

膨張性材料を用いた微膨張型繊維補強モルタル・コンクリートの開発

破壊診断工学研究室 河村 将史

1章 序論

コンクリートは収縮しやすい材料であり収縮が拘束されるとひび割れが生じやすい。コンクリートの収縮量を低減するため、収縮低減剤や若材齢時に膨張する膨張材が使われている。大きく膨張させすぎるとコンクリートにひび割れが生じる。長期にわたってひび割れが生じずに微膨張の状態を保つことができるコンクリートが開発されれば、アンカーボルトの固定、削孔した穴やセパレーターコーンの穴埋め、コンクリート中に後から設置される管の背面充填、機械等の据え付け部などへの適用が期待される。

そこで本研究では2つの研究目的を設定した。1つ目の研究目的は、長期材齢にわたって微膨張の状態を保つことができるセメント系材料の開発である。2つ目の研究目的は、反応性骨材によるアルカリ骨材反応（以下ASR）の膨張を活用し、プレストレスを導入することで部材の耐荷性能を向上させることである。

本研究ではまず、複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料（以下HPFRCC）にASRによる膨張や静的破砕剤による膨張を組み込み、収縮挙動をコントロールする方法についての検討を行い、2章にその結果をまとめた。

さらに、反応性骨材で発生したASRによる膨張を供試体に与えるプレストレスとして活用することを試みた。ASRによるひび割れは欠陥となってしまうため、繊維補強コンクリートを使用し、供試体にはプレストレスを導入するために鉄筋を入れた。そのことにより、変形性能と耐荷性能の向上を目指し、3章にその結果をまとめた。

2章 様々な材料を添加したのHPFRCC体積変化

2.1 使用材料

供試体はPE繊維を使用したHPFRCCで作製した。静的破砕材とは現場造成杭の杭頭処理に使用されるものであり、粉砕後ふるい分けを行い、0.6mm以下の粒径を使用した。静的破砕剤の添加量が20(kg/m³)、22.5(kg/m³)のHPFRCCの長さ変化測定と、静的破砕剤と収縮低減剤を組み合わせたときの長さ変化に与える影響を調査した。

反応性骨材は粉砕後ふるい分けを行い、1.2mm以下の粒径を使用した。繊維と鉄筋によりASR膨張によるひび割れを拘束し、また養生方法の違いによりASRの膨張をコントロールすることを目的とした。

2.2 供試体作製

表-2.1と表-2.2に示すHPFRCC配合で各種類3個ずつ角柱供試体(40×40×160mm)を作製した。

表-2.1の配合では粉砕した静的破砕材(D)と収縮低減剤(SR)を併用したHPFRCCの長さ変化挙動を確認した。静的破砕材をNO.2~NO.4には20kg/m³、NO.5~NO.7には22.5kg/m³添加した。収縮低減剤をNO.3とNO.6には7.6kg/m³(C×0.01)、NO.4とNO.7には15.6kg/m³(C×0.02)添加した。表-2.2の配合では粉砕した反応性骨材を使用したHPFRCCの長さ変化挙動を確認した。反応性骨材を使用したHPFRCCの養生方法の違いによる長さ変化挙動の影響を確認するために、温度と湿度を調整した養生を行った。

表-2.1 静的破砕剤を使用したHPFRCC

| NO. | 記号 | W/C (%) | W/P (%) | 単位量(kg/m ³) | | | | | | | | |
|-----|-----------|---------|---------|-------------------------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|
| | | | | W | C | LP | S | D | SR | AE | HMC | PE |
| 1 | Control | 50 | 38 | 390 | 780 | 234 | 558 | 0 | 0 | 9.13 | 1.01 | 12.1 |
| 2 | D20 | 50 | 38 | 390 | 780 | 234 | 538 | 20 | 0 | 9.13 | 1.01 | 12.1 |
| 3 | D20_SR1 | | | | | | | | 7.6 | | | |
| 4 | D20_SR2 | | | | | | | | 15.6 | | | |
| 5 | D22.5 | 50 | 38 | 390 | 780 | 234 | 536 | 22.5 | 0 | 9.13 | 1.01 | 12.1 |
| 6 | D22.5_SR1 | | | | | | | | 7.6 | | | |
| 7 | D22.5_SR2 | | | | | | | | 15.6 | | | |

