

第1章 序論

1.1 レジンコンクリートの概説

1.1.1. レジンコンクリートについて

レジンコンクリート (resin concrete, 以下 REC と称す) は, セメントコンクリートの結合材であるセメント+水, つまり, セメントペーストの全てを高分子材料で置換したものである。REC は, 合成樹脂を用いて骨材を結合硬化させたものであり, その結合と硬化の過程は, 分子間の重合反応によるものである。これは, コンクリートにおける“セメント+水”の水和反応とはまったく異なる結合形態であり, その硬化特性も違ったものとなる。また, 骨材にはコンクリートと同様に砂利, 砂, 砕石が使用されるが, この他に REC のワーカビリティを確保するために, 砂よりも粒度の細かい充填材を併用するのが普通である。

この REC は, セメントコンクリートと比較し, 以下に示す特徴を有する。¹⁾

- (1) 強度のうち, 特に引張強度と曲げ強度が大きい。
- (2) 化学的侵食に対する抵抗性が大である。特に耐酸性に優れる。
- (3) 耐摩耗性が大きい
- (4) 不透水性で吸水しないため, 凍結融解の影響を受け難い。
- (5) 硬化が速く, 早期に高強度が得やすい。
- (6) 硬化時間を, 人為的かつ広範囲に制御が可能である。
- (7) 電気絶縁性が良好である。

一方で, 次の課題も挙げられる。

- (1) 強度に対する温度依存性が大きい。
- (2) クリープ変形が大きい。
- (3) 硬化時の体積変化が大きい。
- (4) 結合剤として使用する樹脂, 添加剤が高価である。

この REC の研究開発は, 当初, ソ連, 西ドイツ, 日本, アメリカおよびオーストラリアで, 積極的に行われてきた。我が国では, 1956 年, 山本恒太郎氏が REC に関する最初の特許を取得した²⁾。これに前後し, 日本電信電話公社電気通信研究所で研究開発が行われ, その成果を 1961 年に村井, 水野によって報告された³⁾。時を同じくソ連, 西ドイツでも報告された。その後, 京都大学土木工学研究室, 東京大学生産技術研究所, 明治大学建築学教室, 日本大学建築学教室(工学部), 九州工業大学(コンクリート研究室), 建設省建築研究所などにおける基礎研究や, いくつかの民間企業における実用化研究が積極的に行われてきた。

また, REC 発展の基本となる試験方法や品質に関する規格化は, 1985 年日本材料学会コンクリート工事用樹脂委員会から「ポリエステルレジンコンクリート構造設計計算指針(案)」⁴⁾が提案された。これは当時の限界状態設計法による REC の構造物に対する世界初の構造設計に対する考え方を示したものであるとして注目された。時を同じく 1980 年代になると, 下水道施設が細菌の作用によってそのコンクリート構造物が腐食し, その甚大な被害事例が多く報告された⁵⁾。図-1.1 に示す「下水道施設特有の腐食機構」⁶⁾による被害の発生は, セメントコンクリートの欠点とされている耐酸性が顕在化したものである。これによって, 化学的侵食に優れた特性を有する REC の普及が推進されたと考えられる。下水道の整備事業では, 対象施設が地下に埋設される構造物が

