

人工軽量細骨材を使用した低環境負荷型・超低収縮 高強度コンクリートの各種性状

Properties of Low Environmental Impact and Ultra-low Shrinkage High-strength Concrete Using Artificial Lightweight Fine Aggregate

建築基盤技術部	峯 竜一郎	RYUICHIRO MINE
建築基盤技術部	坂本 遼	RYO SAKAMOTO
建築基盤技術部	松田 拓	TAKU MATSUDA
建築技術部	菅谷 泰之	YASUYUKI SUGAYA
建築技術部	若林 信太郎	SHINTARO WAKABAYASHI
建築技術部	横山 徹	TORU YOKOYAMA

本研究は、自己収縮と乾燥収縮のどちらも低減することのできる低環境負荷型高強度コンクリートの開発を目的とするものである。これを実現するため、結合材はセメントの 6 割程度を副産物で置換し、細骨材に人工軽量細骨材を使用することで、単位水量を通常よりも低減させた。その結果、フレッシュ試験により、スランプフローが 70cm を超える高流動性が確認された。また、人工軽量細骨材を使用したコンクリートの圧縮強度は、内部養生効果により、水分供給のない養生条件と水中養生で有意な差は生じないことが明らかとなった。さらに、収縮ひずみは、自己収縮と乾燥収縮のどちらも小さくなった。

キーワード：高強度コンクリート、人工軽量細骨材、低環境負荷、単位水量、圧縮強度、収縮ひずみ

Low environmental impact and ultra-low shrinkage high-strength concrete was developed. Regarding mix proportion of developed concrete, unit water content was reduced extremely compared to conventional concrete by replacing around 60 % of cement with by-products and using artificial lightweight fine aggregate (LWS). As a result, it was clarified that 1) the figure of slump flow exceeded more than 70cm and 2) the difference of curing conditions, such as the presence or absence of water supply and water dissipation, have little effect on compressive strength. Furthermore, it was also clarified that 3) both autogenous shrinkage and drying shrinkage of developed concrete were extremely low due to LWS.

Key Words: High-strength concrete, Artificial lightweight fine aggregate, Low environmental impact, Unit water content, Compressive strength, Shrinkage

1. はじめに

著者らは、超低水結合材比条件下で吸水率が大きいフェロニッケルスラグ細骨材を用い、単位水量を極力低減すると、自己収縮と乾燥収縮どちらも極めて少ない高強度コンクリートが得られることを示した¹⁾。また、自己収縮が低減されるメカニズムは、内部養生効果に起因すると考察している²⁾。内部養生効果は、コンクリート中に高含水率の材料を使用することで、セメントペーストの自己乾燥時に内部から水分を供給し自己収縮が低減

される現象であり、人工軽量細骨材を用いた場合で広く知られている³⁾。近年では人工軽量細骨材を使用して超高強度コンクリートの自己収縮を低減する技術が報告されている⁴⁾。

本研究は、超低水結合材比条件下において人工軽量細骨材を使用して単位水量を通常よりも低減するとともに、セメントの 6 割程度を副産物で置換することで、自己収縮と乾燥収縮のいずれも低減することのできる低環境負荷型な高強度コンクリートの開発を目的とするものである。本報では、その試験結果のうち、フレッシュ試

験結果、圧縮強度試験結果および収縮ひずみ測定結果について報告する。

2. 使用材料とコンクリートの調合条件

使用材料を表-1 に示す。結合材は普通ポルトランドセメント (NC)、高炉スラグ微粉末 (BF)、シリカフェーム (SF) の 3 成分系とした。細骨材は、原料が膨張性頁岩の人工軽量細骨材 (LWS) と硬質砂岩砕砂 (HS) の 2 種類とした。粗骨材は最大粒径が 20mm の硬質砂岩砕石とした。高性能減水剤 (SP) については、ポリカルボン酸系が主成分の SP1 と SP2 の 2 種類を使用した。コンクリートの調合条件を表-2 に示す。水結合材比を 18.0%、細骨材率を 47.5%、単位水量を 130kg/m³ とした。結合材は質量比で NC:BF:SF=38:52:10 とした。なお、W140-LWS については、実製造における細骨材の表面水率補正などの影響による単位水量の変動を想定し、W130-LWS の計画調合に対して 10kg/m³ に相当する水を外割で添加した。コンクリートの練混ぜは強制 2 軸ミキサを使用し、水と化学混和剤以外の材料を投入し、10 秒攪拌後に水と化学混和剤を投入する一括練りとした。ポリプロピレン繊維 (以下、PP 繊維) を混入した水準については、コンクリートの練混ぜ完了後に PP 繊維を投入し、試料を作製した。

