

コンクリート専門委員会報告
REPORT OF THE TECHNICAL COMMITTEE ON CONCRETE
F-58

コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性に関する試験報告
A test report of the crack resistant properties of concrete due to shrinkage

2013年3月

(March. 2013)

社団法人 セメント協会

JAPAN CEMENT ASSOCIATION

要旨

近年、鉄筋コンクリート構造物の収縮ひび割れを低減するために、土木学会コンクリート標準示方書や日本建築学会建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 では、JIS A 1129 「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法」の附属書 A (参考) 「モルタル及びコンクリートの乾燥による自由収縮ひずみ試験方法」に準じて測定した保存期間 6 ヶ月のコンクリートの乾燥収縮率に対して基準値を設け、その基準値を満足するコンクリートを使用する方法が採用され始めている。

しかし、鉄筋コンクリート構造物の収縮ひび割れは、使用材料、配合、前養生条件あるいは鉄筋の拘束条件等の種々の要因に影響を受けると考えられ、保存期間 6 ヶ月のコンクリートの乾燥収縮率の規制のみで、収縮ひび割れを低減することは難しく、鉄筋コンクリート構造物の収縮ひび割れを低減するためには、使用材料や配合条件だけでなく養生方法等も含めた総合的な対策が必要と考えられる。

そこで、本委員会では、鉄筋コンクリート構造物の収縮ひび割れに影響を及ぼす要因として、前養生期間、拘束鉄筋比、水セメント比および骨材岩種を取り上げ、一軸拘束試験によるひび割れ抵抗性を総合的に評価した。

その結果、前養生期間、拘束鉄筋比、水セメント比および骨材岩種の違いにより、一軸拘束試験によるひび割れ発生日数は異なり、保存期間 6 ヶ月のコンクリートの乾燥収縮率と一軸拘束試験によるひび割れ発生日数との間には明確な傾向は認められなかった。しかし、コンクリートの乾燥収縮率、割裂引張強度および静弾性係数を含めた弹性計算で求めた推定ひび割れ発生日数は、ひび割れ発生日数の実測値と概ね対応することが明らかとなった。

これらの結果より、鉄筋コンクリート構造物の収縮ひび割れ抵抗性は、コンクリートの乾燥収縮率だけではなく、コンクリートの力学的特性も含めて総合的に評価するのが適切であると考えられる。

序

本試験は、鉄筋コンクリート構造物の収縮ひび割れに影響を及ぼす要因として、前養生期間、拘束鉄筋比、水セメント比および骨材岩種を取り上げ、一軸拘束試験によるひび割れ抵抗性を総合的に評価することを目的として開始したものである。

今般、実験結果を取りまとめたので報告する。

2013年3月

社団法人 セメント協会 コンクリート専門委員会
(敬称略 順不同)

委員長	三菱マテリアル株式会社 太平洋セメント株式会社 〃	中山 英明 (横山 良 2009年9月交替) (棚木 隆 2008年6月交替)
委 員	日鉄住金高炉セメント株式会社 〃 〃 〃 日鉄住金セメント株式会社 株式会社トクヤマ 〃 太平洋セメント株式会社 〃 宇部興産株式会社 〃 電気化学工業株式会社	大塚 勇介 (植木 康知 2011年4月交替) (伊代田岳史 2009年3月交替) (兼安 真司 2007年9月交替) 小倉 束 加藤 弘義 (土井 宏行 2008年3月交替) 田中 敏嗣 (石川 雄康 2012年4月交替) 大和 功一郎 (大西 利勝 2008年4月交替) 上村 豊 (川原 正秀 2012年6月交替) 草野 昌夫 佐藤 智泰 佐々木 健一 (島崎 泰 2012年5月交替) (泉尾 英文 2012年5月退任) (小林 幸一 2012年7月退任)
事務局	住友大阪セメント株式会社 社団法人セメント協会	

目 次

1. 緒言	1
2. 実験の概要	2
2. 1 使用材料	2
2. 1. 1 セメント	2
2. 1. 2 骨材	2
2. 1. 3 練混ぜ水	3
2. 1. 4 混和剤	3
2. 2 配合および試験条件	3
2. 3 コンクリートの練混ぜ	6
2. 4 成形および養生方法	6
2. 5 試験項目および試験方法	7
2. 5. 1 練上り温度	7
2. 5. 2 スランプ試験およびスランプフロー試験	7
2. 5. 3 空気量試験	7
2. 5. 4 圧縮強度および静弾性係数試験	7
2. 5. 5 割裂引張強度試験	7
2. 5. 6 乾燥収縮率および質量減少率試験	7
2. 5. 7 ひび割れ抵抗性試験	7
3. コンクリートの物性に関する試験結果と考察	9
3. 1 コンクリートの配合およびフレッシュ性状	9
3. 2 圧縮強度	10
3. 2. 1 前養生期間の異なるコンクリートの圧縮強度	10
3. 2. 2 水セメント比の異なるコンクリートの圧縮強度	12
3. 2. 3 骨材岩種の異なるコンクリートの圧縮強度	14
3. 3 静弾性係数	15
3. 3. 1 前養生期間の異なるコンクリートの静弾性係数	15
3. 3. 2 水セメント比の異なるコンクリートの静弾性係数	17
3. 3. 3 骨材岩種の異なるコンクリートの静弾性係数	19

3. 4 割裂引張強度	20
3. 4. 1 前養生期間の異なるコンクリートの割裂引張強度	20
3. 4. 2 水セメント比の異なるコンクリートの割裂引張強度	22
3. 4. 3 骨材岩種の異なるコンクリートの割裂引張強度	24
 3. 5 乾燥収縮率および質量減少率	25
3. 5. 1 前養生期間の異なるコンクリートの乾燥収縮率	25
3. 5. 2 水セメント比の異なるコンクリートの乾燥収縮率	28
3. 5. 3 骨材岩種の異なるコンクリートの乾燥収縮率	31
 4. ひび割れ抵抗性試験結果と考察	33
4. 1 ひび割れ発生日数に及ぼす各種要因の影響	33
4. 1. 1 前養生期間の影響	34
4. 1. 2 拘束鉄筋比の影響	36
4. 1. 3 水セメント比の影響	38
4. 1. 4 骨材岩種の影響	40
4. 2 ひび割れ発生時の応力強度比	41
 5. コンクリートの乾燥収縮率がひび割れ抵抗性に及ぼす影響	44
5. 1 コンクリートの乾燥収縮率とひび割れ発生日数の関係	44
5. 2 弹性理論に基づく推定ひび割れ発生日数とひび割れ発生日数の関係	46
 6. 結言	50
 参考文献	52

1. 緒言

鉄筋コンクリート構造物の収縮ひび割れに影響を及ぼす要因として、コンクリートの力学的特性および収縮特性、断面形状、寸法、配筋等の構造条件、養生等の施工条件、気温、湿度、風、日射等の環境条件等があり、これらが密接に関係する。昨今、収縮ひび割れを低減するために、JIS A 1129「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法」の附属書 A (参考) 「モルタル及びコンクリートの乾燥による自由収縮ひずみ試験方法」に準じて測定した、保存期間 6 ヶ月でのコンクリートの乾燥収縮率に対して基準値を設け、その基準値を満足するコンクリートを使用する方法が採用され始めている。

しかし、保存期間 6 ヶ月のコンクリートの乾燥収縮率が同等であっても、配合や使用材料によって乾燥収縮の進行速度や強度発現性が異なる場合、これらが収縮ひび割れに影響を及ぼすことが想定される。また、コンクリートの初期養生条件により、乾燥収縮率や強度発現性は異なるため、コンクリートの収縮ひび割れに影響を及ぼすと考えられる。

そこで、本研究では、コンクリートの収縮ひび割れに影響を及ぼす要因として、①前養生期間(封緘養生 2 日および 7 日)、②拘束鉄筋比、③水セメント比(普通コンクリートを想定した 55% および 45%、高強度コンクリートを想定した 35%)、④骨材岩種を取り上げ、一軸拘束による収縮ひび割れ抵抗性試験を実施し、コンクリートのひび割れ抵抗性を総合的に評価した。

2. 実験の概要

2. 1 使用材料

2. 1. 1 セメント

セメントは、市販の普通ポルトランドセメント（以下、記号；Nと称す）、低熱ポルトランドセメント（以下、記号；Lと称す）および高炉セメントB種（以下、記号；BBと称す）の3種類を使用した。なお、セメントは、それぞれ3銘柄を任意に選定し、それぞれ均一に等量混合したものを試料とした。使用したセメントの化学成分および物理的性質を表-2.1および表-2.2に示す。

表-2.1 セメントの化学成分

セメント の 種類	化学成分(%)											
	ig.loss	insol.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Na ₂ O _{eq}	Cl
N	1.97	0.12	20.71	5.69	2.86	64.14	1.18	2.02	0.21	0.41	0.48	0.016
L	0.73	0.09	26.21	2.91	3.11	62.92	0.73	2.46	0.19	0.35	0.42	0.004
BB	1.68	0.11	25.75	8.97	1.85	54.73	3.08	2.59	0.26	0.35	0.49	0.010

表-2.2 セメントの物理的性質

セメント の 種類	密度 (g/cm ³)	比表 面積 (cm ² /g)	凝結			安 定 性	圧縮強さ (N/mm ²)				水和熱 (J/g)			
			水量 (%)	始発 (h-m)	終結 (h-m)		3日	7日	28日	91日	7日	28日	91日	
N	3.14	3270	27.7	2-37	3-50	良	29.3	46.5	64.7	—	—	—	—	
L	3.22	3640	28.5	4-05	5-48	良	10.9	15.6	57.0	83.0	200	277	322	
BB	3.02	3760	29.4	3-03	4-52	良	20.1	35.0	60.8	—	—	—	—	

2. 1. 2 骨材

骨材は、粗骨材に東京都青梅市産の硬質砂岩碎石および山口県美祢市産の石灰石碎石を、細骨材に千葉県君津市産の山砂および東京都青梅市産の碎砂を使用した。これらの骨材の粒度および物性を表-2.3および表-2.4に示す。

表-2.3 骨材の粒度

分類	種類	産地	ふるい目の 寸法(mm)	ふるい通過量 (%)										粗 粒 率
				25	20	15	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	
粗骨材	硬質砂岩 碎石	東京都 青梅市産	100	97	79	39	1	0	—	—	—	—	—	6.63
	石灰石 碎石		100	95	77	21	1	0	—	—	—	—	—	6.83
細骨材	山砂	千葉県 君津市産	—	—	—	100	92	80	67	52	29	3	2.77	
	碎砂		—	—	—	—	100	90	59	35	20	6	2.90	

表-2.4 骨材の物性

分類	種類	密度 (g/cm ³)		単位容積質量 (kg/l)	実積率 (%)	吸水率 (%)	微粒分量 (%)
		表乾	絶乾				
粗骨材	硬質砂岩 碎石	2.65	2.63	1.68	63.9	0.74	0.8
	石灰石 碎石	2.70	2.69	1.68	62.5	0.49	0.7
細骨材	山砂	2.63	2.59	1.86	71.9	1.63	0.1
	碎砂	2.67	2.64	1.71	64.9	1.30	1.9

2. 1. 3 練混ぜ水

練混ぜ水は、上水道水を使用した。

2. 1. 4 混和剤

混和剤は、W/C が 55% および 45% の配合のコンクリートに、AE 減水剤標準形（I 種）（ポゾリス No.70 あるいはポゾリス 15S、BASF ジャパン（株）製）およびコンクリートの空気量調整用として AE 剤（I 種）（マイクロエア 303A、BASF ジャパン（株）製）を使用した。また、W/C が 35% の配合のコンクリートには、高性能 AE 減水剤標準形（I 種）（レオビルド SP8SV、BASF ジャパン（株）製）および空気量調整用として AE 剤（I 種）（マイクロエア 101、BASF ジャパン（株）製）を使用した。

2. 2 配合および試験条件

コンクリートの配合は、W/C を 55%、45% および 35% の 3 水準とした。配合条件は、W/C が 55% および 45% のコンクリートについては、目標スランプ 15±1.5cm、目標空気量 4.5±0.5% とした。

また、W/C が 35% のコンクリートについては、目標スランプフロー 60±5cm、目標空気量 4.5±0.5% とした。なお、練上り温度は、20±2°C とした。

試験は、前養生期間、拘束鉄筋比、水セメント比および骨材岩種を要因とした 20 ケースで実施した。

試験条件の一覧を表-2.5 および表-2.6 に示す。

表-2.5 試験条件一覧（その1）

	前養生期間の検討						拘束鉄筋比の検討						水セメント比の検討												
	No.	1	2	3	4	5	6	2	7	8	4	9	10	6	11	12	7	13	14	9	15	16	11	17	18
セメントの種類	N	L	BB	N	L	BB	N	L	BB	N	L	BB	N	L	BB	N	L	BB	N	L	BB	N	L	BB	
前養生期間 (日)	2	7	2	7	2	7																			
拘束鉄筋径 (mm)		φ28			φ28	φ22	φ20	φ28	φ22	φ20	φ28	φ22	φ20	φ28	φ22	φ20	φ28	φ22	φ20	φ28	φ22	φ20	φ28	φ22	φ20
拘束鉄筋比 (%)		6.6			6.6	4.0	3.2	6.6	4.0	3.2	6.6	4.0	3.2	6.6	4.0	3.2	6.6	4.0	3.2	6.6	4.0	3.2	6.6	4.0	3.2
W/C(%)		55						55									55			55			55		
骨材 粗骨材																									
細骨材																									
配合記号	N55	L55	BB55		N55		L55		BB55		N55		L55		BB55		N55		N45		N35		L45		L35
試験項目	圧縮強度																								
静弾性係数																									
割裂引張強度																									
乾燥収縮率																									
質量減少率																									
ひび割れ抵抗性																									

