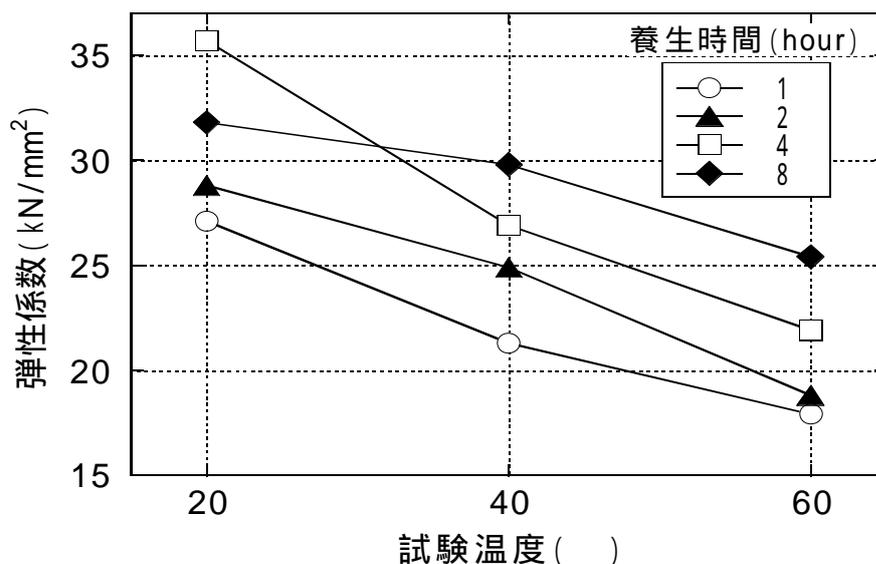
熱硬化性樹脂の重合反応には初期の養生条件が影響すると考えられる。そこで、前節の結果から試験時温度の上昇に伴い圧縮強度の低下が最も大きかったイソフタル酸系不飽和ポリエステル樹脂を用い、養生時間を1～8時間まで延長した場合の力学的特性の温度依存性に関して検討を行った。養生時間を1～8時間まで変化させて圧縮強度を測定した結果を図-4.4に示す。養生温度

は 60 ，試験温度は 20 である．養生時間を 1 時間から 8 時間に延長すると圧縮強度は約 30% 増加しており，初期養生の効果を確認できる．

この養生条件で作成した供試体を用いて試験温度を 20~60 の範囲で変化させ，圧縮強度と弾性係数の温度依存性を調べた結果を図-4.5(a)，(b)に示す．養生時間を延長すると試験温度が 20 のときの圧縮強度は上昇しているが，養生時間 4 時間のものを除き，試験時温度 60 までほぼ並行に強度が低下している．したがって，圧縮強度の低下率も養生温度に依らずほぼ 40% であり，養生時間の延長による温度依存性の改善は認められない．弾性係数の測定結果図-4 (b)も圧縮強度と同様な傾向を示しており，温度依存性に変化は見られない．