3. フレッシュ試験結果

フレッシュ試験結果を表-3 に示す。スランプフロー値は、細骨材を LWS とした水準で、43.5~73.8cm の範

囲だった。細骨材を HS とした水準のスランプフロー値は 31.5~46.6cm だった。また、SP 添加率は、細骨材を LWS とした水準で 0.75~1.00%、HS とした水準で 0.85~1.75% だった。

SP 添加率とスランプフローの関係を図-1 に示す。

W130-HS は SP 添加量が W130-LWS より多いにもかかわらず、W130-LWS よりスランプフロー値が小さい。すなわち、細骨材を LWS としたコンクリートは、細骨材を HS としたものと比べ、少量の SP 量で同一のスランプフローを得ることが出来ると考えられる。また、PP 繊維を混入した水準については、細骨材を LWS とした場合、PP 繊維を混入することでスランプフローの値

表-1 使用材料

名称	種類	物性値	記号
水	上水道水	-	W
セメント	普通 ポルトランドセメント	密度：3.16g/cm ³ 比表面積：3,290cm ² /g	NC
混和材	高炉スラグ微粉末	密度：2.89g/cm ³ 比表面積：4,630cm ² /g	BF
	シリカフェーム	密度：2.20g/cm ³ 比表面積：200,000cm ² /g	SF
細骨材	人工軽量細骨材	表乾密度：1.86g/cm ³ 吸水率：15.5%	LWS
	硬質砂岩砕砂	表乾密度：2.61g/cm ³ 吸水率：1.08%	HS
粗骨材	硬質砂岩砕石	表乾密度：2.64g/cm ³ 吸水率：0.62% 実積率：62.1%	HG
化学 混和剤	高性能減水剤 (I 種)	ポリカルボン酸系	SP1
	高性能減水剤 (I 種)	ポリカルボン酸系	SP2
	消泡剤	エステル脂肪酸系	AF
有機 繊維	ポリプロピレン繊維	繊維長さ：2mm 繊維径：18μm	PP

表-2 コンクリートの調合条件

NO.	記号	SP	W/B (%)	W (kg/m³)	s/a (%)	Air (%)	単位量(kg/m³)								
							W	B	NC	BF	SF	S		G	PP
												LWS	HS		
1	W130-LWS	SP1	18.0	130	47.5	3.5	130	722	274	376	72	517	0	809	0
2	W130-LWS-PP			140			140								3
3	W140-LWS			130			130								0
4	W130-LWS-SP2	SP2		130			130					0	725		3
5	W130-HS	SP1													
6	W130-HS-PP														

表-3 フレッシュ試験結果

NO.	記号	細骨材 種類	SP [B×%]	AF [B×%]	スラン プ [cm]	スラン プ フ ロー [cm]	50cm スラン プ フ ロー 到達 時間 [Sec]	スラン プ フ ロー 停止 時間 [Sec]	空気 量 [%]	単位 容積 質量 [kg/m ³]	練上がり 温度 [°C]	練混ぜ 時間 [Sec]
1	W130-LWS	LWS	0.75	0.003	-	73.3	13.7	172.0	2.3	2199	22.8	190
2	W130-LWS-PP		0.95	0.003	23.5	43.5	-	148.0	2.9	2224	22.9	220
3	W140-LWS		0.75	0.003	-	73.8	11.4	169.0	2.3	2216	22.3	190
4	W130-LWS-SP2		1.00	0.003	-	72.3	14.2	141.0	2.2	2222	22.7	190
5	W130-HS	HS	0.85	0.003	19.5	31.5	-	-	2.8	2418	24.1	310
6	W130-HS-PP		1.75	0.003	23.5	46.6	-	-	2.1	2427	23.2	220

が 30cm 程度低下する結果となったが、細骨材を HS とした水準と同様に SP 添加率を大きくすることで、PP 繊維を混入していない水準と同一のスランプフローになると考えられる。なお、スランプフローが 70cm を超えた水準がいくつかあるが、図-2 に示すように、粗骨材が中心部に偏在しておらず、目視の範囲で材料分離は発生していなかった。

