

第6章 骨材回収型－完全リサイクルコンクリートの実証化

6.1 概説

6.2 ペースト界面との易分解を可能にする骨材の開発

6.3 骨材回収型リサイクル指向コンクリートの基礎的性質

6.4 骨材回収型リサイクル指向コンクリートの破壊特性

6.5 骨材回収型リサイクル指向コンクリートのリサイクル性評価

6.6 第6章のまとめ

6.1 概説

既存コンクリート構造物を起源としたコンクリート塊から骨材を回収する場合、一般的な破碎処理方法を適用すると、骨材周囲にセメントペーストが30%程度付着し、原骨材よりも品質が大きく低下した状態で回収される傾向がある[1-3]。それらを使用したコンクリートのフレッシュ性状、硬化特性、耐久性状などを含めた総合的な性質は、一般的に低下し、結果として、構造コンクリート用骨材として使用するには不適合となる。従って、そのような再生骨材は、現状では、構造用コンクリートと比較して一般的な使用性を確保するための要求性能が低い道路用路盤材などにダウンサイクリングされている。しかしながら、その用途における将来的な需用には限界があることは明らかであるため、そのような適用方法は、用途が広範に存在し、要求品質が低く、需要が喪失するまでの一定期間のみ有効に作用する対処療法的手法として機能するものと理解するべきであろう。

本章では、この問題を抜本的に解決することが期待される骨材回収型リサイクル指向コンクリートを提案し、その実証可能性を検討する。骨材回収型リサイクル指向コンクリートは、「コンクリートの力学特性に過度な低下が生じない程度に原骨材表面に改質処理を施して、骨材マトリックス間の付着力を低減し、原骨材を容易に回収することを可能とするようなコンクリート」と定義されるコンクリートである。なお、骨材回収型リサイクル指向コンクリートは、リサイクル指向性と称されるように、将来的には骨材への改質処理程度により、コンクリートの基礎的物性と再生材料の品質を任意に制御することが可能になるものと考えられる。従って、製造目標とするコンクリートに応じて、材料調整段階における改質処理程度を任意に調整した上で、長期耐久性の確保を主目的とするようなコンクリートとすることも十分に可能であるといえる。

本章では、まず最初に、原骨材とペースト界面との易分解性を可能とする骨材の開発を行う。経済性・使用性・環境安全性および剥離効果の発現性を考慮した上で、骨材界面への塗布が可能な改質処理剤を選定し、表面粗さ性状および、形状の異なる各種骨材を用いて改質処理骨材を製造し、界面剥離効果を検討する。続いて、改質処理骨材を用いたコンクリートの基礎的物性および破壊特性について検討する。最後に、コンクリートを解体処理する際に、骨材とセメントマトリックス間の界面剥離効果により、簡便な処理方法においても品質の優れた再生骨材が回収可能であることを実証する。

なお現在、一般的な構造用コンクリートは、骨材が全容積の7割程度、セメントマトリックスが残り3割程度で構成されているといえるが、鉄筋コンクリート造構造物における構造安全性を確保することを目的としたコンクリートの本質的役割は、自らが破壊することなく構造体に応力を伝達することであると仮定すると、従来型の構成材料の選定方法、使用割合および使用方法を制御することを基調とした材料設計法は、その目的を達成するための最もシンプルで一般化しやすいBATであったといえる。しかしながら、今後、コンクリートに要求される本質的役割は、構造物の構造安全性を確保する性質のみに限られないことは明らかであり、昨今では、先に概説したコンクリートの本質的役割を維持しつつ、他の性能を内在化させる機能性コンクリート[4]とすることが一般化に検討されるような状況となった。その事例として、施工性・充填性を向上させる自己充填コンクリート、構造物自重の軽減を図る軽量コンクリート、短繊維を混入してコンクリートの靱性向上を図る高靱性コンクリートなどの実務レベルで使用されているコンクリートを始め、環境配慮を全面に打ち出した事例として、本研究において提案したセメント回収型—完全リサイクルコンクリート[5]や、骨材を空気泡で代替し骨材を全く使用せず、全量がセメント原料化する軽量気泡コンクリート[6]なども検討されている。つまり、骨材回収型リサイク

ル指向コンクリートは、現状のコンクリート製造における BAT となる仕組みを保持しつつ、解体処理後に原骨材を容易に回収することを可能にし、天然骨材の採取に起因する環境負荷を積極的に低減する機能を内在させたコンクリートとして位置づけられよう。

本章では、6.2 にて「ペースト界面との易分解を可能にする骨材の開発」を、6.3 にて「骨材回収型リサイクル指向コンクリートの基礎的性質」を、6.4 にて「骨材回収型リサイクル指向コンクリートの破壊特性」を、そして最後に 6.5 にて「製品－骨材回収型完全リサイクルコンクリートのリサイクル性評価」と題し、骨材回収型リサイクル指向コンクリートに関する総合的な性質の評価を行う。

なお、骨材回収型完全リサイクルコンクリートとは、使用骨材に石灰石骨材を使用することで、セメント回収型－完全リサイクルコンクリートと同様に全量をセメント原料化する性質を保持しつつ、骨材回収型リサイクル指向コンクリートの性質を兼ね備えたコンクリートのことを示す。つまり、骨材回収型リサイクル指向コンクリートの場合は、コンクリート全量をセメント原料とするものではない。また、将来における天然資源の供給源となるコンクリート構造物においては、セメント供給型の構造物が過剰にならないようにする必要があるので、概念的には、セメント回収型のコンクリート構造物が一定量充足した後に、骨材回収型のコンクリート構造物を積極的に生産することが重要であるといえる。

本研究では、骨材回収型リサイクル指向コンクリートに関する基礎的物性の検討を通じて、最終的には、将来的な骨材需給構成を考慮した上で、石灰石骨材を優先選択し、骨材回収型－完全リサイクルコンクリートとすることを目標としている。そして第 5 章において検討したセメント回収型－完全リサイクルコンクリートとの需給バランスを考慮した上での併用により、長期的に都市部を中心として構築されるコンクリート構造物のストックがコンクリート材料の供給源となるような仕組みを作ることを想定している。そのような状況下における建築生産の企画設計の段階では、ライフサイクル設計が一般的な仕組みとして導入することが可能となり、順逆工程統合生産システムの基盤において、リサイクラーブルコンクリートの存在が重要な位置を占めるようになるといえる。

6.2 ペースト界面との易分解を可能にする骨材の開発

6.2.1 背景と目的

コンクリートを高強度化するためには、基本的にはセメントマトリックス自身を高強度化し、その容積割合を増加させることが検討可能であるが、その他にも考慮すべき要因は多く存在して、粒形が角張っている骨材を優先選択し、セメントマトリックスとの機械的な噛み合わせ力を保持しやすくする手法や、骨材とセメントペーストとの付着性を向上させるために、骨材表面もしくはその周辺部にポリマーを介在させる手法なども挙げられる[7-10]。このように、骨材とセメントペーストとの界面付着を物理的および化学的な手法により強固にすることは、コンクリートの力学特性の支配的要因にはならないものの、影響因子として重要となることが明らかである。

本章では、コンクリートの力学特性に対し、骨材界面性状が適度に影響を及ぼす性質を応用し、経済性、使用性、環境安全性を考慮した上で、コンクリートの力学特性に過度の低下が生じない程度に、骨材マトリックス間の付着力を低減する骨材改質処理方法を提案するものである。

最初に 6.2.2 の「骨材表面の改質処理方法」において、原骨材とペースト界面との易分解性を可能とする改質処理剤を抽出し、その特性および界面剥離効果について検討する。続いて、6.2.3 の「骨材表面の改質実験」において、国内で構造用コンクリートの構成材料として一般的に使用される骨材を中心に、表面物性を調査し、表面改質処理を施した場合の特性を評価する。続いて、6.2.4 の「骨材表面の吸水率低減効果」において、改質処理剤が骨材界面剥離効果を発現する際には、骨材界面における水分の吸収性や遮蔽性が付着性状に影響するという観点から、モルタル硬化体を基礎材料として用いて、改質処理を施した場合の吸水率低減効果を評価する。そして、最後に、6.2.5 の「骨材モデルの曲げ付着強度」において、骨材とセメントペーストとの付着状態を模擬したモデル試験体を用いて、改質処理剤の種類および処理回数と曲げ付着強度との関係を調査し、コンクリートに使用する改質処理骨材としての基礎的性質を明確にする。

6.2.2 骨材表面の改質処理方法

表6.2.1および表6.2.2に本研究で提案する骨材回収型リサイクル指向コンクリートにおける改質処理方法について示す。なお、提案する2つの改質処理方法の原料自体は、建築材料として一般的に使用されているものであり、人体および生活環境に有害となるものは含まれないそれ自体が安定な物質である。以下に2つの改質処理方法について概説する。

方法1は、合板・木製型枠用の水溶性剥離剤を原料とする、鉱物油、油脂などを主成分とした水溶性エマルジョン溶液であり、油膜およびアルカリ金属塩の介在により骨材界面におけるセメント水和物の生成を抑制し、遷移帯の間隙を増長させることでペーストと骨材との付着力を化学的に低減することが期待できるため「化学改質処理法」と呼ぶこととする。使用方法は、水道水で10%程度に希釈して改質処理剤としたものを、骨材に対し散水する方法で塗布することが可能である。なお、改質処理剤の粘性は水道水とほぼ同等であるため、塗布の作業性が優れている。改質処理骨材の使用・保管方法は、塗布されたエマルジョンに含まれる水分が蒸発した時点で使用可能であり、その後は被膜が安定し再乳化して溶出することはないため、プラントにおける表乾骨材を保管する状況と同様の管理

が可能であると思われる。

方法2は、コンクリートの摩耗処理、打継処理、表面強化剤などに使用される合成樹脂エマルジョン溶液を原料としたものであり、骨材全体の形状に影響しない微細レベルで骨材表面を平滑化する固化膜を形成することで、骨材界面とセメント水和物間に発生する機械的な付着力を物理的に低減することが期待できるため「物理改質処理法」と呼ぶこととする。使用方法は、水道水で20%程度に希釈して改質処理剤とするが、粘性が水道水とほぼ同等となるため、化学処理法と同様に骨材群に対し散水する形で塗布することを可能にする。改質処理骨材の使用・保管方法についても、化学処理法とほぼ同様にエマルジョンに含まれる水分が蒸発した時点で使用可能であり、その後は被膜が安定し再乳化して溶出することはないため、プラントにおける表乾骨材を使用・保管する状況と同様な管理が可能であると思われる。

表6.2.1 骨材回収型リサイクル指向コンクリートにおける改質処理方法とその効果（方法1）

| 概要 | | | |
|-----------|--|--|---------------|
| 方法1 | 化学改質処理法 | | |
| 一般名称 | 合板木製型枠用-水溶性表面剥離剤 | | |
| 化学名 | 混合物 | | |
| 主要成分 | 鉱物油 | C_nH_{2n+2} (パラフィン系直鎖炭化水素化合物など) | 含有量 85-95% |
| | 乳化剤 | $C_nH_m-COO-C_3H_5$ (ポリグリセリン脂肪酸エステルなど) | --- |
| | ワリン脂肪酸塩 | $C_nH_m-COO-R$ (ステロールと分枝脂肪酸のエステル化合物の塩化物質 R:アルカリ金属) | --- |
| 骨材改質処理効果 | 改質処理剤は、鉱物油、油脂を主成分としている。鉱物油における親油基を含む分子群は、セメント水和物とは表面エネルギーの差に基づく非接触状態を確保する。油脂に含まれるエステル系化合物は、コンクリート中の金属イオン存在下で、アルカリ条件における加水分解を起こし、不溶性アルカリ金属塩（金属セッケン）および酸を生成する。改質骨材の微細界面では主にこれらの反応・状態により、通常のセメント水和物の生成は抑制され、遷移帯の空隙が増長し骨材との付着力を化学的に低減する。なお化学組成および効果発生メカニズムによりコンクリート中で持続的な効果が期待できるといえる。 | | |
| 原料の理化学的性質 | 外観 | 黄褐色透明溶液（但し、使用時は乳化作用により白濁化） | |
| | 密度 | 0.9g/ml（但し、使用時は低濃度で水溶液化するため、水の密度と同等になる） | |
| | 酸化性 | なし | |
| | 可燃性 | あり（但し、使用時は低濃度で水溶液化するため、可燃性はなし） | |
| | 自然発火性 | なし | |
| | 自己反応性 | 安定であり、危険な重合物を生成しない | |
| | 皮膚腐食性 | なし | |
| | 刺激性 | 皮膚に対し、弱刺激あり（但し、使用時は低濃度で水溶液化するため、なし） | |
| | 発癌性 | なし | |
| | 特徴 | <p>鉱物油に品質の安定しているエステル系新油を混合し、活性剤、脂肪酸などの添加剤を1～30%程度加えた水溶性エマルジョンである。鉱物油は原油を生成する過程で抽出される天然資源であり、機械オイルの中でも製油・品質調整に要する製造負荷が小さく価格が安価である。剥離剤として用いる場合、ベースオイルおよび添加剤の種類・使用量により剥離性能に差がある傾向がある。乳化剤は雨水が流入しても溶解・再乳化しにくい性質が確保されている。</p> <p>(備考)</p> <p>*1 ラノリン ステロールと高級脂肪酸であるオレイン酸などに代表される分枝脂肪酸からなるエステルである。羊毛から抽出される油分でもあり、分子内に環状構造を持つため油分の屈折率が高く光沢に優れ、適度な粘度が保持されるため安定性に優れる。</p> <p>*2 ステロール 分子鎖の第3位に水酸基を持つ炭素数27～29のステロイドの総称である。遊離状、エステル型、配糖体等の形で、動物界に幅広く分布し、生体膜の重要な構成成分でもある。一般に、動物ステロールとして、コレステロールが、植物ステロールとして、シトステロール、カンバステロール等が、また菌類ステロールとして、エルゴステロール等がある。</p> <p>*3 ステロイド 人間の体にあるホルモン的一种で、腎臓の上端に左右一対存在する副腎皮質などから分泌される。ステロイド剤を長期間摂取し続けると、副腎皮質が機能低下して体内でつくられるホルモンの量が減る弊害を生じる場合がある。</p> | |

