

論文 補修用モルタルの諸特性に対する使用済みタイヤ由来の微粒子ゴムとグラフェンの影響

小野田 凌太*¹・上野 敦*²・大野 健太郎*²・鎌田 知久*³

要旨：鉄筋コンクリート床版の補修では断面修復工法が多く採用されている。この工法では一般に、床版と補修材の静弾性係数を同程度とし、補修材の乾燥収縮を抑え、応力集中を避けることで、床版と補修材の界面での剥離を抑制できることが報告されている。本研究では、補修材料に要求される機械的特性、乾燥収縮性状、物質透過性に対して、低弾性骨材としての使用済みタイヤ由来の微粒子ゴム（MRP）およびナノマテリアルの1つであるグラフェンの混和による影響について検討した。その結果、MRPとグラフェンを混和することで各種特性の向上および低下が確認された。

キーワード：補修用モルタル、微粒子ゴム、グラフェン、圧縮強度、静弾性係数、乾燥収縮、水分浸透性状

1. はじめに

鉄筋コンクリート床版（以下、RC床版）は、交通荷重による疲労、寒冷地における凍害および凍結防止剤散布による塩害などにより、橋梁部材の中でも変状が顕著化している部材である。RC床版の劣化は社会問題となっており、床版の取換えや補修材料を用いた断面修復が行われている。しかし、断面修復後に短期間で断面修復部の界面剥離等の損傷が発生する事例も散見されている。

断面修復工法では、一般に、既設床版と補修材の静弾性係数を同程度とし、既設床版と補修材の応力集中を避けることで、補修材の界面での剥離が抑制されることが報告¹⁾されている。そのため、補修材は既設床版の静弾性係数と同程度とすることにより、一体化させることが重要である。また、補修材の乾燥収縮を小さくすることで界面での微細ひび割れの発生を抑制できるものと考えられる。したがって、既設床版の補修部の再損傷を解決するための補修材の開発が求められる。

これまで著者らは、低弾性骨材としての使用済みタイヤ由来の微粒子ゴム(Micronized Rubber Powder, 以下、MRP)を細骨材に置換する形で用いたモルタルの機械的特性および乾燥収縮性状に対する、MRPの置換率および粒径の影響を基礎的に検討してきた²⁾。この結果、MRPの置換率の増加に伴い、モルタルの静弾性係数は低くなるものの、圧縮強度も低下する結果となった。また、MRPの置換率が高く、粒径が小さいと、乾燥収縮ひずみが大きくなった。一方、拘束下では、MRPを混和することで乾燥収縮によるひび割れ抵抗性が向上することが示された。

ここで、コンクリート分野において、寸法数nm～数百nm程度のナノマテリアルの実用化が進められている。

コンクリートにナノマテリアルを適用することで期待される効果としては、超微粒子による空隙充填作用や架橋効果による組織構造の緻密化、このことによる機械的性質の向上が考えられる。そこで、積層厚さ17nm、長さ最大5.7μmであり、ナノマテリアルの中でも比較的小さく、シート状の物質であるグラフェンに着目した。

これまで著者らは、MRPを混和することで、モルタルの静弾性係数の低下を保ったまま、MRPに加え、新たにグラフェンを添加することで、モルタルの強度を高くできる可能性があると考え、MRPとグラフェンを混和したモルタルの補修材料としての機械的特性の改善に関する検討³⁾を行ってきた。この結果、W/Cを小さくすることで、グラフェンを添加することによる圧縮強度の増加が確認され、低い静弾性係数を保ったまま圧縮強度を増加させることが可能となった。

本研究では、補修用モルタルに要求される特性として、乾燥収縮性状に加え、物質の透過性を調べるため、水分浸透性状および細孔構造に対するMRPとグラフェンの混和の影響を検討した。また、グラフェンの添加による圧縮強度増加の要因を明確にするため、MRPとグラフェンを混和したモルタルの破壊進行過程を臨界応力度⁴⁾の算出とAE法により検討した。