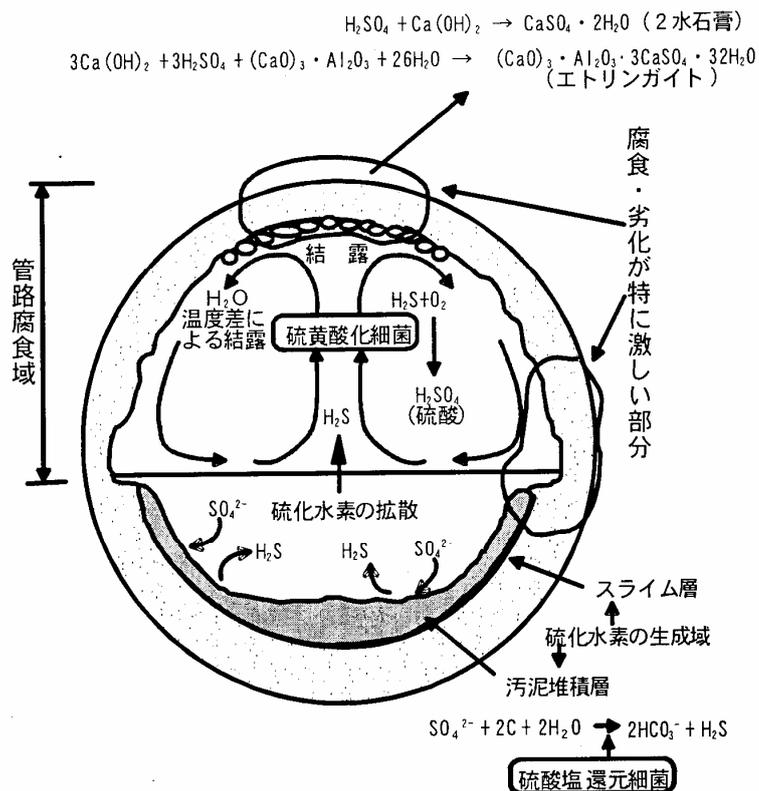


図-1.1 下水道施設特有の腐食機構

多く、将来における維持管理費の抑制は重要な課題である、近年、この課題解消を目指す自治体が多く、下水道のライン整備から面整備に移行する現状でもその需要は維持されている状況である。

この REC 製品の製造技術は、普通コンクリートと異なり、REC 原料の水管理が困難であるため現場打設は殆ど行われず、工場における製造が主流をなしている。工場での製造方法は、普通コンクリートの製造技術が概ね踏襲されている。以下、代表的な製造方法を記す。

(1) 注型成形法・振動成型法

注型成形法は、型枠に流動性を有する REC を流し込んで、製品を得る方法である。通常、内部振動機や外部振動機と併用する振動成形法が主流である。この場合、REC の特徴を生かし、型枠表面にあらかじめ化粧用ゲルコートを施して、これに REC を打ち継ぎ、製品の付加価値を景観的に向上させる技術でもある。

(2) 遠心力成形法

この成形法は、円筒型枠を回転させながら遠心力を利用して成形する方法である。大型で円筒形のパイプやポールなどの製品を比較的薄肉で、かつ均一な肉厚で成形できる製造方法である。

(3) プレス成形法

プレス成形法には、コールドプレス法とホットプレス法があるが、REC 製品の成形には一般的にホットプレス法が用いられる。ホットプレス法は、成形圧が $1\text{N}/\text{mm}^2$ 以上となるため、REC の流動性が増加し、加圧による潜在空気の排除が可能で、密度が高く、優れた寸法精度の製品を成形することができる。

今回の研究対象となるのは、(2)の遠心力成形法である。本研究では、この遠心力の大きさによる材料分離と製品品質に関する検討を実施した。

1.1.2 樹脂について

RECの結合材には、液状レジンである熱硬化性樹脂が使用されている。今回の共同研究先で使用している結合材は、不飽和ポリエステル樹脂である。現在、工業用として使用されている樹脂には、不飽和ポリエステル樹脂の中で3種類、それ以外の樹脂で2種類がある。これらの樹脂の性質、特に耐食性能は、図-1.2の化学構造式⁷⁾に示すエステル基の含有量で決定される。樹脂中のエステル基の含有率が高くなると、加水分解が起こりやすくなり、耐食性が低下する。ここで、オルソ系、イソ系とビスフェノール系を比較すると、両者ともにエステル基を持っているが、前者は主鎖の中にベンゼン骨格を含んでおり二重結合を持っているが、後者はビスフェノール結合が主である。この結合の違いが耐食性の差につながっている。ビスフェノール骨格は分子量も大きいいためエステル基濃度が小さくなり、加水分解が起こりにくくなる。ビニルエステルはエステル基がさらに少なく、エポキシ樹脂はエステル基を全く持っていないため、さらに耐食性が優れることになる。

