

論文

[1204] ポリエステルレジンコンクリートのクリープに関する
温度依存特性

正会員○山崎竹博 (九州工業大学工学部)
正会員 宮川邦彦 (九州産業大学工学部)
正会員 出光 隆 (九州工業大学工学部)
正会員 渡辺 明 (九州工業大学工学部)

1. まえがき

骨材を樹脂のみで結合硬化したレジンコンクリートはセメントコンクリートに比べて強度の発現が早く、高強度でかつ無機酸に対して高い耐久性を示すが、その物理的性質の温度依存性が大きいと、構造用材料としての実用化が遅れている。しかし、今日、このようなレジンコンクリートの長所を利用して、地中の遮水性材料や耐酸性材料としてパイルや剛性管および壁材などへ徐々にその使用例が拡大している。

一般に、レジンコンクリートは使用される樹脂によって数種類に分類されるが、本論文では、その中で実用例の多いポリエステルレジンコンクリートについて、構造用材料として必要なクリープ性状と温度との関係を調べ、適応可能な温度範囲についての考察を試みた。不飽和ポリエステルを結合材としたポリエステルレジンコンクリートは硬化剤や促進剤などの添加剤を混合することによって常温硬化し、乾燥した施工条件では現場打設も可能である。レジンコンクリートは20℃常温養生でも材令数日で800kgf/cm²以上の圧縮強度を発現するが、最終的な重合度に達するためには高温養生を施すか又は長期の常温養生を必要とする。常温硬化したレジンコンクリートのクリープ性状は高温養生後に載荷した場合は異なり、クリープ係数がかなり大きく、載荷時の材令によってもその値が変化するなど性状の把握を困難にする原因となっている。

本研究ではまず現場打設を想定し、20℃常温養生したレジンコンクリートの載荷時の材令とクリープ係数との関係および20℃での長期クリープ性状について実験的考察を行った。次いで、プレキャスト製品を想定して80℃で12時間養生した供試体を20℃～60℃までの各10℃ごとの一定温度に維持し、クリープ荷重を圧縮強度の20%～40%の間で3レベルに保ってそれぞれ測定を行った。

2. 実験概要

(1) 使用材料および配合

レジンコンクリートは強度が高いため、本実験で使用する供試体は試験機の容量も考慮して、すべて直径 7.5cm、高さ15cmの円柱とした。	表-1 REC 1m ³ の質量(kg)			
	レジン	CaCO ₃	細骨材	粗骨材
	241	289	612	1267

樹脂には昭和高分子社製リゴラック不飽和ポリエステル2260Nを全重量の10%使用し、微粒充填材として炭酸カルシウムをレジン重量の1.2倍、細骨材率を36%とした。その示方配合表を表-1に示す。添加剤には希釈剤としてスチレンモノマー、促進剤にナフテン酸コバルト(金属6%溶液)、反応開始剤にMEKPO55%+ジメチルフタレートポリエステル重量に対してそれぞれ6%、0.5%、0.7%使用した。この時、目標可使時間は40分である。

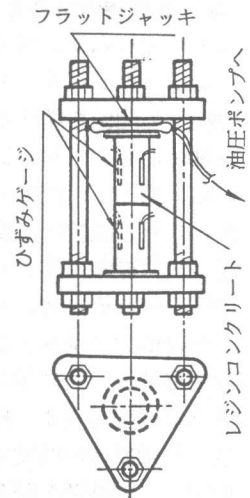


図-1 載荷装置

骨材には角閃安山岩（最大寸法20mm、粗粒率2.75、比重2.98）、海砂（比重2.56）を110℃で24時間乾燥後、密封冷却して使用した。

(2) クリープ試験

クリープ試験は図-1に示すクリープ試験機に供試体を設置し、フラットジャッキで各々所定の一定荷重を載荷した。載荷時の応力は円柱供試体両側面に貼付したワイヤストレーンゲージとフラットジャッキの油圧計の読みから確認し、以後、その油圧計の値を維持することによって荷重を一定に保っている。

