

論文 PP 繊維の親水性の違いが水分逸散環境下でのプラスチック収縮に与える影響

定月 良倫^{*1}・細田 暁^{*2}・佐藤 貴紀^{*3}・大島 章弘^{*4}

要旨: PP 繊維が打ち込み直後の収縮を抑制する効果の主因は PP 繊維の親水性による捕水効果であると考えており、その検証をモルタルにて行った。繊維の親水性処理の有無と繊維径が水分逸散環境下でのプラスチック収縮に及ぼす影響を調べた。親水性処理を施した繊維、径のより小さい繊維が水分逸散環境下での収縮抑制効果が大きかった。さらに、型枠とモルタルの界面性状がプラスチック収縮ひび割れに与える影響を分析し、親水性処理の無い PP 繊維でも架橋効果によりプラスチック収縮ひび割れを抑制する効果を示した。

キーワード: ポリプロピレン繊維, 親水性, プラスチック収縮, 水分逸散, ひび割れ抑制

1. はじめに

少量の合成短繊維をコンクリートに添加することによる剥落対策が検討され、鉄道高架橋などに実際に使用されている^{1), 2)}。剥落対策だけでなく、合成短繊維はコンクリートのブリーディングを抑制すること、ペーストのプラスチック収縮ひび割れを大幅に抑制するという報告もされている³⁾。合成短繊維は少量添加で施工性への影響が小さいのでコンクリートの品質改善策として汎用的に使用される可能性がある。

プラスチック収縮ひび割れの抑制効果にはポリプロピレン繊維（以下、PP 繊維）の親水性による捕水効果が大きな影響を及ぼすことを、これまでの研究で示してきた⁴⁾。水分が逸散しない条件で、ペーストの収縮を親水性のある PP 繊維が抑制し、親水性のない PP 繊維には収縮抑制効果がほとんどないことも示した⁵⁾。

本研究では、水分の逸散する条件において、PP 繊維がプラスチック収縮を抑制する効果を調べる。すなわち、高温、低湿度、風のあるプラスチック収縮ひび割れの発生しやすい条件で、主として PP 繊維の親水性に着目して、モルタルのプラスチック収縮量を測定する。さらに、プラスチック収縮ひび割れの抑制効果を検証する試験方法の確立へ向けて、型枠とモルタルの界面の摩擦の影響を詳細に考察する。

2. 実験の概要

2.1 使用材料

2 種類の実験を行った。繊維の親水性等の物性がプラスチック収縮量の抑制効果に及ぼす影響について検討したもの (3.1) とひび割れ抑制効果の評価のため型枠とモルタルの界面の処理方法を変更した実験 (3.2) である。

この 2 つの実験で、使用した材料の物性値と環境条件が一部異なっている。

結合材として普通ポルトランドセメントを、細骨材として千葉県君津産の山砂を使用した。使用材料の物性値を表-1 に示す。細骨材は十分に洗浄した後にふるいにかけて 5mm 以上を取り除いた。使用するセメント、水、細骨材を練り混ぜ直前まで 20℃の恒温室に保管し、材料の温度差による練りあがり温度への影響を無くした。使用した繊維の種類と物性値を表-2 に示す。

2.2 配合と練り混ぜ

配合は質量比で W/C=60%，砂セメント比 2.0 とした。混和剤は使用していない。表-3 に 2 つの実験の示方配

表-1 使用材料

材料	記号	種類及び物性値
セメント	C1	普通ポルトランドセメント 密度=3.16g/cm ³ 比表面積=3300cm ² /g
	C2	普通ポルトランドセメント 密度=3.16g/cm ³ 比表面積=3340cm ² /g
細骨材	S1	千葉県君津市産山砂 密度=2.62g/cm ³ 吸水率=1.49% 粗粒率=2.61
	S2	千葉県君津市産山砂 密度=2.60g/cm ³ 吸水率=1.63% 粗粒率=2.28

*1 横浜国立大学 工学部 建設学科 (正会員)