表6.2.2 骨材回収型リサイクル指向コンクリートにおける改質処理方法とその効果（方法2）

| 概要 | | | |
|-----------|--|---|---------------|
| 方法2 | 物理改質処理法 | | |
| 一般名称 | コンクリート表面強化剤（レイタンス処理、耐摩耗性強化処理、防塵処理等） | | |
| 化学名 | アクリル変性スチレン-ブタジエン系共重合体ラテックスおよびポリアクリル酸エステル | | |
| 主要成分 | アクリ変性スチレン-ブタジエン系共重合ラテックス | $\left(\begin{array}{c} -\text{CH}_2-\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2- \\ \\ \text{C}_6\text{H}_5 \end{array} \right)_n$ | 含有量 85-95% |
| | ポリアクリル酸エステル | $\left(\begin{array}{c} -\text{CH}_2-\text{CH}- \\ \\ \text{OCOR} \end{array} \right)_n \text{ (アルキル基)}$ | --- |
| | 界面活性剤 | $\text{C}_n\text{H}_m\text{COOH}$, $\text{C}_n\text{H}_m-\text{COO}-\text{R}$ (脂肪酸、樹脂酸セッケンなど、R:アルカリ金属) | --- |
| 骨材改質処理効果 | 改質処理剤は、コンクリートの摩耗処理・打継処理等に使用される合成樹脂系エマルジョン溶液であり、接着被膜の形成が容易であり、セメント水和物中で安定である。骨材表面の凹凸面、微細空隙は、改質処理剤が付着または充填し、骨材全体の形状に影響しない微細界面レベルで骨材表面は平滑化する。結果、骨材界面とセメント水和物間に発生する機械的な付着力を物理的に低減する。なお化学組成および効果発生メカニズムによりコンクリート中で持続的な効果が期待できるといえる。 | | |
| 原料の理化学的性質 | 外観 | 乳白色液体 | |
| | 密度 | 1.0 (g/ml) | |
| | 酸化性 | なし | |
| | 可燃性 | なし | |
| | 自然発火性 | なし | |
| | 自己反応性 | 安定であり、危険な重合物を生成しない | |
| | 皮膚腐食性 | なし | |
| | 刺激性 | なし | |
| | 癌原性 | なし | |
| | 特徴 | <p>塗膜防水材料、汎用ゴムおよび接着剤の原料となる。接着被膜の形成が容易であり、その柔軟性を生かして熱膨張係数の異なる異種材料の接着も可能とする。接着剤として使用した場合は、物体間に生じる応力緩和効果も期待でき、低温時においても脆化することなく柔軟性を維持することができる。曲げ応力、衝撃、振動を受ける被着材の接着に対する抵抗性が高い</p> <p>(備考)</p> <p>*1 アクリル 伸び性、ひび割れ抵抗性、耐水性、耐熱耐寒性等に優れ、塗膜としての耐候性、接着性も優れる。塗布乾燥の繰り返しで、毛細管圧により細密重点になるようにポリマーが変形し、相互融着して平板になる特性を有している</p> <p>*2 アクリル系エマルジョン樹脂 アクリル酸エステルもしくはメタクリル酸エステルを主成分とする高分子であり、炭素数が4以上のアルキル基を持つエステルを使用する。アクリル酸ブチルなどのアクリル酸エステルモノマー、アクリル酸モノマー、あるいは、スチレン、酢酸ビニルなどのビニル系モノマーを2~3種類組み合わせ、乳化剤および反応起剤により乳化重合し、安定剤などを加えて樹脂とする。アルキル基炭素数の増加に伴い、伸び性能、温度特性、加水分解抵抗性が向上する。塗膜防水剤には、ポリアクリル酸エステルを主成分とするものがあり、アルキル基の結合状態により性質を変化させて利用する。なおアクリル繊維モノマーであるアクリルニトリルとは相違する。</p> <p>*3 スチレン 別名ビニルベンゼン、フェニルエチレンであり、ビニル基の官能基にベンゼンが結合してできる。塗膜防水として使用され、粘性が低く空隙に含浸して充填や撥水を促す性質がある。</p> <p>*4 SBR スチレンとブタジエンが共重合したラテックスであり、水溶性のディスパーションである。モノマーのスチレンとブタジエンを脂肪酸や樹脂酸セッケンを乳化剤として水中分散させ、触媒により乳化重合させて合成する。ラテックスは、スチレン量に比例して分子間力が増加して強度が増す性質があり、建築の塗膜防水材料には、結合スチレン量が50%程度のSBRが一般的である。</p> | |
| | (アクリル変性スチレン-ブタジエン系共重合体ラテックス) | (ポリアクリル酸エステル) | |
| | ①エチレンの付加重合により共役二重結合をもつブタジエンを生成 | ①アルキルのカルボン酸化により不飽和カルボン酸を生成 | |
| | $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}_2$ | $\text{C}_n\text{H}_{2n+1} \rightarrow \text{C}_n\text{H}_{2n+1}\text{COOH}$ | |
| | ②スチレンとブタジエンの共重合によりスチレンブタジエンラテックスを生成 | ②グリセリンによるエステル化によりアクリル酸エステルを生成 | |
| | $\text{CH}=\text{CH}_2 + \text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}_2 \rightarrow \left(\begin{array}{c} -\text{CH}_2-\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2- \\ \\ \text{C}_6\text{H}_5 \end{array} \right)_n$ | $\text{C}_n\text{H}_{2n+1}\text{COOH} + \begin{array}{c} \text{CH}_2-\text{OH} \\ \\ \text{CH}-\text{OH} \\ \\ \text{CH}_2-\text{OH} \end{array} \rightarrow \begin{array}{c} n\text{CH}_2-\text{CH} \\ \\ \text{OCOR} \text{ (アルキル基)} \end{array}$ | |
| | | ③アクリル酸エステル付加重合によりポリアクリル酸エステルを生成 | |
| | | $n\text{CH}_2-\text{CH} \rightarrow \left(\begin{array}{c} -\text{CH}_2-\text{CH}- \\ \\ \text{OCOR} \end{array} \right)_n$ | |

6.2.3 骨材表面の改質実験

骨材回収型リサイクル指向コンクリートとするための必要条件となる2種類の改質処理方法に関する各種骨材への適用性を検討する。国内産の岩石を起源とし、構造用コンクリートの骨材となる可能性のある全10種類の骨材を選定し、その表面物性を調査した後に、過去から現在に至るまで、一般的に使用されてきたもの、将来においてその安定した使用性が確保されるものおよび、資源賦存量が希少であり将来において資源循環性を確保する必要性が考えられるというような条件に合致する骨材を任意で抽出し、それらを汎用型骨材と位置づけ、それらに対し表面改質処理を施し、表面特性を詳細に調査した。

(1) 使用材料

表 6.2.3 に本実験における使用材料を示す。全10種類の骨材は、その成因分類により火成岩系、堆積岩系および変成岩系に分けられる。最終的に抽出した汎用型骨材は、硬質砂岩碎石(S)、砂岩系砂利(G)、および石灰石碎石(L)とし、これらに化学処理および物理処理を施して改質処理骨材を製造した。なおこれらを抽出した理由は、硬質砂岩碎石については、日本の国土が、古来からの造山運動に伴ない、発達した勾配のある山岳地域が多数存在する地形特性に起因して、流速が早く流域面積の広い河川がいくつ也存在し、それらが砂岩質で構成される良質の堆積層を生み出す原因となった結果、全国規模で砂岩系岩石の確保が可能になったことによる。砂岩系砂利に関しては、その組成は砂岩系碎石と同様で優れたものが多く、過去において構造物に大量に使用された結果、昨今では、高品質再生骨材の製造技術[11-13]により、再び構造用コンクリートの材料としてコンクリート塊から回収することが期待できる骨材であることによる。石灰石碎石に関しては、国内にはカルサイト系の良質な石灰岩が比較的多く賦存しており、構造用コンクリートに使用可能であること、また化学組成を考慮すると、将来的に完全リサイクルコンクリート[5]の基礎的な構成材料として循環使用が期待されることによる。

(2) 実験方法

表 6.2.4 に実験項目および方法について示す。全骨材およびその改質処理骨材を対象として、高解像度デジタルマイクロ顕微鏡を使用した骨材表面観察試験、超深度形状測定顕微鏡を使用した深度測定試験、空隙径測定試験および表面粗さ測定試験を行った。続いて、改質処理回数が表面粗さに及ぼす影響を詳細に把握するため、抽出した3種類の特定骨材を対象に、処理レベルを3段階（0回、1回、3回）に設定し、その表面粗さを算定し、骨材特性と改質処理方法・回数との関係を比較検討した。

表 6.2.3 使用材料

| 種類 | 内容 | 備考 |
|----------------|---|---|
| セメント | 普通ポルトランドセメント | 密度 3.16(g/cm ³) |
| 原骨材 | 火成岩系：安山岩、玄武岩、粗粒玄武岩、花崗岩 堆積岩系：砂岩(硬質砂岩碎石、砂岩系砂利) 泥岩(千枚岩、粘板岩)、石灰岩 変成岩系：結晶片岩 | 骨材表面観察試験用(全10種) 骨材表面深度測定試験用(全10種) 骨材表面空隙径測定試験用(全10種) 表面粗さ測定試験用(全10種) |
| 改質骨材 (化学処理) | 原骨材：石灰石碎石(L)、硬質砂岩碎石(S)、 砂岩系砂利(G) | 骨材表面観察試験用(全3種) |
| 改質骨材 (物理処理) | 原骨材：石灰石碎石(L)、硬質砂岩碎石(S)、 砂岩系砂利(G) | 表面粗さ測定試験用(全3種) |

表 6.2.4 実験項目および実験方法

| 試験項目 | 方法 | 備考 |
|----------|------------|---|
| 骨材表面観察試験 | --- | 高解像度デジタルマイクロ顕微鏡により全 10 種類の原骨材、改質処理骨材の表面性状（空隙充填度、表面平滑度）を観察 |
| 深度測定試験 | --- | 超深度形状測定顕微鏡により全 10 種類の原骨材表面における任意範囲における最大深度 3 点を 3 箇所測定し平均最大深度を求める。 |
| 空隙径測定試験 | --- | 超深度形状測定顕微鏡により全 10 種類の原骨材における最大深度をとる空隙径を測定する。 |
| 表面粗さ測定試験 | JIS B 0601 | 超深度形状測定顕微鏡により全 10 種類の原骨材および改質処理骨材の粗さ曲線の測定と算術表面粗さ Ra の算定、特定骨材の処理回数と粗さ曲線に基づく算術平均粗さ Ra の関係を求める。なお、算術表面粗さは以下で求める。 $Ra = \frac{1}{L} \int_0^L f(x) dx$ ここに、Ra(μm)：算術平均粗さ、L(mm)：測定長さ(10mm)、f(x)：粗さ曲線 |

| 項目 | 内容 | |
|--------|--|--|
| 名称 | 超深度形状測定顕微鏡 | 高解像度デジタルマイクロ顕微鏡 |
| 用途 | 表面形状、表面空隙径、空隙深さ | 表面状態の観察 |
| 特徴 | レーザー光学原理とデジタル画像処理を導入し、微細骨材界面の形状測定を行い、超深度凹凸面画像を高解像度で再現する。 | プログレッシブデジタル画像処理を導入し、微細骨材界面の表面状態を高解像度で連続撮影が可能とする。 |
| 倍率 | 200~8000 倍 | 0~3000 倍 |
| 測定範囲 H | 129~1290 μm | 100 μm~ |
| 測定範囲 V | 97~970 μm | 80 μm~ |
| 最小分解能 | 0.01 μm | --- |
| 撮像素子 | 1/3インチ CCD イメージセンサ | 1/2インチ 150 万画素 CCD イメージセンサ |

(3) 結果および考察

表 6.2.5 に実験試料の分類と表面特性を、図 6.2.1 に各種骨材の平均最大深度を、図 6.2.2 に各種骨材の平均最大空隙径を、図 6.2.3 に各種骨材の算術表面粗さを示す。

抽出した全 10 種類の骨材は、成因区分による分類から偏りなく抽出しているが、堆積岩系の骨材が若干多いといえる。また、成因により表面性状に限らず、その他の物理的特性および化学的特性に、大きな差異があると考えられ、中でも改質処理効果に影響する平均最大深度に関しては、全試料は 35~598 μm の範囲の深度が存在し、骨材種により大きく差が発生する性質であるといえる。汎用型骨材である石灰石碎石と砂岩系砂利は、比較的小さい値を有する部類に属している。

最大深度をとる場合の平均空隙径に関しては、その値は 27~56 μm の範囲にあり、全種類を通じてその空隙の並び方、分布割合には特徴的な規則はないと考えられる。骨材表面の空隙形状は、深度が深く孔径が小さい細長い窪みが表面にランダムに分布するような性状になっていることが確認された。なお、汎用型骨材である石灰石碎石は、平均空隙径が 31.2~41.6 μm 程度であり、空隙径のばらつきが小さい部類であることが確認された。

粗さ曲線から求めた算術表面粗さに関しては、測定値が 29~116 μm の範囲にあり、骨材種による差が大きいといえる。火成岩系の骨材であり、一般的に組織の一部が結晶化して、骨材強度が大きくなる花崗岩、安山岩、玄武岩などは、目視による観察実験においても表面凹凸が著しく、形状に角張りがあることが容易に確認され、算術表面粗さの値も総じて大きく、粗い評価がなされている。汎用型骨材である砂岩系砂利は、最も小さい値である 33.7 μm を示しており、河川などにおいて流下する過程で、骨材表面にすりもみ力が作用して平滑化したものと考えられる。

写真 6.2.1 に試料である骨材の全体写真を、写真 6.2.2 に高解像度デジタルマイクロ顕微鏡により撮影した微小区間(100 μm/div)における原骨材界面写真を、写真 6.2.3 に物理改質処理(1 回)を施した骨材界

面写真を示す。超深度形状測定顕微鏡を使用して、測定した空隙深さ、空隙径などの定量データを考慮した上で、改質処理剤を骨材表面に塗布して、表面空隙や凹凸部が平滑化する状況を観察した。なお化学処理の場合、油分が骨材表面に付着する状態で被膜化しており、骨材種および処理回数による塗布性状の差が微小区間(100 μ m/div)における顕微鏡写真からは判断されないことや、表面凹凸の深度が大きいため、画像が不鮮明になることなどにより、改質処理状態は、物理改質処理(1回)の場合を代表して示すとした。改質処理の表面状態から、処理回数に比例して、乳白色がかった被膜により骨材表面が平滑化することが確認され、3回処理程度になると骨材の凹凸はほとんど確認されなくなることがわかった。なお、この場合も粒子レベルでの骨材形状は保持されており、骨材表面の微細な凹凸を平滑化する処理の程度であることが明確になった。

表 6.2.6 実験試料の分類と表面特性

| 大分類 | 中分類 | 小分類 | 造岩鉱物 | 算術表面粗さ Ra (μ m) | 平均最大進度 (μ m) | 最大空隙径 範囲(μ m) | |
|------|------|----------------|---|-------------------------|----------------------|-----------------------|-------|
| 火成岩 | 火山岩 | 流紋岩 | 石英(無色) 斜長石(無色) 正長石(無色) 黒雲母(有色) 角閃石(有色) 輝石(有色) かん石(有色) | 87.7 | 324 | 15-39 | |
| | | 安山岩 | | 60.7 | 247 | 29-38 | |
| | | 玄武岩 | | 28.8 | 300 | 31.2-46.8 | |
| | | 細粒玄武岩 粗粒玄武岩 | | | | | |
| | 半深成岩 | 石英斑岩 | | | | | |
| | | ヒン岩 | | | | | |
| | | 輝緑岩 | | | | | |
| | 深成岩 | 花崗岩 | | | 116 | 545 | 31-49 |
| | | セン緑岩 | | | | | |
| | | 斑レイ岩 | | | | | |
| 超塩基岩 | | | | | | | |
| 堆積岩 | 砕屑岩 | 砂岩 | 白雲母 方解石 緑泥石 磁鉄鉱 ザクロ石 リン灰石 赤鉄鉱 キン青石 紅柱石 ケイ線石 | 78.3 | 429 | 28.0-57.2 | |
| | | 硬質砂岩) | | 33.7 | 35.3 | 28.6-49.4 | |
| | | 砂利 | | 84.6 | 248 | 31.2-41.6 | |
| | 泥岩 | 粘板岩 | 113.2 | 598 | 41.6-70.2 | | |
| | | 千枚岩 | | | | | |
| | 火山砕屑 | 凝灰岩 | | | | | |
| | | 凝灰角レキ岩 | | | | | |
| | | サンゴ石灰岩 | | | | | |
| | 生物岩 | けい藻土 | | | | | |
| | | 紡錘中石灰岩 | | | | | |
| 化学岩 | 石灰岩 | | | 80.6 | 172 | 31.2-41.6 | |
| | 石こう | | | | | | |
| | 岩塩 | | | | | | |
| | チャート | | | | | | |
| 変成岩 | 広域変成 | 片麻岩 | 石英 長石 黒雲母 緑泥石 | | | | |
| | | 結晶片岩 | | 116.3 | 420 | 31-59 | |
| | 接触変成 | 原堆積岩 | | | | | |
| 原石灰岩 | | | | | | | |