供試体温度の調節には恒温循環水を用いたため特に防水に注意した。すなわち、ゲージおよびリード線接続部にはポリエステル樹脂でコーティングした上にブチルゴムで3重に防水し、更に、シリコンゴムで被覆した。また、リード線には高温で長期の防水に耐えられる製品を使用した。

(3) 恒温循環水装置

クリープ供試体の温度を一定にする目的で30℃以上の試験温度では図-2に示す恒温循環水装置を用いた。供試体はΦ20×30cmの円筒ステンレス製タンクに入れ、恒温水槽から温水を循環させている。

3. 載荷時の材令とクリープ性状

(1) 載荷応力レベルおよび弾性ひずみ

レジンコンクリートの載荷時の材令とクリープ性状との関係を調べるため、20℃で打設した円柱供試体に3、7、14、28日の各材令および高温養生後に、図-1の状態で作荷してクリープひずみを測定した。試験は温度20℃、湿度70%の恒温恒湿室で、目標載荷応力レベルを載荷時材令での圧縮強度のそれぞれ10、20、30、40%として実施した。

載荷応力の基準となる各材令での圧縮強度の実測結果を表-2に示した。また、同表では樹脂の重合の程度を表す一指標として、80℃で24時間養生した供試体の強度が完全重合状態を示すものと仮定し、同強度を基準とした各材令での強度の比を示している。

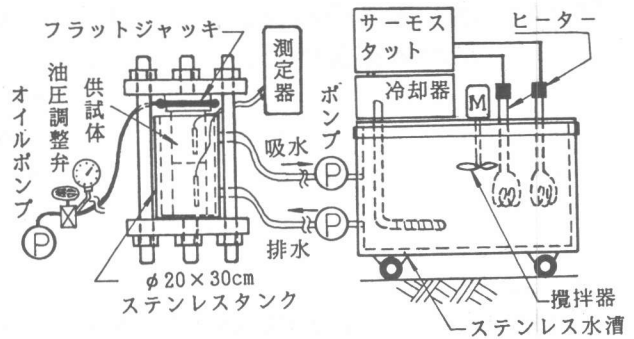


図-2 高温クリープ試験システム

表-2 供試体の材令と圧縮強度および強度比

材令(日)	1	3	7	14	28	高温養生
圧縮強度 kgf/cm ²	632	817	913	949	998	1124
強度比 %	54	70	79	82	86	100

表-3 載荷時の目標および実測弾性ひずみ (×10⁻⁶)

載荷時の材令(日)	目標応力レベル(%)				
	10	20	30	40	
3	目標	329	659	989	1318
	実測	327	618	1147	1180
7	目標	336	671	1107	1342
	実測	381	642	1052	1335
14	目標	337	673	1010	1346
	実測	343	660	1046	1406
28	目標	348	695	1043	1391
	実測	307	626	886	1120
高温	目標	323	646	969	1292
	実測	—	787	1073	1215

表-4 実載荷応力レベル (%)

載荷時の材令(日)	目標応力レベル(%)			
	10	20	30	40
3	9.9	18.8	34.8	35.8
7	11.3	19.1	31.3	39.8
14	10.2	19.6	31.1	41.8
28	8.8	18.0	25.5	32.2
高温	—	24.4	33.2	37.6