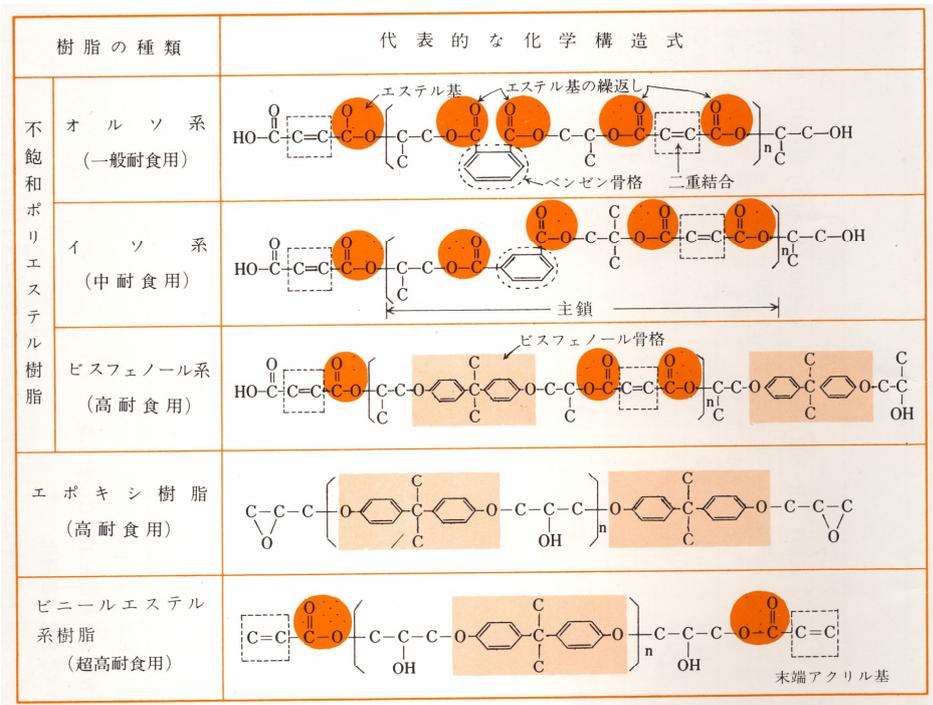


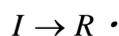
図-1.2 樹脂の化学構造式

次に、本研究の対象となる不飽和ポリエステル樹脂の硬化反応について、文献⁸⁾を参考に概説する。不飽和ポリエステル樹脂の硬化は、自由度のある原子がお互いに結合するラジカル重合、あるいはその結合が更に複雑な結合をする二重結合である。これらの結合を重合反応という。

この重合反応をステップごとに示す。また、硬化反応の概念図を図-1.3に示す。

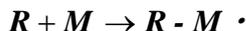
分解反応

開始剤 (I) が反応し、活性反応中心の R・(一次ラジカル) が生成する。



開始反応

開始前の分解で出来た一次ラジカルは、モノマー(M)の不飽和結合に付加し、モノマーラジカル(M・)を生ずる。



生長反応

モノマーラジカルにさらにモノマー、あるいは不飽和ポリエステルの不飽和結合が付加し、分子量の増大、架橋反応の開始が起こる。



停止反応

連鎖反応の停止により最終生成物である安定なポリマーを生成する。

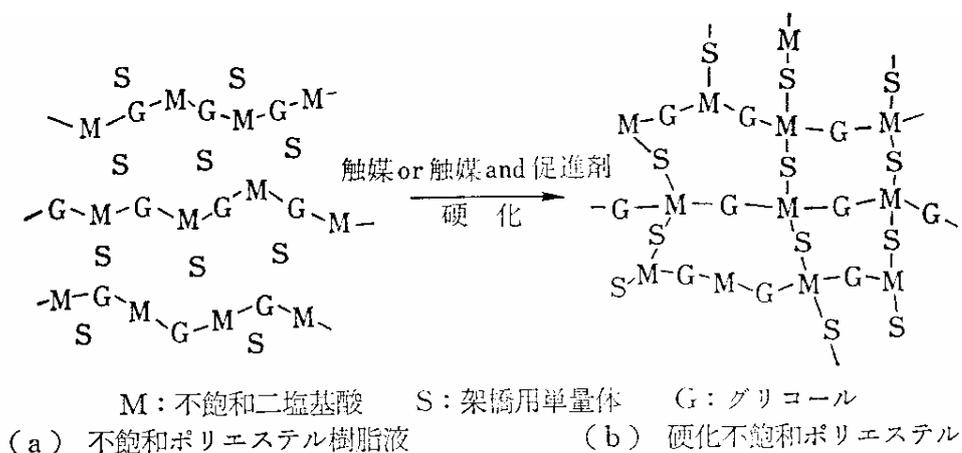


図 - 1.3 樹脂の硬化反応概念図

次に、不飽和ポリエステル樹脂の収縮機構について述べる。一般的には、不飽和ポリエステル樹脂の硬化に伴う収縮は、液状の不飽和ポリエステルとモノマー（スチレン）が、重合して生成するポリマー（固体）との間に、自由体積の差が生じ、硬化の際、収縮を避けることは出来ない。つまり、硬化収縮は、架橋に伴う自由体積の減少によって起こるといわれている。