測定試料

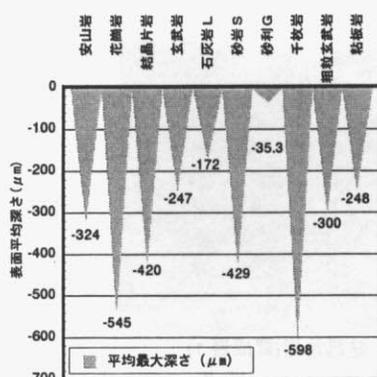


図 6.2.1 骨材表面の平均最大深度

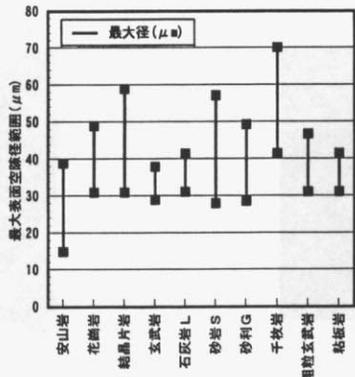


図 6.2.2 骨材表面の平均最大空隙径

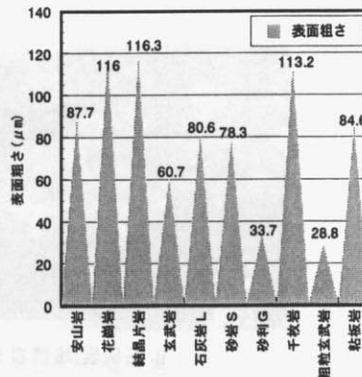
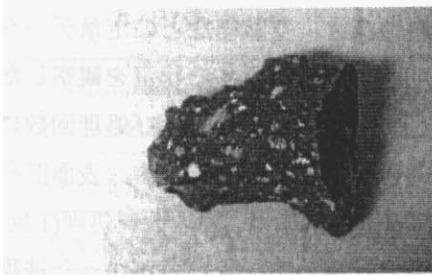
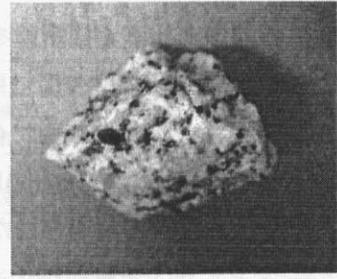


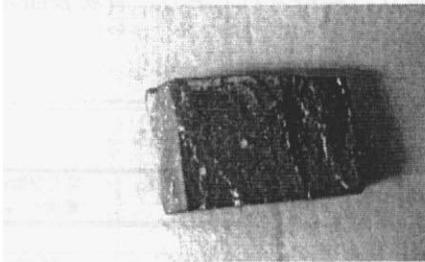
図 6.2.3 骨材の算術表面粗さ



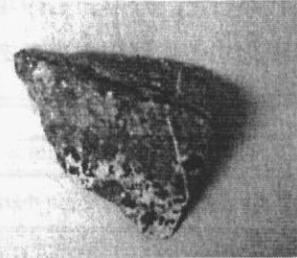
a) 安山岩(火成岩 1)



b) 花崗岩(火成岩 2)



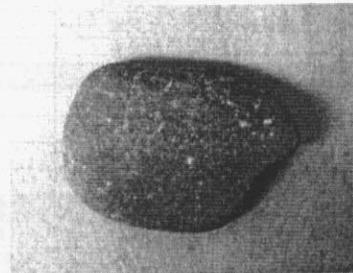
c) 玄武岩(火成岩 3)



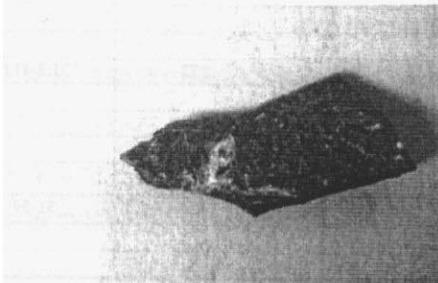
d) 粗粒玄武岩(火成岩 4)



e) 砂岩(堆積岩 1)



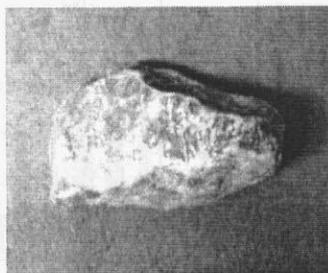
f) 砂利(堆積岩 2)



g) 千枚岩(堆積岩 3)



h) 粘板岩(堆積岩 4)

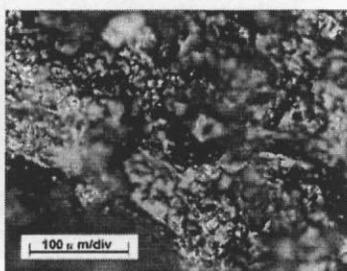


i) 石灰岩(堆積岩 5)

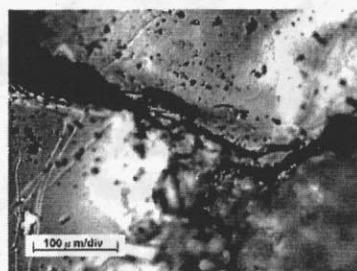


j) 結晶片岩(變成岩 1)

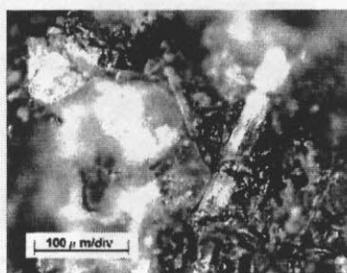
写真 6.2.1 原骨材—全体写真



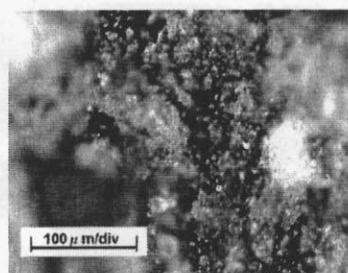
a) 安山岩(火成岩 1)



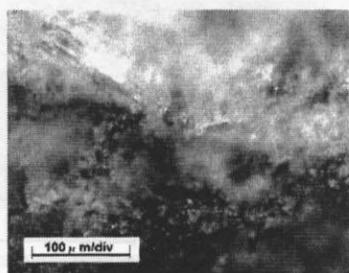
b) 花崗岩(火成岩 2)



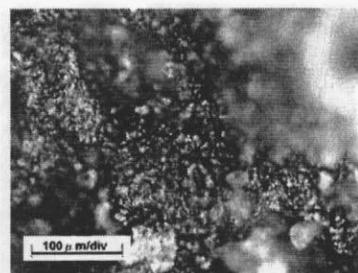
c) 玄武岩(火成岩 3)



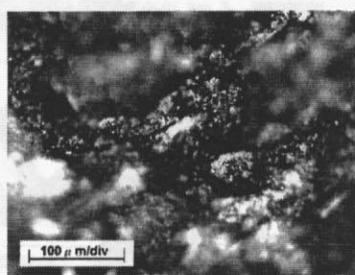
d) 粗粒玄武岩(火成岩 4)



e) 砂岩(堆積岩 1)



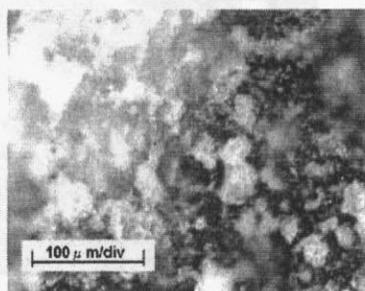
f) 砂利(堆積岩 2)



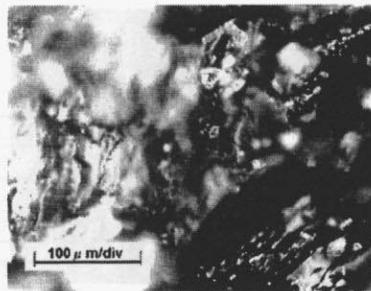
g) 千枚岩(堆積岩 3)



h) 粘板岩(堆積岩 4)

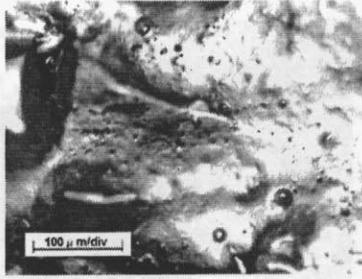


i) 石灰岩(堆積岩 5)

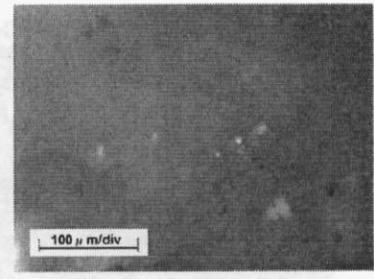


j) 結晶片岩(變成岩 1)

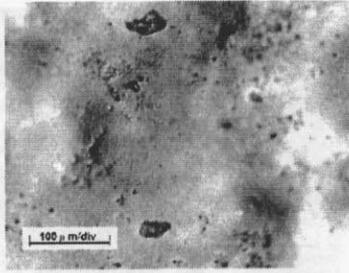
写真 6.2.2 原骨材—拡大写真(scale 100 μm/div)



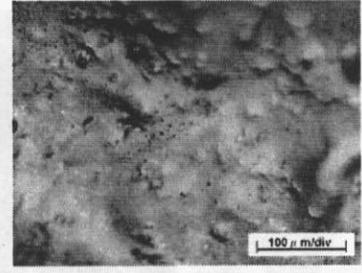
a) 安山岩(火成岩 1)



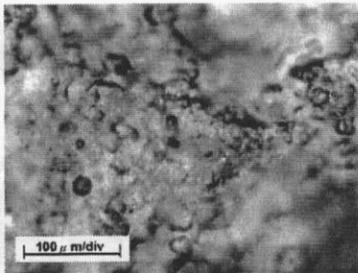
b) 花崗岩(火成岩 2)



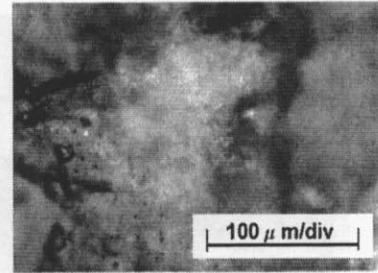
c) 玄武岩(火成岩 3)



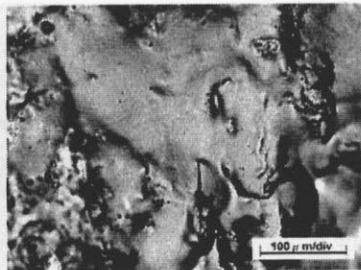
d) 粗粒玄武岩(火成岩 4)



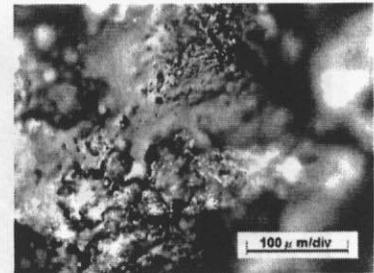
e) 砂岩(堆積岩 1)



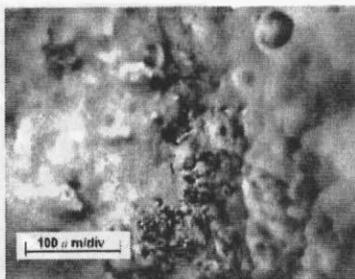
f) 砂利(堆積岩 2)



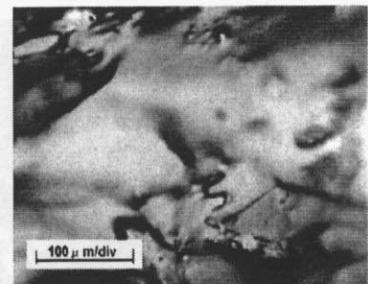
g) 千枚岩(堆積岩 3)



h) 粘板岩(堆積岩 4)



i) 石灰岩(堆積岩 5)



j) 結晶片岩(変成岩 1)

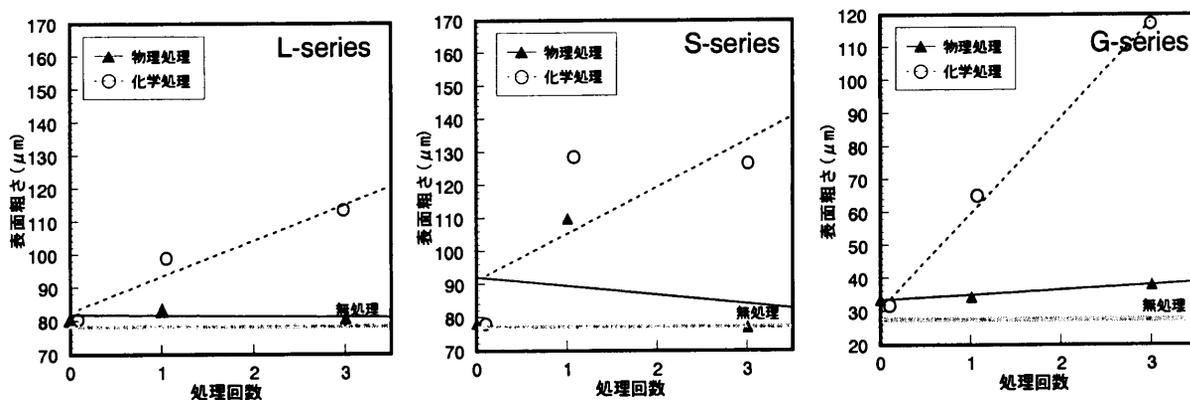
写真 6.2.3 改質处理骨材一拡大写真 (物理处理 1 回 scale 100 μm/div)

続いて、汎用型骨材である石灰石碎石(L)、硬質砂岩碎石(S)および砂岩系砂利(G)について、化学処理および物理処理により改質処理骨材を製造し、その表面粗さと処理回数との関係を具体化した。図 6.2.4 に汎用型骨材における改質処理方法、回数と表面粗さ Ra との関係を示す。

無処理の場合の算術表面粗さ Ra は、L および S に関しては、80 μm 程度で同等であるが、G は 30 μm 程度であり、より平滑な面が形成されているといえる。これに対し、物理処理を施した場合は、大きく表面粗さが低下することなく原骨材固有の粗さを保持した上で、樹脂による被膜を骨材表面に形成するものといえるが、化学処理を施した場合は、算術表面粗さ Ra は塗布回数に比例しており、骨材種類に関係なく 3 回処理で 130 μm 程度の表面粗さの値を示すようになる。これは、骨材表面の油膜に骨材表面を平滑化する作用がないことを間接的に示すものであり、高解像度デジタルマイクロ顕微鏡での観察結果において骨材種の表面性状が反映されにくい凹凸のある油膜面が形成されていることから判断できる。

本章で提案する 2 通りの改質処理方法は、その物質に備わる化学的性質に加え、骨材表面の被膜状態の差異により、各々で想定される改質処理効果を発現することが期待できるといえる。

なおセメントが水和反応する過程において、骨材とペースト間の遷移帯は徐々に水和生成物により充填されその間隙は小さくなると考えられる。一般的に遷移帯厚さは 50~100 μm 程度と考えられるため [26]、遷移帯を膜状物質としてみなした場合、骨材表面は薄い遷移帯被膜が取り巻く形になるといえるが、各種骨材についてその最大深度範囲は 35~598 μm の範囲で存在し、最大深度をとる場合の平均空隙径は 27~56 μm の範囲で存在する形状特性を考慮すると、遷移帯被膜は、骨材表面の凹凸の形状を保持しながら被膜を形成するものと考えられる。従って、骨材形状を保持しつつ骨材界面に発達する水和生成物を低減する被膜を形成することや、骨材表面に存在する空隙改質処理剤で充填し微細表面全体を平滑化する被膜を形成することは、コンクリートの過度な強度低下を発生させないで骨材とペーストとの付着を低減する手法として適度な条件を備えたものであると説明することができる。



| 改質処理方法 | 石灰石碎石(L-series) | | | 硬質砂岩碎石(S-series) | | | 砂岩系砂利(G-series) | | |
|-----------------------|-----------------|------|------|------------------|-----|------|-----------------|------|------|
| | 0回 | 1回 | 3回 | 0回 | 1回 | 3回 | 0回 | 1回 | 3回 |
| 化学処理(μm) | 81 | 99.5 | 114 | 78.3 | 130 | 128 | 33.7 | 67 | 119 |
| 物理処理(μm) | 80.6 | 83.4 | 80.5 | 78.3 | 110 | 77.1 | 33.7 | 34.4 | 38.1 |

図 6.2.4 汎用型骨材における改質処理方法・回数と表面粗さ Ra の関係

6.2.4 骨材表面の吸水率低減効果

2系統の改質処理方法により、骨材界面剥離効果を発現する際には、骨材表面の被膜による水分移動の遮蔽性が骨材とセメントペーストとの付着性状に大きく影響を及ぼすものと考えられる。従って、骨材表面の吸水率低減性は、骨材界面剥離効果の発現性を確認するための重要な評価指標となる。なお本研究の場合、改質処理骨材の吸水率は、被膜の形成によりその値が低下するものと予想される。本節では、水セメント比により吸水率を変化させたセメントモルタル硬化体による模擬骨材を用いて改質処理骨材を製造し、吸水率低減性を評価する。