2. MRPとグラフェンの混和がモルタルの機械的特性に及ぼす影響³⁾

2.1 実験概要

(1) 使用材料およびモルタルの配合

表-1に使用材料を示す。細骨材の一部を体積置換したMRPの粒径範囲は200~830μmである。また、MRPとグラフェン（記号：Gr）の空気巻き込みおよび保持作用

*1 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域 (学生会員)

*2 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域 准教授 博士(工学)(正会員)

*3 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域 助教 博士(工学)(正会員)

表－1 使用材料

材料	名称	物性	記号
セメント	普通ポルトランドセメント	密度：3.16g/cm ³	C
細骨材	標準砂	表乾密度：2.64g/cm ³ 吸水率：0.42%	S
混和材	微粒子ゴム	表乾密度：1.14g/cm ³ 吸水率：0%	MRP
	グラフェンスラリー	密度：1.00g/cm ³ 固形分量：20Wt.% 積層厚さ：17nm 長さ：～5.7μm	Gr
化学混和剤	高性能減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物	SP
	空気量調整剤	ポリアルキレングリコール誘導体	D

表－2 モルタルの配合およびフレッシュ性状

配合名	W/C (%)	単位量(g/L)					SP (C×%)	D (C×%)	15打フロー (mm)	空気量A (%)
		W	C	S	MRP	Gr				
50%-Gr0	50	256	512	1536	—	0.000	—	—	166	—
50%-Gr0.020	50	256	512	1536	—	0.512	—	—	175	—
50%-Gr0.210	50	252	512	1536	—	5.376	—	—	185	—
50%-Gr0.230	50	251	512	1536	—	5.888	—	—	184	—
50%-Gr0.250	50	251	512	1536	—	6.400	—	—	181	—
50%-Gr0.275	50	250	512	1536	—	7.040	—	—	170	—
50%-Gr0.300	50	250	512	1536	—	7.680	—	—	185	—
30%-MRP0-Gr0	30	243	810	1320	0	0.000	0.5	0.000	163	2.0
30%-MRP10-Gr0	30	243	810	1188	57	0.000	0.7	0.010	213	6.1
30%-MRP20-Gr0	30	243	810	1056	114	0.000	1.25	0.016	189	7.1
30%-MRP30-Gr0	30	243	810	924	171	0.000	4	0.016	233	3.6
30%-MRP0-Gr0.100	30	240	810	1320	0	4.049	0.6	0.020	164	2.4
30%-MRP10-Gr0.100	30	240	810	1188	57	4.049	0.7	0.020	160	4.7
30%-MRP20-Gr0.100	30	240	810	1056	114	4.049	1.1	0.020	208	15.9
30%-MRP30-Gr0.100	30	240	810	924	171	4.049	3.75	0.020	231	8.4
30%-MRP0-Gr0.200	30	236	810	1320	0	8.098	0.6	0.026	160	2.7
30%-MRP10-Gr0.200	30	236	810	1188	57	8.098	0.7	0.026	155	3.0
30%-MRP20-Gr0.200	30	236	810	1056	114	8.098	1.1	0.026	193	7.1
30%-MRP30-Gr0.200	30	236	810	924	171	8.098	3.75	0.026	232	5.2
30%-MRP0-Gr0.300	30	233	810	1320	0	12.147	0.6	0.026	159	3.5
30%-MRP10-Gr0.300	30	233	810	1188	57	12.147	0.7	0.026	154	4.4
30%-MRP20-Gr0.300	30	233	810	1056	114	12.147	1.1	0.026	209	5.8
30%-MRP30-Gr0.300	30	233	810	924	171	12.147	3.75	0.026	225	5.1