また、RECの収縮について遠藤⁹⁾は、結合材である不飽和ポリエステルとモノマー（スチレン）が重合反応に伴って起こる分子量の減少と空孔(キャビティ)の減少によって発生するとし、収縮率と重合度の関係式を提案している。また、赤岡¹⁰⁾は、重合反応によるポリマー（固体）の架橋に伴う自由体積の減少は、高分子鎖の接近による自由体積の減少によると仮定して、硬化の過程における体積抵抗と体積収縮率の関係式から、硬化収縮は、重合反応の橋架けに伴う自由体積の減少によって起こると結論付けている。

本研究では、このRECの重合反応をパラメーターとする任意の収縮挙動のモデル化の検討を行った。

1.2 研究の背景

わが国は、第二次世界大戦後急激な復興を遂げてきた。この国土開発の建設資材として貢献したものがセメントコンクリートである。このセメントコンクリートの大量消費の根拠は、セメントの原燃料である石灰石と石炭が、わが国において良質かつ豊富に得られたことによるものである。経済成長期においては、都市化の進展とともにライフラインの整備や社会資本の整備が進め

られてきた。この整備の充実に伴い、多くのコンクリート構造物が各地で建設されてきた。わが国の社会資本整備において、下水道整備は生活環境の改善に資するとともに、河川の水質改善等良好な水辺空間の保全・創出に貢献した。このように快適な生活環境を実現するため各自治体では、積極的に下水道設備を進めてきた。平成16年3月現在、人口普及率で、全国70%、大都市で90%以上の下水道普及が実施された¹¹⁾。

しかし、この下水道施設において食生活の変化や多様化に伴い、下水道に流れ込むたんぱく質などの有機硫黄化合物が微生物の作用により分解され、最終的に硫化水素を発生することがわかってきた⁵⁾⁶⁾。この硫化水素の発生によって、既存のコンクリート構造物が酸性腐食するといった新たな問題が提起された。一方、急激な都市化による交通事情や、コスト削減、工事の住民対策等によって長距離推進やカーブ推進といった高度な施工技術が要求されるようになってきた。特に維持管理費の低減の要求に伴い、下水道管や下水道施設にも高強度、高耐久性が必要とされてきた。つまり、RECの持つ高強度・高耐久性という特徴が生かした需要開拓が実勢されてきた。しかし、多くの特徴を有するRECではあるが、1.1.1項で述べたように収縮や温度依存性等の課題も抱えている。