(1) 試験体概要

表6.2.7に吸水率低減性を評価する使用材料について示す。模擬骨材となるセメントモルタルは、水セメント比が0.2～0.6までの5水準とし、一般的なコンクリートの調合における粗骨材を除いた部分のモルタルと同程度の調合となるように調整した。試験体寸法は、コンクリート塊から得られる最大粒形が20mm程度の再生骨材を模擬し、20mm×20mm×20mmの立方体の試料とした。それらに対し、物理処理および化学処理による改質処理を施して、改質模擬骨材を製造した。なお比較用として、防水性および水密性に優れ、建築用補修用材料や屋根用防水材料などに使用されるエポキシ樹脂およびスチレン樹脂による改質模擬骨材についても検討した。

(2) 実験方法

全5種類の模擬骨材により吸水率低減性を評価する。改質骨材は、温水養生（60℃）で28日間養生した模擬骨材を105℃で24時間乾燥させた後に、4種の改質処理剤を所定回数塗布して、改質模擬骨材を製造した。続いて、24時間水中で浸漬させた後に、表面の水分をふき取り表乾重量を測定し、再び105℃で24時間乾燥させた乾燥重量を測定し、その質量変化率より吸水率を求め、吸水率低減性を評価する。

(3) 結果および考察

図6.2.5に化学処理および物理処理における改質処理回数と吸水率の関係を、図6.2.6に比較用改質骨材であり防水性および水密性が期待できるエポキシ処理およびスチレン処理における改質処理回数と吸水率の関係を示す。無処理である模擬骨材の吸水率は、水セメント比0.3で吸水率9%程度、水セメント比0.6で吸水率13%程度であり、水セメント比の増大に比例して吸水率が大きくなることが確認できる。

表 6.2.7 使用材料

| 項目 | 記号 | 性質 | 成分及び特徴 |
|----------------------|---------------------------------|---|--|
| 模擬骨材 (無処理) | N20 N30 N40 N50 N60 | セメントモルタル硬化体 W/C : 0.2,0.3,0.4,0.5,0.6 の5水準 細骨材量：粗骨材かさ容積 0.6、細骨材率 0.4 の場合に使用する細骨材量とする。 | 試験体寸法:20×20×20mm 立方体 (Gmax20mm 骨材を模擬) |
| 改質骨材 (化学処理) | C | 模擬骨材を4段階(1～4回)に分けて塗布した改質骨材 | --- |
| 改質骨材 (物理処理) | P | 模擬骨材を4段階(1～4回)に分けて塗布した改質骨材 | --- |
| 比較用改質骨材 (エポキシ樹脂系) | E | 模擬骨材を4段階(1～4回)に分けて塗布した比較用改質骨材 (建築補修用常温硬化型エポキシ樹脂) | 主剤(エポキシ基)、硬化剤(カルボン酸と7 シ縮合体)の2:1混合溶液 |
| 比較用改質骨材 (スチレン樹脂系) | S | 模擬骨材を4段階(1～4回)に分けて塗布した比較用改質骨材 (合板木製型枠コーティング用スチロール系樹脂) | ポリスチレン系樹脂シナ-希釈 |

備考) セメントは普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm³) を使用

模擬骨材に対し、化学処理を施した場合は、処理回数に比例して大幅に吸水率が低減されている。1回の処理でも吸水率は大きく低減し、2回の処理を施した段階で模擬骨材の吸水性能に関わらず吸水率は1%以下になり、硬化体への水分移動をほぼ遮断できる確認され、骨材の吸水率低減性を大きく期待することができる。化学処理に想定している改質処理効果は骨材表面における水和物の生成抑制であり、化学的な反応を直接的に低減することであるため、想定した改質処理効果が発現しているといえる。

模擬骨材に対し、物理処理を施した場合は、1回の処理で吸水率は50%程度低減するが、その後は処理回数に比例して吸水率が低減する傾向は鈍化する。物理処理に想定している改質処理効果が、骨材界面を平滑化し、微細な凹凸に起因して発生する機械的摩擦力を低減することを主目的としているため、化学処理のような吸水率低減効果は大きくは期待することはできないが、物理処理における本来の効果と兼ね合わせた付着力低減効果として認識することができる。

なお模擬骨材に対し、エポキシ処理を施した比較用改質骨材は、処理回数に比例して吸水率は低減している。スチレン処理を施した比較用改質骨材についても、更に効果的に吸水率を低減することができる。双方の改質処理剤は、化学処理剤および物理処理剤のように、エマルジョン溶液ではなく、粘性の大きい反応性溶剤であり、硬化体表面に形成される被膜厚も大きいといえる。改質処理方法としての位置づけは、物理処理と同様に界面の平滑化による付着力低減を図る方法であると位置づけられるため、処理回数に比例した吸水率低減効果が発現するようになる。

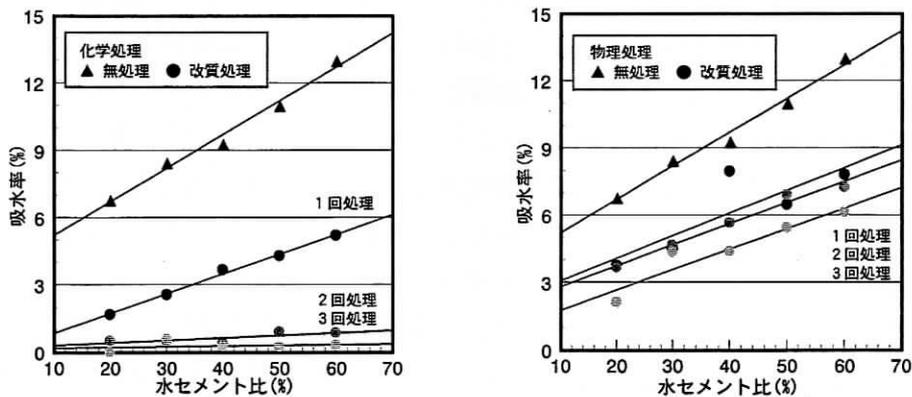


図 6.2.5 改質処理回数と吸水率の関係 (左：化学処理 右：物理処理)

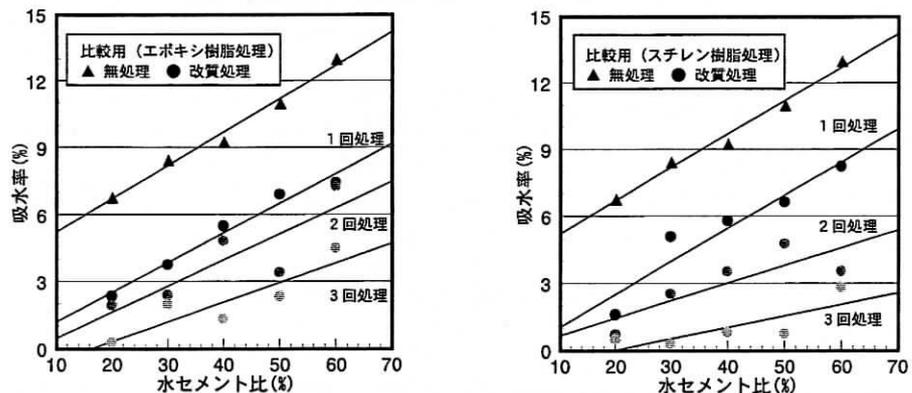


図 6.2.6 改質処理回数と吸水率の関係 (左：エポキシ処理 右：スチレン処理)

6.2.5 骨材モデル試験体の曲げ付着強度

コンクリートのひび割れは、本質的にはセメント硬化体の微細構造における引張応力下でのひび割れメカニズムが関与しており、コンクリートが安定した引張荷重の作用を受けた場合、引張強度に達した後はひび割れ面の形成に従って、耐荷重は次第に低下するものの、ある程度の抵抗性を示しながら破壊に至るという特徴[14]がある。これは、コンクリート自身がセラミックスなどの脆性材料と比較すると、ダクタイルな性質を保持しているからであり、その原因のひとつである骨材は、ひび割れ進展の際に、ひび割れアレスター効果、偏向効果、分散効果などを複合的に引き起こし、ひび割れ先端部には破壊進展領域を形成するもの[15]としている。ひび割れ近傍の破壊モードは、引張型(モードⅠ)、面内せん断型(モードⅡ)、面外せん断型(モードⅢ)の3つの型に分類されるが、実際の破壊には、これらの破壊のモードが複合的に影響する混合モード型破壊も起こる場合もある。

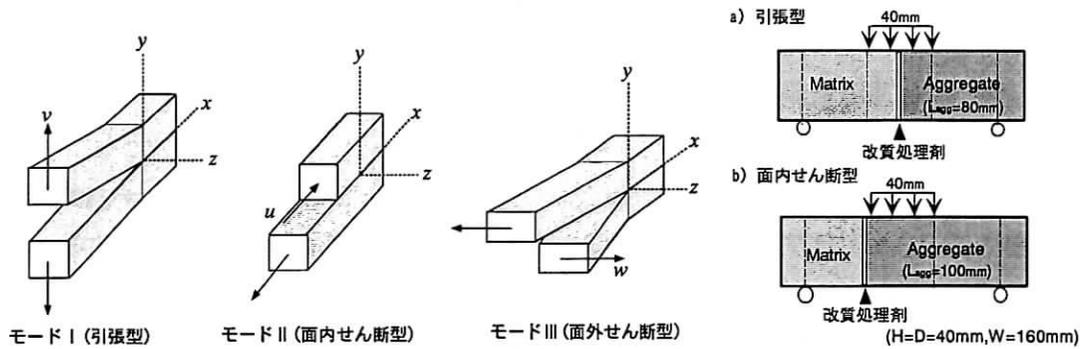
本章では、改質処理を施した骨材界面とセメントマトリックス間に発生する力学的挙動を評価するために、一般的なコンクリート用骨材の圧縮強度と同程度である骨材モデルを、高強度ペーストより製造し、改質処理面を介して、モルタル部分と接合した付着試験体を作成し、引張型および面内せん断型の破壊モードを模擬した曲げ付着強度試験を行ない、化学処理および物理処理による改質処理回数と曲げ付着強度試験による力学特性との関係を実験的に評価する。

(1)使用材料

表 6.2.8 に曲げ付着強度試験の使用材料について示す。鋼製型枠を用い、改質処理面を介して骨材モデルとモルタルモデルが接する形で成型された試料を曲げ付着強度試験体とする。試験体寸法は $40 \times 40 \times 160 \text{mm}$ である。試験体作成手順は、改質処理面の端面に押出法ポリスチレンフォームによる間仕切りを設置した後に、骨材モデルとなる水セメント比 0.18 のペーストを所定長さのみ打設し、 60°C 温水養生 (28 日間) の後に間仕切り面に改質処理を施し、モルタルモデルとなる水セメント比 0.5 のモルタルを打設・成型し試験体とした。なお、接触面は押出法ポリスチレンフォーム(B 類保温板 3 種)としたが、この場合、成型接触面における最大深度および平均空隙径はポリスチレンフォームの気泡セル直径である $200 \sim 300 \mu\text{m}$ [16]に近い表面状態になり、6.2.3 節で検討した一般的な骨材における最大深度 $35 \sim 598 \mu\text{m}$ 、平均空隙径 $27 \sim 56 \mu\text{m}$ の値よりも、若干、粗面と評価される接触面が形成されるが、改質処理効果がより明確に再現されると考え、この方法を採用した。

表 6.2.8 使用材料および試験方法

| 種類 | 内容 | 成分及び特徴 |
|---------------|--------------|---|
| セメント | 普通ポルトランドセメント | 曲げ付着試験における骨材モデルおよびモルタルモデルの原料として使用 密度: 3.16g/cm^3 |
| 細骨材 | 大井川産陸砂 | 曲げ付着試験におけるモルタルモデルの骨材原料として使用 密度: 2.54g/cm^3 吸水率: 1.94% |
| 押出法ポリスチレンフォーム | 改質面仕切り板 | JIS B 9511 に規定する B 類保温板 3 種を使用。ポリスチレンフォームを形成する気泡セル直径は $200 \sim 300 \mu\text{m}$ である |
| 骨材モデル | 曲げ付着試験用 | $40 \times 40 \times 160 \text{mm}$ 三連鋼製型枠を使用し、引張型は $160 \text{mm} \times 1/2$ 長さ、せん断型は $160 \text{mm} \times 10/16$ 長さとする 水セメント比: 0.18 圧縮強度(28 日温水養生): 123N/mm^2 |
| モルタルモデル | 曲げ付着試験用 | $40 \times 40 \times 160 \text{mm}$ 三連鋼製型枠を使用し、引張型は $160 \text{mm} \times 1/2$ 長さ、せん断型は $160 \text{mm} \times 6/16$ 長さとする 水セメント比: 0.5 圧縮強度(28 日温水養生): 123N/mm^2 |



| 試験項目 | 方法 | 備考 |
|----------|------------|---|
| 曲げ付着強度試験 | JIS R 5201 | 改質骨材とモルタル間の作用力が a)引張型および b)面内せん断型となることを模擬した曲げ付着強度試験体とする。加圧面は 40mm×40mm の等分布荷重とする。 |

図 6.2.7 破壊モード[17]と曲げ付着強度試験

(2) 実験方法

図 6.2.7 に破壊モード[17]と曲げ付着強度試験方法について示す。引張型および面内せん断型の破壊モードを模擬した曲げ付着強度試験を行ない、化学処理および物理処理による改質処理回数と引張型と面内せん断型の破壊モードとの関係を、曲げ付着強度試験により実験的に評価するとした。

なお実際のコンクリートにおける引張変形にはコンクリートの破壊がダクタイルとなる性質上、引張軟化特性が影響する。その荷重変形特性を考慮し、安定した引張型（モード I）の破壊靱性を得る試験方法としては RILEM の切欠き梁の 3 点曲げ試験方法[18]などが一般化されており、得られる荷重変位データから破壊エネルギーを求めることを可能にしている。なお引張型（モード I）での破壊靱性を精度よく測定できる他の試験方法として、コンパクトテンション(CT)試験方法[19-20]やウェッジスプリッティング試験方法（楔挿入型割裂試験）[21]があるが、本実験では曲げ付着強度試験により、改質処理効果を評価するとした。

(3) 結果および考察

図 6.2.8 に改質処理骨材モデル表面における算術表面粗さ R_a を、図 6.2.9 に曲げ付着強度試験の結果を示す。まず、骨材モデル表面における改質処理の回数・種類を考慮した算術表面粗さ R_a に関しては、無処理に対して改質処理を施した場合、改質処理回数に比例して表面粗さが小さくなっており、その傾向は、物理処理の場合に顕著であることが示された。この結果は、これまでに検討した物理処理および化学処理に関する骨材表面に及ぼす性質の結果を反映しているといえる。

曲げ付着強度試験に関しては、引張型およびせん断型試験体ともに 3 水準（0 回、1 回、3 回）の改質処理を施した試料に対し、強度試験を行った。物理処理を施した場合は、破断面における作用力によらず 1 回の改質処理で、無処理に対する 35~63% 程度の強度低下が、3 回の改質処理で 70~94% 程度の強度低下が確認された。改質処理回数に比例して、段階的に曲げ付着強度を低減することは可能であり、骨材界面が平滑化され、機械的まさえが低減する状況を反映している結果といえる。化学処理を施した場合は、破断面の作用力によらず、1 回の改質処理で無処理に対する 90% 以上の強度低下が発生することが確認され、化学処理による骨材界面でのセメントの水和反応を抑制する効果により、遷移帯を含む骨材-モルタル硬化体間の間隙は増大し、結果的に、付着力が低下する作用が得られていることが容