*2 横浜国立大学大学院 環境情報研究院 准教授 博(工) (正会員)

*3 大成建設株式会社 土木本部 土木設計部 海洋設計室 (正会員)

*4 萩原工業株式会社 合成樹脂事業部 製品開発グループ 工修 (正会員)

表-2 使用繊維

記号	繊維径(μm)	長さ(mm)	弾性係数(MPa)	密度 (g/cm ³)	融点(°C)	備考
PP-43	43	12	7500	0.91	160~165	親水性処理有
PP-65	65		5000			親水性処理有
PP-NC						親水性処理無

表-3 モルタルの配合

種類	W/C(%)	S/C	単位量(kg/m ³)					繊維添加量(vol%)
			C1	C2	W	S1	S2	
3.1 実験	60	2.0	595	0	357	1191	0	0.20
3.2 実験			0	593	355	0	1186	

合を示す。この配合とした目的は、材料分離が生じやすく、顕著なプラスチック収縮を生じさせることである。水分の逸散が生じる環境下では、水セメント比を大きくすると、材料分離により収縮が顕著になると考えた。収縮量が大きい条件において、繊維の収縮抑制効果の相对比较が容易になると考えた。水セメント比、砂セメント比ともに、一般的に使用されるコンクリートの配合の範囲から大きく逸脱しない値に設定した。

繊維の添加量をモルタルに対する体積比で 0.2%添加を基本とした。この添加量にした理由は、コンクリート片の剥落対策では繊維をコンクリートの体積比 0.1%以下で使用しており¹⁾、これをコンクリート中のモルタルに対する体積比に換算すると約 0.2%となるためである。剥落対策に使用されている繊維の長さに合わせて、12mm の繊維長を基本とした。

練り混ぜにはモルタルミキサーを使用した。練り量は 80 である。水は 1 次水と 2 次水を等質量に分けて使用した。練り混ぜ時間は砂とセメントと 1 次水を投入し 30 秒、さじで掻き落して更に 30 秒、その後、2 次水を投入しさじで掻き落して 30 秒、さじで掻き落して更に 30 秒、その後繊維を投入し 60 秒、さじで掻き落して更に 60 秒間、繊維無添加に関しても練り混ぜ条件を同じにするため 120 秒間空練りを行った。水を 2 回に分けて投入した理由は、ミキサーのエネルギーを効率よくモルタルに伝え、材料の分散性を高めるためである。既往の研究によって繊維を練り混ぜ水を加える前に添加すると、ブリーディング抑制効果やプラスチック収縮ひび割れ抑制効果が減少することが確認されている⁵⁾。このため、モルタルを練り混ぜた後に繊維を添加した。

練りあがったモルタルのフレッシュ性状は締め固めの必要がなく、流し込むだけで成型が可能なるものである。

2.3 プラスチック収縮ひび割れ試験

型枠は寸法が上面付近で 310mm×207mm、下面付近で 295mm×185mm、深さが 115mm であり、底部に向かって

テーパ加工が施してあるプラスチック製の市販されているものを使用した。打設直後における材料の分離は、コンクリートの高さ及び横寸法に大きく影響を受けるとの研究結果が報告されている⁶⁾。水平方向の断面が高さと比較して大きい場合には、コンクリートと型枠の内面との付着力又は摩擦力の影響が非常に小さくなり、コンクリートが自由に収縮をなすという報告から本研究では型枠高さと比較して水平方向の断面が大きい型枠を選定した。加えて収縮量を出来るだけ大きく確保するために、本モルタルの配合で研究室保有のモルタルミキサーを使用した際、水が飛散せずに練れる容量上限に近い容積の型枠を選定した。型枠の上面の淵でできるだけ正確に擦り切るため、一連の実験開始前に型枠上面を紙やすりで平らに削った。なお、試験時に型枠に離型剤は塗っていない。これは、離型剤を塗ることでモルタル表面に油膜が形成され、水分の逸散が妨げられることを防止するためである。