※配合記号：セメントの種類、水セメント比を表している。

表-2.6 試験条件一覧（その2）

		骨材岩種の検討	
試験 No.	7	19	20
セメントの種類		N	
前養生期間 (日)		7	
拘束鉄筋径 (mm)		φ22	
拘束鉄筋比 (%)		4.0	
W/C(%)		55	
骨材	粗骨材 細骨材	硬質砂岩碎石 山砂	石灰石碎石 山砂
配合記号		N55	N55Li
圧縮強度			
静弾性係数	養生条件：ひび割れ抵抗性試験と同一養生または標準養生		
試験材齢	試験材齢：標準養生の場合 7、28 日	ひび割れ抵抗性試験と同一養生の場合 3～91 日 (3、7、14、28 日がベース)	
項目	乾燥収縮率 質量減少率	基長：封緘養生の場合は材齢 2 日または 7 日、標準養生の場合は材齢 7 日に基長 乾燥材齢：6 ヶ月まで	
ひび割れ 抵抗性	養生条件：封緘養生 2 日または 7 日 測定期間：ひび割れ発生まで		

※配合記号：セメントの種類、水セメント比、骨材岩種 (Li : 石灰石碎石 + 山砂、s : 硬質砂岩碎石 + 碎砂) を表している。

2. 3 コンクリートの練混ぜ

コンクリートの練混ぜは、JIS A 1138「試験室におけるコンクリートの作り方」に従って行った。

練混ぜには、パン型強制練りミキサ（公称容量 55 リットル）を使用し、粗骨材、細骨材、セメント投入後、空練りを 30 秒し、その後、混和剤を分散させた練混ぜ水を投入し、W/C55%および 45%の配合では 90 秒、W/C35%の配合では 120 秒練り混ぜた。

2. 4 成形および養生方法

圧縮強度および割裂引張強度試験用供試体は、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体とし、JIS A 1132「コンクリート強度試験用供試体の作り方」に従って成形した。供試体の養生方法は、ひび割れ抵抗性試験と同一養生および標準養生とした。前者の養生は、型枠にコンクリートを打設後、型枠上面からの水分蒸発を防止するためビニールまたはラップで上面を密閉したまま、脱型まで温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の環境で封緘養生した。その後、乾燥開始材齢（2 日または 7 日）で脱型を行い、温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 5\%\text{RH}$ の環境に試験材齢まで気乾養生した。また、後者の養生は、成形後、温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の環境に静置した後、材齢 1 日で脱型し、その後、 20°C の水中で試験材齢まで水中養生した。（図-2.1 参照）

乾燥収縮率および質量減少率試験用供試体は、 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の角柱供試体とし、JIS A 1132「コンクリート強度試験用供試体の作り方」に従って成形した。また、乾燥を開始するまでの養生は、封緘養生 2 日または 7 日および標準養生 7 日とし、その後、基長を行った後、温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 5\%\text{RH}$ の環境に静置した。

ひび割れ抵抗性試験供試体は、（公社）日本コンクリート工学会の「コンクリートの自己収縮応力試験方法」に準じ、 $100 \times 100 \times 1500\text{mm}$ の供試体を使用し、JIS A 1132「コンクリート強度試験用供試体の作り方」に従って成形した。供試体成形後、型枠上面からの水分蒸発を防止するためビニールまたはラップで上面を密閉したまま、脱型まで温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の環境で封緘養生した。その後、乾燥開始材齢（2 日または 7 日）に脱型を行い、温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 5\%\text{RH}$ の環境に、ひび割れ発生まで静置した。

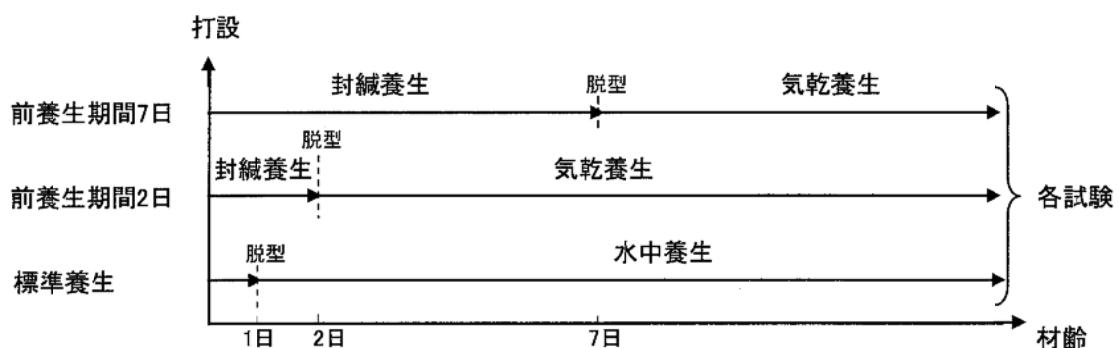


図-2.1 養生方法

2. 5 試験項目および試験方法

2. 5. 1 練上り温度

練上り時のコンクリート温度の測定は、JIS A 1156「フレッシュコンクリートの温度測定方法」に従って行った。

2. 5. 2 スランプ試験およびスランプフロー試験

スランプ試験は、JIS A 1101「コンクリートのスランプ試験方法」に、スランプフロー試験は、JIS A 1150「コンクリートのスランプフロー試験方法」に従って行った。

2. 5. 3 空気量試験

空気量試験は、JIS A 1128「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法－空気室圧力方法」に従って行った。

2. 5. 4 圧縮強度および静弾性係数試験

圧縮強度試験は、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に従って行った。

静弾性係数の測定は、JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準じ、コンプレッソメータ（(株) 東京測器研究所製）を用いて行った。

2. 5. 5 割裂引張強度試験

割裂引張強度試験は、JIS A 1113「コンクリートの割裂引張強度試験方法」に従って行った。

2. 5. 6 乾燥収縮率および質量減少率試験

乾燥収縮率および質量減少率試験は、JIS A 1129-2「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法－第2部：コンタクトゲージ方法」に従って行った。

2. 5. 7 ひび割れ抵抗性試験

ひび割れ抵抗性試験は、(公社) 日本コンクリート工学会の「コンクリートの自己収縮応力試験方法」に準じて行った。

供試体および型枠は、図-2.2 および写真-2.1 に示すように、内寸法 100×100×1500mm とし、供試体の自由な変形が拘束されるのを防ぐために、型枠底面の内側にテフロンシート（厚さ 1mm）、両端部の内側にポリスチレンボード（厚さ 3mm）を入れた。さらに、コンクリートと型枠が接触しないようにするため、型枠内側の側面、両端面および底面にポリエスチルフィルム（厚さ 0.1mm）を貼り付けた。

鉄筋は、長さ 1600mm の D22、D25、D32 の異形棒鋼を用い、中心部 300mm 部分を、リブと節を取り除きそれぞれ ϕ 20mm、 ϕ 22mm、 ϕ 28mm の円柱に加工した。

鉄筋中心部の両側面に検長 5mm のひずみゲージを貼り付けた後、コンクリートを打設し、封緘養生（2日、7日）を終え脱型した後、直ちに、コンクリート両側面に検長 120mm のひずみゲージを貼り付け、測定を開始した。

概要図

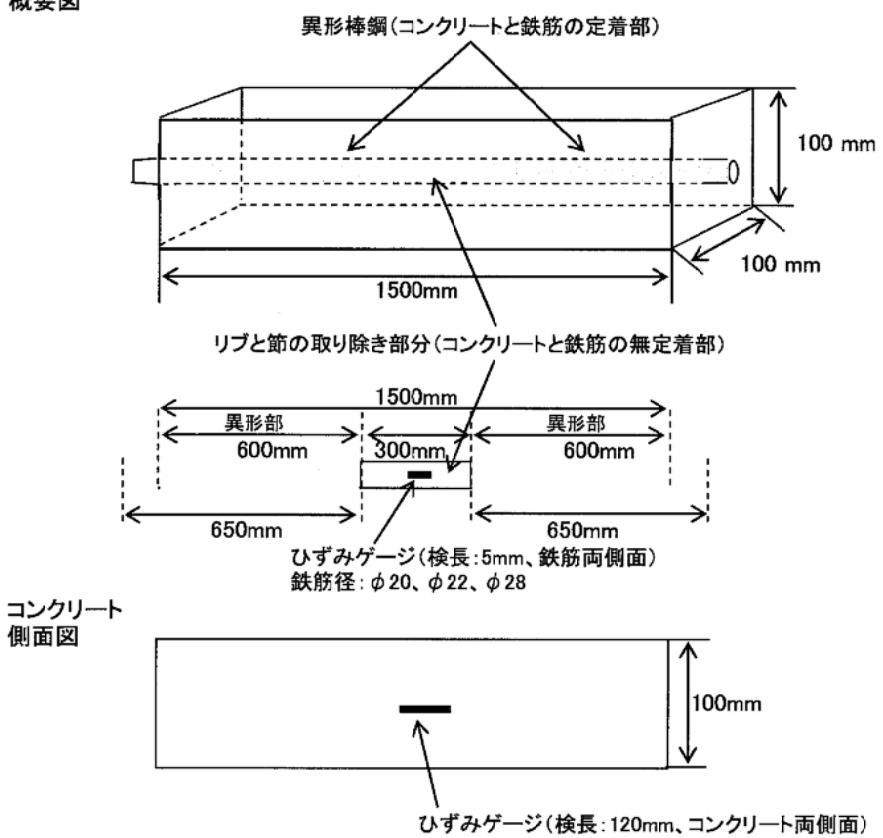


図-2.2 ひび割れ抵抗性試験供試体の概要

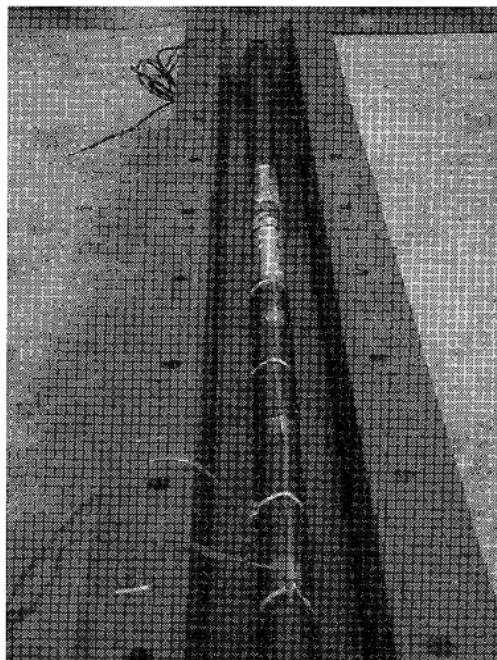


写真-2.1 ひび割れ抵抗性試験型枠の概要

3. コンクリートの物性に関する試験結果と考察

3. 1 コンクリートの配合およびフレッシュ性状

表-3.1.1 にコンクリートの配合を、表-3.1.2 にコンクリートのフレッシュ性状を示す。

表-3.1.1 コンクリートの配合

配合 No.	セメント の 種類	粗骨材	細骨材	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				A E 減水剤 (C×(%))	高性能 A E 減水剤 (C×(%))	A E 助剤 (ml/m ³)
						W	C	S	G			
N55	N	硬質砂岩 碎石	山砂	55	48	164	298	885	959	0.25*	—	12
N45				45	48	170	378	845	916	0.35*	—	2
N35				35	49	175	500	806	839	—	1.3	6
L55	L	硬質砂岩 碎石	山砂	55	48	155	282	906	982	0.25*	—	14
L45				45	48	161	358	869	941	0.35*	—	0
L35				35	50	163	466	858	858	—	1.3	16
BB55	BB		山砂	55	48	158	287	893	967	0.25*	—	14
BB45				45	48	166	369	848	919	0.35*	—	10
BB35				35	49	168	480	816	849	—	1.3	12
N55Li	N	石灰石 碎石	山砂	55	48	164	298	885	977	0.8**	—	15
N55s		硬質砂岩 碎石		55	48	164	298	892	959	1.6**	—	6

*) AE 減水剤標準形（I 種）ポゾリス No.70 を使用。

**) AE 減水剤標準形（I 種）ポゾリス 15S を使用。

表-3.1.2 フレッシュコンクリート試験結果

配合 No.	セメント の 種類	粗骨材	細骨材	スランプ (cm)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	練上り温度 (°C)
N55	N	硬質砂岩 碎石	山砂	16.0	—	4.9	21.4
N45				16.0	—	4.3	20.5
N35				—	58.0	4.5	21.0
L55	L	硬質砂岩 碎石	山砂	14.0	—	4.9	21.3
L45				14.0	—	5.0	21.6
L35				—	63.0	4.7	22.0
BB55	BB		山砂	15.5	—	4.8	21.4
BB45				14.0	—	4.7	21.0
BB35				—	58.0	4.7	21.5
N55Li	N	石灰石 碎石	山砂	15.0	—	4.8	21.0
N55s		硬質砂岩 碎石		9.5***	—	4.0	21.0

***) 細骨材に碎砂を使用した配合では、所要の目標スランプを得られなかったがそのまま使用した。

3. 2 圧縮強度

3. 2. 1 前養生期間の異なるコンクリートの圧縮強度

各種セメントを使用した前養生期間の異なるコンクリートの圧縮強度を図-3.2.1に示す。図には標準養生時の圧縮強度も併せて示す。

前養生期間2日と7日の圧縮強度は、材齢7日の場合、前養生期間の違いに係わらず、セメントの種類毎で概ね同等の値を示した。材齢7日以降では、前養生期間の違いによる影響が認められ、前養生期間2日の場合、圧縮強度の伸びは小さく低めに推移した。材齢28日における前養生期間2日と7日の圧縮強度の差は、Nで4.6(N/mm²)、Lで5.1(N/mm²)、BBで6.3(N/mm²)となった。標準養生との比較は、前養生期間7日の場合、材齢7日および28日ともに概ね同等の値を示した。前養生期間2日の場合では、材齢7日で概ね同等の値を示したものの、材齢28日では低くなつた。