表-2.2 反応性骨材を使用したHPFRCC

| NO. | 記号 | W/C (%) | W/P (%) | 単位量(kg/m ³) | | | | | | | | 温度(°C) | 湿度(%) |
|-----|----------|---------|---------|-------------------------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|--------|-------|
| | | | | W | C | LP | S | RA | AE | HMC | PE | | |
| 1 | Control | 50 | 38 | 390 | 780 | 234 | 558 | 0 | 9.13 | 1.01 | 12.1 | 20 | 60 |
| 2 | RA_20/60 | 50 | 38 | 390 | 780 | 234 | 335 | 223 | 9.13 | 1.01 | 12.1 | 20 | 60 |
| 3 | RA_20/95 | | | | | | | | | | | 20 | 95 |
| 4 | RA40/60 | | | | | | | | | | | 40 | 60 |
| 5 | RA40/95 | | | | | | | | | | | 40 | 95 |
| 6 | NRA40/95 | | | | | | | | | | | 50 | 38 |

2.3 養生方法

供試体は材齢1日まで温度20°Cに保たれた恒温温室で、供試体の表面をラップで覆った封かん養生を行い、脱型後、材齢1日から材齢7日まで水中養生を行った。HPFRCCの長さ変化測定において温度・湿度管理は重要であるため、以下に示すような養生方法を行った。

表-2.1 の供試体は水中養生後、温度 20℃・湿度 60%の気中養生を行った。臭化ナトリウムにより湿度 60%を保つ養生箱を作製し、供試体を養生した。

表-2.2 の供試体は水中養生後、NO.1 と NO.2 は 20℃, RH60%の気中養生, NO.3 は 20℃, RH 95%以上の加湿養生, NO.4 は 40℃, RH 60%の高温養生, NO.5 と NO.6 は 40℃, RH95%以上の促進養生をそれぞれ行った。

2.3 試験方法 長さ変化測定

JIS A 1129-3 にもとづき、角柱供試体に 10mm のゲージプラグを供試体の両側に埋め込み、ダイヤルゲージを用いて長さ変化(3 個の供試体の平均)を測定し、元の長さで除して、長さ変化率(μ 表記)を求めた。

2.4 実験結果 長さ変化測定

(i) 静的破砕剤関連

図-2.1 に静的破砕材を 20kg/m³ 使用した HPFRCC の長さ変化を、図-2.2 に静的破砕材を 22.5kg/m³ 添加した HPFRCC の長さ変化を示す。静的破砕材を 20kg/m³ 添加した HPFRCC は、材齢 7 日から 49 日まで緩やかな収縮挙動を示した後に長期材齢において緩やかな膨張挙動を示した。また収縮低減剤を 1%添加することにより 100 μ 程度の収縮量の低減の効果が見られた。静的破砕材を 22.5kg/m³ 使用した HPFRCC は、長期間にわたって膨張挙動を示した。また材齢 91 日の長さ変化の結果では、D22.5_SR1 は、D22.5 と D22.5_SR2 に比べて 200 μ 膨張量が大きくなった。

以上のように、静的破砕材の添加量によって収縮低減剤による効果が異なる結果となった。その理由は収縮低減剤の効果が最も見られる材齢 7 日から 28 日の間に複数微細ひび割れ型繊維補強セメント材料 (以下 HPFRCC) が膨張したことだと考えられる。図-2.1 の HPFRCC は材齢 7 日から 28 日まで緩やかな収縮挙動を示したが、図-2.2 の HPFRCC は材齢 21 日から膨張した。収縮低減剤の効果が見られる時期に静的破砕材を 22.5kg/m³ 使用した HPFRCC は膨張したため、収縮低減剤の効果があまり見られなかったと考えられる。

(ii) 反応性骨材関連

図-2.3 に反応性骨材を使用した HPFRCC の長さ変化の試験結果を示す。ここでは、反応性骨材を添加した HPFRCC に様々な養生を行った場合の長さ変化挙動を確認した。

RA40/95 は材齢 90 日で約 2500 μ 膨張した。RA40/95 は早期材齢から ASR による膨張が発生し、また長期材齢にわたって膨張し続けた。RA20/95 は材齢 90 日まで約 500 μ の膨張量を長期材齢にわたって保ち続け、また MRA40/95 も同様の挙動を示した。その理由として、MRA40/95 はアルカリを添加していないため、供試体の内部にあるアルカリ量が少ないからであると考えられる。つまり、RA20/95, MRA40/95 は長期材齢において微小な膨張量を保てる可能性があり、今後も測定していくことで微膨張モルタルの開発に役立つのではないかと考えられる。

気中養生した RA40/60 と RA20/60 は収縮した。Control と比較すると明らかであるが ASR による膨張は発生していないと考えられる。反応性骨材を添加しても水分が無ければ膨張しないことをここでは確認できた。つまり、水分を与えないことで収縮するため膨張反応のコントロールができるのではないかと考えられる。