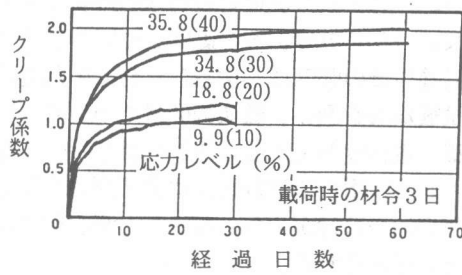


図-3 材令3日で荷重したクリープ係数

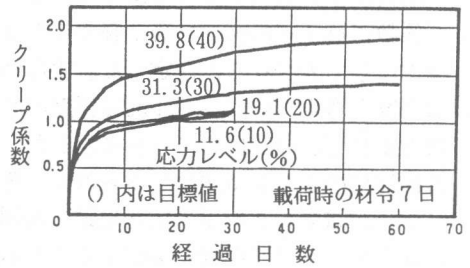


図-4 材令7日で荷重したクリープ係数

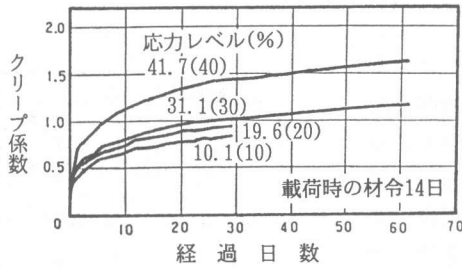


図-5 材令14日で荷重したクリープ係数

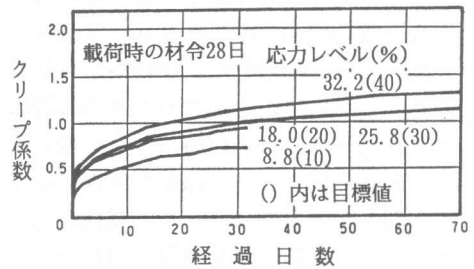


図-6 材令28日で荷重したクリープ係数

表-3には各材令での荷重応力レベルに相当する弾性ひずみの目標値と荷重時の実測値をまとめて示した。クリープひずみは初期の進行速度が大きいため、実験に際しては荷重を数分で終了する必要がある、必ずしも目標値と実測値とは一致していない。表-3の実測ひずみから実荷重応力レベルを計算すれば表-4のようになり、ほぼ応力レベル40%までの測点が網羅されていることが分かる。

(2) 荷重時の材令とクリープ係数

測定されたクリープひずみをそれぞれ表-3中の該当する実測弾性ひずみで除してクリープ係数を算出し、その経時変化を荷重時の材令別に図-3~7に示した。それらの各図から、材令3日以後に圧縮強度の40%以下の応力を荷重しても、20℃でのクリープ係数はほぼ2.0以下となる。また、材令28日以後に荷重した場合は1~1.5程度となり、圧縮強度300 kgf/cm²程度のセメントコンクリートの値と大差ないことが判る。更に、高温養生後の供試体のクリープ係数は極めて小さく、荷重後45日間ではほぼ0.3程度となり安定した結果が得られた。

このように、常温で養生されたレジコンクリートのクリープは若材令で荷重する程クリープ係数が大きくなる傾向を示す。しかしながら、レジコンクリートは骨材を樹脂の重合反応で結合硬化させたものであり、その硬化反応は材令よりも硬化剤

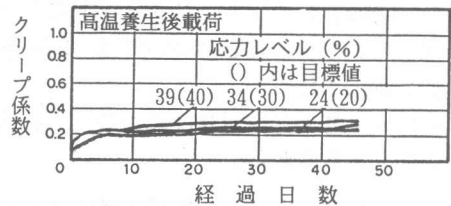


図-7 高温養生後荷重のクリープ係数

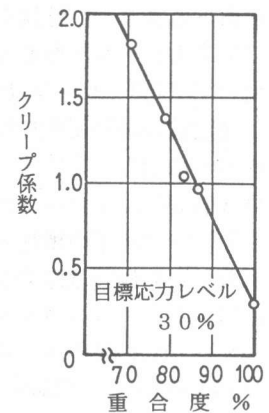


図-8 樹脂の重合度と60日後のクリープ係数(応力レベル30%程度)

の配合比や養生温度などによって支配されるため、このような載荷時の物理的性質のクリープ係数に及ぼす影響を材令で表すことは適切でない。ここでは、その影響が樹脂の重合度を指標にして表されると仮定した。すなわち、高温養生後の強度に対する各材令での強度比を重合度と考え、応力レベル30%程度のクリープ試験結果を選び、載荷後60日でのクリープ係数と重合度との関係を図-8に示した。その結果、重合度が上がるに連れてクリープ係数が直線的に小さくなる関係が得られた。その原因として、重合の進行と共に分子間の未反応モノマーが減少し、樹脂の粘性流動に起因する内部応力の移行が少なくなることや、化学反応に伴うクリープの促進効果が小さくなることなどが考えられる。