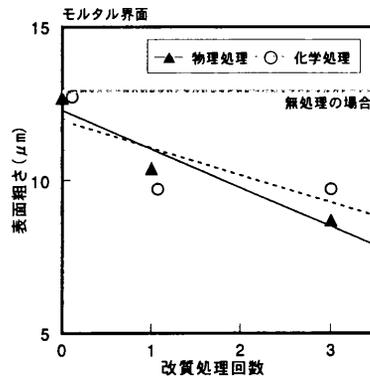


図 6.2.8 改質処理を施した骨材モデルの表面粗さ Ra

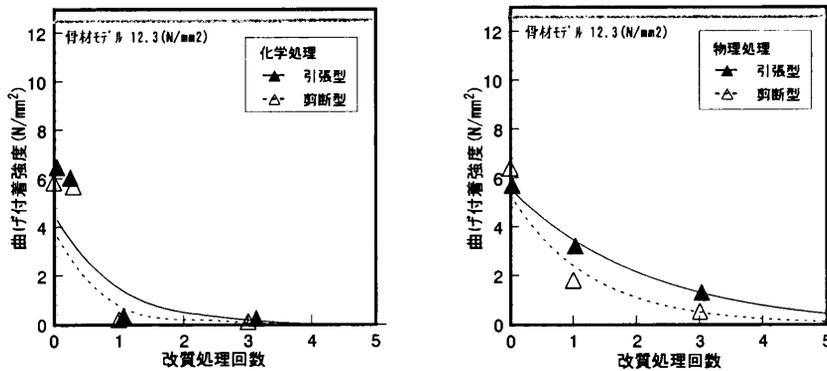


図 6.2.9 曲げ付着強度 (左: 化学処理 右: 物理処理)

易に推測できる。この結果についても、改質処理による吸水率低減効果を反映したものとなっている。

以上より、骨材回収型リサイクル指向コンクリートに必要な条件となる改質処理骨材の骨材界面剥離効果は、2系統の改質処理方法により実現できることが確かめられた。各々の改質処理方法は、目的とする改質処理効果を発現する仕組みが明確にされており、それは、改質処理剤の化学的性質、吸水率低減効果、曲げ付着強度などの諸特性から検証されたといえる。

6.2.6 まとめ

本節では、ペースト界面との易分解を可能にする骨材の検討を行った。以下に得られた知見を示す。

- 1) 骨材とペースト界面との易分解を可能にするには、骨材表面平滑化により物理的なかみ合わせに伴う付着を低減する物理処理と、水和反応の抑制により水和に伴う付着を低減する化学処理が有効である。
- 2) 2種類の改質処理により製造される改質処理骨材は、表面に薄膜が形成されるが、質量は表乾骨材とほぼ同等なものであり、改質処理回数に応じて吸水特性を制御することが可能であり、その効果は化学処理の場合に大きく期待できる。
- 3) 改質処理骨材とペーストとの付着界面を模擬した曲げ付着強度試験により、改質処理により塗布回数に応じた付着強度の低減が可能であることが示され、骨材界面剥離効果を期待することができた。

6.3 骨材回収型リサイクル指向コンクリートの基礎的性質

6.3.1 背景と目的

骨材回収型リサイクル指向コンクリートを実証するために、経済性、使用性、環境安全性を考慮した上で、コンクリートの力学特性に過度の低下が生じない程度に骨材マトリックス間の付着力を低減できる骨材改質処理方法を具体的に示した。

本節では、物理処理および化学処理により、火成岩、変成岩、堆積岩の大分類に属する各種骨材から、現在および将来的な使用可能性と形状特性を考慮して選定された石灰石砕石、硬質砂岩砕石、砂利に対し、所定回数の改質処理を行い、それらを用いて骨材回収型リサイクル指向コンクリートを製造し、その基礎的性質を確認する。

最初に、6.3.2の「コンクリートの力学特性と改質処理効果」において、水セメント比の水準を変えたコンクリートについて、圧縮強度およびヤング係数を測定し、改質処理が基礎的な力学特性に及ぼす影響を評価する。続いて、6.3.3の「コンファインドコンクリートの圧縮強度」において、改質処理によりコンクリートが強度低下を起こす場合を想定し、横補強筋比を変化させたスパイラル筋を導入したコンファインドコンクリートを製造し、補強筋による強度低下の抑制可能性を検討した。

6.3.2 コンクリートの力学特性と改質処理効果

普通強度、高強度および超高強度の3水準による骨材回収型リサイクル指向コンクリートについて、圧縮強度およびヤング係数を測定し、化学処理および物理処理による改質処理効果がコンクリートの基礎的な力学特性に及ぼす影響を評価する。

(1) 使用材料

表 6.3.1 に使用材料を示す。セメントは普通ポルトランドを使用し、細骨材は硬質砂岩砕砂で一定、粗骨材は粒形の異なる石灰石砕石(L)、硬質砂岩砕石(S)、川砂利(G)を物理処理および化学処理による改質処理(3回処理)を施した改質処理骨材とした。

改質処理方法は、表乾状態の原骨材表面に対し、改質処理剤原液を水道水で一定濃度(化学処理 10%、物理処理 20%)に希釈したエマルジョン溶液である改質処理剤を、散水用ホースを使用して均一に散布し、エマルジョン溶液の含有水を自然乾燥させて試料とする簡便な手法により改質処理を行った。

表6.3.1 使用材料

| 骨材 | 記号 | 種類 | 表乾密度 (g/cm ³) | 吸水率 (%) | 単位容積 質量(kg/l) | 実積率 (%) | 粒形判定 実積率(%) |
|-----------------|----|--------------|------------------------------|------------|------------------|------------|----------------|
| 細骨材 | S | 硬質砂岩砕砂 | 2.62 | 1.71 | 1.44 | 55.8 | --- |
| 粗骨材 L-series | Ln | 石灰石砕石(無処理) | 2.71 | 0.24 | 1.68 | 60.7 | 60.7 |
| | Lc | 石灰石砕石(化学処理) | 2.71 | 0.00 | 1.68 | 60.7 | 60.7 |
| | Lp | 石灰石砕石(物理処理) | 2.71 | 0.08 | 1.68 | 60.7 | 60.7 |
| 粗骨材 S-series | Sn | 硬質砂岩砕石(無処理) | 2.66 | 0.80 | 1.59 | 60.2 | 60.2 |
| | Sc | 硬質砂岩砕石(化学処理) | 2.66 | 0.01 | 1.59 | 60.2 | 60.2 |
| | Sp | 硬質砂岩砕石(物理処理) | 2.66 | 0.36 | 1.59 | 60.2 | 60.2 |
| 粗骨材 G-series | Gn | 砂岩系砂利(無処理) | 2.60 | 1.34 | 1.71 | 65.7 | 65.7 |
| | Gc | 砂岩系砂利(化学処理) | 2.60 | 0.01 | 1.71 | 65.7 | 65.7 |
| | Gp | 砂岩系砂利(物理処理) | 2.60 | 0.52 | 1.71 | 65.7 | 65.7 |

備考) 普通ポルトランド (密度: 3.16 g/cm³)

改質処理骨材は、化学処理、物理処理ともに表面水が蒸発した後の密度は、原骨材とほぼ同等であり、有効数字3ケタで評価される密度値として反映されない程度の質量である薄膜が形成されている。なおその程度は処理回数に比例する。吸水率は、改質処理剤の吸水率低減効果の性質が反映されており、改質処理剤の吸水率低減性に応じて値は低下し、その程度は処理回数に比例する。その他の性質として、単位容積質量、実積率、粒形判定実積率は同等であった。

(2) 実験方法

表 6.3.2 に実験要因と水準を、表 6.3.3 に骨材回収型リサイクル指向コンクリートの調合条件を、表 6.3.4 に骨材回収型リサイクル指向コンクリートの計画調合を、表 6.3.5 に実験項目および方法を示す。

骨材回収型リサイクル指向コンクリートとして、水結合材比が 0.6(普通強度 N)、0.4(高強度 H)および 0.29(超高強度 SH)の3水準を設定し、空気量およびスランプで定める調合条件を満足するようにコンクリートを作製した。なお、同一水結合材比のシリーズにおいて単位粗骨材かさ容積の目標値を碎石と砂利で区別しつつ同程度になるように定めている。これは、コンクリートのフレッシュ性状および骨材表面におけるモルタルの総接触面積が、骨材種に因らず同程度となるようにして、改質処理骨材の粒形に起因する力学特性が明確になるようにしたためである。なお、モルタルの調合は、同一水結合材で一定とし、骨材を取り囲むモルタルの性質の差が影響しないように定めた。

作製したコンクリートについてスランプ試験、空気量試験を行い、目標値の範囲内であることを確認した後標準養生し、材齢 28 日で圧縮強度試験、静弾性係数試験を実施した。なお、改質処理がフレッシュ性状に及ぼす影響に関しては本調合では特に問題とされることはなかったといえる。

表 6.3.2 実験要因と水準

| 要因 | 水準 |
|-------|--|
| 水結合材比 | 0.6(普通強度 N), 0.4(高強度 H), 0.29(超高強度 SH) |
| 細骨材 | 砂岩砕砂(S) |
| 粗骨材 | 石灰石碎石(L), 硬質砂岩碎石(S), 砂利(G) |
| 改質処理 | 無処理(n), 化学処理(c), 物理処理(p) |

表 6.3.3 骨材回収型リサイクル指向コンクリートの調合条件

| 設定 | 普通強度 N | 高強度 H | 超高強度 SH |
|----------------------------|--|--|--|
| 水結合材比 | 60 | 40 | 29 |
| 目標スランプ | 18±1.5 cm | 21±1.5 cm | 21±1.5 cm |
| 目標空気量 | 4.0±1.5 % | 2.0±1.5 % | 2.0±1.5 % |
| 単位粗骨材かさ容積 (上: 碎石 下: 砂利) | 0.62 m ³ /m ³ 0.63 m ³ /m ³ | 0.60 m ³ /m ³ 0.61 m ³ /m ³ | 0.57 m ³ /m ³ 0.58 m ³ /m ³ |

表 6.3.4 骨材回収型リサイクル指向コンクリートの計画調合

| コンクリート種類 | 水結合材比 (%) | 細骨材率 (%) | 単位水量 (kg/m ³) | 単位質量(kg/m ³) | | | | 化学混和剤使用量(C×%) | | | |
|----------|-----------|----------|---------------------------|--------------------------|--------|-----|-----|---------------|-------|-----|------|
| | | | | セメント | シカヒューム | 細骨材 | 粗骨材 | A1 | A2 | A3 | |
| N | 60 | L-series | 46.5 | 169 | 281 | 0 | 846 | 1014 | 0.002 | --- | 1.0 |
| | | S-series | 46.5 | 169 | 281 | 0 | 846 | 995 | 0.002 | --- | 1.25 |
| | | G-series | 41.0 | 168 | 281 | 0 | 749 | 1071 | 0.002 | 1.0 | --- |
| H | 40 | L-series | 41.3 | 184 | 461 | 0 | 675 | 995 | --- | --- | 1.0 |
| | | S-series | 41.3 | 184 | 461 | 0 | 675 | 976 | --- | --- | 0.75 |
| | | G-series | 35.2 | 184 | 461 | 0 | 576 | 1053 | --- | 1.0 | --- |
| SH | 29 | L-series | 40.7 | 185 | 613 | 42 | 621 | 938 | --- | --- | 1.0 |
| | | S-series | 41.7 | 185 | 613 | 42 | 629 | 912 | --- | --- | 1.0 |
| | | G-series | 34.6 | 185 | 613 | 42 | 525 | 991 | --- | 1.0 | --- |

A1: 空気量調整剤 A2: AE 減水剤(リグニンスルホン酸系化合物) A3: 高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸エーテル系化合物)

表 6.3.5 実験項目および方法

| 試験項目 | 試験方法 | 備考 |
|---------|------------|---------------------------|
| 空気量試験 | JIS A 1128 | 全ての試料について実施 |
| スランプ試験 | JIS A 1101 | |
| 引張強度試験 | JIS A 1106 | |
| 圧縮強度試験 | JIS A 1108 | 全ての試料について材齢 28 日(標準養生)で実施 |
| 静弾性係数試験 | JIS 原案 | |

(3)結果および考察

図 6.3.1 および図 6.3.2 に物理処理および化学処理による改質処理骨材がコンクリートの圧縮強度とヤング係数に及ぼす影響について示す。

全体的特徴として、コンクリートは改質処理および骨材種類に起因する特徴的な強度発現性が認められた。碎石である L および S-series は、無処理と比較した場合の強度低下が大きくなる傾向があり、化学処理に関しては、L-series で最大 20%、S-series で最大 23% 程度の強度低下を示し、界面付着力低減効果が有効に作用しているのに対し、砂利である G-series は、無処理の場合と比較した強度低下はさほど大きくはなく、最大で 10% 程度であることが確認された。碎石の無処理試験体においては、骨材ペースト間の機械的なみ合わせ力が有効に作用するのに対し、改質処理は付着力を低減する効果が作用するといえる。なお、水結合材比が小さくなると強度低減が大きくなることも確認された。これは一般的に、高強度コンクリートとなる低水セメント比の領域においては、マトリックスが高強度化されるために圧縮強度に及ぼす骨材自体の強度と界面付着の影響が大きくなり、高強度コンクリートにおける骨材に起因する諸特性が再現できることから発生する現象といえる。物理処理に関しても同様の性質が確認され

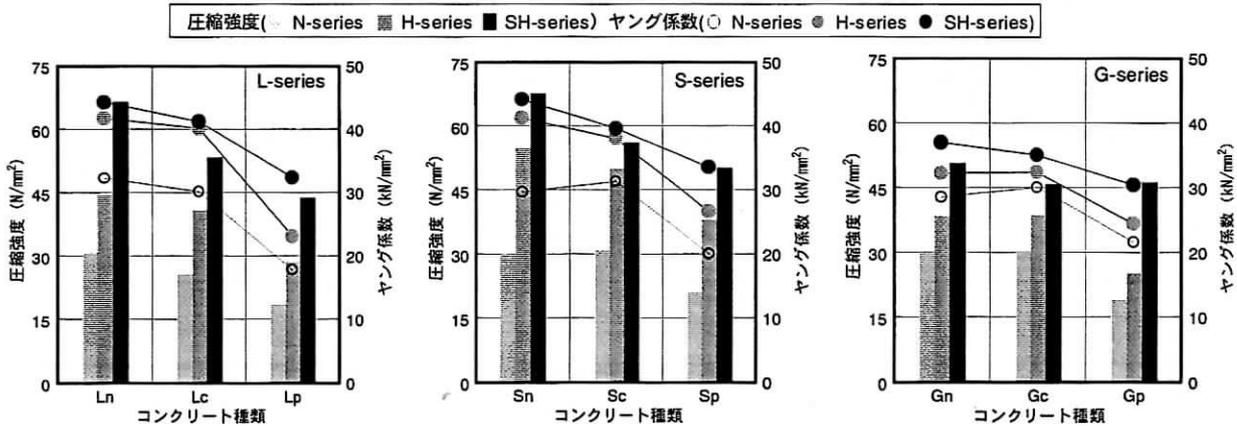


図 6.3.1 改質処理が圧縮強度とヤング係数に及ぼす影響(種類別)

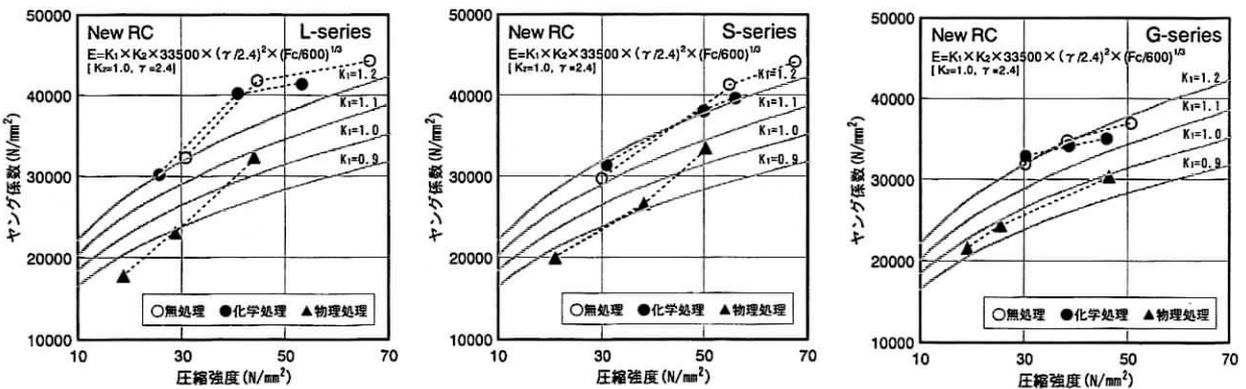


図 6.3.2 改質処理が圧縮強度とヤング係数に及ぼす影響(New RC 式との相関)