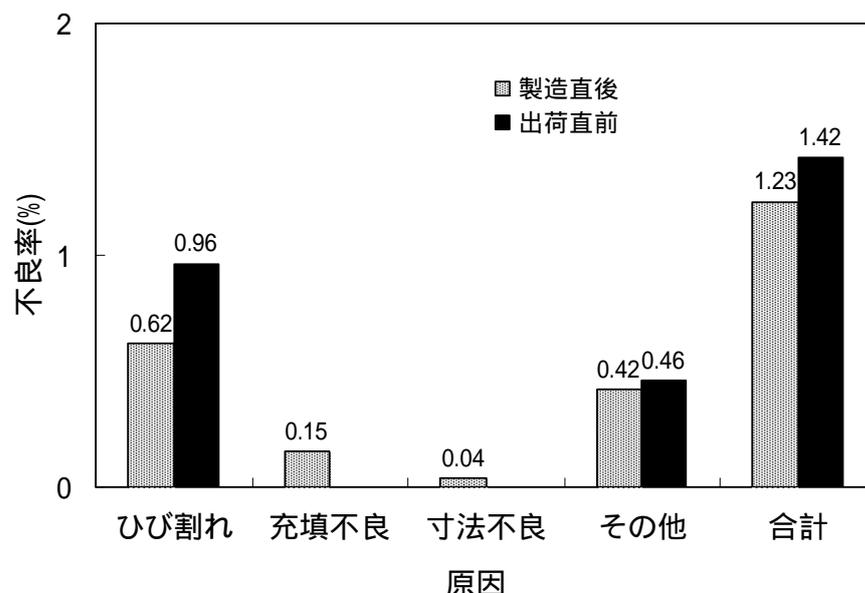


図-1.5 原因別不良率

ここで、共同研究先であるREC製品工場の検査結果を図-1.5に示す。この工場では、製造直後に製品の全数検査と出荷直前に全数検査を実施している。図は、この時の原因別不良率のグラフである。不良率は、生産総重量に対する不良製品の重量百分率で示す。ここに示す、原因の中でひび割れによるものが全体の約60%を占めた。ひび割れの直接の原因として考えられるのが、RECの硬化収縮である。ここで、この硬化収縮によるひび割れの影響を検討するにあたり、任意の温度条件におけるRECの収縮挙動を把握することが必要である。

また、REC製品の温度依存性については、工場内の製品検査とは関係の無いものであるが、このREC製品の多くが下水道等排水施設へ供用されている。下水道の排出基準は45と規定されている¹²⁾が、工場内排水や温泉地の排水等高温にさらされることも考えられる。そこで、REC製品の供用後の温度依存性に対する検討も必要となる。

1.3 既往の研究と問題点

1.3.1 収縮に関する研究

(1)大濱ら¹³⁾は、主剤にオルソフタル酸系不飽和ポリエステル樹脂を用い、希釈剤にスチレンモノマーを主剤の外割 8, 12, 16%添加し、硬化促進剤としてナフテン酸コバルトを用い主材に対し 0.3, 0.5, 1.0%を添加。また、メチルエチルケトンパーオキサイドを触媒として主剤の 0.3, 0.5, 1.0%を添加した配合について研究を行った。そして、それらの配合と硬化ひずみとの関係を検討した。この時の REC の配合は、重量百分率で、樹脂量:11.24%、充填材量:11.24%、細骨材 48.4%、粗骨材:29.1%である。REC を 10 × 20cm の円柱供試体に充填し、標準養生中の長さ変化を埋込みゲージおよびコンタクトゲージで測定した。その結果、硬化促進剤が増加することによって長さ変化が大きくなり、硬化剤が多くなることによって、長さ変化が増大することを確認した。長さ変化は、0.3 ~ 0.5%程度であることを報告している。

(2)山崎ら¹⁴⁾は、補強された REC の硬化収縮応力算定に関する研究の中で、主剤にオルソフタル酸系不飽和ポリエステル樹脂を用い、希釈剤にスチレンモノマーを主剤の外割 6%を添加。硬化促進剤としてナフテン酸コバルトを用い主剤に対する添加量 0.3, 0.6, 1.0, 1.3%、また、メチルエチルケトンパーオキサイドを触媒として主剤の 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9%を添加した配合の組み合わせについて、検討を行った。この時の REC の配合は、重量百分率で、樹脂量:10.0%、充填材量:12.0%、細骨材 52.6%、粗骨材:24.5%である。15 × 30cm の円柱供試体に充填し、標準養生中の長さ変化を埋込みゲージで測定した。その結果、0.3 ~ 0.4%であると報告している。

以上、いずれも標準養生での測定結果であり、加熱養生下の長さ変化の測定結果はない。

1.3.2 拘束応力に関する研究

(1)岡田ら¹⁵⁾は、REC の補強実験の中で、粗骨材最大寸法 20mm の REC を用い 8×15×90cm の矩形梁を作製し、無筋、普通丸鋼、異形鉄筋、高張力異形鋼棒、グラスファイバー等を補強材にした場合の曲げ強度試験を実施した。曲げ強度試験結果から、ひび割れ強度と破壊強度の補強率を整理した。その中で、ひび割れ耐力については、補強材を用いたものの補強効果は見られなかった。その原因は、硬化収縮による強度低下と考察している。

(2)小林ら¹⁶⁾は、REC の補強に関する研究の中で、粗骨材最大寸法 15mm の REC を用い、10×10×40cm の角柱梁において、異形鉄筋とグラスファイバーロットで補強した場合の曲げ特性から、拘束応力の考え方を整理し、捕捉係数を測定することによって、補強効果を配慮した設計方法を提案している。その中で、REC の硬化初期段階の粘性流動の影響については、捕捉係数を導入することによって拘束応力の推定を行った。その結果、梁のひび割れ荷重の低下を防ぎ補強効果を高めるには、補強効果の認められる最小の鉄筋比を配する必要があると報告している。