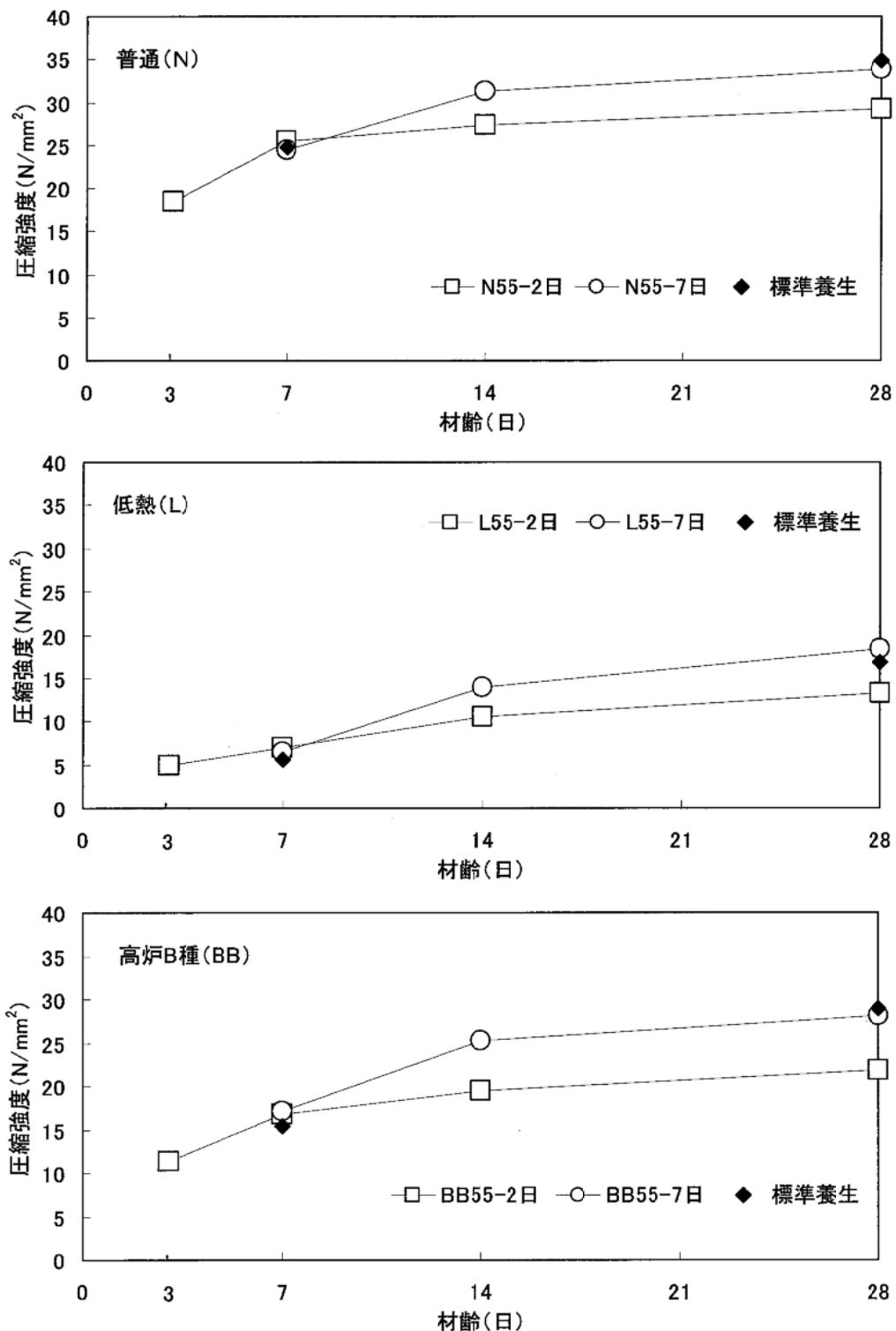


図-3.2.1 コンクリートの圧縮強度

備考) 凡例中の記号は、配合記号—前養生期間を示す。

3. 2. 2 水セメント比の異なるコンクリートの圧縮強度

各種セメントを使用した水セメント比の異なるコンクリートの圧縮強度を図-3.2.2 に示す。図には標準養生時の圧縮強度も併せて示す。

水セメント比と圧縮強度の関係は、セメントの種類に係わらず水セメント比が小さくなると圧縮強度も高くなつた。

前養生期間 7 日の場合の圧縮強度の発現は、いずれのセメントの場合でも、材齢 7 日から 14 日までは圧縮強度の増進が認められた。それ以降の材齢では、圧縮強度の増進が鈍く、微増もしくは停滞する傾向となつた。

水セメント比を変化させた前養生期間 7 日と標準養生を比較すると、圧縮強度は水セメント比およびセメントの種類に係わらず、材齢 7 日で概ね同等の値を示した。材齢 28 日では、水セメント比が小さくなると前養生期間 7 日の圧縮強度が低く、標準養生との圧縮強度の差も大きくなる傾向が認められた。ただし、その圧縮強度の差の程度はセメントの種類で異なり、N は水セメント比 55% および 45% の場合で養生条件の違いによる差が認められなかつたものの、水セメント比 35% の場合は前養生期間 7 日の圧縮強度が若干低めとなつた。一方、L および BB は水セメント比 55% の場合において、養生条件の違いによる圧縮強度の差は認められなかつた。水セメント比 45% および 35% では圧縮強度の差が顕著に認められ、その差は L の水セメント比 45% で $5.0(\text{N/mm}^2)$ 、同 35% で $13.1(\text{N/mm}^2)$ 、BB の水セメント比 45% で $8.2(\text{N/mm}^2)$ 、同 35% で $7.7(\text{N/mm}^2)$ となつた。

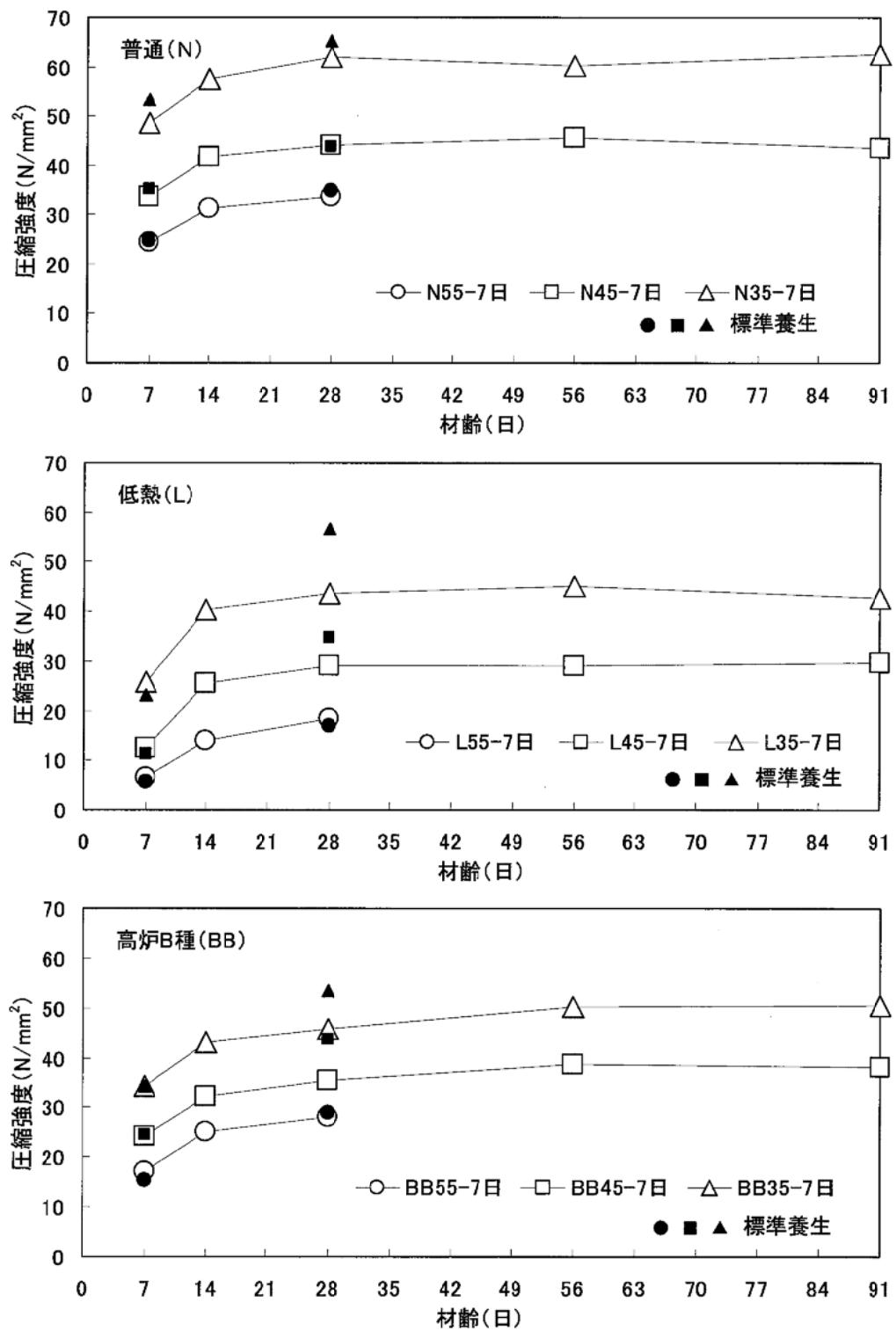


図-3.2.2 コンクリートの圧縮強度

備考) 凡例中の記号は、配合記号—前養生期間を示す。

3. 2. 3 骨材岩種の異なるコンクリートの圧縮強度

Nを使用した骨材岩種の異なるコンクリートの圧縮強度を図-3.2.3に示す。図には標準養生時の圧縮強度も併せて示す。

圧縮強度は使用した骨材の種類で異なり、碎砂+硬質砂岩碎石(N55s)の圧縮強度が最も高かった。山砂+硬質砂岩碎石(N55)および山砂+石灰石碎石(N55Li)の圧縮強度は、概ね同等の値を示した。

前養生期間7日と標準養生の圧縮強度を比較した場合、碎砂+硬質砂岩碎石(N55s)では、標準養生の圧縮強度が僅かに高めとなったが、山砂+硬質砂岩碎石(N55)および山砂+石灰石碎石(N55Li)ではいずれの養生方法も圧縮強度は同等となった。

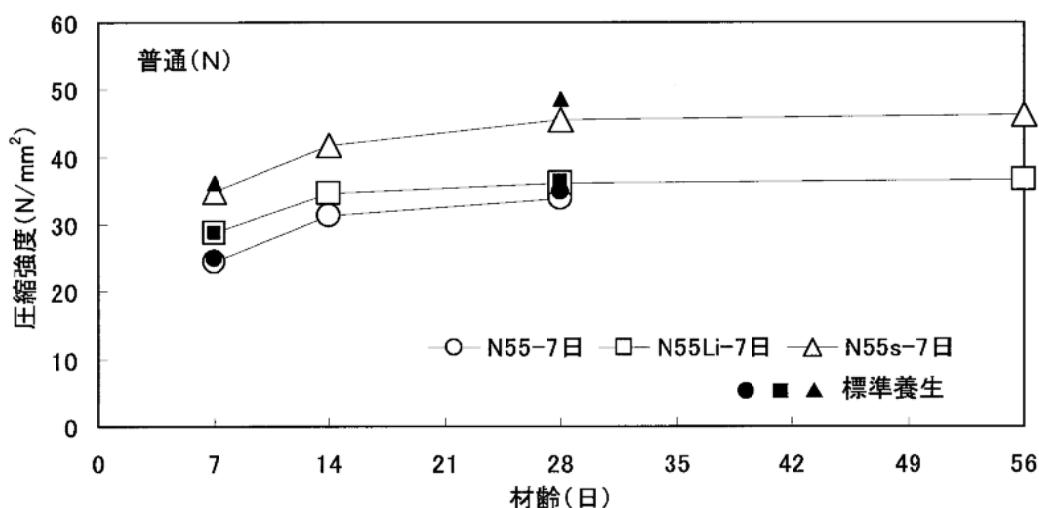


図-3.2.3 コンクリートの圧縮強度

備考) 凡例中の記号は、配合記号—前養生期間を示す。

3. 3 静弾性係数

3. 3. 1 前養生期間の異なるコンクリートの静弾性係数

各種セメントを使用した前養生期間の異なるコンクリートの静弾性係数を図-3.3.1に示す。図には標準養生時の静弾性係数も併せて示す。

セメントの種類に係わらず、前養生期間 7 日の方が前養生期間 2 日に比べて静弾性係数が大きくなかった。また、前養生期間に係わらず、材齢の経過に伴う静弾性係数の伸びは小さかった。材齢 28 日における静弾性係数の値は、前養生期間が同一の場合、圧縮強度と同様に、N>BB>L の順であった。

標準養生と比較すると、前養生期間 2 日の場合、材齢 7 日では静弾性係数は同等であったが、材齢 28 日では小さくなった。前養生期間 7 日の場合、材齢 7 日では標準養生よりも大きくなつたが、材齢 28 日では同等の値を示した。