(a) 圧縮強度

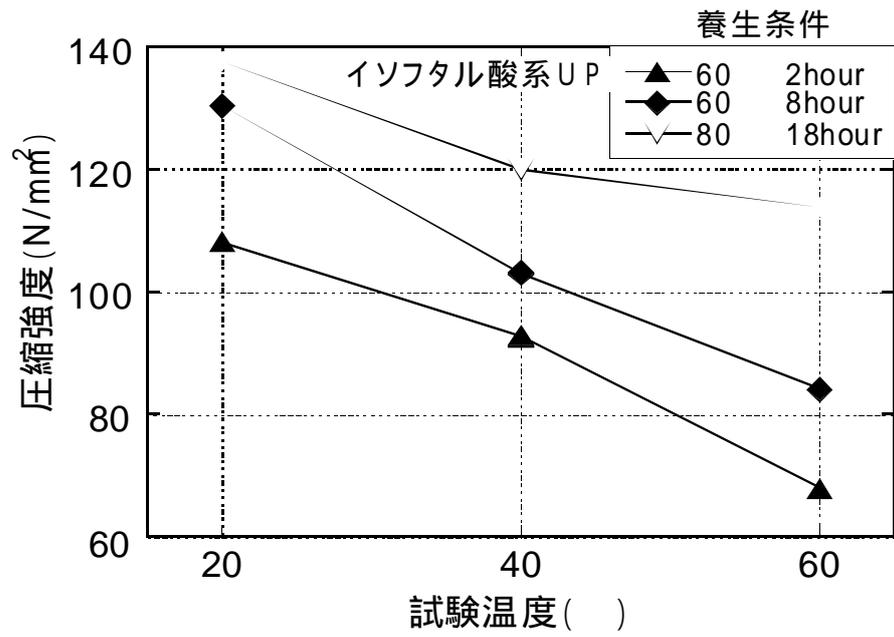


(b) 弾性係数

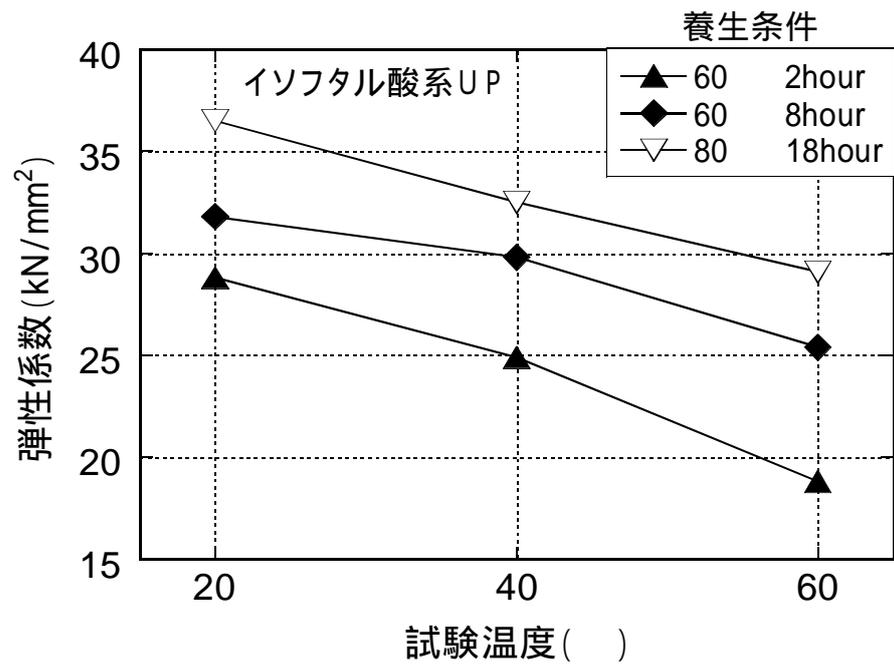
図-4.5 試験温度と物性(養生時間)

(3) 養生温度が温度依存性に及ぼす影響

次に養生温度を 80 にし、養生時間を 18 時間まで延長して養生条件が力学的特性の温度依存性に及ぼす影響について検討した。前節と同様にイソフタル酸系 UP を用いて圧縮強度と弾性係数の変化を調べた結果を図-4.6(a), (b)に示す。養生温度と養生時間を増加させた場合、試験温度 20 で評価された圧縮強度は増加しており、初期養生の効果が見て取れる。試験温度を 20 から 60 まで上昇させると圧縮強度は低下しているが、その他の養生条件と比較してその低下量が若干小さくなっている。80 で 18 時間養生したものの試験時温度 20 に対する試験時温度 60 における圧縮強度の相対的な低下率は約 17%であり、60 で 2 時間養生したものはこの低下率が約 37%であった。このような結果から養生温度と時間を増加させ重合反応を促進することで、圧縮強度の温度依存性の改善が示唆される。弾性係数に関して、同様に試験温度 20 に対する相対的な低下率で温度依存性を評価すると、60 で 2 時間養生したものは低下率が約 35%であった。これに対して養生温度を 80 としたものはこの低下率が約 20%であり、若干であるが弾性係数の低下が小さくなっていると考えられる。