を考慮して空気量調整剤を使用し、さらに、15 打フローを調整するため高性能減水剤を使用した。

モルタルの配合および、15 打フロー、空気量の測定結果を表－2 に示す。表－2 の Gr は固形分量 20wt% で除したスラリーとしての単位量を示しており、スラリー中の水の質量は計量時に単位水量から差し引いている。モルタルの配合は、W/C=50% では、グラフェンの添加がモルタルの圧縮強度に及ぼす影響を明確にすること、W/C=30% では、W/C=50% の配合との圧縮強度の比較に加え、グラフェンと MRP の混和がモルタルの圧縮強度および静弾性係数に及ぼす影響を明確にすることを目的とした。W/C=50% では、S/C=3.0、Gr の固形分添加率を 0.020、0.210、0.230、0.250、0.275、0.300 (C×%) とした。W/C=30% では、ワーカビリティ確保のため、セメントペースト体積 V_p ：細骨材体積 $V_s=1:1$ とし、MRP による細骨材の体積置換率を 0、10、20、30% (図表中記号：MRP0、MRP10、MRP20、MRP30)、Gr の固形分添加率を 0、0.100、0.200、0.300 (C×%) (図表中記号：Gr0、Gr0.100、Gr0.200、Gr0.300) とした。

練混ぜ方法は、JIS R 5201 を参考とし、グラフェンを分散させるため、練混ぜ時間を規定の 2 倍とした。グラ

フェンスラリーはマグネチックスターを用いて攪拌しながら計量し、練混ぜ水と混合させてから、セメントと接水させた。

(2) 試験方法

15 打フロー試験は JIS R 5201 に、空気量試験は JIS A 1116 に準拠した。

W/C=50% の配合では、JIS R 5201 に準拠し、40×40×160mm の角柱供試体を作製し、補修モルタルの短期材齢での機械的特性を調べるため、材齢 1 日で脱型し、7 日間の水中養生後、圧縮強度試験を実施した。

W/C=30% の配合では、JSCE-G 505 に準拠し、φ50×100mm の円柱供試体を作製し、材齢 1 日で脱型し、材齢 7 日まで水中養生後、圧縮強度試験を実施した。載荷中の縦ひずみは検長 30mm のひずみゲージで測定した。

2.2 結果および考察

(1) 水セメント比とグラフェン添加率が圧縮強度に及ぼす影響

図－1 にグラフェン添加率とモルタルの圧縮強度の関係を示す。W/C=50% ではグラフェン添加率の増加に伴い、圧縮強度は若干低下した。一方、W/C=30% ではグラフェンを添加することで圧縮強度は若干高くなった。これは、