プラスチック収縮が促進される環境を作り出すために、風工学の専門家の指導のもと、簡易風洞装置を作成し、供試体に様な 6.0m/s の風が当たるようにした。風洞の模式図と写真を図-1 に示す。風速に関しては、強風時の風を想定して決定した。使用した送風機の仕様は羽根径 230mm、風量 19m³/min である。ベニヤ板で作製した筒状の箱を組み合わせ、送風口から緩やかに拡幅した断面を 4:1 の比率で一気に絞る(縮流)ことで様な風を作り出した。なお、風洞の拡幅した断面には金網を 2 枚重ねて入れている。これは、風速と風向を整える役割を果たす。完成した風洞を 30°傾けて設置した。このようにした理由はモルタル表面が沈下、収縮した後も様な風を当て続けるためである⁷⁾。供試体は床との熱の伝達を断つために、木製の台の上に載せ、床から 15cm 離して設置した。型枠にモルタルを打ち込んだ時間を 0 分として、10 分で風洞を作動させブリーディングした水を一散させた。打ち込み後から 300 分経過するまで様な風を送

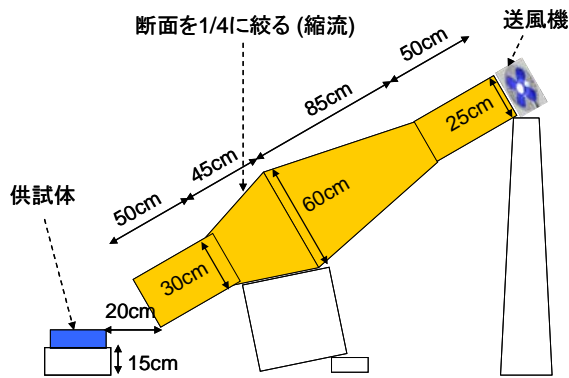


図-1 簡易風洞装置

り続け、300分経過したところで写真撮影と型枠縁からの沈下量の測定をおこなった。風洞の作動を打ち込み後10分としたのは、打ち込み直後から風を当てると、モルタルが風により移動し、それを避けるためである。

3.1で結果を示すプラスチック収縮による沈下量を測定する実験において養生室の環境は温度 $29\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 $26\pm 1\%$ である。3.2で結果を示すひび割れ抑制効果を調べる実験において養生室の環境は温度 $30\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 $30\pm 1\%$ である。温度・湿度に関しては、国内において想定される環境の範囲内で収縮が促進される厳しい条件に設定した。

2つの実験で最も大きく違う点は型枠とモルタルの界面の処理方法である。型枠とモルタルの界面が剥離した場合も一種のひび割れと考えることができるが、界面の摩擦によりばらつきが大きくなることが予備試験により判明した。3.2の実験においては、型枠とモルタルの境界面にテフロンシートと塩化ビニール製のシートを挿入した。テフロンシートは型枠壁面に接着してあり、塩化ビニール製シートはテフロンシートに直接モルタルが接し