たが、強度低減率が化学処理よりも大きく、同一処理回数でも、圧縮強度に及ぼす改質効果が顕著になることが確認された。一方、効果がばらつきやすい傾向も示され、曲げ付着強度および吸水率低減効果の調査で複数回の改質処理により初めて改質処理効果が現れるという性質が力学特性にも影響することが確認された。なお、以上の傾向は、引張強度および静弾性係数についてもほぼ同様であるといえるが、化学処理の方が、水結合材比と力学特性値に相関する改質処理の特徴が明確に示されるといえる。

NewRC 式を示す座標軸上にコンクリートの圧縮強度とヤング係数を示した。碎石である L-series および S-series と砂利である G-series の全てにおいて物理処理を施した場合の改質処理効果による圧縮強度とヤング係数の低下が顕著であることが確認できる。化学処理に関しては、無処理の場合よりも若干、圧縮強度とヤング係数が低下することが確認された。普通コンクリート(N)と高強度コンクリート(H)の調査を基準とした場合、NewRC 式における特性値 K_1 は 1.0 となる。本実験で使用した骨材回収型リサイクル指向コンクリートが、その曲線履歴の近傍で強度が示されていることを考慮すると、化学処理のみならず、物理処理の場合においても構造用コンクリートとして使用することは十分に可能であると思われる。

なお普通コンクリートの場合、ひび割れ発生の特徴としてまずコンクリートの脆弱部にある潜在クラックが荷重によりボンドクラックを導き、クラックが骨材周囲に生長し、セメントペースト部分にも進展する。結果、モルタルクラックを誘発し、更には使用骨材が脆弱である場合には骨材クラックを生じるようになる流れが想定されるが[8]、碎石による改質処理骨材の場合、硬化した時点で潜在クラックが骨材下面だけではなく周辺部に偏りなく発生することが想定されるため、ボンドクラックに生長するまでに要する消費エネルギーは少なくなると想定できるが、砂利による改質処理骨材の場合、無処理の場合においても潜在クラックが骨材界面に限られる形で入りやすくなることが考えられる。

続いて、図 6.3.3 および図 6.3.4 に各種改質処理による圧縮-引張-ヤング係数比の変化を示す。

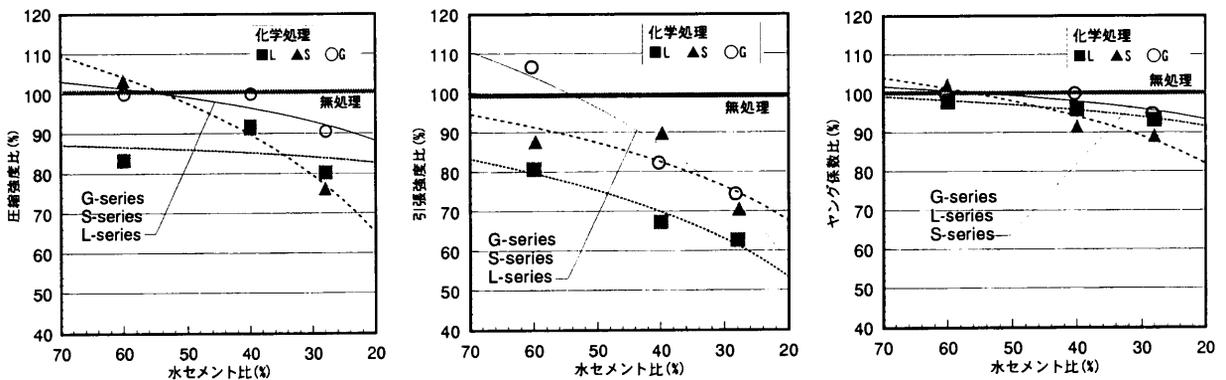


図 6.3.3 化学処理が各種強度比に及ぼす影響 (左：圧縮強度 中：引張強度 右：ヤング係数)

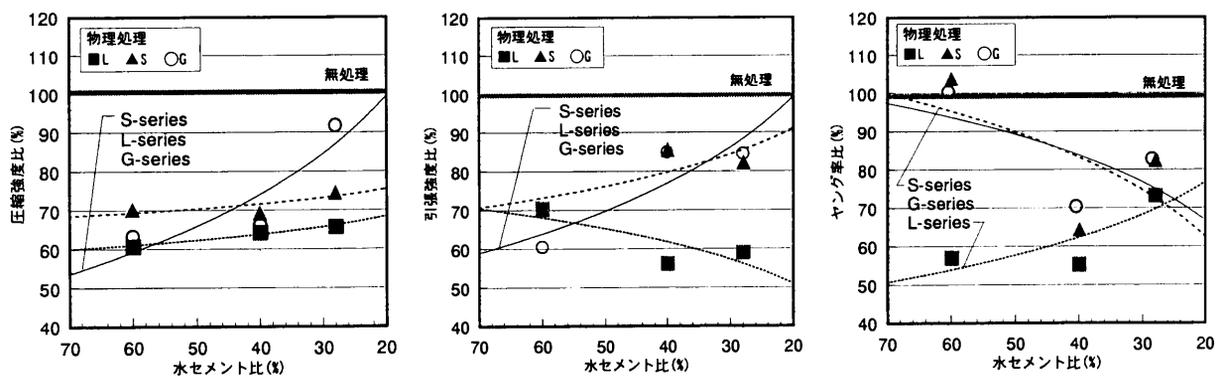


図 6.3.4 物理処理が各種強度比に及ぼす影響 (左：圧縮強度 中：引張強度 右：ヤング係数)

双方ともに圧縮強度とヤング係数の結果より導かれた骨材回収型リサイクル指向コンクリートにおける水結合材比に対する強度低減の特徴が明確に示されている。化学処理の場合は、水結合材比の低下に比例して強度低減率が一様に低下し、その程度は砕石である場合に顕著となる。砂利シリーズにおいては骨材の機械的かみ合わせが少ないことに加え、高強度である場合、マトリックス強度に対する界面部分の相対強度が、改質処理の有無に関わらず一様に低下した状況になるため、改質処理効果が出にくくなると判断される。物理処理に関しては、砕石シリーズの場合、化学処理と同様の改質処理効果も得られるが、砂利シリーズの場合、水結合材比の低下に比例して強度低減率が一様に低下しない場合があることが確認できる。これは物理処理の場合、骨材界面の機械的かみ合わせ力に起因する強度低減が大きくなること、界面の被膜厚さが大きいことなどによる付着状態の違いが、結果的に強度低減特性に反映されたと考えられる。

図 6.3.5 に骨材粒形と圧縮強度比を、図 6.3.6 に骨材粒形と引張強度比の関係を示す。これまでの検討により、骨材粒形により界面付着力低減効果の発現性の相違が確認されたため、粒形判定実積率をパラメータとした強度発現性の評価を行った。硬質砂岩砕石を使用し、無処理の場合である Sn を基準に、圧縮強度および引張強度に対する各試料の強度比を示した。骨材粒形が角張っている場合、粒形が優れる場合よりも圧縮強度、引張強度ともに大きくなる傾向があるように、粒形判定実積率が 65.4% である砂利シリーズは明らかに強度低下しており、その傾向は水結合材比が低い場合に顕著になる。強度比グラフは大きな負の勾配を保持した形状となる。これに対し、改質処理の場合は、グラフ形状に多少の違いはあるものの、粒形の影響は無処理ほどは大きくなく、強度比グラフの勾配は緩やかな負の勾配を保持した形状となる。これは、砕石シリーズにおいて改質処理効果が大きく、砂利

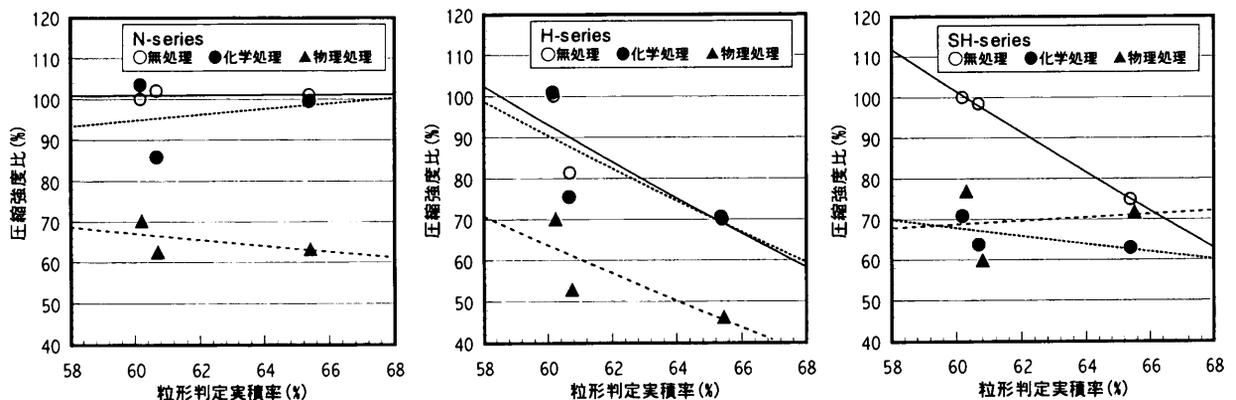


図 6.3.5 骨材粒形と圧縮強度比の関係(左：普通強度 中：高強度 左：超高強度)

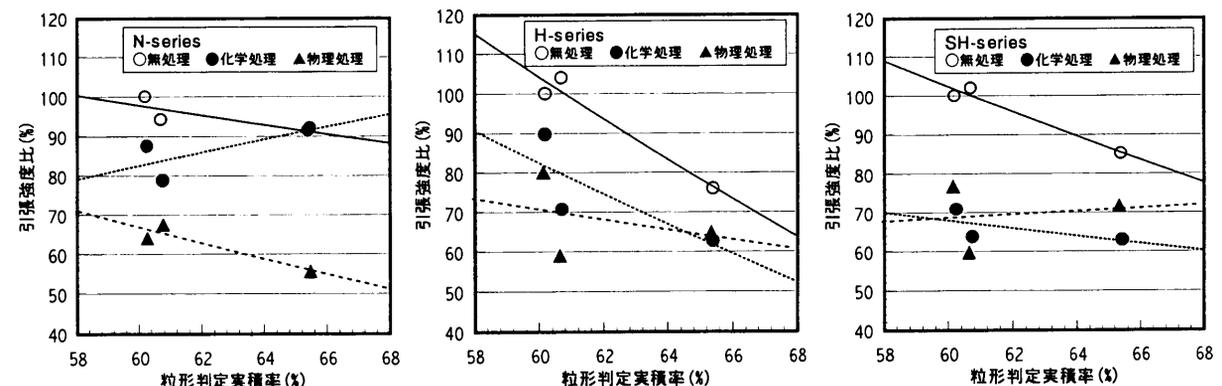


図 6.3.6 骨材粒形と引張強度比の関係(左：普通強度 中：高強度 左：超高強度)

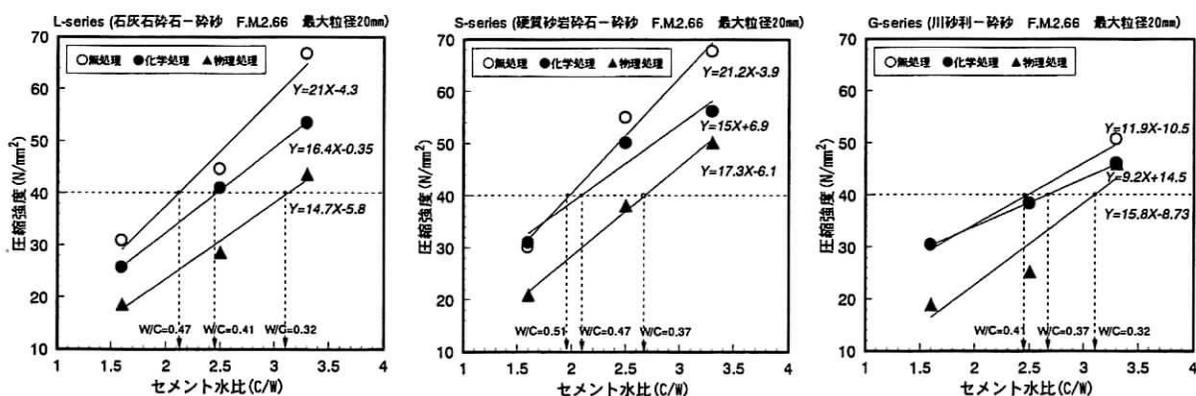


図 6.3.7 改質処理による強度低減率の検討 (左：L-series 中：S-series 右：G-series)

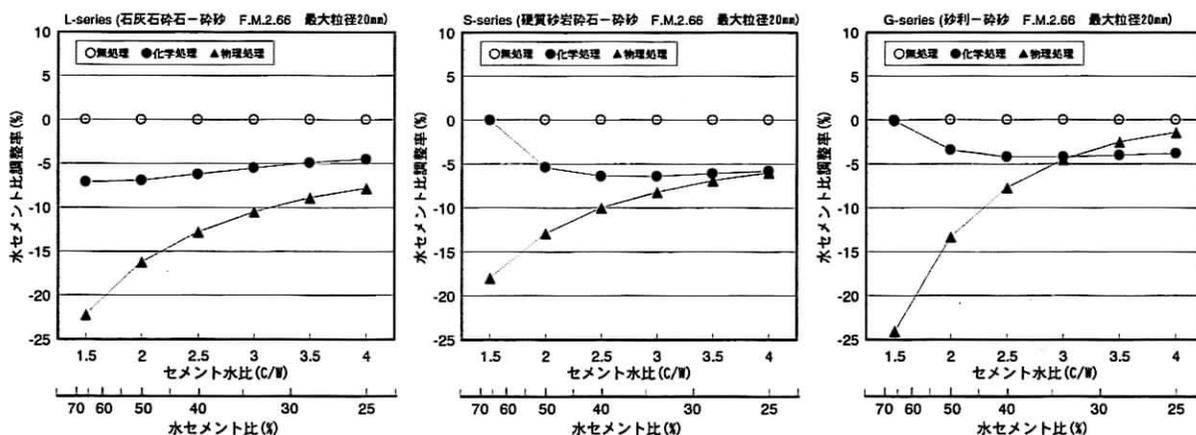


図 6.3.8 改質処理による水セメント比調整率 (左：L-series 中：S-series 右：G-series)

シリーズにおいては効果が小さく発現することを示している。別の言い方をすれば、骨材種類に関わらず、骨材改質処理を施せば、一般的な硬質砂岩砕石コンクリートの圧縮強度に対して70%程度の圧縮強度となる界面付着力低減効果を発現することができるといえる。

最後に、改質処理骨材の導入によるコンクリートの強度低下現象を抑制する方法として、調合段階で強度低減分を補完するように水結合材比を小さく設定する方法がある。図 6.3.7 にコンクリートの圧縮強度とセメント水比の関係を示す。具体的事例として、改質処理シリーズにおいて圧縮強度 40N/mm² を満足するために減ずる水セメント比は、砕石骨材-化学処理の場合は4~6%程度、砕石骨材-物理処理の場合は14~15%程度、また砂利骨材-化学処理の場合は4%程度、砂利骨材-物理処理の場合は9%程度であり、その程度水セメント比を小さくすれば無処理の場合と同等の圧縮強度を得ることができる。図 6.3.8 に水セメント比調整率を示すが、図 6.3.7 の線形回帰実験式により無処理コンクリートに対する改質処理コンクリートの水セメント比調整率の概算値を具体的に求めることが可能になる。なお化学処理は水セメント比の変化に因らず調整率がほぼ同等であるのに対し、物理処理は高水セメント比における調整率が大きい。これは、化学処理と物理処理における骨材粒形、骨材表面粗さ、処理界面状態および被膜厚さ等に起因する改質処理効果の発現性の違いが影響するためである。