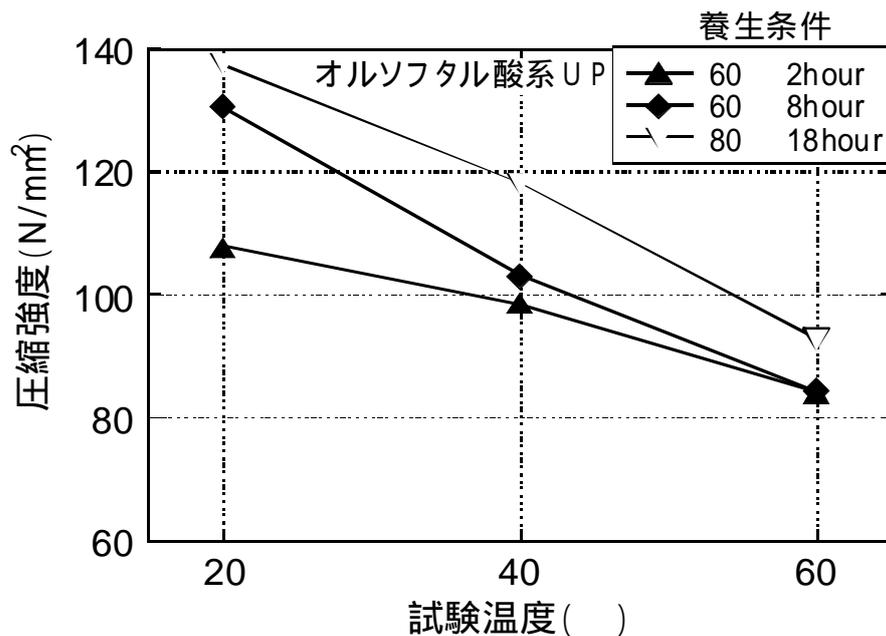


(a) 圧縮強度

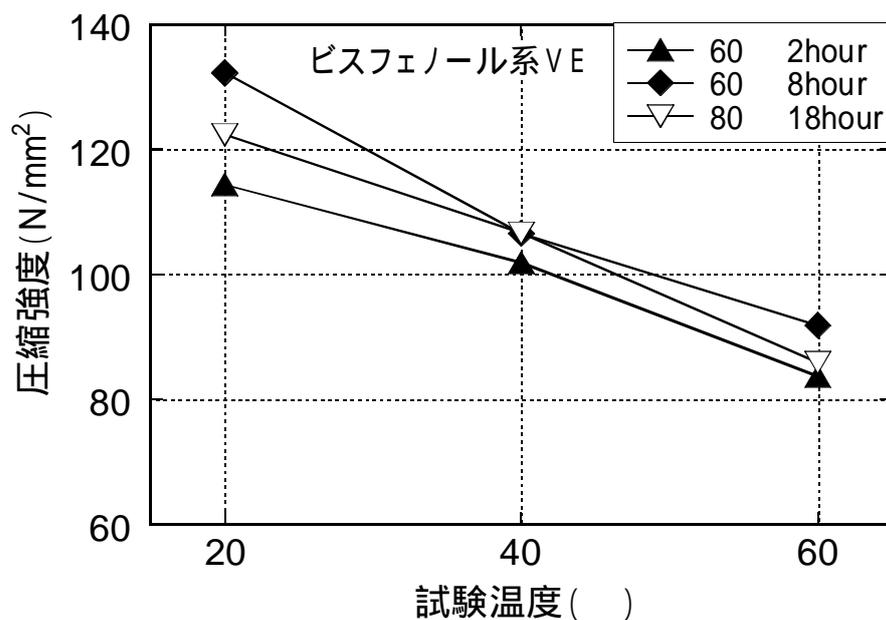


(b) 弾性係数

図-4.6 試験温度と物性 (養生温度)



(a) オルソフタル酸系 UP



(b) ビスフェノール系 VE

図-4.7 試験温度と物性 (養生温度)

イソフタル酸 UP 以外のオルソフタル酸系 UP とビスフェノール系 VE を使用した場合の圧縮強度の温度依存性を図-4.7(a), (b) に示す。オルソフタル酸系 UP の場合(a)は、養生温度と養生時間を増加させた効果が圧縮強度の増加としては確認できるが、温度依存性の改善としては認められない。イソフタル酸系 UP とは逆に養生温度と養生時間を増加させると圧縮強度の温度依存性がより顕著に現われる結果となった。ビスフェノール系 VE 樹脂の場合(b)は、養生条件を変更し

ても圧縮強度の増加はほとんどなく、温度依存性に及ぼす影響も認められない。

結果として、本実験で用いた3種類の樹脂では、強度試験時の温度が20 から60 に上昇すると圧縮強度は30%~40%低下する温度依存性を示すことが分かった。そこで初期養生の温度と時間を増加させ重合反応を促進してこの温度依存性の改善を試みた。その結果、イソフタル酸系UP樹脂では圧縮強度と弾性係数の温度依存性に関して若干の改善が認められたが、オルソフタル酸系UPとビスフェノール系VEでは養生条件の変更によって温度依存性を十分改善するには至らなかった。