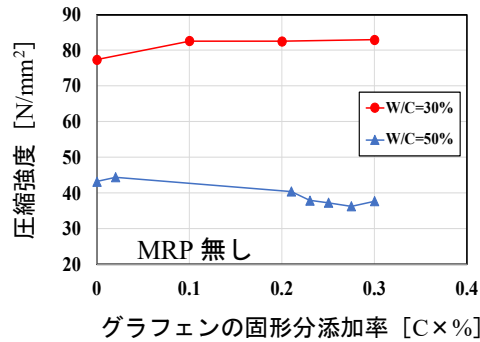


図-1 グラフェン添加率と圧縮強度³⁾

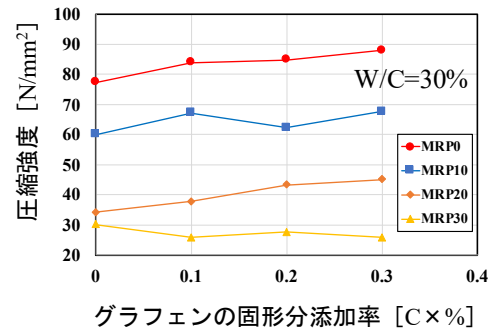


図-2 グラフェン添加率と圧縮強度の関係

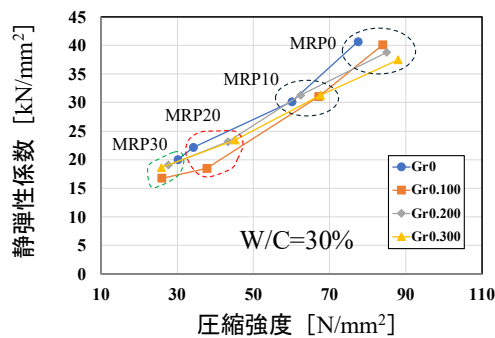


図-3 圧縮強度と静弾性係数の関係

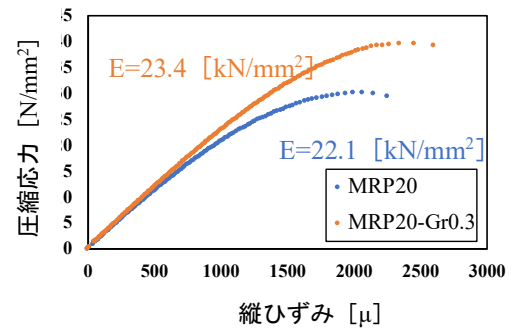


図-4 応力-ひずみ曲線

低水セメント比によりセメント水和物間の距離が近くなり、長さ最大 $5.7\mu\text{m}$ のグラフェンが粗大な空隙を分断する架橋効果を示したと考えられる。また、 $W/C=50\%$ の場合に圧縮強度が若干低下した要因として、 $W/C=30\%$ の場合と比較して、セメント水和物間の距離が大きく、グラフェンの架橋効果が十分に現れなかったことや、グラフェンの添加による空気巻き込み作用によって空気量が若干増加した可能性が考えられる。

(2) MRP の置換率とグラフェンの添加率が圧縮強度に及ぼす影響

これまでの検討³⁾では、 $W/C=30\%$ の配合で空気量にばらつきがあったため、圧縮強度を評価するにあたり、空気量が圧縮強度に影響を及ぼす可能性を考え、空気量の測定結果をもとに圧縮強度の補正を行った。補正方法は式(1)より、実測の空気量 1%の増加（または減少）に対して圧縮強度が 4%低下（または増加）すると考え⁴⁾、各配合の空気量を 2.0%として補正計算した圧縮強度を基にした。

$$F'_c = f'_c(1 \pm |A - 2.0| \times 0.04) \quad (1)$$

ここに、 F'_c : 補正後の圧縮強度 [N/mm^2], f'_c : 実測の圧縮強度 [N/mm^2], A : 実測の空気量 [%]

図-2 に MRP を用いたモルタルのグラフェン添加率と圧縮強度の関係を示す。MRP の置換率の増加に伴い、圧縮強度は小さくなった。そして、MRP の置換率が 20%までの範囲では、グラフェンの添加により圧縮強度が高くなった。また、グラフェンの添加による強度増加率は、

MRP20 で最も高くなることがわかった。一方、MRP 置換率 30%の場合では、グラフェンの添加率増加に伴い圧縮強度は若干低下した。これは、モルタルよりも MRP 粒子の弾性係数が低いことによる圧縮強度低下の影響が、グラフェンによる強度増加の影響を上回ったことが原因であると考えられる。

(3) 圧縮強度および静弾性係数

図-3 にモルタルの圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。図中の破線で囲った枠は、同一 MRP 置換率でグラフェンの固形分添加率が異なる配合のプロットを示す。同一 MRP 置換率では、グラフェンを添加することで同等の静弾性係数を保ったまま、圧縮強度が大きくなることがわかった。また、同一 MRP 置換率では、グラフェンの添加による静弾性係数への影響は小さいこともわかった。ここで、MRP およびグラフェンの混和がモルタルの圧縮破壊過程に及ぼす影響を次章にて考察する。

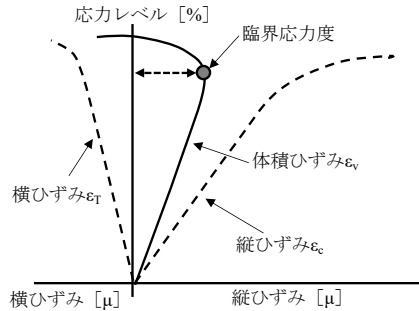
3. モルタルの破壊進行過程に対する MRP とグラフェンの混和の影響

3.1 使用材料およびモルタルの配合

使用材料は表-1 に示したものと同一である。モルタルの配合および 15 打フロー、空気量の測定結果を表-3 に示す。モルタルの配合は、2. の検討で、グラフェンの添加による圧縮強度の増加率が最も高かった MRP 置換率 20%のものを対象に、グラフェンをセメント質量に対し 0, 0.3%添加した水準 (MRP20, MRP20-Gr0.3) と MRP