以上より、骨材回収型リサイクル指向コンクリートにおいて普通コンクリートと同様の力学特性を得るための水セメント比調整用基礎データを構築することも可能となった。

6.3.3 コンファインドコンクリートの圧縮強度

骨材回収型リサイクル指向コンクリートにおける基礎力学特性で確認された界面付着力低減効果には、水セメント比依存性と骨材粒形依存性が認められ、高強度コンクリートである場合に効果が顕著に現れることや、原骨材が碎石である場合に無処理の場合と比較した強度低減率が大きくなるなどの特徴が具体的に示された。またそれらの性質は、改質処理回数によりある程度制御することが可能と考えられた。しかしながら、通常のコンクリートと同様に骨材回収型リサイクル指向コンクリートを使用して調合設計を実施し、鉄筋コンクリート造構造物に適用する場合、改質処理による圧縮強度低下が明確な問題として位置づけられるといえる。この問題の解決方法としては、調合設計時における水セメント比調整による強度低減の抑制方法や、短繊維導入型の調合設計法の適用などが挙げられる。部材レベルでは、せん断耐力保持に有効となる補強筋比の再設定により対応が可能であると考えられる。

本章では、部材レベルにおける強度低減抑制手法の適用可能性を模擬的に検討するために、らせん筋を導入したコンファインドコンクリートを製造し、基礎力学特性を確認することで、補強筋比を導入することによる強度低減抑制可能性を検討する。

(1) 横補強筋比の設定

鉄筋コンクリート部材は、斜長力によって生じる斜めひび割れによるせん断破壊により、コンクリートが脆性破壊を引き起こし、構造物の決定的崩壊をもたらす可能性がある。そのため、せん断補強筋を導入することで、耐力を保持しながら変形し、吸収エネルギーが大きくなるような設計を行うが、せん断破壊に関しては、国内外で多数の研究実績があるにも関わらず、破壊に至るまでの力学的挙動に対する明確な解答は得られておらず、特にせん断ひび割れ発生以後における破壊靱性や、正負交番繰り返し荷重の影響などが、特に明確にされていないのが現状であるとしている[22]。

日本建築学会における、鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説では、鉄筋コンクリート部材である長方形およびT形断面の梁・柱や、柱梁接合部に関するせん断力の算定方法を定める際に、横補強筋に対する仕様を定めている。具体的には、梁の場合、横補強筋比が0.2%以上1.2%以下で計算するように定めており、同時に横補強筋がせん断に対して有効に作用させるために、使用筋の直径を制限するほか、種々の部材寸法に対する間隔などを規定しており、直径9 mm以上の丸鋼またはD10以上の異形鉄筋を用いる場合には、横補強筋感覚を1/2D以下かつ250mm以下にする[1]などが、具体的に定められている。柱の場合には、横補強筋比はほぼ同様の規定があり、補強筋間隔については、構造が軽微な場合および、らせん筋を用いる場合を除き、直径9 mm以上の丸鋼、またはD10以上の異形鉄筋を用いて100mm以下にする[22]などが定められている。

横補強筋を導入することで、部材のせん断ひび割れの発生時期が遅くなるわけではないとする説[36]も存在するが、ひび割れ伸展および開口幅の増大を防止し、材のせん断耐力ならびに靱性の確保に役立つことは示されている。なお、横補強筋導入時におけるせん断耐力は、平行根に比例した増大傾向が認められながらも有効に作用する限界量が存在し、その値は実験的検証[23]により $p_w=1.2\%$ と定められていることが特徴として挙げられる。

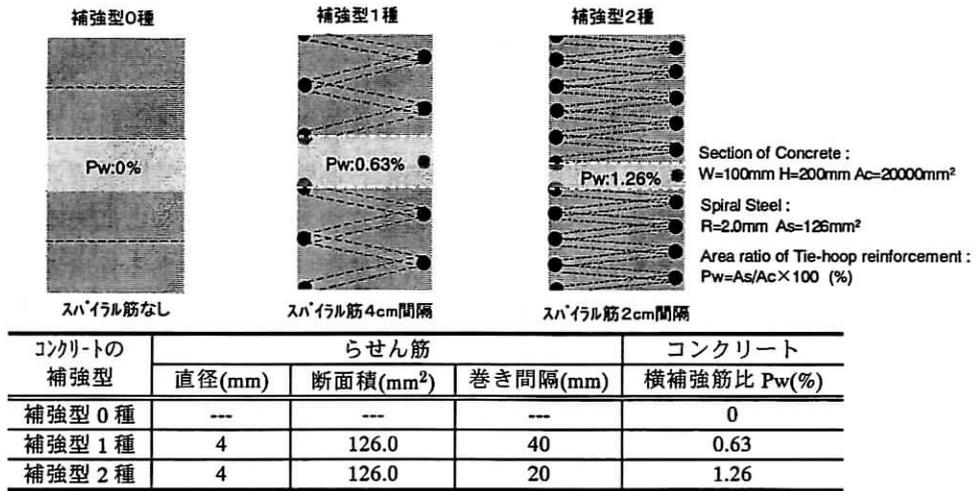


図 6.3.9 らせん筋を用いたコンファインドコンクリートの概要

なお、柱梁接合部に関しては、既往の研究において、接合部内の帯筋は柱・梁の帯筋と違い、せん断補強筋としてのせん断強度を上昇させる効果はほとんど期待できない[24-25]としているため、接合部のせん断強度はコンクリート強度のみに依存した計算式で構造計算は行われるとしている。

以上より、本実験では、図 6.3.9 に示すらせん筋により、コンファインドコンクリートを製造する。横補強筋比は鉄筋コンクリート構造計算規準に示される補強筋比の最大値である 1.2%および最低値である 0.2%の値を考慮し、普通軟鋼・直径 4mm のらせん筋(らせん間隔 2cm および 4cm)を 2 種類使用して、補強型 0 種($p_w=0\%$)、補強型 1 種($p_w=0.63\%$)、補強型 2 種($p_w=1.26\%$)の 3 水準を設定した。なお、補強型 0 種は、 $p_w=0.2\%$ を想定したものであるが、当該コンクリートの断面積に対する 0.2%の補強率は、占有面積が非常に小さいため、その効果として 0%の場合と同等になると考えられる。補強型 2 種は横補強筋比の最大量を、補強型 1 種は中間値を想定して設定した。

(2) 使用材料と実験方法

表 6.3.6 に実験要因と水準を、表 6.3.7 にコンクリートの調合条件を示す。本実験は、コンクリート部材を模擬した補強効果をコンクリート供試体レベルで簡易的に評価することを目的とした実験であるため、前節の実験で使用した全てのコンクリート種類について実施することはしない。試験体水準は、水セメント比が普通強度(N)と高強度(H)の 2 水準、骨材は細骨材に硬質砕石砕砂(S)を、粗骨材には 3 種類の骨材で最も一般的に使用されており、粒形に起因する改質処理効果が明確に現れる傾向にある硬質砂岩砕石により構成されるコンクリートとした。なお本実験は、前節のコンクリート実験と試験時期が相違する結果、コンクリートの調合、使用する基本材料の状態および改質処理剤の塗布状態などは、完全に同一とはならなかったが、調合設計をするための基本的な考え方は同様である。

実験試料の作製方法は、らせん筋を挿入した ϕ 10-20cm のコンクリート供試体用鋼製型枠を使用し、改質処理骨材を用いたコンクリートについて、フレッシュ性状としてスランプ試験および空気量試験を実施して、目標値を満たすことを確認した後に、打設・成型し、標準養生を行った。材齢 28 日で圧縮強度を測定し、らせん筋によるコンファインド効果を確認することにより、改質処理による強度低減が抑制される仕組みを評価した。

表 6.3.6 実験要因と水準

| 要因 | 水準 |
|--------|---|
| 水結合材比 | 0.6(普通強度 N-series), 0.3(高強度 H-series) |
| 細骨材 | 砂岩砕砂(S) |
| 粗骨材 | 硬質砂岩砕石(S) |
| 改質処理 | 無処理(n), 化学処理(c), 物理処理(p) |
| 横補強筋比 | 0%(0種), 0.63%(1種), 1.26%(2種) |
| コンクリート | 普通コンクリート N-(Sn0, Sc0, Sp0) N-(Sn1, Sc1, Sp1) N-(Sn0, Sc0, Sp0) 高強度コンクリート H-(Sn0, Sc0, Sp0) H-(Sn1, Sc1, Sp1) H-(Sn2, Sc2, Sp2) |

表 6.3.7 コンクリートの調査条件

| 設定 | 普通強度 N | 高強度 H |
|-----------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 水セメント比 | 60 | 33 |
| 目標スランプ | 18±1.5 cm | 21±1.5 cm |
| 単位セメント量 | 298kg/m ³ | 515 kg/m ³ |
| 目標空気量 | 4.0±1.5 % | 2.0±1.5 % |
| 単位粗骨材かさ容積 | 0.62 m ³ /m ³ | 0.60 m ³ /m ³ |

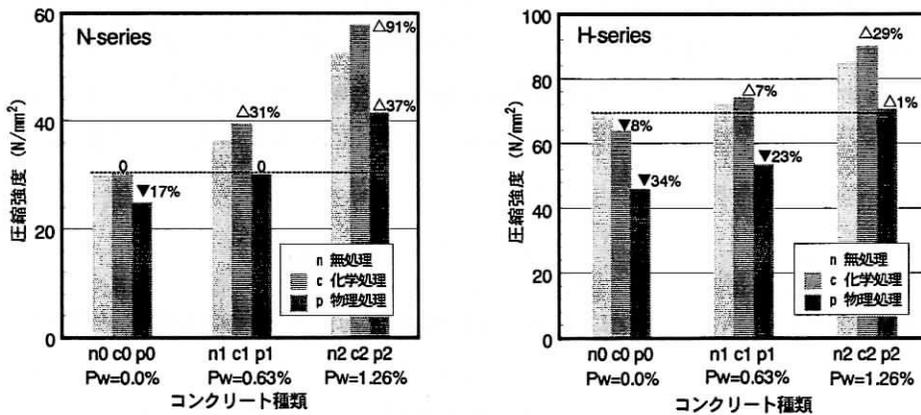


図 6.3.10 横補強筋導入による圧縮強度増加率(左:普通強度 右:高強度)

(3) 結果および考察

図 6.3.10 に横補強筋導入による圧縮強度増加率を示す。

補強型 0 種で無処理の試験体を基準とした場合、N-series に関しては、化学処理の場合、補強型 1 種で 31% の強度増加、補強型 2 種で 91% の強度増加が確認され、無処理の場合と同等以上の圧縮強度も確保可能になる。物理処理の場合、補強型 2 種の段階で 37% の強度増加が確認されたが、化学処理の場合ほど明確な強度増加は確認されなかった。H-series に関しては、化学処理の場合、補強型 1 種で 7% の強度増加、補強型 2 種で 29% の強度増加が確認され、無処理の場合と同等以上の圧縮強度も確保することが可能となる。物理処理の場合、補強型 2 種の段階でも基準試験体と同程度の圧縮強度であり、強度増進は図られなかったといえる。また高強度の場合は、全試験体を通じて、化学処理の場合ほど明確な強度増進は図られなかった。これは、補強筋がコンクリート部材に及ぼす効果として、ひび割れの発生時期に大きく影響しないかわりに、ひび割れ伸展および開口幅の増大を防止する効果[22]があることから、圧縮強度に達した後の耐力低下に対し、効果的に補強効果を発揮するものであると捉えられる。従って、コンクリートの高強度化により、硬化コンクリートの弱点部がボンドクラックが発生する界面に限定される結果、ひび割れ進展の主要因も界面に限定されることになり、補強による強度増進の効果はより小さくなるといえる。

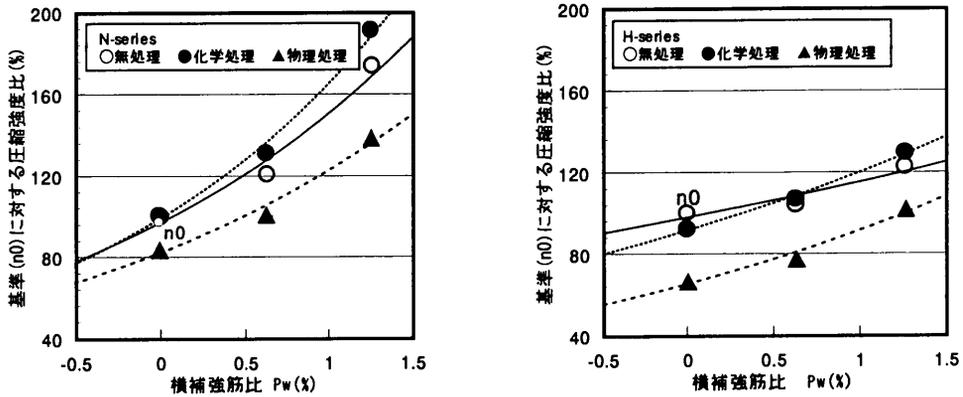


図 6.3.11 横補強筋比と圧縮強度比の関係(左：普通強度 右：高強度)

図 6.3.11 に横補強筋比と圧縮強度比の関係を示す。補強型 0 種で無処理である基準コンクリート n_0 に対し、N-series に関しては、無処理と化学処理が補強筋比に応じてほぼ同様の強度増進性を示しており、物理処理は若干強度増進が小さくなっていること確認できる。H-series についても同様の傾向であるが、全体的に強度増進が小さくなっていることがグラフの形状から読みとることができる。これは、先に述べたようにセメントマトリックスを高強度化することで、内部組織の弱点部となる因子が骨材界面に限定されるようになり、補強効果が効果的に作用しなくなる材料構成となるためである。

6.3.4 まとめ

本節は、骨材回収型リサイクル指向コンクリートの基礎的性質を検討した。以下に得られた知見を示す。

- 1) 骨材回収型リサイクル指向コンクリートは、改質骨材の界面付着力低減効果により、圧縮強度等の弾性限界における力学特性が若干低下する傾向がある。
- 2) 骨材回収型リサイクル指向コンクリートにおける強度低減は、セメントマトリックスの高強度化より改善可能である。マトリックスの高強度化による強度低減抑制を実施しない場合は、横補強筋を導入することで強度低減を抑制することが可能となる。なおこの場合、骨材回収性を低下させないで強度低減性を改善することが重要となるが、CFT 構造のような適用方法の場合、その問題は解消される。
- 3) 骨材回収型リサイクル指向コンクリートにおける界面付着力低減効果には、水セメント比依存性があり、モルタルが高強度である場合の方が、無処理の場合に対する改質処理による強度低減が大きくなる。これは骨材界面の脆弱部に対し、骨材およびモルタルが相対的に高強度となり、ひび割れが骨材界面に優先的に形成され、破壊が生じやすくなるためと考えられた。
- 4) 骨材回収型リサイクル指向コンクリートにおける界面付着力低減効果には、骨材粒形依存性があり、碎石の場合は、無処理の場合に対する強度低減が大きくなる。これは、無処理の場合、骨材形状に起因する機械的なかみ合わせが増大し、ボンドクラックは発生しにくい条件となるが、改質処理の場合は、骨材界面に優先的にひび割れが進展する性質が保持されるためと考えられる。

6.4 骨材回収型リサイクル指向コンクリートの破壊特性

6.4.1 背景と目的

前節までの検討により、骨材回収型リサイクル指向コンクリートを実証するために必要な条件となる骨材の改質処理方法、改質処理骨材を使用したコンクリートの基礎的物性などが明確になった。そして、骨材回収型リサイクル指向コンクリートの強度低下に関しては、骨材粒形およびマトリックスの水結合材比が関係することが確認され、その要因を考慮した上で、ひび割れ発生メカニズムおよび破壊性状に及ぼす影響を明確にすることが必要とされた。

本節では、骨材回収型リサイクル指向コンクリートのひび割れ発生メカニズムと破壊性状について検討する。コンクリートは本来、引張脆性型の破壊形態を示す高度な非線形材料であり、ひびわれの進展形態、局所的な微細なひび割れの蓄積がコンクリートの靱性および破壊性状に大きく影響するため、コンクリートの破壊性状を明確にするためには、引張破壊に対する応力伝達機構を評価することが重要とされている[26-27]。そして引張破壊に対する応力伝達機構は、引張軟化特性と置き換えが可能であるが、現在のところ、引張軟化特性の評価方法は十分に確立されておらず、結果、コンクリートの破壊強度や靱性、破壊進展などの特徴を定量的に評価することが困難になっていると思われる。