これらのことから、レジンコンクリートを現場打設する場合には、強度の発現が規定値以上であっても十分な重合反応が得られるよう養生に配慮することが望ましい。

(3) 載荷応力レベルとクリープ係数

図-3~7に示した試験結果からレジンコンクリートのクリープに与える応力レベルの影響について考察した。これらの図では、載荷時の材令が若い場合、載荷応力レベルの高い程クリープ係数が大きくなるが、高温養生後に載荷した場合にはほとんど載荷応力レベルの相違によるクリープ係数の変化は見られない。その傾向を明らかにするため、載荷後30日でのクリープ係数値と実測載荷応力レベルとの関係を調べ、その結果を図-9に示した。

一般に、セメントコンクリートのクリープに及ぼす載荷応力レベルの影響については Davis-Granville の法則が適用されるが、レジンコンクリートでも高温養生などによって十分に重合反応が進行すれば同法則の適用が可能と考えられる。

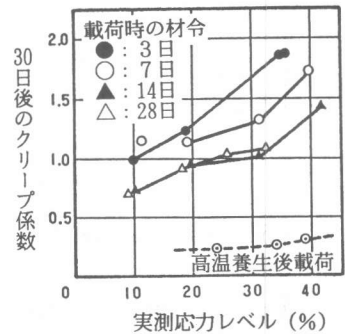


図-9 載荷後30日でのクリープ係数と応力レベル

(4) 長期のクリープ性状と最終クリープ係数の推定

常温養生したレジンコンクリートの長期におけるクリープ性状を見るため、材令28日で応力レベル30%および40%の荷重を載荷し600日間クリープひずみを測定した。

測定値の経時変化を図-10の様に片対数座標上に示したところ、載荷後3日以降ではほぼ直線的にクリープ係数が増加し、200日以降では若干の増加率鈍化の傾向が見られた。この傾向は応力レベル30%、40%共に見られ、レジンコンクリートのクリープ

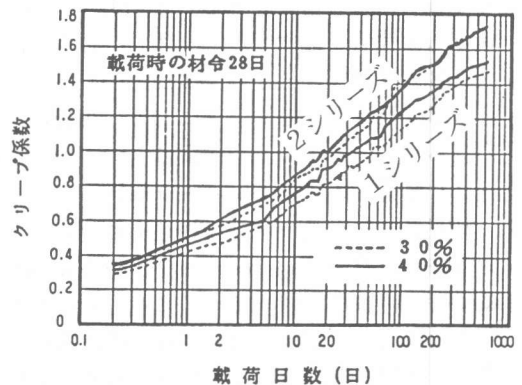


図-10 載荷後2年間のクリープ係数

が温度20℃の条件下で収束することを示唆している。また更に、この結果を同座標上で30年(10000日)後まで直線的に延長して最終クリープ係数を推定したところほぼ2.0~2.2の値となった。すなわち、気温20℃程度で現場打設したレジンコンクリートでも十分な養生を行えばセメントコンクリートとほぼ同等のクリープ係数値となることが判った。当然のことながら、高温養生を行ったレジンコンクリート製品のクリープ係数値については、図-9に示す値を参考にして、上記の結果の数分の1になるものと予測される。

4. 高温環境下のクリープ係数

(1) 圧縮強度の温度依存性

レジンコンクリートの強度は材料温度の増加と共に低下する。

本実験では80℃で24時間高温養生した供試体を載荷前に図-

2に示す恒温槽内でクリープ供試体と同一温度条件にし、圧縮強度ならびに弾性係数を測定した。各温度での供試体3本の平均圧縮強度および弾性係数を表-5に示す。各温度でのクリープ試験の載荷応力を表-5の圧縮強度の20、30、40%の応力レベルとし、各応力レベルでのクリープひずみを測定した。この時、試験時の温度を20、30、40、50、60℃の各温度としたが、測定中の温度誤差は±1℃以内であった。また、クリープ試験時には特に注意して載荷し、ほぼ目標載荷応力レベルに一致する荷重を与えている。