スランプフローの経時変化を図-3 に示す。スランプフロー試験は、注水時刻を基点に 5 分、30 分、60 分の時点で実施した。W130-LWS と W140-LWS は SP1 を、W130-LWS-SP2 は SP2 をそれぞれ使用している。いずれの水準も、注水から 60 分後のスランプフロー値は注水から 5 分後のスランプフロー値より低下した。その変化量はそれぞれ W130-LWS で 22.0cm, W140-LWS で 12.5cm, W130-LWS-SP2 で 2.0cm であり、SP2 を使用した場合に少なかった。本検討より、SP2 を使用することで、経時変化によるスランプフローの低下を小さくすることが可能であることがわかった。

4. 圧縮強度試験結果

圧縮強度試験結果を図-4 に示す。養生条件は、水中養生と水分供給のない養生条件として 90℃封かん養生、20℃封かん養生、水分が逸散する養生条件として材齢 7 日まで封かん養生とし、その後気中養生（以下、7dry）の計 4 水準とした。試験材齢はそれぞれ 91 日、7 日、105 日、106 日とした。細骨材を LWS とした水準に着目する。W130-LWS は養生条件の違いによる圧縮強度の差は見られなかった。W130-LWS-PP と W130-LWS を比較すると、養生条件の違いによらず、PP 繊維を混入することで圧縮強度は 10%程度低下する傾向が見られた。W140-LWS と W130-LWS-SP2 は、養生条件の違いによらず、W130-LWS と同等の強度発現を示した。

養生条件と圧縮強度の関係を図-5 に示す。水中養生の圧縮強度と、水分供給のない養生条件もしくは水分が逸散する養生条件を行った水準の圧縮強度を比較する。

90℃封かん養生に着目すると、水中養生とした圧縮強度と同等の強度を示した。20℃封かん養生に着目すると、細骨材を LWS とした水準は水中養生とした圧縮強度と同等であるが、細骨材を HS とした水準の圧縮強度は、水中養生とした圧縮強度よりも低い値を示している。7dry も 20℃封かん養生と同様の傾向を示した。

LWS を使用することで、水分供給のない養生条件あるいは水分が逸散する養生条件の強度発現は、水分供給のある養生条件の強度発現と同等であった。これは、LWS の内部に保有された水分が周囲のペーストマトリ

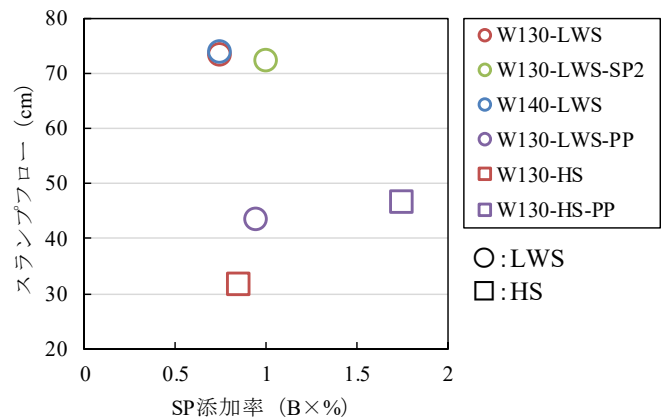


図-1 SP 添加率とスランプフローの関係

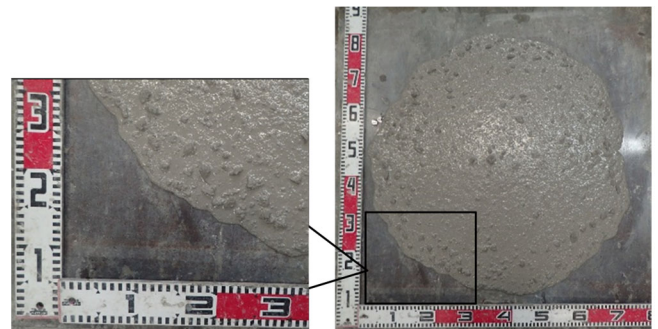


図-2 スランプフロー試験結果 (W130-LWS)