以上より、本節では、骨材回収型リサイクル指向コンクリートにおける骨材界面付着力の低減性を考慮した破壊特性を評価するために、モード I (引張破壊型)による破壊を導くくさび割裂型破壊試験[28]により荷重とひび割れの関係を導き、そのデータをもとに、コンクリートの破壊進展における結合応力と開口変位の関係を精度良く表現可能とする多直線近似逆解析法[29]により引張軟化曲線(TSD)を求める。そして、引張軟化曲線における破壊進展時の開口変位(COD)および結合応力の分布特性から、ひび割れ進展に伴うエネルギー変化量を始めとする種々の破壊力学パラメータを導出し、その特性を破壊力学の観点から分析する。以上により、骨材界面付着力の低減性がコンクリートの破壊特性に及ぼす影響について評価が可能になる。

6.4.2 実験概要

(1) 使用材料

表 6.4.1 に使用材料を示す。本節で使用する材料は、6.3 節における実験試料と同様である。セメントは普通ポルトランドを使用し、細骨材は硬質砂岩砕砂で一定とし、粗骨材は粒形の異なる石灰石砕石(L)、硬質砂岩砕石(S)、川砂利(G)を物理処理および化学処理による改質処理(3 回処理)を施した改質処理骨材とした。

改質処理方法は、骨材ヤードから採取した表乾状態の原骨材表面に対し、改質処理剤原液を水道水で一定濃度(化学処理 10%、物理処理 20%)に希釈したエマルジョンである改質処理剤を散水用ホースを用いて均一に散布し、エマルジョン溶液の含有水を自然乾燥させる簡便な手法によった。

改質処理骨材は、化学処理、物理処理ともに、表面水が蒸発した後の密度は原骨材とほぼ同等であり、密度値として反映されないほどの質量である薄膜が表面に形成されたものである。被覆の程度は処理回数に比例する。改質処理骨材の吸水率は、改質処理剤の吸水率低減効果の性質が明確に反映されたものであり、改質処理剤の吸水率低減性能に応じて値が低下し、かつその程度は処理回数に比例する。その他の性質として、単位容積質量、実積率、粒形判定実積率は同等であった。

(2) 実験方法

表 6.4.2 に実験要因と水準を、表 6.4.3 に骨材回収型リサイクル指向コンクリートの調合条件を、表 6.4.4 に骨材回収型リサイクル指向コンクリートの計画調合を、表 6.4.5 に実験項目および方法を、そして図 6.4.1 にくさび割裂型破壊試験方法の概要を示す。

骨材回収型リサイクル指向コンクリートとして、水結合材比が 0.6(普通強度 N)および 0.4(高強度 H)の 2 水準を設定し、目標空気量および目標スランプによる調合条件を満足するようにコンクリートを作製した。なお、同一水結合材比のシリーズでは、単位粗骨材かさ容積の目標値を砕石と砂利で区別しつつ同程度になるように定めている。これは、コンクリートのフレッシュ性状および骨材界面におけるモルタルの総接触面積が骨材種に因らず同程度になるようにして、改質処理骨材の粒形に起因する破壊特性の違いが明確になるようにしたためである。なお、モルタルの調合は、同一水結合材で一定とし、骨材を取り囲むモルタルの性質の差が影響しないように定めた。

作製した全 18 種類のコンクリートについてスランプ試験、空気量試験を行い、目標値の範囲内であることを確認した後に標準養生し、材齢 28 日で割裂引張試験およびくさび割裂型破壊試験を実施した。くさび割裂型試験体は、RILEM 標準試験方法[30]で定める試験体寸法の 1/4 程度である 100mm×100mm×120mm の小試験体であり、コンパクトテンション試験体[31]と試験体寸法および載荷方法がほぼ同様である。引張により開口する切り欠き部分は、ダイヤモンドカッターを用いて長さ 50mm、幅 2 mm になるように作製した。なお、コンクリートは一般的に、引張力に対する抵抗性が著しく弱い場合があるため、安定した荷重開口変位曲線を測定するためには、最大荷重以降の軟化域を精度よく検出する必要がある。そのために、試験装置として、加力部、油圧装置およびフィードバック機能を有する開口変位式制御装置により構成されるクローズドループシステム（閉回路機構）のサーボ・コントロール式油圧万能試験機を使用した。切り欠き端部の開口変位速度は、安定破壊が得られるように 0.02mm/min に設定し載荷を行った。ここで得られる荷重－開口変位曲線の測定データを基に、破壊力学パラメータである有効引張強度(Ft^{eff})、破壊エネルギー(Gf^{WOF})、引張軟化曲線(TSD)、初期結合応力、エネルギー開放率(Gp)および破壊エネルギー(Gf^{TSD})を解析により求め、骨材の改質処理がコンクリートの破壊特性に及ぼす影響を評価した。

表 6.4.1 使用材料

| 骨材 | 記号 | 種類 | 表乾密度 (g/cm ³) | 吸水率 (%) | 単位容積 質量(kg/l) | 実積率 (%) | 粒形判定実 積率(%) | 圧縮強度 (N/mm ²) |
|-----------------|----|--------------|------------------------------|------------|------------------|------------|----------------|------------------------------|
| 細骨材 | S | 硬質砂岩砕砂 | 2.62 | 1.71 | 1.44 | 55.8 | --- | --- |
| 粗骨材 L-series | Ln | 石灰石砕石(無処理) | 2.71 | 0.24 | 1.68 | 60.7 | 60.7 | 60.4 |
| | Lc | 石灰石砕石(化学処理) | 2.71 | 0.00 | 1.68 | 60.7 | 60.7 | --- |
| | Lp | 石灰石砕石(物理処理) | 2.71 | 0.08 | 1.68 | 60.7 | 60.7 | --- |
| 粗骨材 S-series | Sn | 硬質砂岩砕石(無処理) | 2.66 | 0.80 | 1.59 | 60.2 | 60.2 | 82.5 |
| | Sc | 硬質砂岩砕石(化学処理) | 2.66 | 0.01 | 1.59 | 60.2 | 60.2 | --- |
| | Sp | 硬質砂岩砕石(物理処理) | 2.66 | 0.36 | 1.59 | 60.2 | 60.2 | --- |
| 粗骨材 G-series | Gn | 砂岩系砂利(無処理) | 2.60 | 1.34 | 1.71 | 65.7 | 65.7 | 82.0 |
| | Gc | 砂岩系砂利(化学処理) | 2.60 | 0.01 | 1.71 | 65.7 | 65.7 | --- |
| | Gp | 砂岩系砂利(物理処理) | 2.60 | 0.52 | 1.71 | 65.7 | 65.7 | --- |

備考) 普通ポルトランド (密度: 3.16 g/cm³)

表 6.4.2 実験要因と水準

| 要因 | 水準 | |
|-------|----------------------------|--|
| | | |
| 水結合材比 | 0.6(普通強度 N), 0.4(高強度 H) | |
| 細骨材 | 砂岩砕砂(S) | |
| 粗骨材 | 石灰石砕石(L), 硬質砂岩砕石(S), 砂利(G) | |
| 改質処理 | 無処理(n), 化学処理(c), 物理処理(p) | |

表 6.4.3 骨材回収型リサイクル指向コンクリートの調査条件

| 設定 | 普通強度(N) | 高強度(H) |
|----------------------------|--|--|
| 水結合材比 | 60 | 40 |
| 目標スランプ | 18±1.5 cm | 21±1.5 cm |
| 目標空気量 | 4.0±1.5 % | 2.0±1.5 % |
| 単位粗骨材かさ容積 (上: 砕石 下: 砂利) | 0.62 m ³ /m ³ 0.63 m ³ /m ³ | 0.60 m ³ /m ³ 0.61 m ³ /m ³ |

表 6.4.4 骨材回収型リサイクル指向コンクリートの計画調査

| コンクリート 種類 | 水結合 材比 (%) | 細骨材 率 (%) | 単位 水量 (kg/m ³) | 単位質量(kg/m ³) | | | | 化学混和剤 使用量(C×%) | | | |
|--------------|------------------|-----------------|----------------------------------|--------------------------|-------------|-----|-----|-------------------|-------|-----|------|
| | | | | セメント | シリカ ヒューム | 細骨材 | 粗骨材 | A1 | A2 | A3 | |
| | | | | | | | | | | | |
| N | L-series | 60 | 46.5 | 169 | 281 | 0 | 846 | 1014 | 0.002 | --- | 1.0 |
| | S-series | 60 | 46.5 | 169 | 281 | 0 | 846 | 995 | 0.002 | --- | 1.25 |
| | G-series | 60 | 41.0 | 168 | 281 | 0 | 749 | 1071 | 0.002 | 1.0 | --- |
| H | L-series | 40 | 41.3 | 184 | 461 | 0 | 675 | 995 | --- | --- | 1.0 |
| | S-series | 40 | 41.3 | 184 | 461 | 0 | 675 | 976 | --- | --- | 0.75 |
| | G-series | 40 | 35.2 | 184 | 461 | 0 | 576 | 1053 | --- | 1.0 | --- |

A1: 空気量調整剤 A2: AE 減水剤(リグニンスルホン酸系化合物) A3: 高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸エーテル系化合物)

表 6.4.5 試験項目および方法

| 試験項目 | 試験方法 | 備考 |
|------------------|------------|--|
| 空気量試験 | JIS A 1128 | 全ての試料について実施 |
| スランプ試験 | JIS A 1101 | 全ての試料について実施 |
| 割裂引張強度 試験 | JIS A 1106 | 全ての試料について材齢 28 日(標準養生)で実施 破壊力学パラメータである有効引張強度との相関を比較 |
| くさび割裂型 破壊試験 | --- | 変位制御によりくさび割裂試験体(100×100×120mm、切り欠き 50mm) の 荷重-ひびわれ開口変位曲線の測定を全試料に材齢 28 日(標準養生)で実施 |
| 破壊力学 パラメータの算定 | --- | 荷重-ひびわれ開口変位曲線(L-COD: Load and Crack Opening Displacement) を基に、多直線近似逆解析法[42]により以下の破壊力学パラメータを算定 ・有効引張強度(P_t^{eff}) ・破壊エネルギー(G_f^{WOF}) ・引張軟化曲線(TSD: Tension Softening Diagram) ・初期結合応力 ・エネルギー開放率(G_p) ・破壊エネルギー(G_f^{TSD}) |

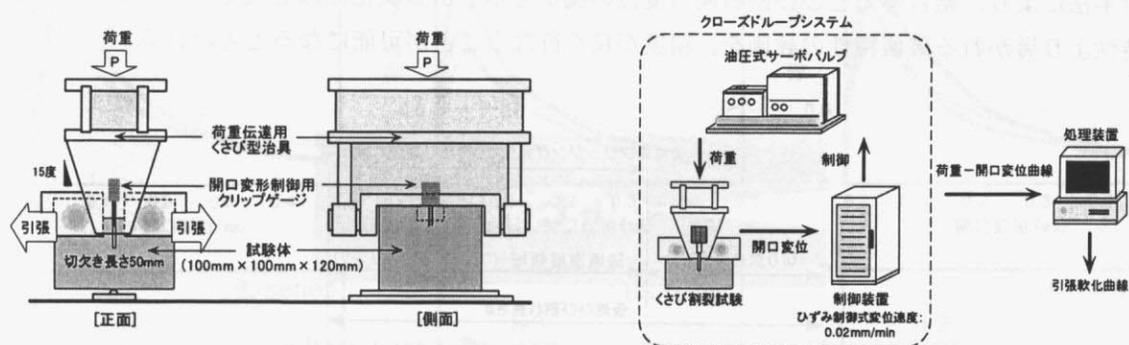


図 6.4.1 くさび割裂試験体と破壊靱性評価システム

(3)破壊力学パラメータ

コンクリートの破壊現象の定量化あるいはひび割れ進展の数値解析等に、破壊力学パラメータを適用することは有効であると考えられるが、コンクリートは非線形弾塑性材料であるため、弾性材料を対象とした既存の破壊力学パラメータを直接適用することは困難であり、非線形・非回復性の荷重変形特性を正確に反映した破壊力学パラメータが必要になる。

本章では、最終的に、骨材回収型リサイクル指向コンクリートにおける骨材界面剥離性状を評価するために、コンクリートにおける潜在クラック、ボンドクラック、モルタルクラックおよび骨材クラックなどのひび割れ形態や、骨材およびマトリックスの強度差に起因して発生するひび割れのトラッピング [32]、骨材近傍でのひび割れ偏向効果であるクラックディフレクション [33]などのひび割れ伝播機構の特徴を見いだす必要があるが、本節では、コンクリートの破壊現象を捉えるために、結合力モデル(仮想ひび割れ長さ a を有する 1 本のひび割れに、外力に釣り合う結合応力を開口変位に応じて作用させるモデル)を基に、フラクチャープロセスゾーン (FPZ) [34] を有する引張変形モード I による破壊が進展するとして、実験により得られる荷重-ひび割れ開口変位曲線から、多直線近似逆解析法により結合応力と開口変位の関係である引張軟化曲線を導出して、各種コンクリートにおけるひび割れ形態および、ひび割れ伝播機構の特徴を評価する。また、破壊進展時における開口変位 COD および結合応力の分布から、ひび割れ進展に伴う任意の時点における単位エネルギー変化量を算定可能にするため、荷重-ひび割れ開口変位曲線の計測結果から破壊力学パラメータを導出してその評価を行う。

なおコンクリートの破壊現象を、各種破壊力学パラメータによりモデル化するためには、構造物の数値解析における材料構成則、破壊領域の特性評価、破壊力学パラメータなどに広く応用可能な引張軟化特性の定量化が必要であり、その逆解析の精度が良いことが重要であるとしている [35]。金属などは、せん断によるすべり破壊により破壊が進展するのに対し、分離破壊型の破壊形態が卓越するコンクリートでは、引張破壊が全体の破壊を支配することになり、またそれは、引張により一度に破壊するのではなく、微細ひび割れが蓄積されて破壊が徐々に進展し、最大荷重以降でも引張力を伝達して抵抗性を示すような引張軟化現象となる。この性質をモデル化するため、仮想ひび割れモデル (FCM: Fictitious Crack Model) [36] が Hillerborg により提案され、純引張による非回復性の破壊部分の変形を、1 本の仮想ひび割れ幅 (開口変位 δ) で表し、 δ に応じた伝達応力 (結合応力 σ) が作用するという仕組みにより、 δ と σ との関係を示す引張軟化曲線で示しており、その有効性が高く評価されている。

以上のことから、本実験における引張軟化特性の評価方法は次のように定める。まず、開口変位速度を制御して安定破壊が得られるくさび割裂型破壊試験により、高感度クリップゲージを使用して荷重-ひび割れ開口変位曲線を計測する。また、得られた荷重-ひび割れ開口変位曲線から、多直線近似逆解析手法により、結合応力とひび割れ開口変位の関係を示す引張軟化曲線を推定する。そして、引張軟化特性より導かれる破壊特性の評価を、精度が良く行なうことが可能になるとと思われる。

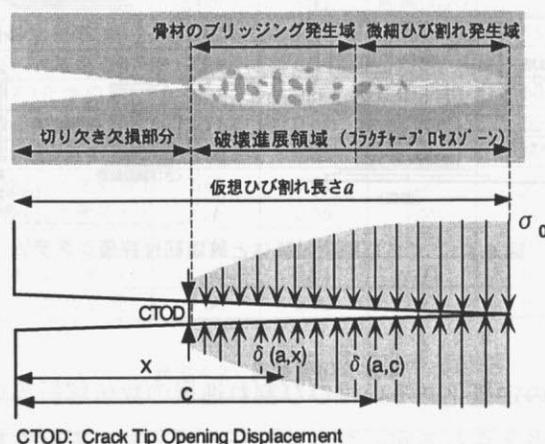


図 6.4.2 仮想ひびわれモデル [36]