(2) 載荷温度とクリープ係数

試験温度をそれぞれ一定に保って3種類の載荷応力レベルでのクリープひずみを測定した。

それらの結果を各温度別に図-11~15に示した。

図-11には20℃でのクリープ係数を示しており、前節で述べた高温養生後の結果とほぼ等しく0.3程度の値となった。しかし、試験温度が上昇するに連れて図-12、13のようにクリープ係数も増大し、50℃では図-14に示すように、載荷応力レベル40%でクリープ破壊を生ずるに至った。この場合でも載荷応力レベルが20%以下の小さい範囲では30日後のクリープ係数は0.6程度となり、実用に供しうると考えられる。

温度60℃では載荷応力レベル20%以外はすべて数日で破壊し、応力レベル20%でも30日後のクリ

表-5 各温度での供試体の圧縮強度

供試体温度 ℃	20	30	40	50	60
圧縮強度 kgf/cm ²	1130	1147	1002	895	847
対20℃強度比 %	100	102	89	79	75
弾性係数×10 ⁵ kgf/cm ²	3.5	3.4	3.0	2.5	2.4

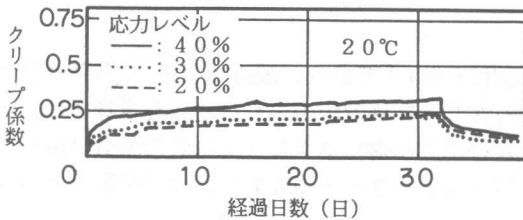


図-11 20℃でのクリープ係数の経時変化

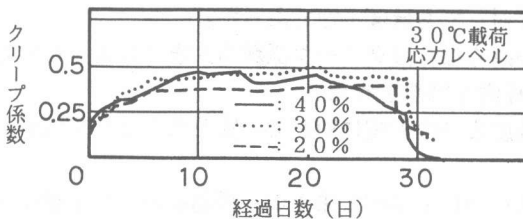


図-12 30℃でのクリープ係数の経時変化

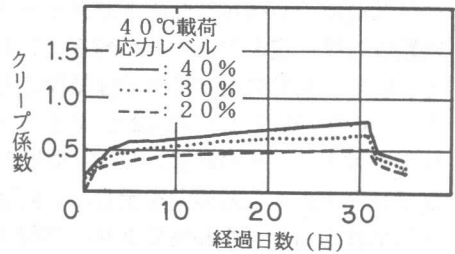


図-13 40℃でのクリープ係数経時変化

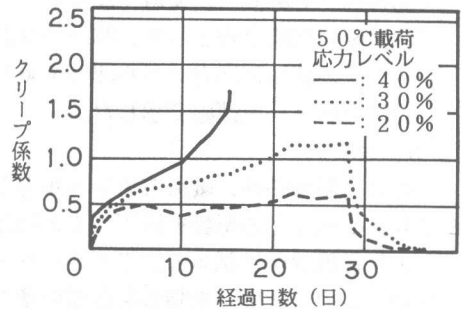


図-14 50℃でのクリープ係数の経時変化

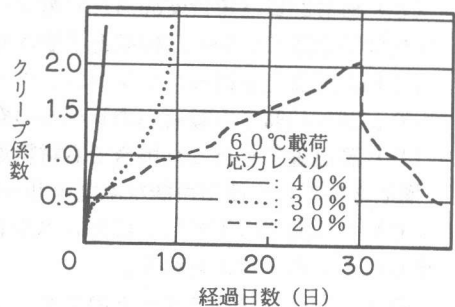


図-15 60℃でのクリープ係数の経時変化

ープ係数は 2.1にも達した。これらの結果から、レジンコンクリートのクリープの温度依存性を明らかにするため載荷後28日でのクリープ係数と試験温度との関係を図-16に示した。同図から、載荷応力レベルが一定の場合レジンコンクリートのクリープ係数は試験温度の上昇に対して二次関数状に増大することが判る。また、特に使用する樹脂の耐熱性の向上を図らない限り、軟化温度80℃のポリエステル樹脂を使用したレジンコンクリートであっても構造材料としての実用可能な温度の上限は40~50℃程度であるものと考えられる。