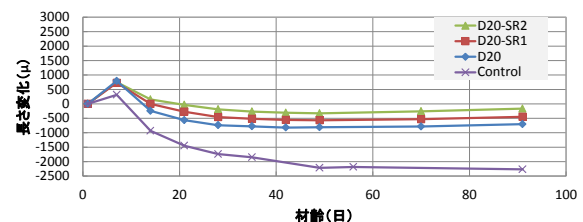


図-2.1 静的破砕材を 20kg/m³ 添加した HPFRCC

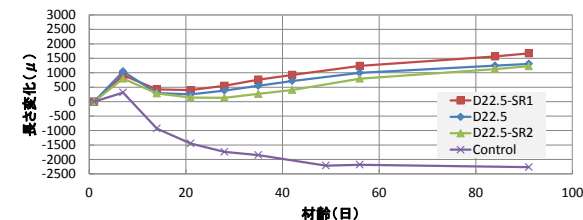


図-2.2 静的破砕材を 22.5kg/m³ 添加した HPFRCC

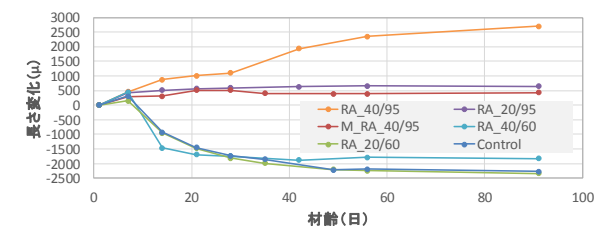


図-2.3 反応性骨材を入れた HPFRCC

3 章 反応性骨材を使用した繊維補強コンクリート

3.1 使用材料

表-3.1 に配合を示す。PVA 太繊維を容積当たり 2%の割合で使用した繊維補強コンクリートで作製した。反応性骨材は粉砕することなくそのまま使用した。本実験では使用する細骨材の量が従来のコンクリートと比較して少ない。ま

た、ここで用いた反応性骨材の膨張については、反応性骨材と普通細骨材は4:6の割合がペシマム量であるが、本実験での繊維補強コンクリートは細骨材の量が少ないため反応性骨材と普通骨材を5:5の割合で使用した。

表-3.1 示方配合

| NO. | 記号 | W/C (%) | W/P (%) | 単位置量(kg/m ³) | | | | | | | | |
|-----|---------|---------|---------|--------------------------|-----|----|------|-----|-----|------|-------|-----|
| | | | | W | C | LP | S | RA | G | AE | SP8HU | PVA |
| 1 | Control | 30 | 26 | 185 | 617 | 83 | 1212 | 0 | 243 | 0.03 | 9.3 | 26 |
| 2 | FRA | | | | | | 606 | 618 | | | | |
| 3 | NRA | | | | | | 618 | 630 | | | | |

3.2 供試体作製

はり供試体(寸法100×100×600mm)を作製した。はり供試体は表-3.2に示す合計8種類を作製した。末尾にSのついた供試体はD10(SD295)鉄筋を1本、かぶり25mmで配筋してある。表-3.1に示すように、Control配合は反応性骨材を入れていない繊維補強コンクリート、FRAは反応性骨材を入れた繊維補強コンクリート、NRAは反応性骨材を入れた普通コンクリートである。はり供試体にはゲージプラグを供試体の上面と下面に2個、距離が250mmで取り付け、長さ変化は上面と下面の2ヶ所で測定を行った。

表-3.2 供試体の一覧

| NO. | 記号 | W/C (%) | 単位置量 | | 養生方法 | | 鉄筋 | 繊維 | | |
|-----|-------------|---------|------|-----|------|----|----|----|----|---|
| | | | S | RA | 温度 | 湿度 | | | | |
| 1 | Control | 30 | 1212 | 0 | 20 | 60 | 無 | 有 | | |
| 2 | Control_S | | | | | | 有 | | | |
| 3 | FRA_20/95 | | 606 | 618 | 20 | 95 | 無 | | | |
| 4 | FRA_20/95_S | | | | | | 有 | | | |
| 5 | FRA_40/95 | | | | | | 40 | | 95 | 無 |
| 6 | FRA_40/95_S | | | | | | | | | 有 |
| 7 | NRA_40/95 | | 40 | 95 | 無 | 無 | | | | |
| 8 | NRA_40/95_S | | | | 有 | | | | | |