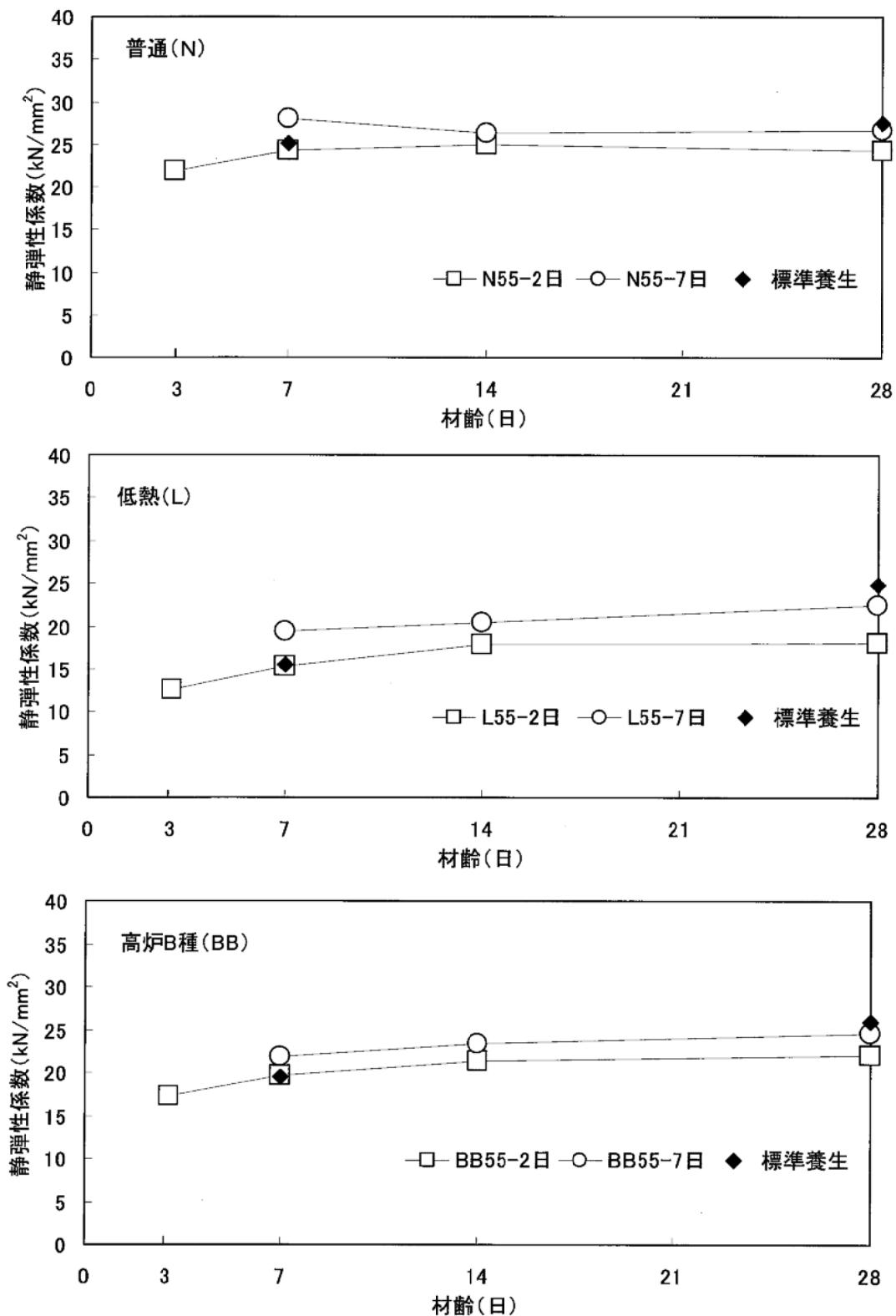


図-3.3.1 コンクリートの静弾性係数

備考) 凡例中の記号は、配合記号-前養生期間を示す。

3. 3. 2 水セメント比の異なるコンクリートの静弾性係数

各種セメントを使用した水セメント比の異なるコンクリートの静弾性係数を図-3.3.2に示す。図には標準養生時の静弾性係数も併せて示す。

セメントの種類に係わらず、水セメント比が小さいほど静弾性係数は大きくなった。材齢28日における静弾性係数の値は、水セメント比が同一の場合、圧縮強度と同様に、N>BB>Lの順であった。養生条件の影響については、前養生期間7日の場合は、セメントの種類、水セメント比に係わらず、材齢の経過に伴う静弾性係数の伸びが小さかった。標準養生の場合は、前養生期間7日に比べて、材齢7日から28日の静弾性係数の伸びが大きかった。

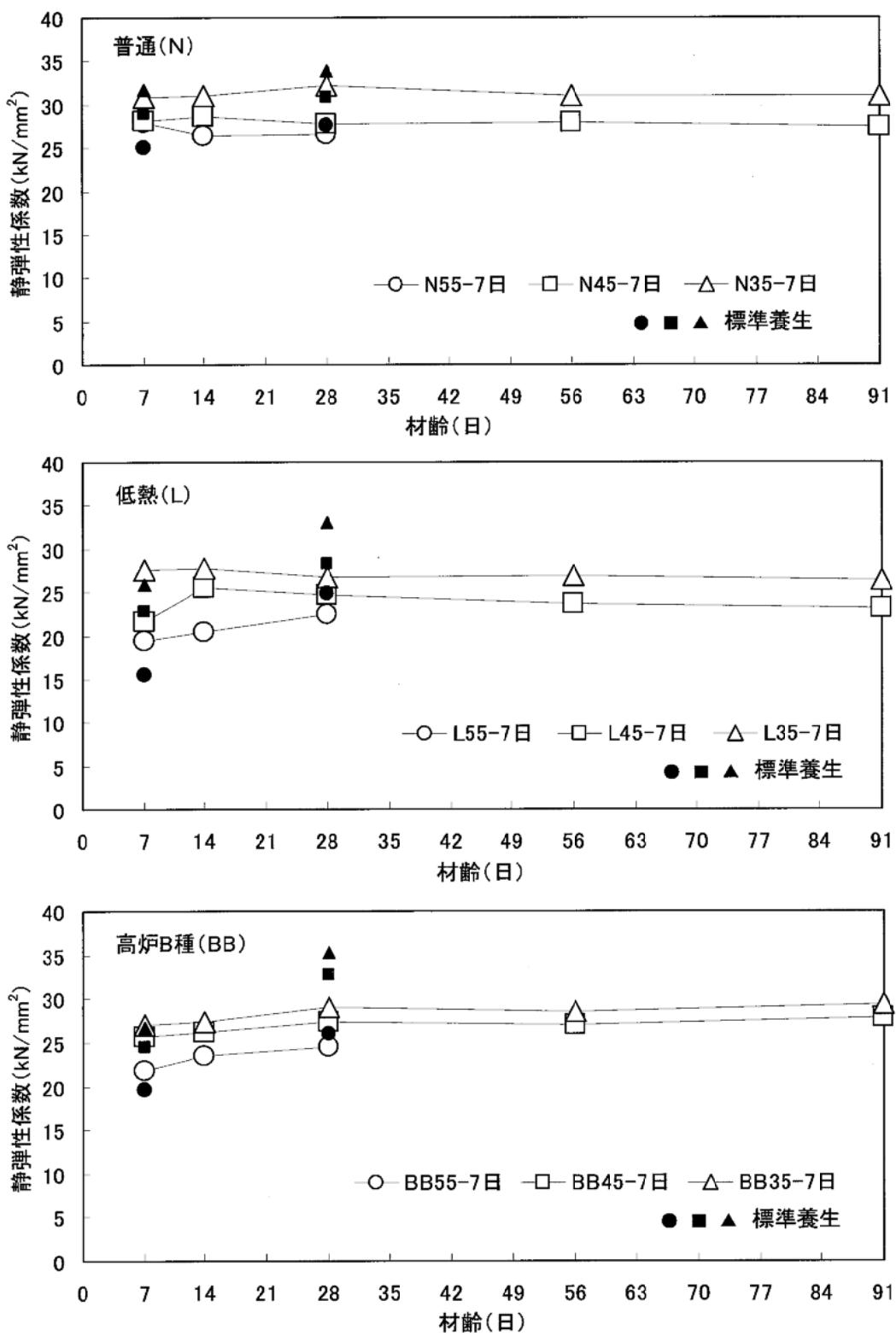


図-3.3.2 コンクリートの静弾性係数

備考) 凡例中の記号は、配合記号ー前養生期間を示す。

3. 3. 3 骨材岩種の異なるコンクリートの静弾性係数

Nを使用した骨材岩種の異なるコンクリートの静弾性係数を図-3.3.3に示す。図には標準養生時の静弾性係数も併せて示す。

材齢7日から28日の静弾性係数は、山砂+石灰石碎石(N55Li)が最も大きくなった。材齢56日の静弾性係数は、山砂+石灰石碎石(N55Li)と碎砂+硬質砂岩碎石(N55s)のみであるが、同等の値を示した。養生条件の影響については、前養生期間7日の場合は、骨材岩種に係わらず、材齢の経過に伴う静弾性係数の伸びが小さかった。標準養生の場合は、前養生期間7日に比べて、材齢7日から28日の静弾性係数の伸びが大きかった。

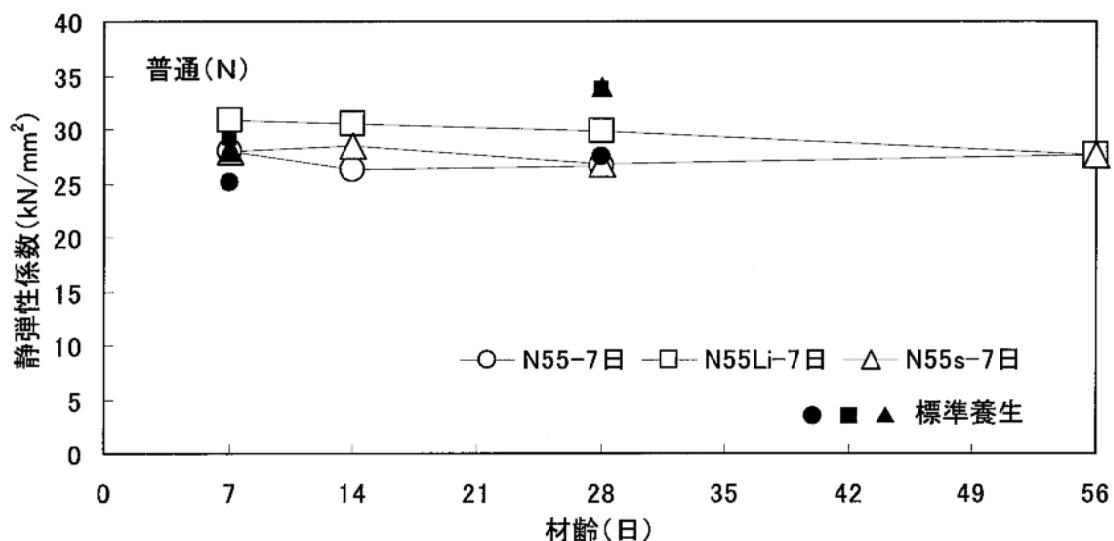


図-3.3.3 コンクリートの静弾性係数

備考) 凡例中の記号は、配合記号—前養生期間を示す。

3. 4 割裂引張強度

3. 4. 1 前養生期間の異なるコンクリートの割裂引張強度

各種セメントを使用した前養生期間の異なるコンクリートの割裂引張強度を図-3.4.1 に示す。図には標準養生時の割裂引張強度も併せて示す。

いずれの前養生期間についても、材齢の経過に伴い割裂引張強度の増進が認められた。N を使用した場合、前養生期間 2 日と 7 日では材齢 7 日以降の強度増進の傾向は概ね同等であった。一方、L および BB を使用した場合は、前養生期間 7 日に比べて 2 日の方が、材齢 7 日以降の強度増進が小さい傾向を示した。

標準養生時の割裂引張強度と比較すると、N を使用した場合は、いずれの前養生期間の場合も、材齢 7 日、28 日ともに標準養生と概ね同等の強度を示した。L および BB を使用した場合は、前養生期間 2 日については、材齢 7 日は標準養生と概ね同等の強度であったが、材齢 28 日は低い強度を示した。前養生期間 7 日の場合は、材齢 7 日、28 日ともに標準養生と概ね同等の強度を示した。

前養生期間が割裂引張強度に及ぼす影響は使用するセメントの種類により異なり、N を使用した場合、割裂引張強度は前養生期間の影響を受けにくいが、L および BB を使用した場合は、前養生期間が短いと長期材齢における強度増進が低下する傾向を示した。この傾向は、圧縮強度の場合と類似している。

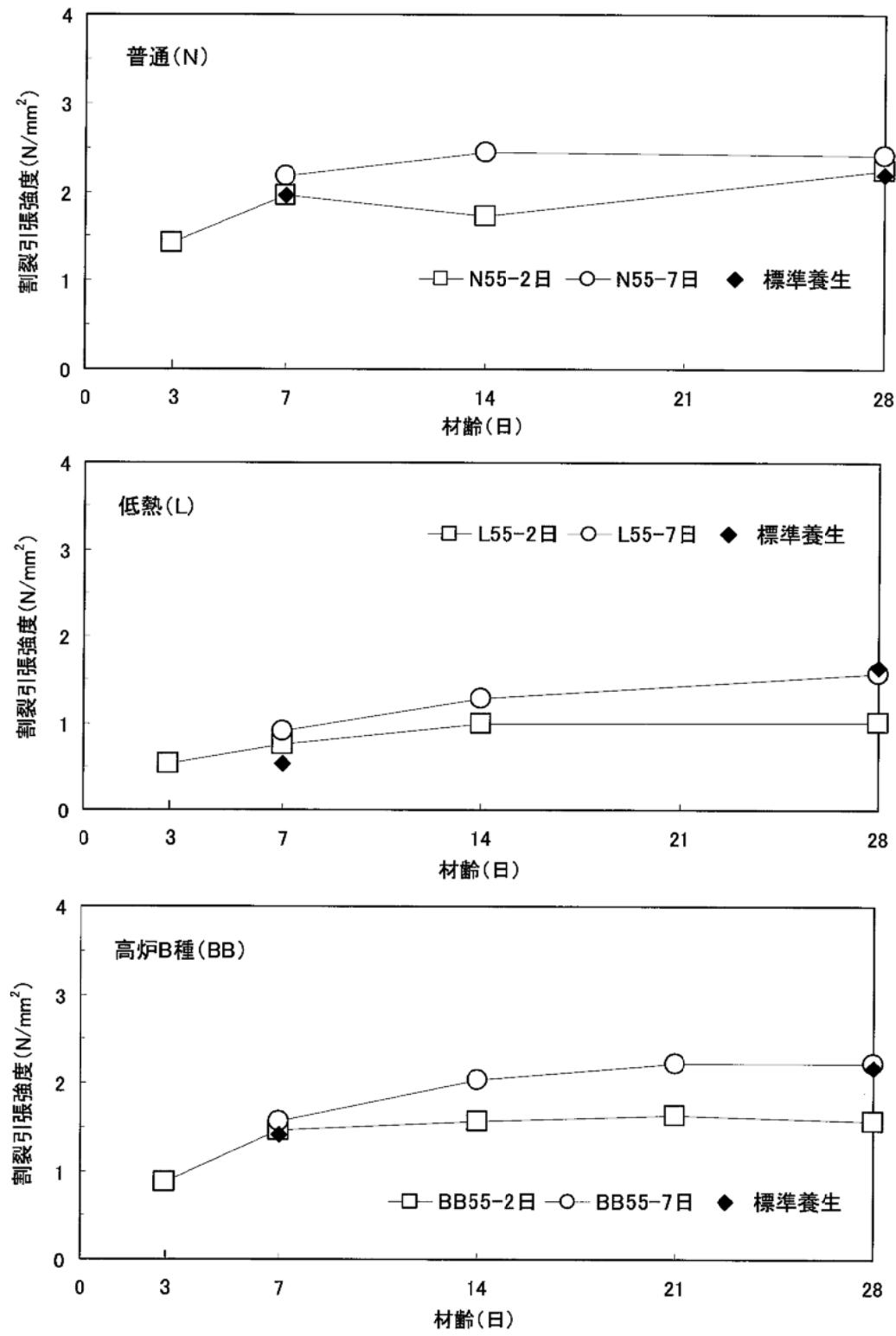


図-3.4.1 コンクリートの割裂引張強度

備考) 凡例中の記号は、配合記号-前養生期間を示す。

3. 4. 2 水セメント比の異なるコンクリートの割裂引張強度

各種セメントを使用した水セメント比の異なるコンクリートの割裂引張強度を図-3.4.2 に示す。前養生期間は 7 日とした。図には標準養生時の割裂引張強度も併せて示す。