(3) 載荷応力レベルとクリープ係数

各温度でのクリープ試験結果から、載荷応力レベルと載荷後28日でのクリープ係数との関係を図-17に示した。同図より、温度20℃では載荷応力レベル30%以下でクリープ係数はほぼ一定となることが判る。しかし、30℃~40℃の温度範囲では載荷応力レベルの増加に対して直線的にクリープ係数が増大し、その直線の傾きは温度が高いほど大きくなる傾向を示した。温度50℃では応力レベル40%でクリープ破壊に至っている。破壊時の全ひずみは概略 6000×10^{-6} であった。実用可能なクリープ係数値の判断目安として、28日間常温養生した供試体に応力レベル30%を載荷した時の値を一点鎖線で示した。

5. まとめ

材令、温度条件、載荷応力レベル等がクリープへ与える影響を以下にまとめる。

- (1) 常温養生供試体の20℃でのクリープ係数は2.0以下であり、載荷時の材令が若い程大きい。このことは、樹脂の重合度の増加に連れクリープ係数が小さくなる事を意味する。
- (2) また、重合度が低い程、載荷応力レベルの増加に対するクリープ係数の増分は著しい。
- (3) 材令28日(重合度86%)で載荷したレジンコンクリートの20℃における長期クリープ係数は30年後で2.0~2.2程度と予測される。
- (4) 高温養生を行ったレジンコンクリートの20℃でのクリープ係数は0.3程度と極めて小さく、20~40%での載荷応力レベルの変化に対してもほぼ一定であった。
- (5) 高温養生を行った場合でも材料温度が高くなればクリープ係数も大きくなる。この時、構造材料として使用可能な温度は40~50℃程度と判断された。
- (6) この温度以下では、応力レベル40%程度までの荷重に対して安定したクリープ性状が得られるものと考えられる。

以上、レジンコンクリートのクリープ性状について述べて来たが、構造材料として使用する場合、強度のみならずクリープ性状の面からも十分な養生を行うことが望ましい。

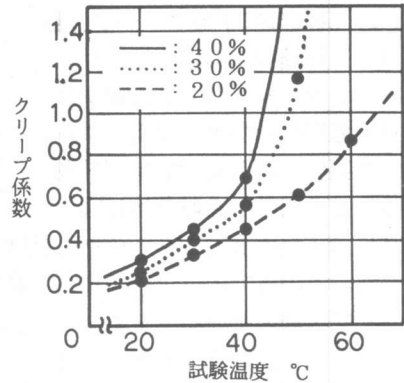


図-16 載荷後28日でのクリープ係数と試験温度

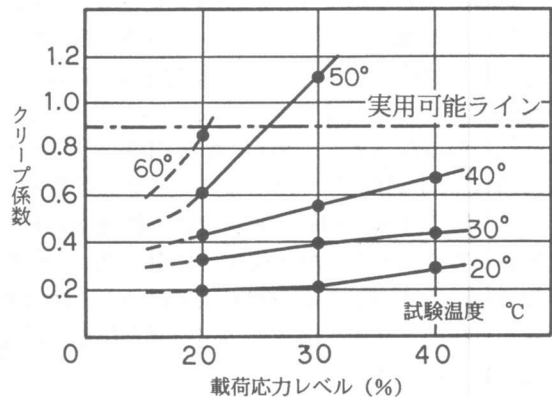


図-17 載荷後28日でのクリープ係数と載荷応力レベルの関係