表－3 モルタルの配合およびフレッシュ性状

配合名	W/C (%)	単位量(g/L)					SP (C×%)	D (C×%)	15打フロー (mm)	空気量A (%)
		W	C	S	MRP	Gr				
Plain	30	243	810	1320	0	0	0.50	0	163	2.0
MRP20	30	243	810	1056	114	0	1.25	0.016	189	7.1
MRP20-Gr0.3	30	233	810	1056	114	12.147	1.10	0.026	209	5.8



図－5 載荷時の縦・横・体積ひずみと
応力レベルの関係

とグラフェンをともに添加しない水準（Plain）の3水準とした。また、供試体はφ50×100mmの円柱とし、材齢1日で脱型後、材齢7日まで水中養生を行ったものを使用した。

3.2 最大応力時の縦ひずみ

図－4にMRP20とMRP20-Gr0.3の応力-ひずみ曲線を示す。載荷初期では応力-ひずみ曲線の直線関係は、グラフェンの有無によらず同等であり、グラフェンによる静弾性係数への影響は小さいことがわかる。一方、最大応力時の縦ひずみはMRP20-Gr0.3では、MRP20と比較して500μ程度大きいことから、グラフェンが高い応力レベルでの微細ひび割れの進行を抑制したものと考えられる。

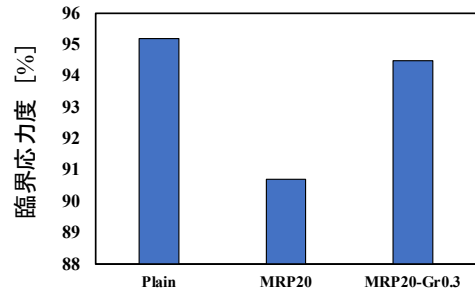
3.3 モルタルの圧縮強度試験時における臨界応力度

図－5にコンクリートの圧縮強度試験時における圧縮応力レベルと縦ひずみ、横ひずみ、体積ひずみおよび臨界応力度の関係を示す。応力レベルとは、最大応力度に対する、各応力時までの応力の割合を示している。また、臨界応力度は、コンクリートの体積ひずみが増加に転じる時点の応力レベルと定義される⁵⁾。体積ひずみは、縦ひずみと横ひずみから式(2)により算出した。

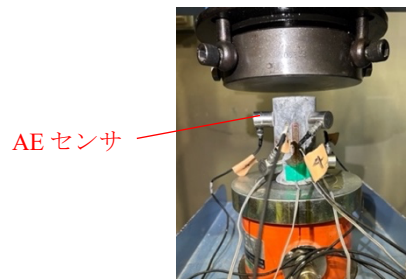
$$\varepsilon_v = \varepsilon_c - 2\varepsilon_T \quad (2)$$

ここに、 ε_v ：体積ひずみ、 ε_c ：縦ひずみ、 ε_T ：横ひずみ
圧縮強度試験は、JSCE-G 505に準拠して実施した。また、載荷中の縦ひずみおよび横ひずみを検長30mmのひずみゲージをそれぞれ2枚ずつ用いて測定した。その後、式(2)により体積ひずみを求め、臨界応力度を算出した。

図－6に臨界応力度の算出結果を示す。Plainと比較してMRP20では、臨界応力度が低下した。一方、MRP20-Gr0.3では、臨界応力度は高くなり、Plainと同等となっ