3.3 養生方法

NO.1とNO.2は繊維補強コンクリートを20℃、RH60%の気中養生を行い、NO.3とNO.4は反応性骨材を入れた繊維補強コンクリートを20℃、RH95%以上の湿布養生を行い、NO.5とNO.6は反応性骨材を入れた繊維補強コンクリートを40℃、RH95%以上の促進養生を行い、NO.7とNO.8は反応性骨材を入れた普通コンクリートを40℃、RH95%以上の促進養生を行った。

2章においては、反応性骨材を入れたHPFRCCは20℃、RH95%以上で長期材齢において微小な膨張を保ち続け、40℃、RH95%以上で材齢90日で3000μ以上膨張した。本章では、同じ条件下での養生を繊維補強コンクリートに

対して行い、微小な膨張や大きな膨張を導入しようとして試みた。

3.4 試験方法(曲げ試験)

曲げ試験機を使用して2点荷重の曲げ荷重試験を行い、終局荷重と終局たわみを測定した。はり供試体(100×100×600mm)は1種類3体ずつ作製した。はり供試体において膨張・収縮の検長区間は中央部分(長さ250mm)である。高感度変位計を上部の両端50mmの部分と下部の中央に設置し、たわみを計測した。支点間距離500mm、荷重点間距離100mmで荷重は二点荷重を行い。曲げ荷重試験ではすべての供試体に対して、荷重-たわみ曲線の荷重が最大となった点(鉄筋の降伏は除く)を曲げ耐力と終局たわみとした。1つの配合の種類の曲げ耐力と終局たわみとヤング率をそれぞれ求め、3つの供試体の平均を実験結果とした。

3.5 実験結果

3.5.1 長さ変化の測定結果

表-3.3に材齢90日の各供試体の長さ変化を示す。鉄筋を入れていない配合の上面と下面の長さ変化と鉄筋を入れた配合の鉄筋位置の長さ変化を示した。またASRによる膨張が発生した配合は供試体に与えたプレストレス量も示す。

表-3.3 長さ変化のまとめ

| 記号 | 上面 | 下面 | 鉄筋位置 | プレストレス |
|-----------|-------|-------|--------|----------|
| Control | -1100 | -900 | -800μ | - |
| FRA_20/95 | -50 | +50 | +50μ | - |
| FRA_40/95 | +3400 | +4300 | +1600μ | 22.8(kN) |
| NRA_40/95 | +2650 | +3300 | +1300μ | 19.0(kN) |

3.5.2 曲げ荷重試験の結果

(i) 湿布養生による影響

ControlとFRA_20/95を比較すると、FRA_20/95のひび割れ発生荷重は28%向上し、終局荷重はほぼ変化なく、終局たわみが0.6mm小さくなった。Control_SとFRA_20/95_Sを比較すると、FRA_20/95_Sのひび割れ発生荷重は54%向上し、終局荷重は10%向上し、終局たわみはほぼ変化なかった。これは表-3.3より、Controlは1000μ収縮しておりひび割れが発生しやすいためひび割れ発生荷重が小さくなったと考えられる。材齢90日程度であれば湿布養生下で反応性骨材を使用してもひび割れ発生荷重が向上するが、長期材齢においてASRによる膨張が起きる可能性があるため、さらに長期材齢において長さ変化測定と曲げ試験を行う必要があると考えられる。

(ii) ASR による膨張をプレストレスとして導入した結果

Control と FRA_40/95 を比較すると FRA_40/95 のひび割れ発生荷重は 21(%)低下し、終局荷重は 38%低下し、終局たわみは 47%低下した。これは ASR による膨張が発生したことによる供試体の劣化であると考えられる。PVA 太繊維のみでは ASR による膨張を拘束することができないことが確認された。Control_S と FRA_40/95_S を比較すると FRA_40/95_S のひび割れ発生荷重は 40(%)向上し、終局荷重は 7%低下し、終局たわみは変化しなかった。鉄筋を入れた FRA_40/95_S は 22.8(kN)のプレストレスが導入されることで、ひび割れ発生荷重を十分に向上でき、終局荷重と終局たわみを大きく低下させることがなかった。つまり、材齢 90 日程度であれば ASR による膨張を有効に活用できた。

(iii) ASR による膨張が発生したコンクリートの繊維の有無による比較

NRA と FRA_40/95 を比較すると、FRA_40/95 のひび割れ発生荷重が 29(%)向上し、終局荷重が 34(%)向上し、終局たわみが 0.7mm 向上した。FRA_40/95 の性能が向上していることから繊維のメリットは大きかった。NRA_S と RA40/95_S を比較すると FRA_40/95_S のひび割れ発生荷重は 24(%)向上し、終局荷重は 22(%)向上し、終局たわみは 1.1mm 向上した。NRA_S に導入したプレストレスは 19.0(kN)で FRA_40/95_S に導入したプレストレスは 22.8(kN)と違いはあるが、繊維を入れたことによるメリットは大きかった。