(3)NGUYEN VAN LOI らは¹⁷⁾、REC の硬化収縮と拘束応力の研究の中で粗骨材最大寸法 10mm の REC を用い、10×12×130cm の角柱梁において 9.2, 13, 15mm の PC 鋼線を配し、そのときの曲げ強度を測定し、この時の REC 中の PC 鋼棒のひずみを測定した。この PC 鋼線のひずみから導入応力を算出し、導入応力と鋼材比の関係、梁の曲げ強度と鋼材比の関係、導入応力と曲げ強度の関係、鋼材比と曲げ強度の関係、曲げ強度と REC 導入応力との関係を整理した。

その結果、鋼材比と REC 導入応力には線形関係が見られ、鋼材比および導入応力が増加した場合、曲げ強度が低下すると結論付けている。

(4)小柳らは¹⁸⁾, REC の硬化収縮性状と補強筋による拘束応力の研究の中で, 粗骨材最大寸法 10mm の REC を用い 10×10×38cm の角柱梁を作製し, 9, 11, 15, 19 mm の PC 鋼棒を配しそのときの曲げ強度を測定した. この時の REC 中の PC 鋼棒のひずみと梁表面のひずみを測定した.

一方, 10×20cm の円柱供試体の圧縮強度試験時の応力度とひずみの関係から, ひずみ時間曲線を求め, 材令 48 時間の測定値をもとにして, 拘束応力に寄与する見かけのひずみと全ひずみに対する比率, REC に導入された平均引張応力, 曲げ強度とその鉄筋量が REC の曲げ強度に対する影響を整理した. その結果, REC の収縮の中で補強材の拘束応力に寄与する割合は補強材料によって変化することと, 補強材に導入される拘束力は鋼材量にほぼ比例する, と結論付けている.

(5)山崎らは¹⁴⁾, 樹脂の硬化収縮ひずみによって発生する硬化収縮応力算定のための一般式を誘導することを目的に, 一般的に使用されているオルソフタル酸系不飽和ポリエステル樹脂を用いた REC に的を絞って, 誘導式の妥当性を確認した.

いずれにしても, これらの拘束応力を推定するには, 硬化収縮量, 弾性係数, 引張強度, クリーブ係数等の経時変化を把握する必要がある. 中でも, 製品のひび割れ発生と大きな関係を有する REC の収縮挙動を把握する必要がある. 任意の条件における REC の収縮を解析により推定できるような硬化収縮のモデル化を必要とするものである.

1.3.3 温度依存性に関する研究

(1) 小林ら¹⁹⁾は, 樹脂量 9,11,13% の不飽和ポリエステル樹脂を用い, 骨材の最大寸法 15mm の REC について, 打設後 20 で 24 時間, その後 70 で 15 時間過熱養生した供試体を空気循環方式の高温負荷装置を用いて 0 ~ 100 における圧縮強度と弾性係数を測定した. その結果, 試験温度 40 における圧縮強度は, 20 時の約 90% に低下し, 弾性係数は約 95% に低下した. また, 試験温度が 80 の場合, 圧縮強度は約 50% に低下し, 弾性係数は約 60% まで低下することを報告している.

(2) 岡田ら²⁰⁾は, 樹脂量 12% の不飽和ポリエステル樹脂を用い, 骨材の最大寸法 15mm の REC について, 打設後 24 時間 20 で養生し, 70 で 12 時間過熱養生した供試体を試験機載荷部にセットした高温槽中で 5 ~ 60 における圧縮強度と弾性係数を測定した. その結果として 60 における圧縮強度は 20 の場合の約 70% に低下することを報告している. 引張強度に関しては, 試験時の温度が 20 ~ 40 の範囲でピークを示す傾向を明らかにしており, この原因として硬化収縮による内部応力が温度上昇に伴い減少したためと考察している.

(3) 高山ら²¹⁾は, 不飽和ポリエステル樹脂よりも耐腐食性を向上させたビスフェノール系ビニルエステル樹脂を用いて, 圧縮強度と弾性係数の温度依存性および高温環境下におけるクリープ特性を検討し, ビスフェノール系ビニルエステル樹脂の耐熱性を報告している. その中で, 試験時の温度が 60 における圧縮強度は 20 の場合と比較して約 80% 程度であり, 不飽和ポリエステル樹脂を用いたコンクリートよりも高温時の強度低下が小さいことを明らかにしている.