図－6 臨界応力度



写真－1 AE計測時のモルタル供試体

た。これは、グラフェンが高い応力レベルに至るまでの過程で破壊の進行を抑制したためと考えられる。

3.4 AE法を用いた破壊進行過程の検討

(1) AEの計測方法

写真－1に示すように、供試体底面から25mm、75mmの位置で左右に1個ずつ、計4個のAEセンサをひずみゲージ用接着剤で供試体に貼付した。また、供試体と載荷面の摩擦を低減するために、グリスを塗ったテフロンシートを供試体の載荷面に貼り付け、破壊に至るまで載荷した。

(2) 累積AEエネルギー率と応力レベル

AE計測により記録された1つのAE波の特徴を表す指標としてAEパラメータが提案されている⁶⁾。そのうち、本研究では、1波形全体のエネルギーを表す「AEエネルギー」を用いて、載荷時の変形や破壊の規模を示す累積AEエネルギー率を求め考察することとした。図－7に累積AEエネルギー率と応力レベルの関係を示す。なお、累積AEエネルギー率とは、載荷初期から破壊までに得られた全累積AEエネルギーに対する、各応力時までの累積AEエネルギーの割合を示すものである。図より、応力レベルによらず、Plainと比較してMRP20では累積AEエネルギー率は高くなっていることがわかる。一方、MRP20-Gr0.3ではMRP20と比較して累積AEエ

エネルギー率は小さくなっている。以上より、グラフェンを添加することで、载荷初期から終局段階にかけて供試体に生じる変形や破壊を抑制していることが考えられる。これは、図-6 で示したように、グラフェンを添加することで臨界応力度が高くなり、供試体が膨張に転ずる応力レベルが大きくなったことと整合すると考えられる。

4. モルタルの乾燥収縮性状、水分浸透性状および細孔構造に対する MRP とグラフェンの混和の影響

4.1 使用材料およびモルタルの配合

使用材料およびモルタルの配合はそれぞれ、表-1、表-2 に示したとおりである。

4.2 試験方法

(1) 長さ変化試験

JISA 1129-2 に準拠し、モルタルの乾燥収縮ひずみを測定した。供試体は $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ とし、材齢 1 日で脱型し、 20°C の水中で材齢 7 日まで養生後、基長 100mm を測定した。その後、 20°C 、60%R.H. の恒温恒湿室に保管し、所定の乾燥材齢において長さを測定した。

(2) 拘束収縮試験

ASTMC 1581 を参考とし、モルタルの拘束収縮試験を行った。供試体は、写真-2 に示すとおり、モルタルの厚さを 40mm、高さを 150mm とし、内側に拘束用の外径 406mm の鋼管を有する円筒形の供試体を 1 配合につき 2 体作製した。供試体は、材齢 1 日で外型枠を外した後、 20°C の室内で湿布養生を材齢 7 日まで行い、それ以降は、 20°C 、60%R.H. の恒温恒湿室に保管した。気中保管中の供試体の収縮ひずみは、検長 30mm のひずみゲージで、拘束枠となる鋼製円筒の内型枠およびモルタル表面で 2 箇所ずつ測定し、乾燥開始の材齢 7 日を起点としてひび割れ発生日数を記録し、2 供試体の平均値を各配合のひび割れ発生日数とした。

(3) 水分浸透速度係数試験

JSCE-G 582 を参考として、水分浸透深さを測定した。材齢 7 日まで水中養生を行った $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の供試体を、打込み底面から約 10mm の位置で切断除去し、側面をアルミテープでシールし二面開放とした。その後、 20°C 、60%R.H. の環境で 91 日間以上乾燥させた。供試体下面から 10mm の高さまで水に浸漬し、5、24、48 時間で取り出し、質量を測定後に割裂し、水分検知剤を噴霧して呈色した深さを 5 点測定し、その平均値を水分浸透深さとした。

(4) 細孔径分布

材齢 7 日まで 20°C の水中養生を行った $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の供試体を粉砕し、2.5~5.0mm に細分化したモルタル片を採取した。採取したモルタル片を 24 時間アセトンに浸漬し、デシケータを用いて真空状態で 7 日間以上保管し