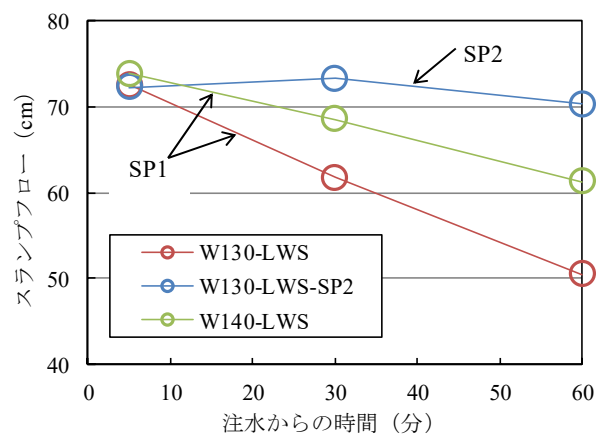


図-3 スランプフローの経時変化

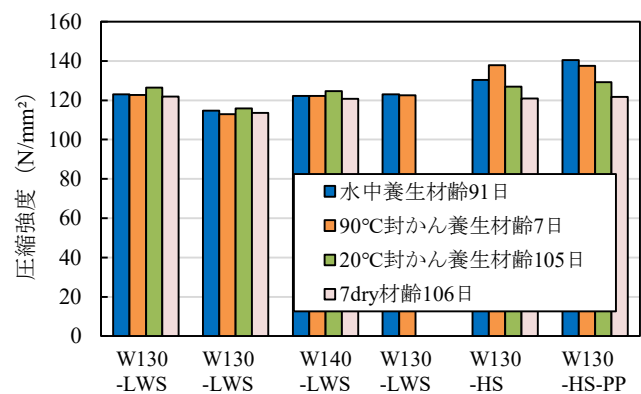


図-4 圧縮強度試験結果

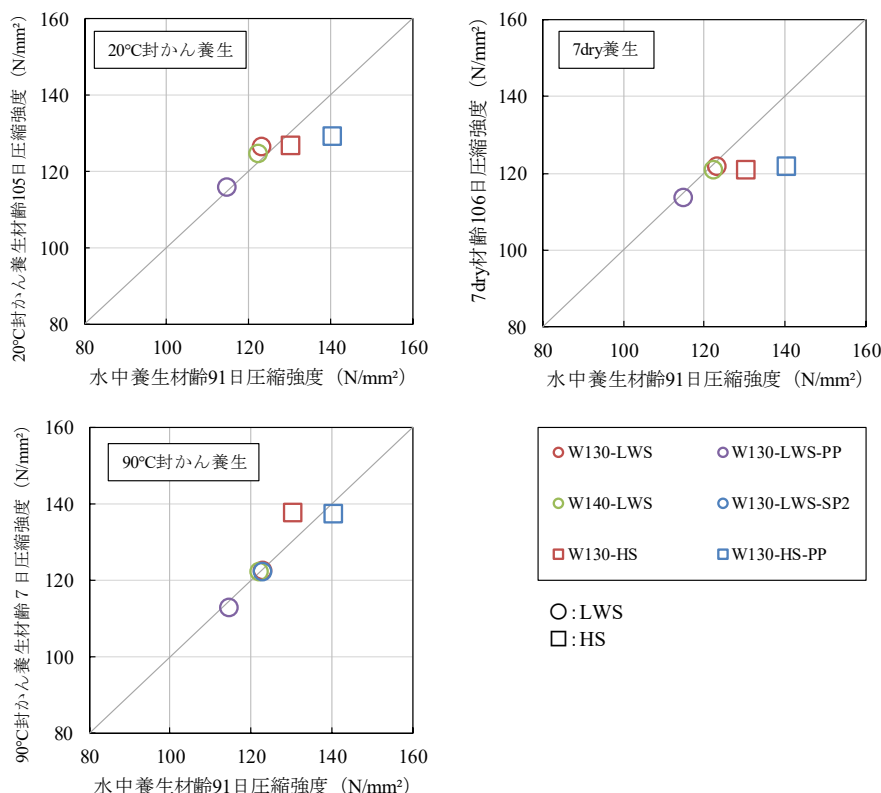


図-5 圧縮強度と養生条件の関係

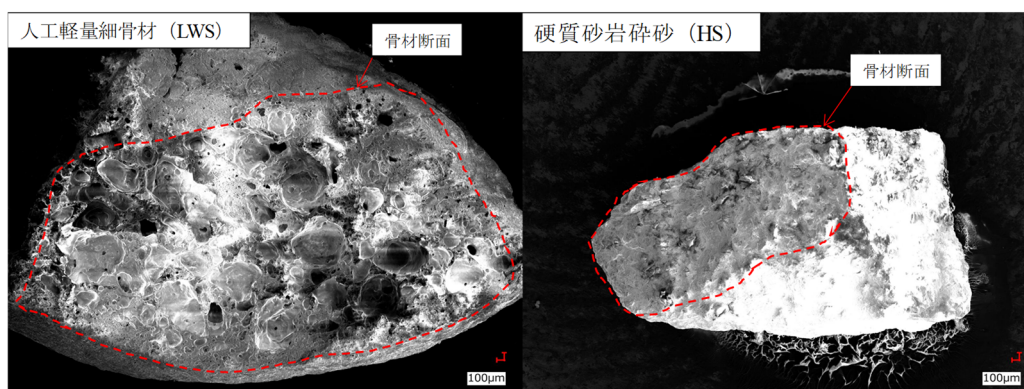


図-6 電子顕微鏡による観察結果 (倍率 50 倍)

クスに供給されてセメントの水和反応に寄与したためと推察される³⁾。電子顕微鏡 (キーエンス社製 VHX-D500) を用いた人工軽量細骨材と硬質砂岩砕砂の断面の観察結果を図-6 に示す。人工軽量細骨材の断面には多数の空隙を確認できたが、硬質砂岩砕砂の断面では空隙が確認できず、人工軽量細骨材はこの多数の空隙内に水分を保有していると考えられる。

静弾性係数と圧縮強度の関係を図-7 に示す。図中には、以下に示す JASS5 の静弾性係数の推定式も記した。

$$E = \kappa_1 \times \kappa_2 \times 3.35 \times 10^4 \times (\gamma / 2.4)^2 \times (F_c / 60)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

ここで、 E : 静弾性係数 (N/mm²), κ_1 : 骨材種類によって定まる補正係数, κ_2 : 混和材種類によって定まる補正係数, γ : 単位容積質量 (t/m³), F_c : 圧縮強度

(N/mm²) とした。なお、 $\kappa_1 = \kappa_2 = 1.0$ とした。