このように REC の力学的特性の温度依存性に関する研究は, そ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。

1.4 研究の意義と目的

REC 製品の品質の不具合発生率を製造工程の段階およびストックヤードでの保管中における割合を把握し、その発生原因を検討した結果、その中でひび割れによる不具合が60%を占めることがわかった。ひび割れの直接の原因は、RECの硬化収縮に起因すると推定される。

そこで、REC製品のひび割れの主要因と考えられるRECの硬化収縮の挙動把握が第一義との考えに基づき、RECの収縮モデルを確立することにした。RECの重合反応による収縮モデルの開発にあたり、発熱モデルと収縮モデルの連成モデルを提案した。

この連成モデルは、セメントコンクリートの水和発熱モデルを発展させ、基準温度における反応速度項と温度依存項の積で反応速度を表現できるモデルを提案し、さらに樹脂の収縮反応と発熱反応を個別にモデル化し、反応温度を共有化させることで連成して計算を進める手法を採用した。モデルは、収縮反応と発熱反応のそれぞれの基準反応速度項と温度依存項を断熱環境下の発熱挙動と収縮挙動から定量的に同定し、任意の温度履歴における硬化収縮挙動を再現できる計算モデルを提案する必要がある。加えて、実際のRECの製造工程における加熱養生過程を模擬した実験から提案する基準発熱速度項と基準収縮速度項の検証を行い、提案モデルの実効性を確認する必要がある。

REC製品の品質改善については、製造工程におけるRECの硬化収縮を大きくする要因を検討し、遠心力の大きさや充填材の密度がRECの収縮量を左右、その収縮量とREC製品の不具合との関連性の確認と対策が必要である。ここでは、遠心力の大きさと材料分離に着目し、その実態と製品への影響を検討した。

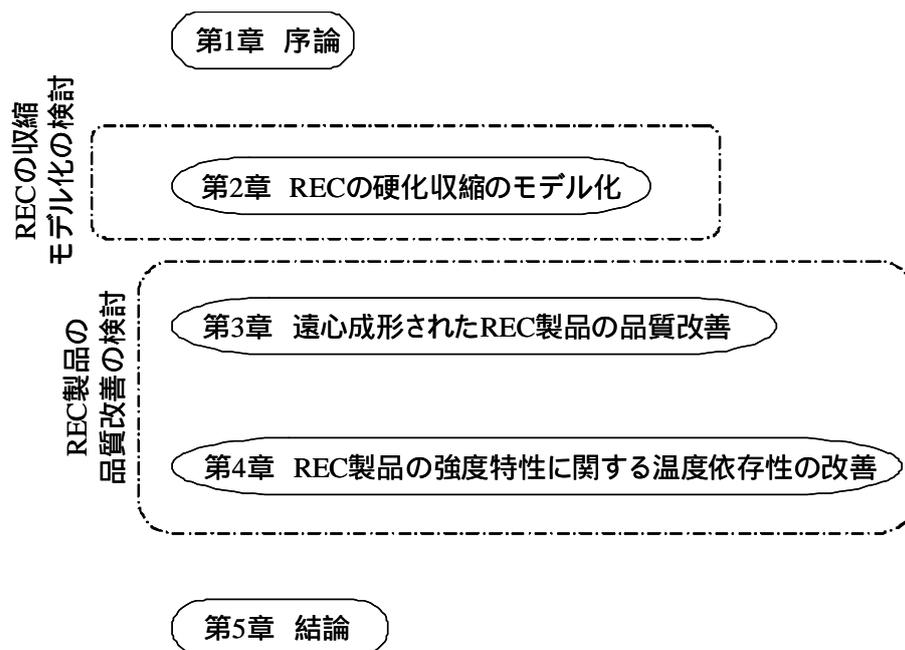


図-1.6 本論文の構成

以上が製造段階における不具合の発生および品質改善のための研究であるが、REC 製品の供用後の温度依存性についての品質改善では、その影響の確認と対策を必要とするものである。ここでは、REC 製品の製造段階における養生方法に着目し、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。