いずれのセメントを使用した場合も、水セメント比が小さいほど割裂引張強度が高くなつた。特に、水セメント比 35% の割裂引張強度が高い傾向を示した。材齢の経過に伴う強度増進の傾向について見ると、N および L を使用した場合は、L を使用した水セメント比 55% 以外の配合は、材齢 14 日以降の強度増進が低い傾向を示した。BB を使用した場合は、材齢 21 日以降の強度増進が低い傾向を示した。

標準養生の割裂引張強度と比較すると、N および BB を使用した場合は、水セメント比に係わらず、材齢 7 日、28 日ともに標準養生と概ね同等の割裂引張強度を示した。L を使用した場合については、材齢 7 日は標準養生と概ね同等か高い傾向を示した。一方、材齢 28 日については標準養生に比べて低い傾向を示した。特に水セメント比 45% および 35% の材齢 28 日において、その傾向が顕著に認められた。

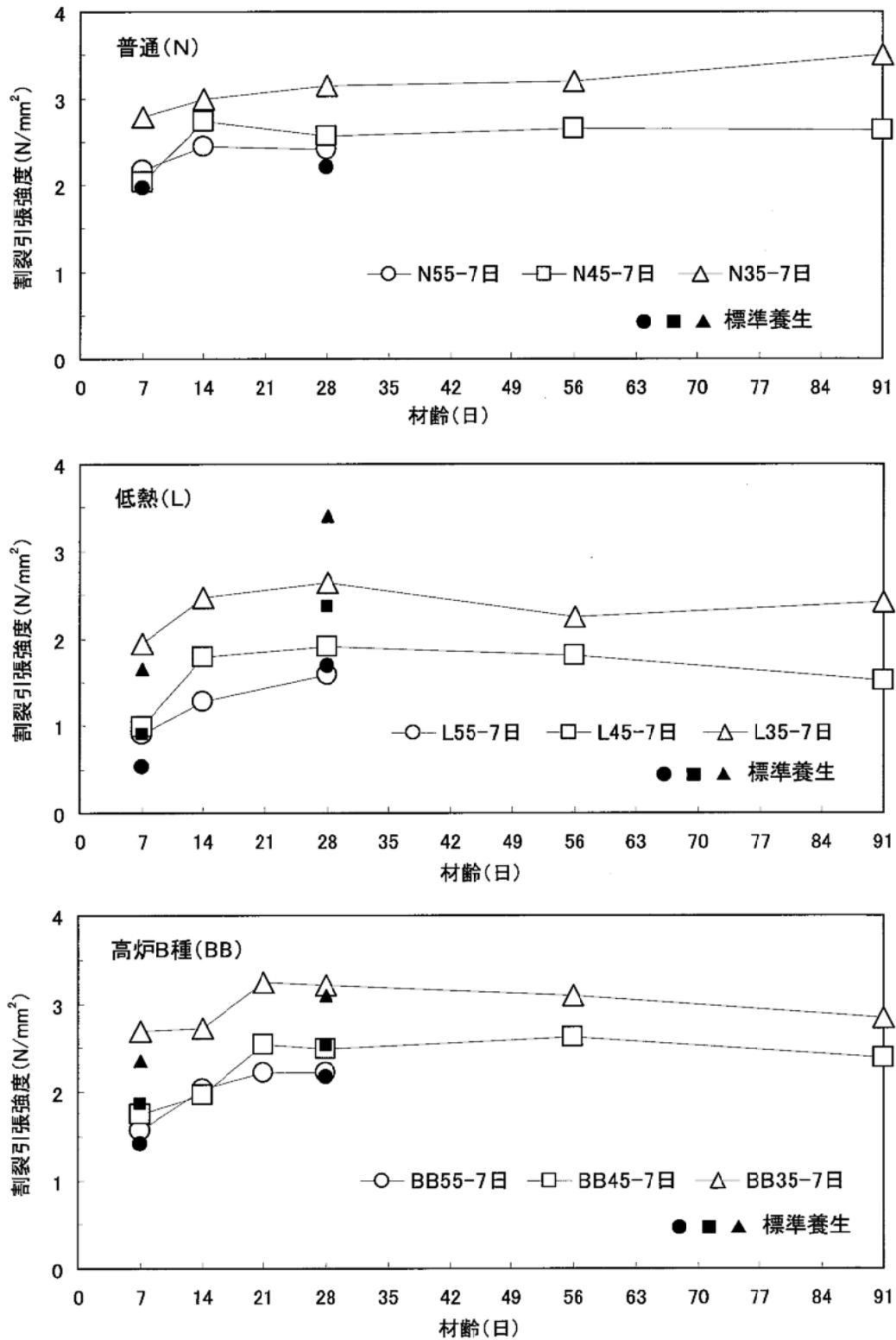


図-3.4.2 コンクリートの割裂引張強度

備考) 凡例中の記号は、配合記号-前養生期間を示す。

3. 4. 3 骨材岩種の異なるコンクリートの割裂引張強度

Nを使用した骨材岩種の異なるコンクリートの割裂引張強度を図-3.4.3に示す。図には標準養生時の割裂引張強度も併せて示す。

細骨材の種類の影響をみると、山砂+硬質砂岩碎石(N55)の場合に比べて碎砂+硬質砂岩碎石(N55s)の場合の方が高い割裂引張強度を示した。粗骨材については、岩種が割裂引張強度に及ぼす影響は認められなかった。

標準養生の割裂引張強度と比較すると、碎砂+硬質砂岩碎石(N55s)の場合、標準養生に比べて割裂引張強度は低くなった。強度発現性の高い骨材を使用した場合、乾燥期間の影響を受けやすいものと推測される。

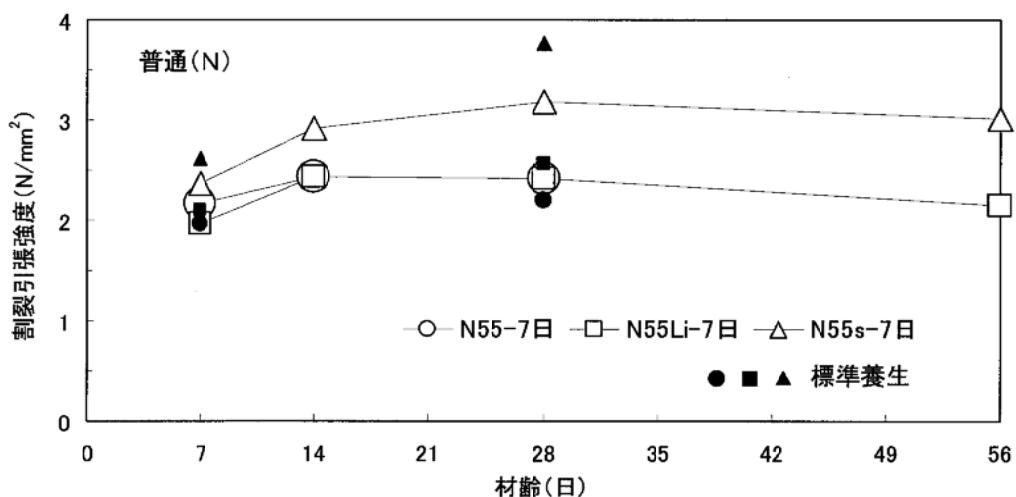


図-3.4.3 コンクリートの割裂引張強度

備考) 凡例中の記号は、配合記号-前養生期間を示す。

3. 5 乾燥収縮率および質量減少率

3. 5. 1 前養生期間の異なるコンクリートの乾燥収縮率

各種セメントを使用した前養生期間の異なるコンクリートの乾燥収縮率を図-3.5.1 に、質量減少率を図-3.5.2 に示す。図には JIS による乾燥収縮率（前養生：標準養生 7 日）も併せて示す。

乾燥収縮率は、いずれのセメントを使用した場合も前養生期間 7 日の方が前養生期間 2 日に比べて小さくなり、前養生期間を長くすることで乾燥収縮率が小さくなるという既往の報告¹⁾ と同様の傾向となった。また、前養生期間 7 日と標準養生 7 日を比べると、いずれのセメントについても標準養生 7 日の方が乾燥収縮率が大きくなる傾向が認められた。

質量減少率は、いずれのセメントについても前養生期間 7 日の方が前養生期間 2 日に比べて小さくなった。前養生期間 7 日と標準養生 7 日を比べると、いずれのセメントについても標準養生 7 日の方が質量減少率は大きくなる傾向が認められた。また、L は、N および BB と異なり乾燥期間 14 日後やや質量が増加する傾向が認められた。なお、この一因としては中性化による質量増加が原因であると報告されている²⁾。