細骨材を LWS とした水準の静弾性係数は、細骨材を HS とした水準と比べ、20%程度低下する傾向が見られた。JASS5 においては、静弾性係数は(1)式で計算される値の 80%以上であることが求められる⁵⁾。本研究の実験結果は、全てのプロットが $\gamma = 2.4 \text{ t/m}^3$ で計算した推定式の 80%以上の範囲にあり、一般的な高強度コンクリートと同等の値となった。

5. 収縮ひずみ測定結果

収縮ひずみ測定結果を図-8 に示す。試験体の寸法は 100×100×400mm とし、試験体中に低弾性の埋込み型ひずみ計を設置し、コンクリートを打設した。収縮ひずみ

の基点をコンクリート打設直後とし、線膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と仮定して収縮ひずみを求めた。試験体は打設から材齢 7 日まで 20°C 封かん養生とし、その後脱枠し、 $20^{\circ}\text{C}60\%\text{RH}$ の環境で気中養生とした。

20°C 封かん養生とした材齢 7 日までの測定結果に着目すると、細骨材を HS としたものは、約 $600 \mu\text{m}$ の収縮ひずみが確認され、一般的な自己収縮によるものだと考えられる。細骨材を LWS としたものは、すべての水準で膨張する挙動を示し、自己収縮に起因した収縮は確認されなかった。これは、LWS の内部養生効果によるものだと推察される。材齢 7 日で気中養生とした以降、乾燥による収縮ひずみが確認された。乾燥を開始した材齢 7 日を基点として、それ以降の変化量を乾燥収縮ひずみとみなした場合、材齢 100 日時点での値は、細骨材を LWS としたもので約 $150 \mu\text{m}$ 、細骨材を HS としたもので約 $260 \mu\text{m}$ だった。LWS を使用したコンクリートの乾燥収縮ひずみは、緩やかではあるが、長期的に進行するといわれているため、今後も計測を行う予定である。