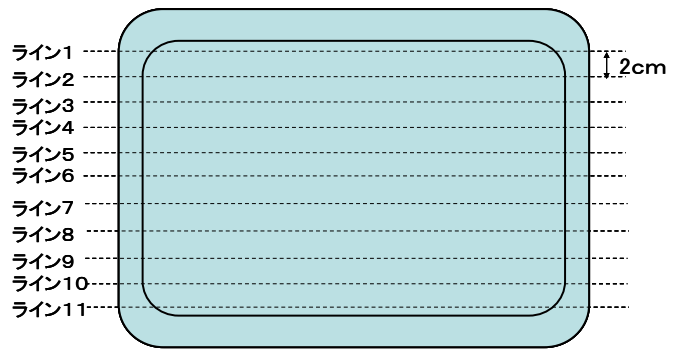


図-2 沈下量測定ライン

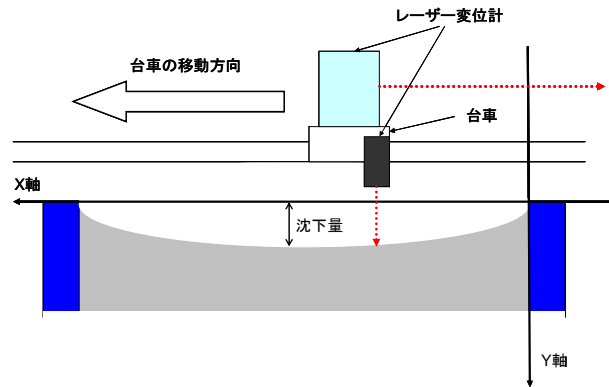


図-3 レーザー変位計概略図

ないように挿入されている。モルタルの収縮が進むとテフロンシートから塩化ビニール製のシートが剥離し、型枠の境界面での摩擦を低減できると考えた。界面処理がプラスチック収縮ひび割れに及ぼす影響を検討し、ひび割れ抑制効果を検討する適切な実験方法について考察する。さらに各実験で繊維の有無による比較を行うために繊維を添加していないモルタル(以下 Control)の沈下量、総ひび割れ面積を測定した。

2.4 沈下量の測定について

PP 繊維の親水性による収縮抑制効果の評価指標として型枠の縁からの沈下量を測定した。

沈下量の測定にはレーザー変位計を2つ用いた。レール上の台車に水平方向と鉛直方向にそれぞれレーザー変位計を固定し、デジタルデータレコーダーで変位を計測しながらレール上を台車が移動することで型枠縦方向の断面形状を測定した。乾燥面上の測定したラインを図-2に、レーザー変位計による沈下量測定の概略を図-3に示す。ラインは2cmの等間隔で全11本測定した。供試体の中央部を通るラインを6としてライン6から型枠の外側に向かい片側5本ずつ測定した。

2つのレーザー変位計から得られた値のうち、水平方向の変位をX座標、鉛直方向の変位をY座標とし、値をX、Y平面に図示するとモルタルの沈下後の形状が得られる。データの整理はExcelに出力された水平変位と鉛直変位をX、Y座標で表した点(以下プロット)を滑ら