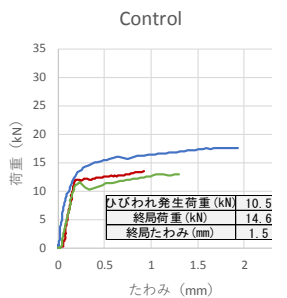


図-3. 1(a)Controlの曲げ試験

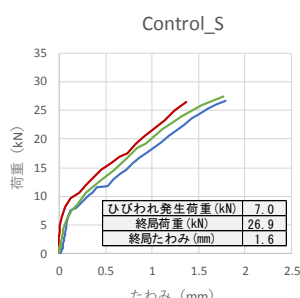


図-3. 1(b)Control_Sの曲げ試験

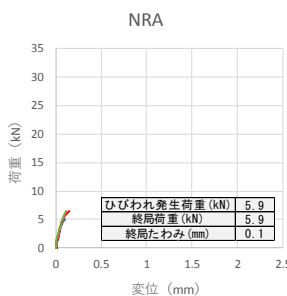


図-3. 1(c)NRAの曲げ試験

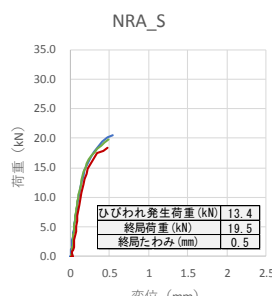


図-3. 1(d)NRA_Sの曲げ試験

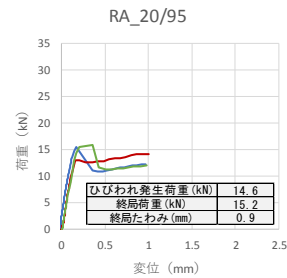


図-3. 1(e)RA20/95の曲げ試験

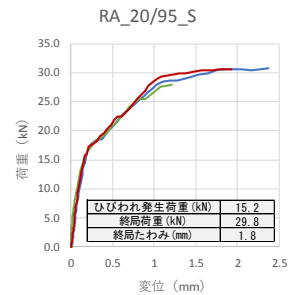


図-3. 1(f)RA20/95_Sの曲げ試験

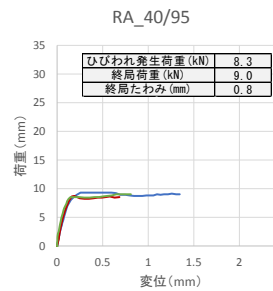


図-3. 1(g)RA40/95の曲げ試験

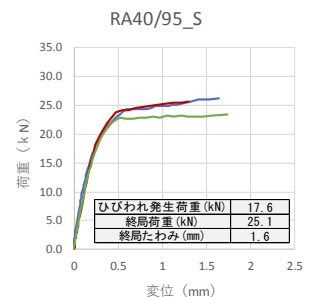


図-3. 1(h)RA40/95_Sの曲げ試験

4章 結論

4.1 2章のまとめ

1. 粉砕した 静的破砕材を 20(kg/m³) 使用した HPFRCC は収縮低減剤による膨張のコントロールが可能で、静的破砕材を 22.5(kg/m³) 使用した HPFRCC はコントロールできなかった。
2. 粉砕した反応性骨材を使用した HPFRCC を促進養生すると材齢 90 日で約 2500 μ 膨張した。
3. 粉砕した反応性骨材を使用した HPFRCC を湿布養生すると材齢 90 日まで約 500 μ の膨張量を保ち続けた。

4.2 3章のまとめ

1. 反応性骨材を使用した繊維補強コンクリートは材齢 90 日の湿布養生下では ASR による膨張が発生せず、ひび割れ発生荷重は鉄筋無しで 28(%)、鉄筋有りで 58(%)向上した。
2. 反応性骨材を使用した繊維補強コンクリートは材齢 90 日の促進養生下では ASR による膨張が発生し、22.8(kN)のプレストレスを導入した結果、ひび割れ発生荷重が 40(%)向上した。
3. 反応性骨材を使用したコンクリートと普通の繊維補強コンクリートを比較すると、鉄筋無しでひび割れ発生荷重は 29(%)、終局荷重は 34(%)、終局たわみは 0.7mm 向上し、鉄筋有りではひび割れ発生荷重は 24(%)、終局荷重は 22(%)、終局たわみは 1.1mm 向上した。