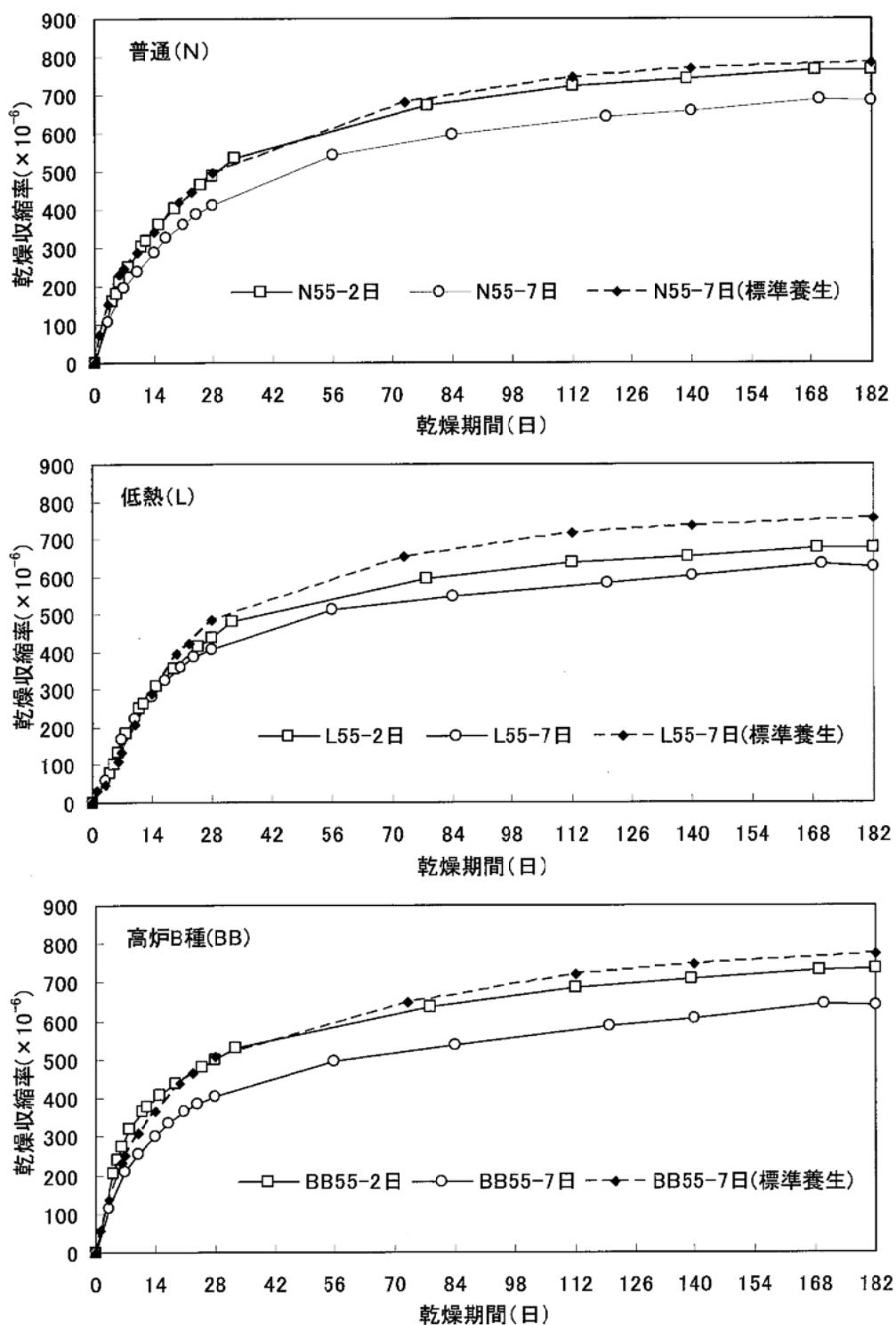


図-3.5.1 コンクリートの乾燥収縮率

備考) 凡例中の記号は、配合記号—前養生期間を示す。

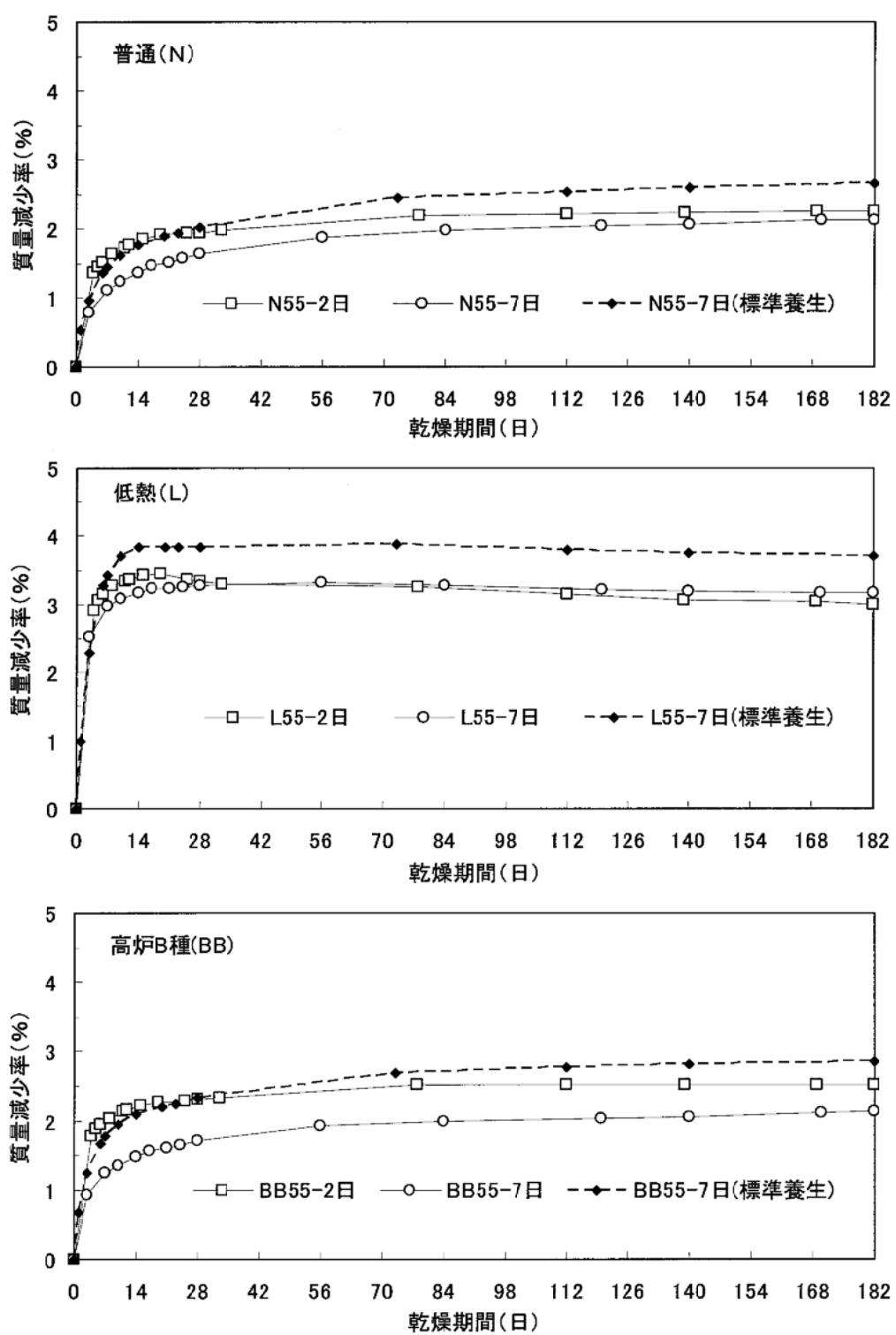


図-3.5.2 コンクリートの質量減少率

備考) 凡例中の記号は、配合記号ー前養生期間を示す。

3. 5. 2 水セメント比の異なるコンクリートの乾燥収縮率

各種セメントを使用した水セメント比の異なるコンクリートの乾燥収縮率を図-3.5.3 に、質量減少率を図-3.5.4 に示す。図には JIS による乾燥収縮率（前養生：標準養生 7 日）も併せて示す。

乾燥収縮率は、いずれのセメントを使用した場合も水セメント比が大きいほど大きくなつた。また、いずれの水セメント比についても標準養生 7 日の方が前養生期間 7 日に比べて乾燥収縮率が大きくなつた。

質量減少率は、いずれのセメントを使用した場合も、水セメント比が大きいほど大きくなつた。また、いずれの水セメント比についても標準養生 7 日の方が前養生期間 7 日に比べて質量減少率が大きくなつた。L は、水セメント比 55%および 45%では、3.5.1 で記載したように質量が増加する傾向を認められるが、水セメント比 35%では質量が増加する傾向は認められなかつた。

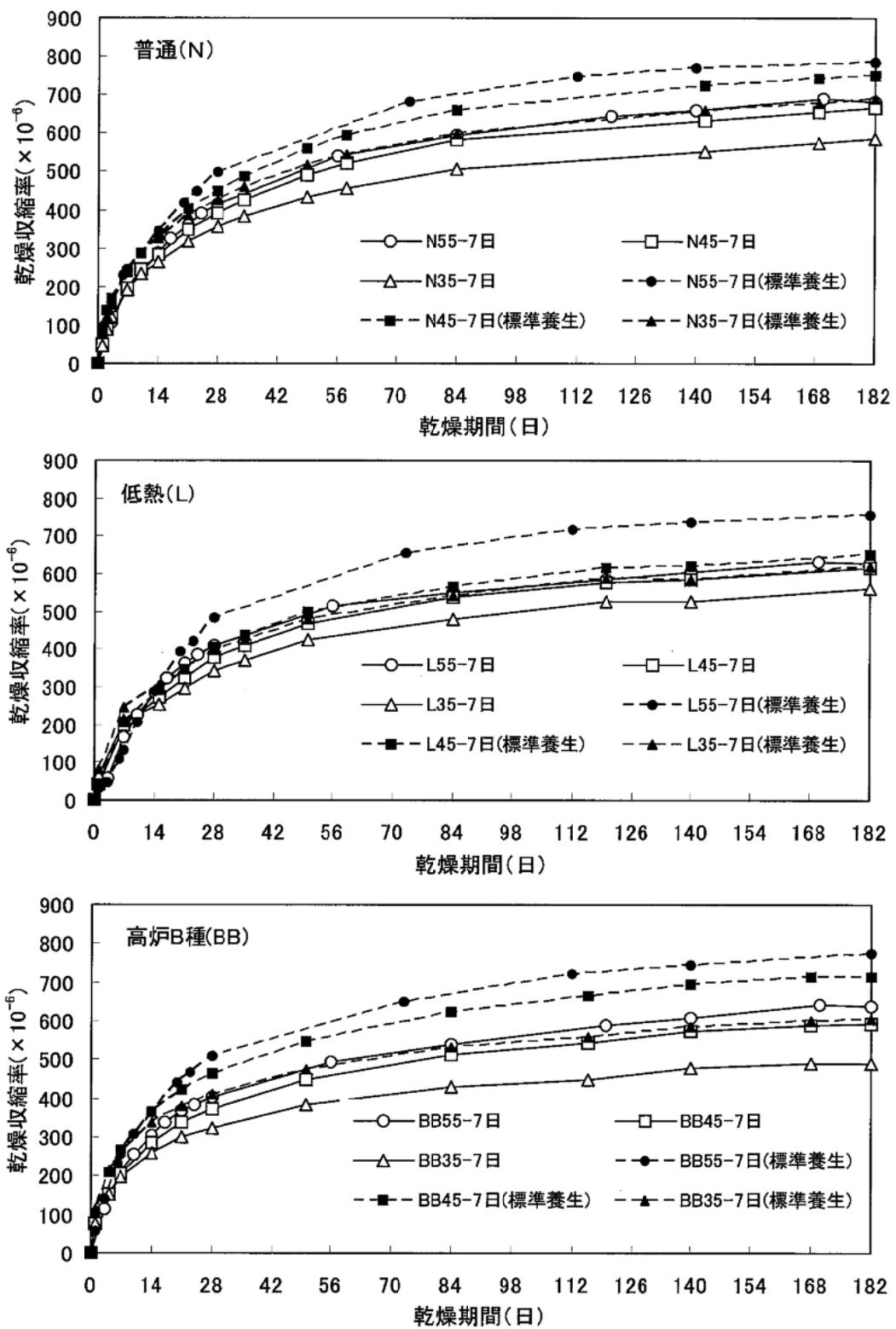


図-3.5.3 コンクリートの乾燥収縮率

備考) 凡例中の記号は、配合記号—前養生期間を示す。

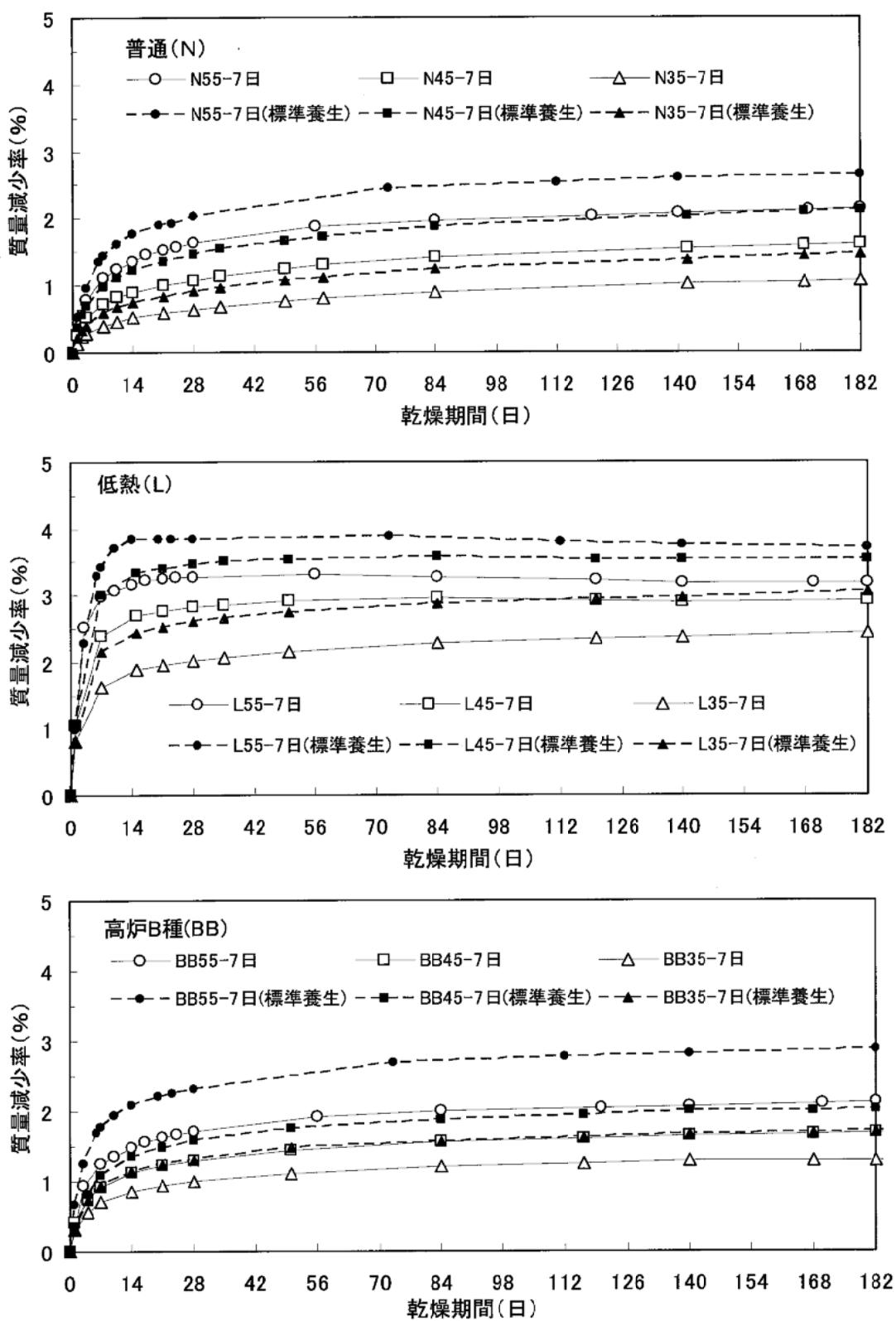


図-3.5.4 コンクリートの質量減少率

備考) 凡例中の記号は、配合記号ー前養生期間を示す。

3. 5. 3 骨材岩種の異なるコンクリートの乾燥収縮率

Nを使用した骨材岩種の異なるコンクリートの乾燥収縮率を図-3.5.5に、質量減少率を図-3.5.6に示す。図にはJISによる乾燥収縮率（前養生：標準養生7日）も併せて示す。

乾燥収縮率は、使用する細骨材と粗骨材の組み合わせが、山砂+石灰石碎石(N55Li)<山砂+硬質砂岩碎石(N55)<碎砂+硬質砂岩碎石(N55s)の順で大きくなつた。粗骨材として石灰石骨材を用いた場合、コンクリートの乾燥収縮は総じて他の岩種に比べて小さくなると報告されており³⁾、本試験結果においても同様となつた。また、細骨材の種類が乾燥収縮に与える影響については、粗骨材の種類の場合と比べて小さくほとんど差がないとされているが⁴⁾、粗骨材を硬質砂岩とした本試験では、細骨材として山砂と碎砂を使用した時、山砂に比べて碎砂は乾燥期間182日において 100×10^{-6} 程度乾燥収縮が大きくなつた。前養生期間7日と標準養生7日を比べると、いずれの骨材岩種についても標準養生7日の方が乾燥収縮率は大きくなる傾向が認められた。

質量減少率は、いずれの骨材岩種についても概ね同等であった。前養生期間7日と標準養生7日を比べると、いずれの骨材岩種についても標準養生7日の方が質量減少率は大きくなつた。