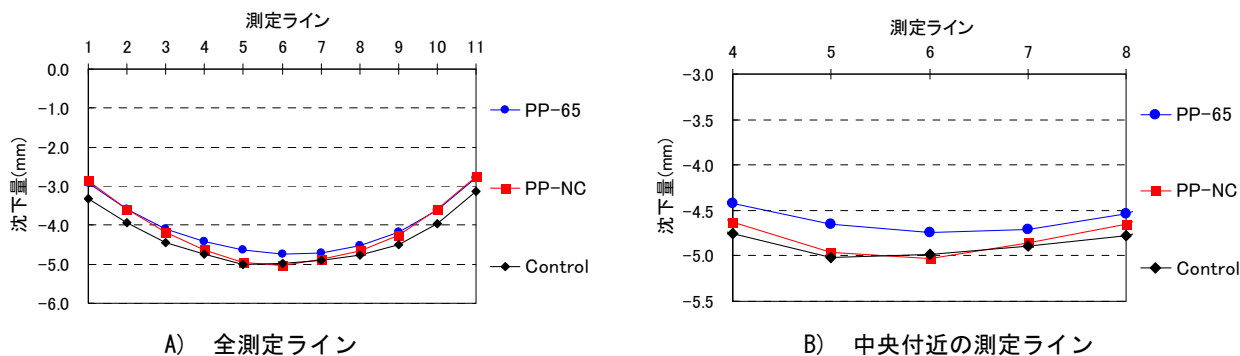


図-4 親水性の有無による沈下量の比較

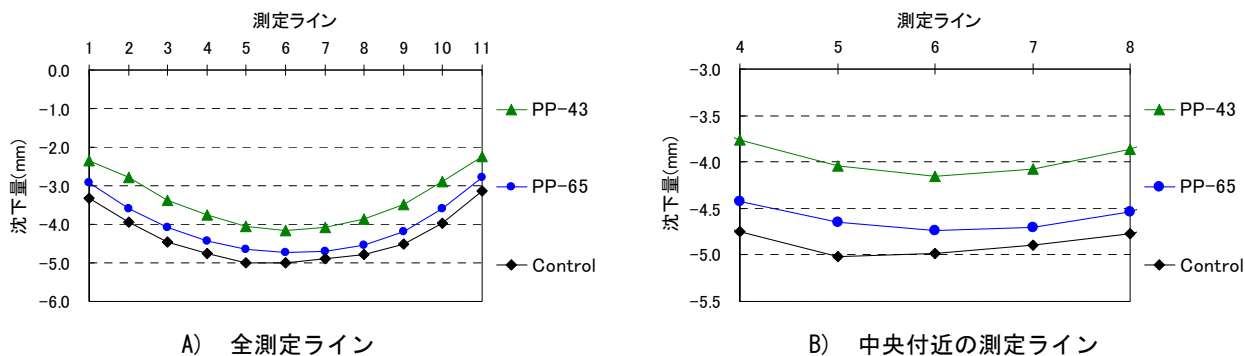


図-5 繊維径の違いによる沈下量の比較

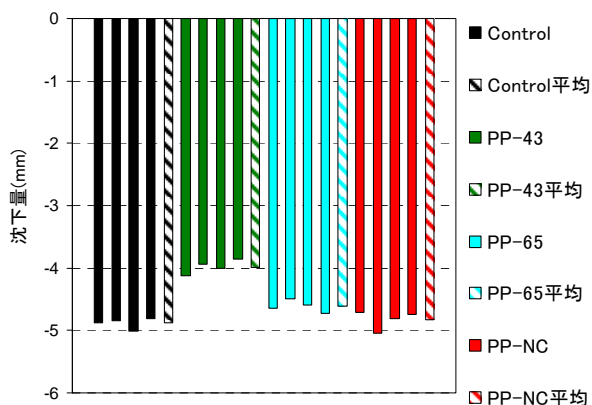


図-6 各供試体の中央付近の沈下量

かに結び、供試体表面付近の断面を表すグラフを作成して沈下量を求める。記録された左右の型枠の淵を表すプロットを結んだ線が水平となるように測定点全体を回転させ、表面に入ったひび割れ部分のプロットを取り除く。レーザー変位計はレーザーの照射部分と対象に当たったレーザーを受け取る部分を結ぶ微小な三角形により対象までの距離を測定している。そのためレーザーが十分に届き、三角形を結ぶことのできる表面部は測定が可能だが、ひび割れ部分ではひび割れの最深部までレーザーが届かないので測定結果の信頼性が低い。そこでひび割れ部分のプロットを取り除き、表面部分の変位を滑らかに示し、沈下量とした。

沈下量の測定は1種の繊維につき供試体4体ずつ、各11本のラインを測定している。測定した各ラインの沈下

量を供試体4体の平均値をとって比較した。繊維の違いが沈下量に及ぼす影響は、型枠とモルタルの摩擦の影響が小さい中央部のデータで評価した。

2.5 ひび割れの評価について

供試体を水分逸散条件下で5時間養生し、レーザー変位計での沈下量の測定が終了した段階でクラックスケールを用いてひびわれ幅とひび割れ長さを記録した。ひびわれ幅とひび割れ長さの積の総和を総ひび割れ面積とした。ひびわれ幅は30mm毎に測定し、その区間の平均的なひび割れ幅を測定し、長さと同幅を掛け合わせ、それらを足し合わせることでひび割れ面積を算定した。ひび割れ面積の総計である総ひび割れ面積で、ひび割れ抑制効果を評価する。

3. 実験結果

3.1 繊維径、親水性の有無に着目した実験の結果

沈下量を図-2の各測定ラインで比較したところ、型枠に近いラインでは型枠との摩擦の影響が現れてしまい繊維の影響が確認できなかった。型枠との摩擦の影響が小さい供試体中央付近の測定点で繊維の違いによる影響が顕著となった。