1.5 本研究の構成

本論文の構成を図-1.6 に示す。

第1章は、序文であり、REC の特徴、歴史、関連基準値の整備状況、REC 製品の普及と製造方法、樹脂の種類について概説し、REC の研究の背景と目的および論文の構成について記した。

第2章では、REC の硬化収縮のモデル化について、

- (1) モデル化の基本方針について、詳述した。
- (2) 実験概要について、本実験に使用した配合、断熱温度上昇試験機等について詳述した。
- (3) 実験データから、基準温度における反応速度項と基準温度からの温度差を考慮した温度依存項の積で表す反応速度を表現するモデルを提案し、断熱環境下の発熱挙動と収縮挙動から定量的な同定の方法について述べた。
- (4) 発熱・収縮モデルについて、連成モデルの提案の理由について、また、それぞれの終局値の求め方について提案した。
- (5) 実際の REC の製造工程における加熱養生過程を模擬した実験から提案する基準発熱速度項と基準収縮速度項の検証を行い、提案モデルの検証を行った。

次いで、第3章と第4章で REC 製品の品質改善についての検討を行った。

第3章では、遠心成形された REC 製品のひび割れ解消の検討を行った。

- (1) 遠心力が REC 製品の成型時の材料分離に与える影響、また、それが鉄筋補強の有無による製品強度に与える影響について検討した。
- (2) 増量や流動性改善材の目的で使用する充填材の密度と遠心力が材料分離に及ぼす影響について実験をもとに要因分析を行い、それが製品に与える影響について検討を行った。

第4章では、REC の力学的性質、強度およびヤング係数の温度依存性の改善を材料と製造方法の観点から検討した

- (1) REC の養生条件、養生温度と養生時間との関係について実験結果をもとに、その影響について確認した。
- (2) 材料の面では、ビスフェノール系不飽和ポリエステル樹脂の有効性について検討した。

第5章では、以上の結論を要約し、REC の収縮の測定とその収縮が REC 製品の品質へ与える影響について述べ、REC 製品の品質改善に関する検証成果を提案した。

参考文献

- 1) 清水茂夫：実用レジンコンクリート:山海堂，pp.15～33，1986.2
- 2) 山本恒太郎：日本特許 231963，1956
- 3) 村井信夫，水野 進：研究実用化報告，10-10，111，1961
- 4) レジンコンクリート構造設計計算指針(案)，日本材料学会コンクリート工用樹脂部門委員会，材料，34，108，1985
- 5) 厳しい腐食性地下埋設コンクリート構造物の耐久性に関する設計ガイドライン，九州橋梁・構造工学会，1995.10
- 6) 下水道管路施設腐食対策の手引き(案)，(社)日本下水道協会，pp.4，2002.4
- 7) 耐食 FRP の手引き，昭和高分子，2000
- 8) 滝山栄一郎：ポリエステル樹脂ハンドブック，pp.103～112，日刊工業新聞
- 9) 遠藤剛：非収縮性樹脂の最新の進歩，エポキシ樹脂技術協会における講演会，1986.1.23
- 10) 赤岡輝尚：高分子化学，22，(241)，289，1985
- 11) 建設白書，国土交通省，2007
- 12) 法令集，下水道排水基準
- 13) 大濱義彦，出村克宣：ポリエステルレジンコンクリートの硬化収縮，日本建築学会大会学術講演概要集（構造系），pp.253-254，1976.10.
- 14) 山崎竹博，宮川邦彦，渡辺明：補強されたレジンコンクリートの硬化収縮応力算定に関する研究，土木学会論文集，No.318，pp.127-137，1982.2
- 15) 岡田清，小林和夫，矢村潔，平井正樹：レジンコンクリートの補強に関する 2・3 の実験，セメント技術年報，Vol.22，pp.502-506，1968
- 16) 小林保，小林一輔：レジンコンクリートの補強に関する 2，3 の考察，コンクリート工学論文集，1976
- 17) NGUYEN VAN LOI ほか：ポリエステル REC の硬化収縮と拘束応力，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.1，1994
- 18) 小柳 治ほか：REC の収縮性状と補強筋による拘束応力の発現，第 2 回コンクリート工学年次講演会講演論文集，Vol.2，pp.241-244，1980.
- 19) 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
- 20) 岡田清ほか：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，第 5 部，1975
- 21) 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