5.3.2 ビスフェノール系樹脂の耐熱性

従来まで報告例にないビスフェノール系不飽和ポリエステル樹脂を用いて、その力学的特性の温度依存性を検討した。試験温度を20 ~60 まで変化させて圧縮強度を測定した結果を図-4.8 に示す。養生条件は温度60 で2時間である。ビスフェノール系UPを用いたものはその他の樹脂と比較して試験温度20 で評価された圧縮強度が低くなっている。養生条件は同じであるので元来強度発現の小さな樹脂であると推測される。また、試験温度が20 から40 に上昇した場合の強度低下がほとんどなく、40 から60 まで上昇したところで約10%の強度低下を示している。オルソフタル酸系UPとビスフェノール系VEを用いたものも試験温度が40 から60 へ上昇すると15%程度圧縮強度が低下しており、この範囲では圧縮強度の温度依存性は同程度であると考えられるが、試験温度20 における圧縮強度が小さく、40 までの範囲で低下が小さかったことから、全体として20 から60 までの範囲で温度依存性が小さくなる結果となった。

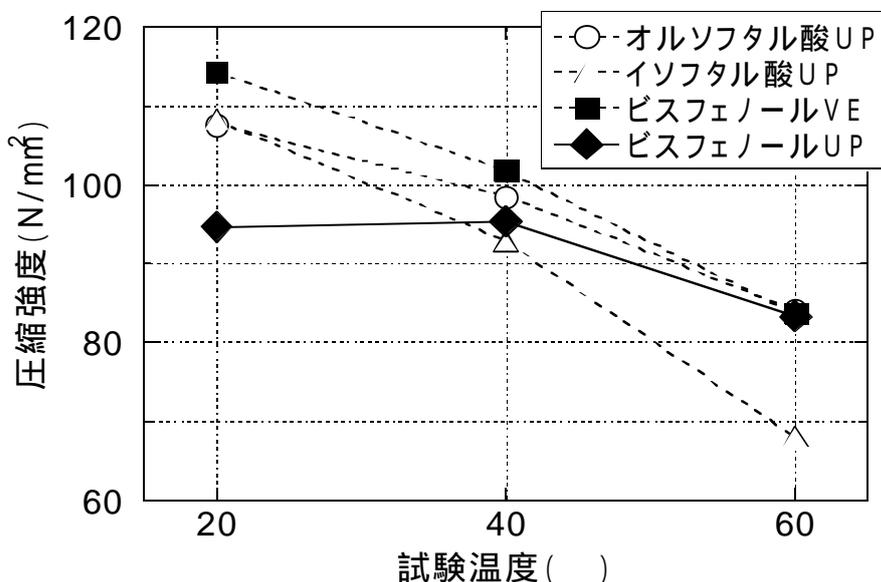


図-4.8 試験温度と圧縮強度

引張強度に対する温度依存性を調べた結果を図-4.9 に示す。ビスフェノール系UPを用いたものは20 ~60 の範囲で連続的に引張強度が低下する傾向を示している。その他の樹脂を用いた場合、圧縮強度は連続的に低下し、引張強度は試験温度40 以上の範囲で低下する傾向を示していたが、ビスフェノール系UPを用いたものはこれとは逆の傾向を示している。ただし、試験温度40 以上の範囲では最も低い低下率を示している。

試験温度を変化させて弾性係数を測定した結果を図-4.10 に示す。ビスフェノール系 UP を用いたものは 20 ~ 60 の範囲で弾性係数の変化がその他の樹脂と比較して極めて小さいことがわかる。既報³⁾におけるビスフェノール系 VE を用いたコンクリートのクリープ特性から推測して、弾性係数に対する温度依存性の小さな樹脂は、高温環境下のクリープ特性に対しても高い耐熱性が期待できる。