図-4に親水性の有無に着目した沈下量の比較結果を示す。図から明らかのように、モルタルの沈下量は型枠近傍で小さくなり、型枠界面での摩擦の影響が顕著である。型枠から離れた中央付近では、親水性処理を施した繊維の収縮抑制効果が確認できたが、親水性の無い繊維



A) 界面処理無し



B) 界面処理あり

図-7 界面処理の違いによる Control のひび割れ

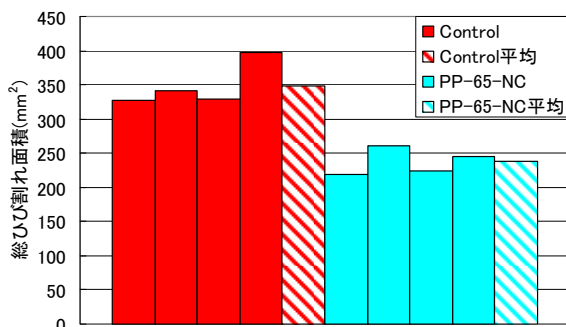


図-8 総ひび割れ面積測定結果

表-4 総ひび割れ面積測定結果

	Control	PP-65-NC
総ひび割れ面積 (mm ²)	327	219
	342	261
	328	225
	397	245
平均 (mm ²)	349	237
分散 (mm ⁴)	814.04	278.60
標準偏差 (mm ²)	28.53	16.69
変動係数	0.082	0.070

ではほとんど収縮抑制効果は確認できなかった。PP 繊維の親水性がモルタルの沈下量に影響をおよぼしているのは明らかである。繊維の親水性により繊維周囲の自由水が捕捉され、材料分離や供試体表面からの水分逸散が抑えられたため、プラスチック収縮が抑制されたと考える。

図-5 に径の異なる繊維の沈下量の比較結果を示す。径の小さい繊維ほど、高い収縮抑制効果が発揮されていることが分かる。特に、繊維径の小さい PP-43 で高い効果が確認できた。これは同量の繊維を添加した場合、繊維径が小さくなるほど、繊維の総表面積が大きくなり、親水性による捕水効果がより発揮されたためであると考えている。

図-6 に各供試体中央付近の沈下量と供試体 4 体の中央付近沈下量の平均を示す。繊維 1 種あたり 4 体の供試体の沈下量とその平均から、各繊維の収縮試験結果のばらつきは非常に小さいことがわかる。

3.2 型枠との界面を処理した実験の結果

繊維がプラスチック収縮ひび割れを抑える要因は繊維の親水性による捕水効果で収縮量が抑制されることと、ひび割れを繊維がまたぐ架橋効果によるものと考えている⁴⁾。

界面処理をした場合、テフロンシートから剥離した塩化ビニール製シートは養生が終了し、型枠縁からの沈下

量と総ひび割れ面積を測定した後、型枠から取り出すまでモルタルと付着しており、型枠から剥離した面に空気がまわりこみ、モルタルの乾燥が促進されることはなかった。

界面処理の方法の違いによる Control のひび割れを図-7 に示す。界面処理方法を変更することで、ひび割れの発生状況に大きな違いが見られた。界面処理を施した場合、型枠との摩擦が無くなり、供試体の乾燥面に近い部分がより自由に収縮をしやすくなり、供試体内部の十分な湿度がある箇所と収縮量に差が生じる。その収縮量の差が内部拘束となり界面処理をしないものよりも多くのひび割れが発生したと考えている。界面処理のない Control の場合、型枠との摩擦力、付着力も拘束となるため、供試体乾燥面の中央付近で発生するケースが多い。界面処理をしたもののひび割れは界面処理無しに比べひび割れ本数が多く、発生位置も中央付近だけでなく乾燥面全体に及んでいる。