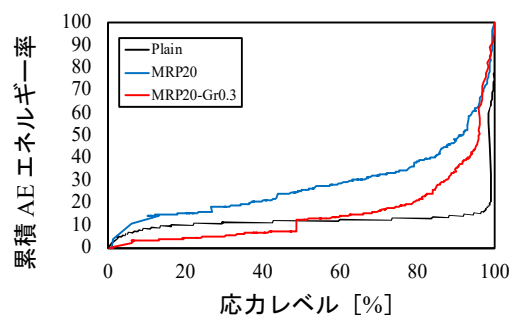


図-7 累積 AE エネルギー率と応力レベルの関係

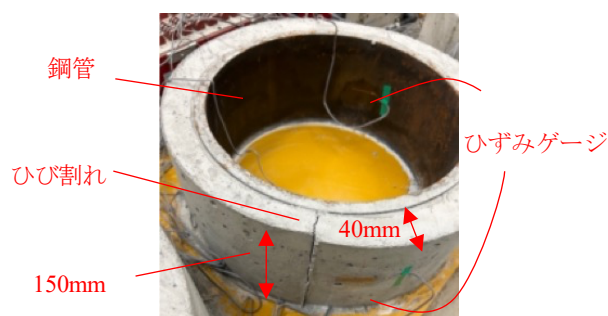


写真-2 円筒形の供試体

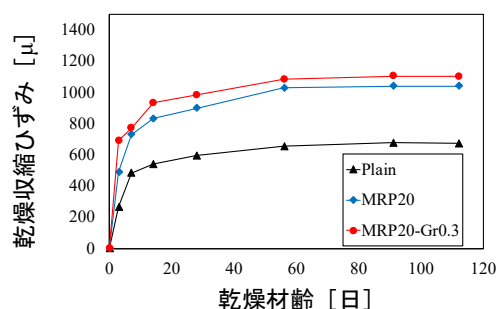


図-8 乾燥収縮ひずみの経時変化

た後、水銀圧入法によって細孔径分布を測定した。

4.3 結果および考察

(1) 長さ変化試験

図-8 に各モルタル供試体の乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。Plain と比較して MRP20 では乾燥収縮ひずみは大きくなり、既往の研究²⁾と同様の結果となった。MRP20-Gr0.3 では、MRP20 と比べて、乾燥収縮ひずみは若干大きくなるが同程度であり、グラフェンを添加することによる乾燥収縮性状への影響は小さいと考えられる。

(2) 拘束収縮試験

図-9 に各モルタル供試体のひび割れ発生日数を示す。図中のプロットは、各配合の 2 供試体の平均値であり、エラーバーは、供試体ごとの値を示す。Plain と比較して、MRP20 ではひび割れ発生日数は長くなり、ひび割れ抵抗性が向上することがわかる。また、MRP20-Gr0.3 では MRP20 と比較してひび割れ発生日数が若干短くなったが、Plain と比較して長く、MRP の低弾性係数の効果が

現れていると考えられる。また、グラフェンによるひび割れ抵抗性への影響は小さいと考えられる。

(3) 水分浸透深さ

図-10 に各モルタル供試体の水分浸透深さの経時変化を示す。Plain と比較して MRP20 は、浸漬 5 時間以降の水分浸透深さが小さくなった。このことから、MRP を用いることで水分浸透抵抗性が向上することがわかる。これは、MRP の疎水性により水分の浸透を妨げていることが考えられる。MRP20-Gr0.3 では、水分浸透深さは MRP20 と比較して若干小さくなるが、同程度であることから、グラフェンの添加による水分浸透性状への影響は小さいと考えられる。

(4) 細孔径分布

図-11 に各モルタルの細孔径分布測定結果を示す。MRP20 では Plain と比較して、1 μ m を超える細孔量が顕著に増加した。これは、測定時の圧力上昇による MRP の体積変化の影響を受けた可能性が考えられる。また MRP20-Gr0.3 では MRP20 と比較して、全ての細孔径において細孔量が増加した。これらの要因は明らかではないが、練混ぜ時に巻き込んだ空気がグラフェンとセメントペーストの間に入り込み、グラフェンの広い表面積や疎水性により、排出が妨げられた可能性が考えられる。