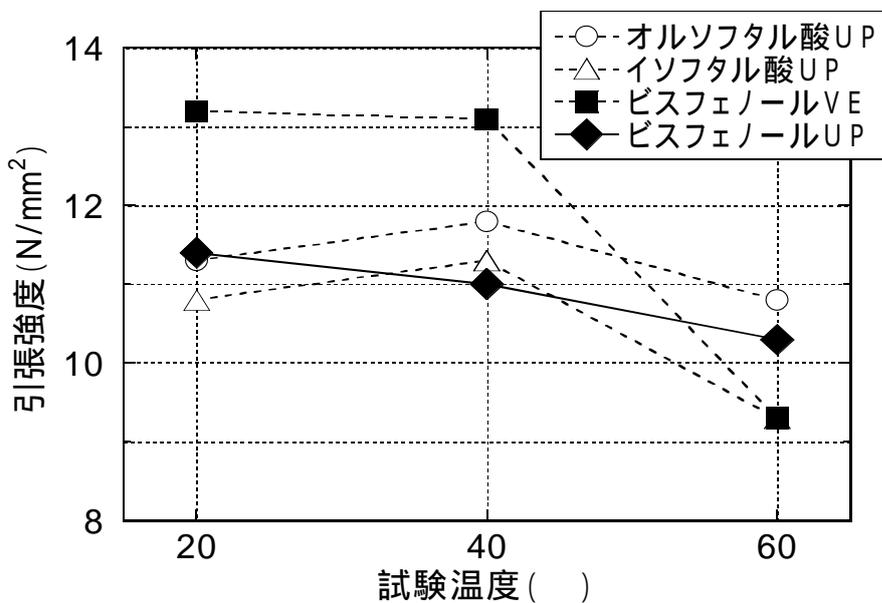


図-4.9 試験温度と引張強度

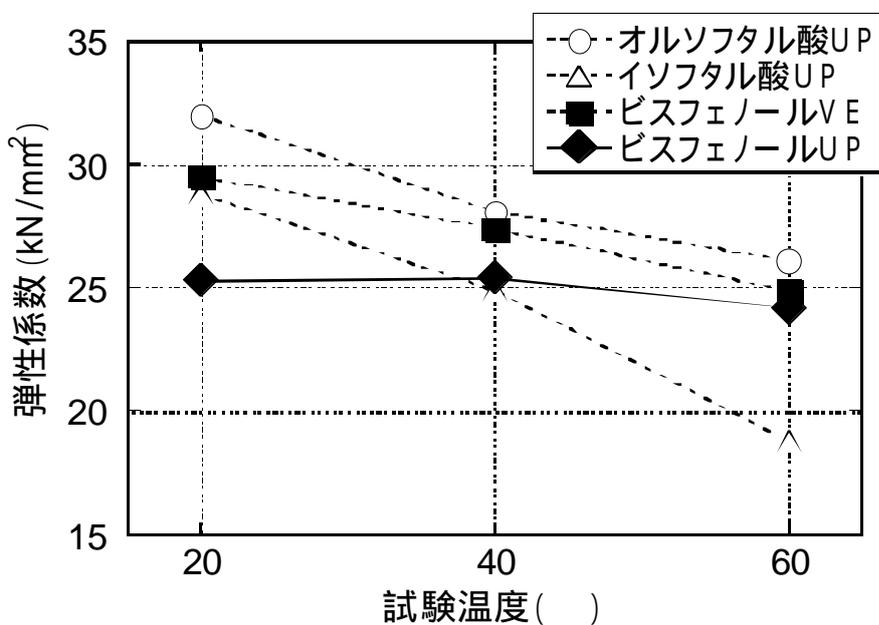


図-4.10 試験温度と弾性係数

4.5 まとめ

フタル酸を含む2種類の不飽和ポリエステル樹脂(UP)とビスフェノールを含む、ビニルエステル樹脂(VE)および不飽和ポリエステル樹脂の合計4種類の樹脂を使用し、レジンコンクリートの力学的特性の温度依存性に関して検討を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 試験時の温度が20 から 60 まで上昇すると圧縮強度は低下する。その低下率は最大のイソフタル酸系UPで約30%、最小のビスフェノール系UPで約10%であった。
- (2) 引張強度の低下は20 ~40 の範囲ではほとんどなく、40 ~60 の範囲で認められた。
- (3) 弾性係数に対する温度依存性は樹脂の種類によって大きく異なり、フタル酸を含む樹脂は温度依存性が大きく、ビスフェノールを含む樹脂の温度依存性は小さかった。特にビスフェノール系UPの高い耐熱性が確認できた。
- (4) 養生温度および養生時間を増加させ、樹脂の重合反応を促進させて力学的特性の温度依存性の改善を試みた。その結果、初期養生の変更による改善効果は、60 - 2時間から80 - 18時間に伸ばすことにより、イソフタル酸系UPでは圧縮強度低下率を37%から17%に、弾性係数は35%から20%に改善できた。その他のオルソフタル酸系UP、ビスフェノール系VE樹脂の圧縮強度に対して改善効果は認められなかった。

参考文献

- 1) 小林一輔, 伊藤利治: レジンコンクリートにおける強度の温度依存性と荷重速度依存性, 土木学会第29回年次学術講演会概要集, V-52, pp.112-113, 1974
- 2) 岡田 清, 米澤敏男, 川崎昌文: レジンコンクリートの強度特性の温度依存性について, 土木学会第30回年次学術講演会概要集, V-35, pp.71-72, 1975
- 3) 高山俊一, 出光 隆, 山崎竹博: 高温条件下におけるポリマーコンクリートの力学特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.579-582, 1993