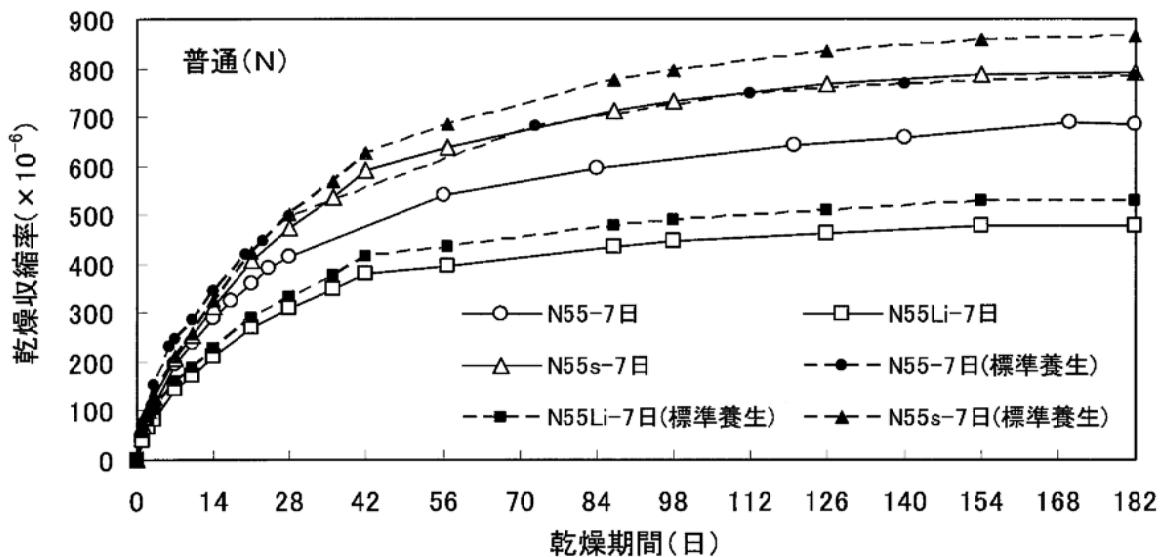


図-3.5.5 コンクリートの乾燥収縮率

備考) 凡例中の記号は、配合記号ー前養生期間を示す。

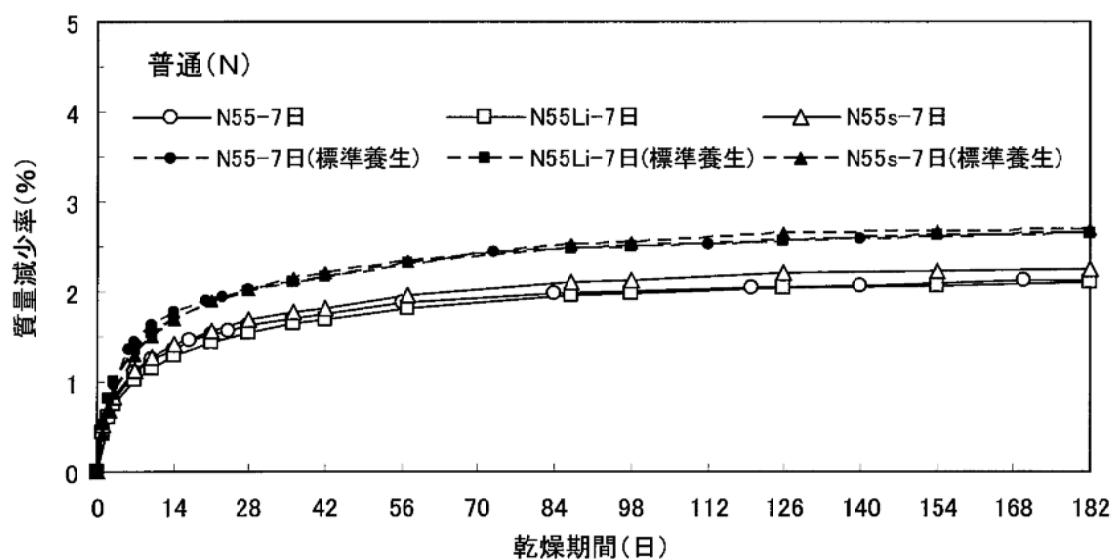


図-3.5.6 コンクリートの質量減少率

備考) 凡例中の記号は、配合記号ー前養生期間を示す。

4. ひび割れ抵抗性試験結果と考察

4. 1 ひび割れ発生日数に及ぼす各種要因の影響

コンクリートの収縮ひび割れに影響を及ぼす要因として、前養生期間、拘束鉄筋比、水セメント比および骨材岩種を取り上げ、一軸拘束試験から求めたひび割れ発生日数から各種セメントを使用したコンクリートのひび割れ抵抗性を評価した。

水セメント比 55%のコンクリートでは、自己収縮ひずみは小さくひび割れに及ぼす影響は小さいと予想し、脱型時にひずみゲージを供試体側面に貼り付けた直後の測定日時を初期値とした。水セメント比 45%、35%は自己収縮ひずみが大きくひび割れに及ぼす影響が大きいと予想し、各コンクリートの凝結始発時間を初期値とした。

ひび割れ発生日数は、目視観察により試験体にひび割れが認められた日数、またはひび割れが認められない場合はコンクリートの引張応力が最大となる日数をひび割れ発生日数とした。コンクリートの引張応力は、一軸拘束試験から求めた拘束鉄筋のひずみをもとに下記(1)式より算出した。

$$\sigma_c(t) = -\varepsilon_s(t') \times E_s \times A_s / A_c \quad (1)$$

ここに、 $\sigma_c(t)$: 材齢 t 日におけるコンクリートの引張応力 (N/mm^2)

$\varepsilon_s(t')$: 測定期間 t' における拘束鉄筋のひずみ

E_s : 鉄筋のヤング係数 (N/mm^2)

A_s : 鉄筋の中央部断面積 (mm^2)

A_c : コンクリートの純断面積 (mm^2)

t' : 測定期間 (日)

4. 1. 1 前養生期間の影響

拘束鉄筋比 6.6%で前養生期間を 2 日、7 日と変化させた一軸拘束試験を実施し、コンクリートの引張応力の推移を図-4.1.1 に、ひび割れ発生日数を図-4.1.2 に示す。

全てのセメントにおいて、前養生期間が 2 日から 7 日と長くなるに従い、ひび割れ発生日数は長くなる傾向が認められた。

また、各ひび割れが発生した時の引張応力は、発生日数に係わらず概ね同程度となっており、前養生期間がコンクリートの引張応力に及ぼす影響は認められなかった。

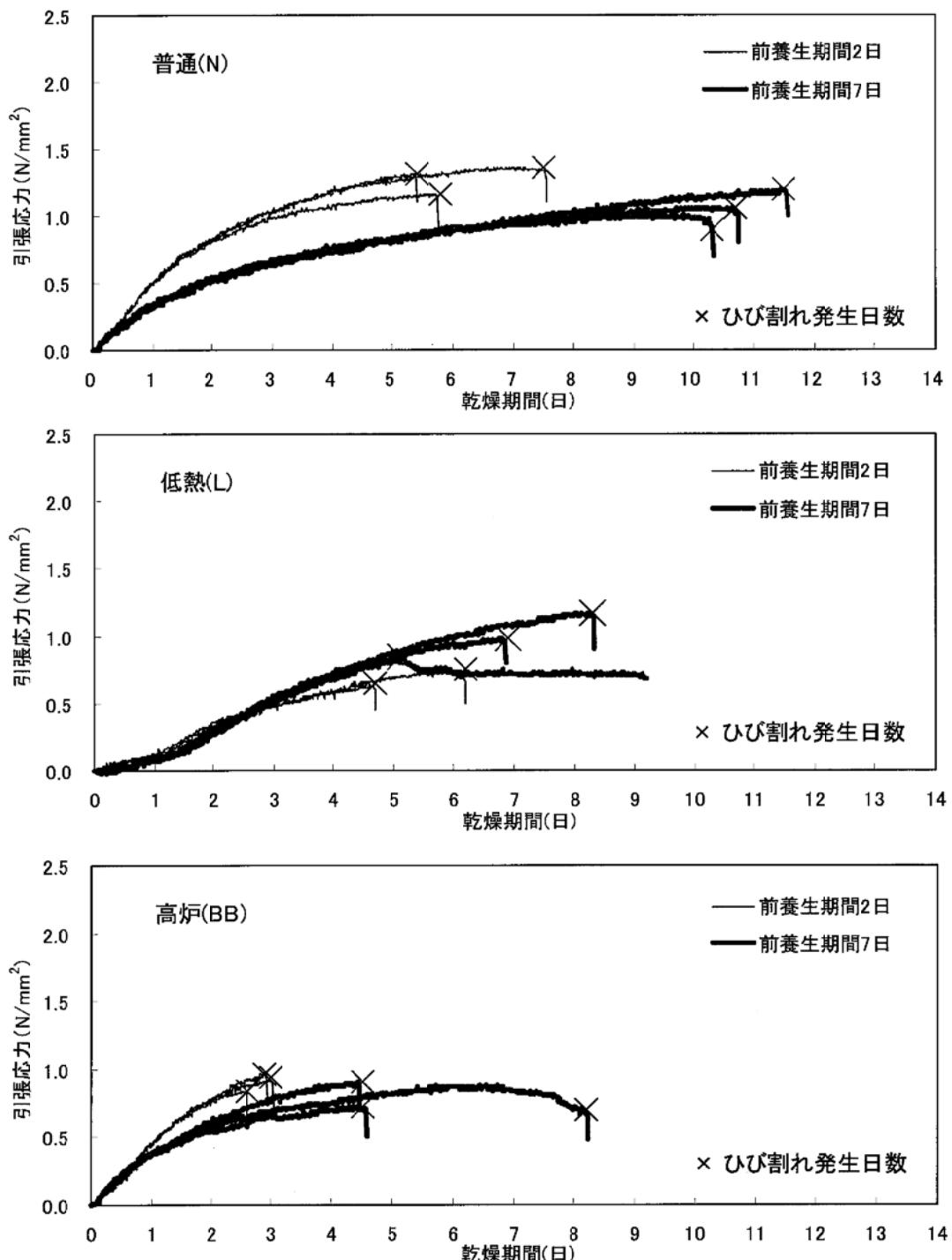


図-4.1.1 引張応力の推移 (W/C : 55%、拘束鉄筋比 6.6%)

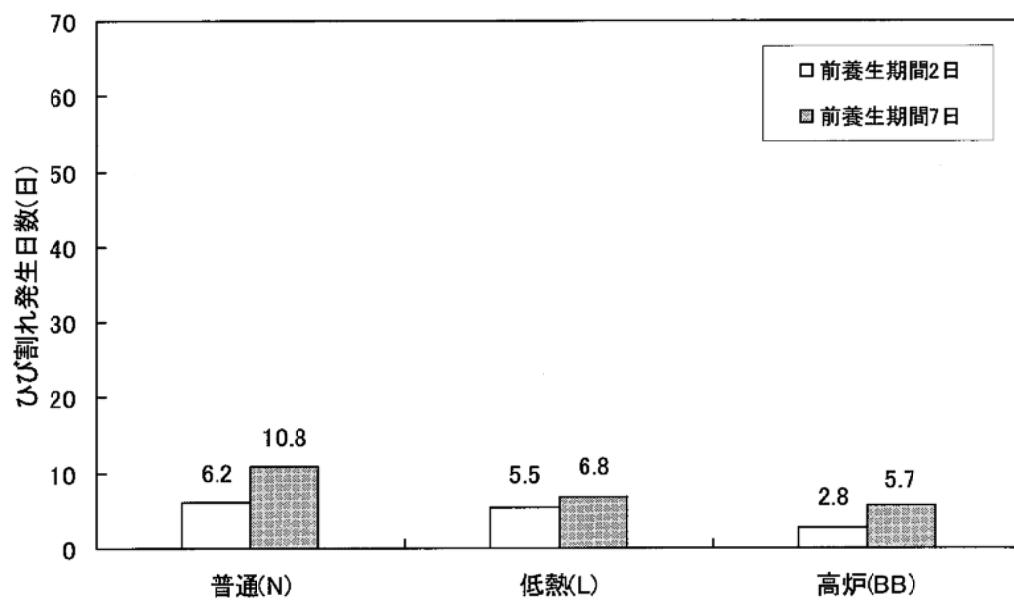


図-4.1.2 ひび割れ発生日数(W/C : 55%、拘束鉄筋比 6.6%)

4. 1. 2 拘束鉄筋比の影響

拘束鉄筋比を3.2%、4.0%、6.6%と変化させた一軸拘束試験を実施し、コンクリートの引張応力の推移を図-4.1.3に、ひび割れ発生日数を図-4.1.4に示す。

全てのセメントにおいて、拘束鉄筋比が小さくなるに従い、ひび割れ発生日数は長くなる傾向が認められた。

ひび割れ発生日数は、拘束鉄筋比が6.6%、4.0%ではBB<L<Nとなるが、拘束鉄筋比が3.2%ではL<BB<Nとなった。

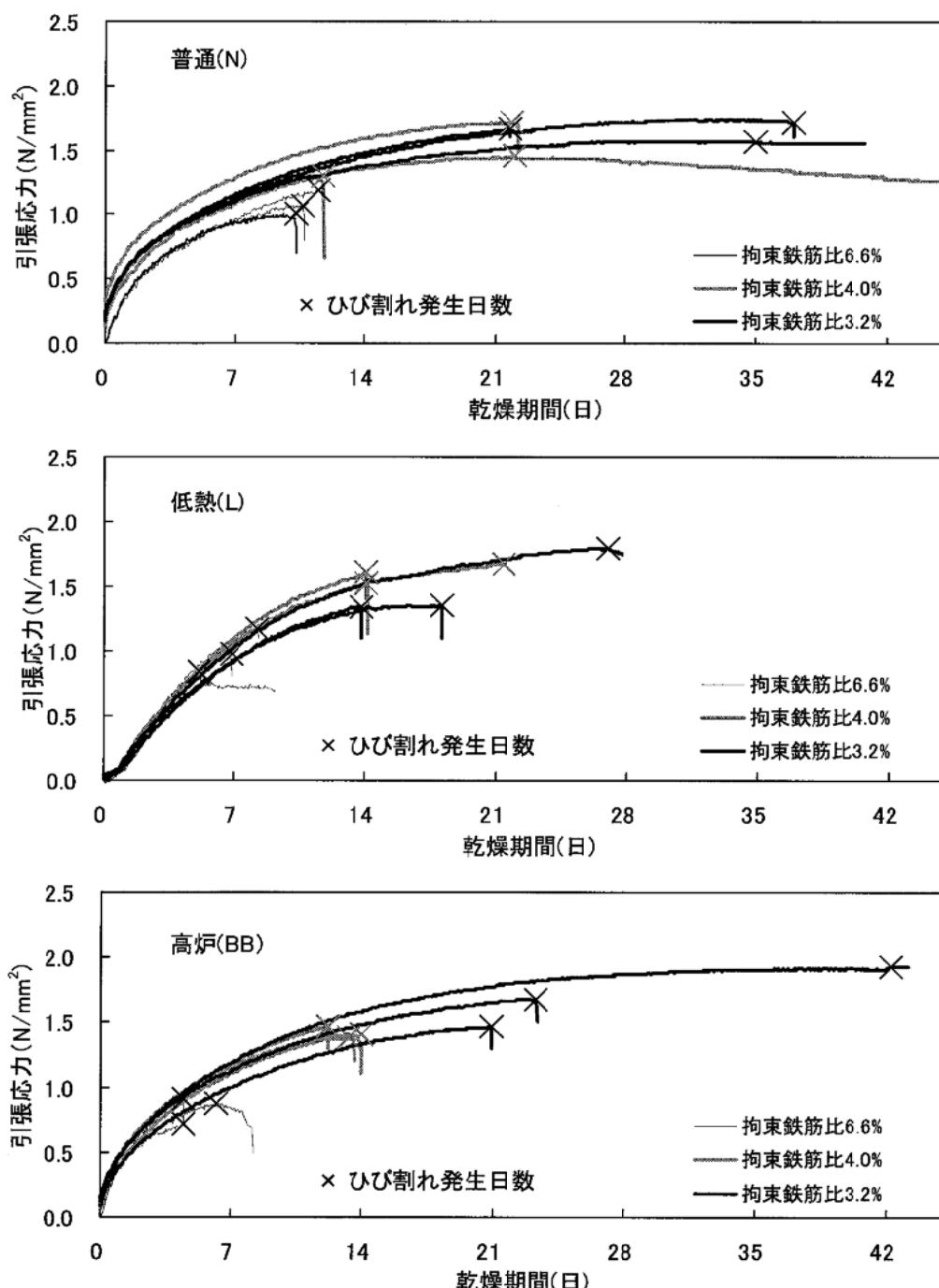


図-4.1.3 引張応力の推移(W/C : 55%、前養生期間 7 日)