界面処理のないものは境界面付近にモルタルが型枠から剥離しているのか、ひび割れて生じたのか判別のできない亀裂が発生した。この亀裂により総ひび割れ面積の結果がばらついてしまう。界面処理のあるものは型枠に接着したテフロンシートから塩化ビニール製のシートが剥離するので、境界条件が明確となった。界面処理によ

り剥離した部分を除いて、供試体乾燥面の亀裂を全てプラスチック収縮ひび割れとして評価することとした。

図-7の界面処理がある場合は、主たるひび割れ1本の長さは120~160mmほどであり、ひびわれ幅も端部は0.1mmほどだが最大幅は0.8~1.0mmほどである。繊維のひび割れ抑制効果を調べる時、種々の幅のひび割れについて効果を見ることができる、という利点もあると考えている。よって、2.5で記述した型枠の界面処理を施した方法でプラスチック収縮ひび割れの抑制効果を評価した。

総ひび割れ面積は各繊維につき界面処理をした供試体4体のデータを集め、その平均値で評価をしている。ControlとPP-NCの総ひび割れ面積の測定結果を図-7、表-4に示す。親水性処理の施していない繊維でもプラスチック収縮ひび割れを抑制している。親水性処理のない繊維の場合、プラスチック収縮による沈下量の抑制効果はないものの、ひび割れに繊維が架橋することでひび割れの発生とひびわれ幅の増大が抑えられたのではないかと考察する。親水性のある繊維の場合、収縮量が抑制されることで、さらにひび割れを抑制すると予想される。

界面処理を施すことで総ひび割れ面積のばらつきは図-8、表-4で示すほどに抑えることができた。テフロンシートと塩化ビニール製シートを挿入し、界面処理を施して総ひび割れ面積を測定することがプラスチック収縮ひび割れの測定、評価方法として有効であることを示した。

4 まとめ

本研究では少量のPP繊維の添加が水分逸散条件下でのプラスチック収縮による沈下量およびプラスチック収縮ひび割れに与える影響について考察し、以下の結果が得られた。

- (1) 少量のPP繊維の添加によりモルタル打ち込み後のプラスチック収縮による沈下が抑制された。その抑制効果は繊維の親水性による捕水効果によるものであると考察した。親水性処理を施していないPP繊維では収縮抑制効果はほとんど確認できなかった。
- (2) 繊維の径が小さくなるほどプラスチック収縮による沈下量の抑制効果が発揮された。
- (3) 繊維を添加することでモルタルのプラスチック収縮ひび割れが抑制された。親水性処理の施していない繊維でも架橋効果によってプラスチック収縮ひび割れが抑制された。
- (4) プラスチック収縮ひび割れの試験を行う際には、型枠界面の摩擦が大きく影響することを示した。

謝辞

横浜国立大学の椿龍哉教授、林和彦特別研究教員には境界条件の設定やひび割れの評価方法について、またレーザー変位計を用いての沈下量の測定方法についても多くの助言を頂きました。

横浜国立大学の勝地弘准教授には、風洞の作成に当たり風工学の観点から助言をいただきました。心より御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 細田暁, 菅野貴浩, 石橋忠良: 合成短繊維添加によるコンクリート片の剥落対策, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No1, pp.275-280, 2003
- 2) 土木学会: コンクリート標準示方書[施工編], 2007
- 3) Parvis Soroushian, Faiz Mirza, Abdulrahman Alhozaimey: Plastic Shrinkage Cracking of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete, *ACI Materials Journal*, V.92, No5, September-October 1995
- 4) 細田暁, 高梨大介, 高木亮一, 我彦聡志: 少量の合成短繊維による収縮ひび割れの抑制機構, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.28, No1, pp.299-304, 2006
- 5) 高木亮一, 細田暁: 少量の合成短繊維添加による打ち込み後の収縮抑制と凝結遅延, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No1, pp.417-422, 2007
- 6) 吉田 徳次郎: 新しいコンクリートに於ける材料分離に就いて, 土木学会誌, 第18巻第8号, pp.36-55, 1932
- 7) 日本風工学会: 風工学ハンドブックー構造・防災・環境・エネルギーー, 2007