6. まとめ

本研究の結果、単位水量 $130\text{kg}/\text{m}^3$ で水結合材比 18% かつセメントの 6 割程度を副産物で置換した条件において、人工軽量細骨材を使用したコンクリートについて、以下の知見を得た。

- ① 一般的な硬質砂岩砕砂を用いた場合に比べて少ない化学混和剤の添加量でスランプフローが 70cm を超えるコンクリートを製造できる。
- ② 細骨材を人工軽量細骨材としたコンクリートの圧縮強度は、水分供給の有無および水分逸散による影響が少なかった。
- ③ 静弾性係数は、一般的な高強度コンクリートと同等の値を示した。
- ④ 一般的な硬質砂岩砕砂を用いると極めて大きな

自己収縮性状を示す。このとき硬質砂岩砕砂を人工軽量細骨材に置き換えると、収縮が著しく低減される。

参考文献

- 1) 松田拓ほか：ポルトランドセメントを使用しない超低収縮・高強度コンクリート，日本建築学会学術講演梗概集（中国），pp.369-370，2017.9
- 2) 松田拓ほか：細骨材の違いが超高強度コンクリートの性状に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1117-1122，2015
- 3) Bemtur, A., Igarashi, S. Kovler, K. : "Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates", Cement and Concrete Research 31, pp.1587-1591, 2001
- 4) 黒岩秀介ほか：人工軽量細骨材による高強度コンクリートの自己収縮低減，日本建築学会構造系論文集，第 79 巻，第 695 号，pp.19-26，2014.1
- 5) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事，2018

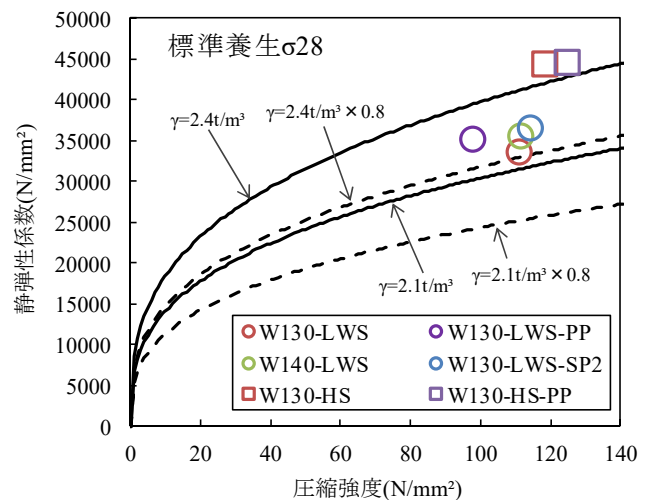


図-7 圧縮強度と静弾性係数の関係

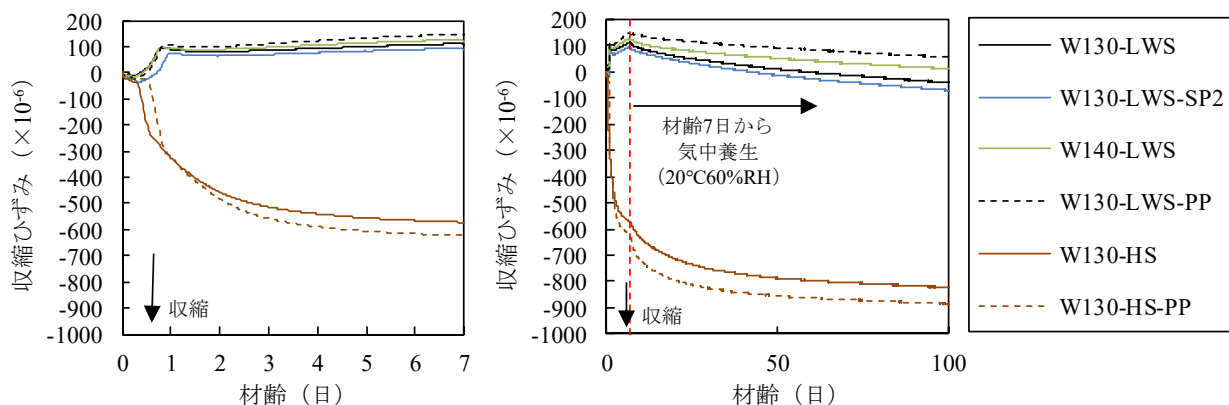


図-8 収縮ひずみ測定結果