5. まとめ

- (1) W/C=30%では、MRP の置換率 20%までは、グラフェンの添加により、同等の静弾性係数を保ったまま圧縮強度が高くなることが確認された。
- (2) MRP20 では Plain と比較して、臨界応力度は低下したが、MRP20-Gr0.3 では、臨界応力度が Plain と同程度まで高くなることが確認された。
- (3) MRP20 の累積 AE エネルギー率は、Plain と比較して載荷初期から終局段階において高くなるが、MRP20-Gr0.3 では MRP20 と比較して低くなることが確認された。
- (4) MRP を用いることで、モルタルの乾燥収縮ひずみは大きくなるが、ひび割れ抵抗性は向上する。一方、グラフェンの添加による影響は小さいことが確認された。
- (5) MRP を用いることで、モルタルの水分浸透抵抗性は向上するが、グラフェンの添加による影響は小さいことが確認された。

謝辞：本研究の遂行にあたり、日本ミシュランタイヤ株式会社よりリーハイテクノロジー社製の試料の提供を受けた。ここに記して謝意を表す。

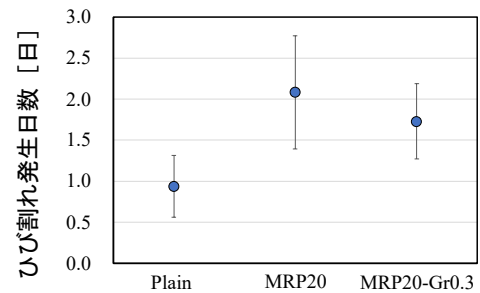


図-9 ひび割れ発生日数

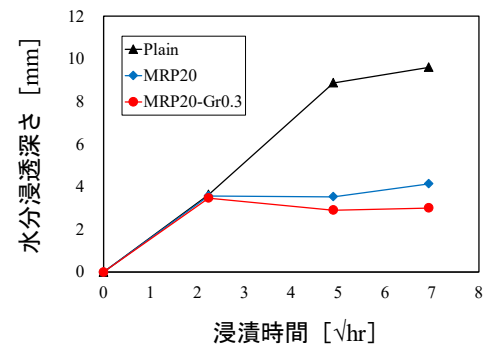


図-10 水分浸透深さの経時変化

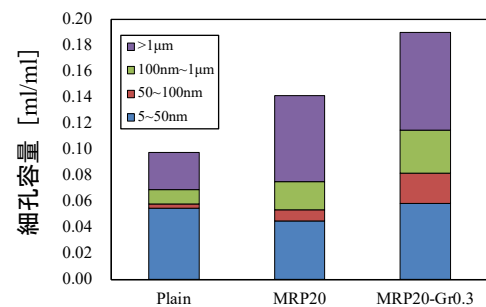


図-11 細孔径分布

参考文献

- 1) 松本政徳ほか：RC 床版における断面修復部の耐久性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.35, No.2, pp.673-678, 2013.6
- 2) 小野田凌太ほか：使用済みタイヤ由来の微粒子ゴムの置換率と粒径がモルタルの特性に及ぼす影響，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.78, V-715, 2023.8
- 3) 小野田凌太ほか：使用済みタイヤ由来の微粒子ゴムとグラフェンの混和がモルタルの機械的特性に及ぼす影響，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.79, V-729, 2024.8
- 4) 公益社団法人日本コンクリート工学会：コンクリート技術の要点 '23. p.69, 2023.9
- 5) 社団法人日本コンクリート工学協会編：コンクリート便覧 [第二版]，技報堂出版，p.236, 1996.2
- 6) 日本非破壊検査協会編：非破壊検査技術シリーズ アコースティック・エミッション試験 I，社団法人日本非破壊検査協会，pp.16-19, 2006