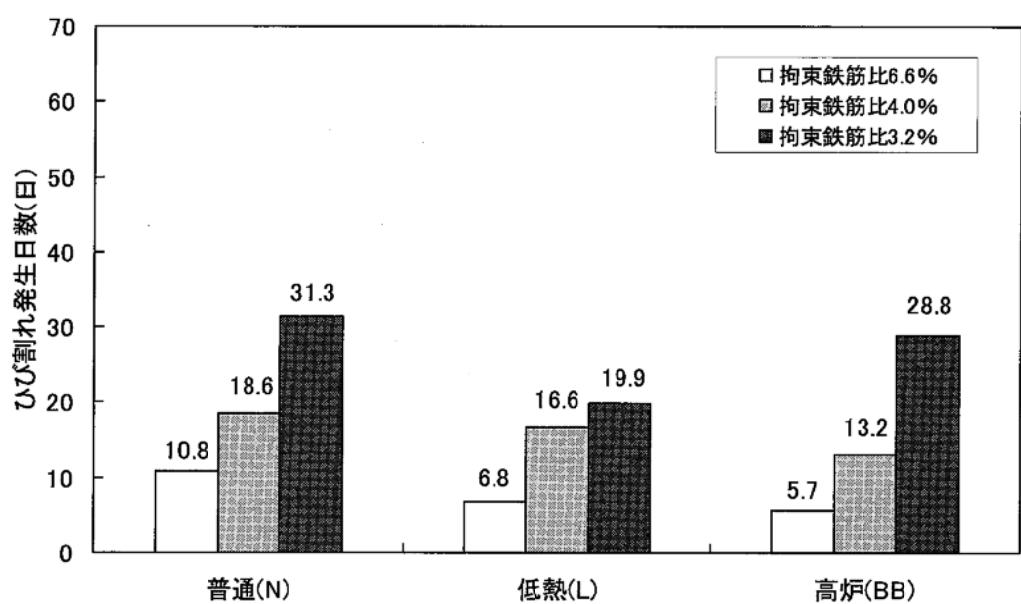


図-4.1.4 ひび割れ発生日数 (W/C : 55%、前養生期間 7 日)

4. 1. 3 水セメント比の影響

コンクリートの引張応力の推移を図-4.1.5に、ひび割れ発生日数を図-4.1.6に示す。NおよびBBを用いた場合、コンクリートの引張応力は、水セメント比が小さいほど同一の前養生期間において大きくなり、ひび割れ発生日数も長くなる傾向を示した。一方、Lを用いた場合には、水セメント比35%のコンクリートの引張応力およびひび割れ発生日数は、水セメント比45%の場合より短くなった。このように、水セメント比とひび割れ発生日数には必ずしも明確な傾向は認められなかった。

なお、乾燥開始時点には、既にコンクリートには引張応力が発生しており、水セメント比が小さいほど大きくなる傾向が認められ、NおよびBBを用いた場合に顕著であった。これは養生期間中に生じた自己収縮の影響と考えられる。

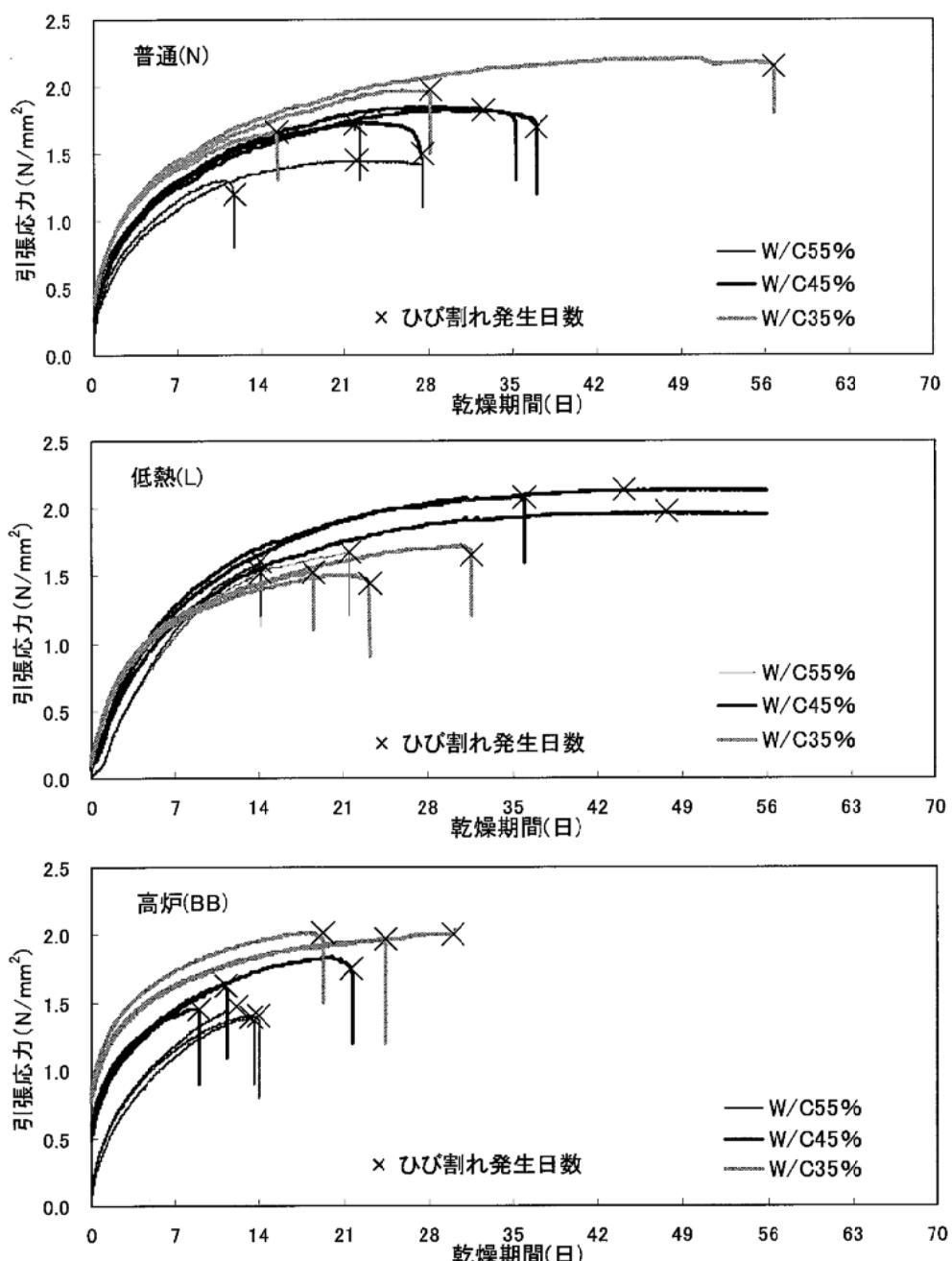


図-4.1.5 引張応力の推移(拘束鉄筋比4.0%、前養生期間7日)

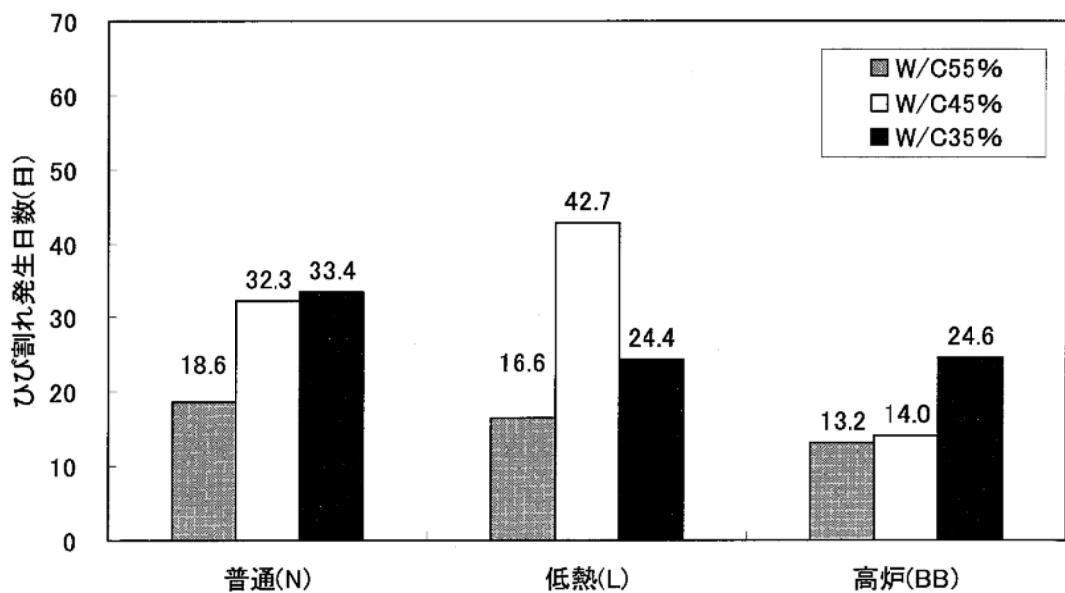


図-4.1.6 ひび割れ発生日数(拘束鉄筋比 4.0%、前養生期間 7 日)

4. 1. 4 骨材岩種の影響

コンクリートの引張応力の推移を図-4.1.7に、ひび割れ発生日数を図-4.1.8に示す。ひび割れ発生日数は、山砂+硬質砂岩碎石(N55) < 碎砂+硬質砂岩碎石(N55s) < 山砂+石灰石碎石(N55Li)の順に長くなっている。骨材岩種の影響が認められた。特に、石灰石を粗骨材に使用した場合(N55Li)は、明確なひび割れ発生が認められず、本研究ではコンクリートの引張応力が最大となる材齢をひび割れ発生日数としたため、実際のひび割れ発生日数は不明であるが、極めて高いひび割れ抵抗性が認められた。材齢6ヶ月の乾燥収縮率は、山砂+硬質砂岩碎石(N55)が 683×10^{-6} 、山砂+石灰石碎石(N55Li)が 527×10^{-6} 、碎砂+硬質砂岩碎石(N55s)が 866×10^{-6} となり、ひび割れ発生日数は必ずしも乾燥収縮の大きさとは対応していない。コンクリートに発生する引張応力が、後述5.2の式(7)で表されるとすれば、弾性係数は山砂+硬質砂岩碎石(N55)と碎砂+硬質砂岩碎石(N55s)は同程度なので、引張応力は碎砂+硬質砂岩碎石(N55s)の方が大きくひび割れには不利となるが、コンクリートの引張強度は山砂+硬質砂岩碎石(N55)より碎砂+硬質砂岩碎石(N55s)の方が高いため、この点からはひび割れが生じにくいことになる。このように収縮ひび割れは、引張応力と引張強度が大きな影響要因であるが、これらに加えて持続する引張応力によるクリープの影響も受けるため、乾燥収縮率のみではひび割れ抵抗性を適切に評価できないと考えられる。

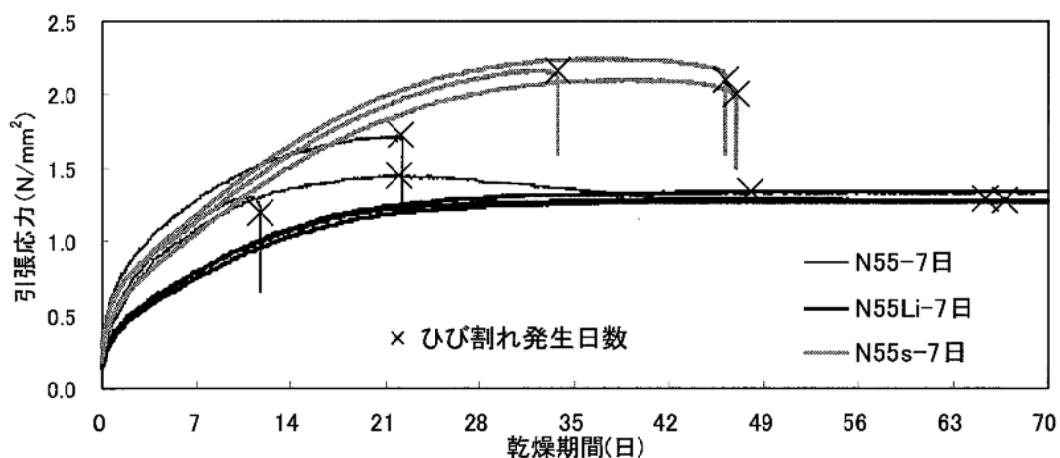


図-4.1.7 引張応力の推移(拘束鉄筋比 4.0%)

備考) 凡例中の記号は、配合記号-前養生期間を示す。

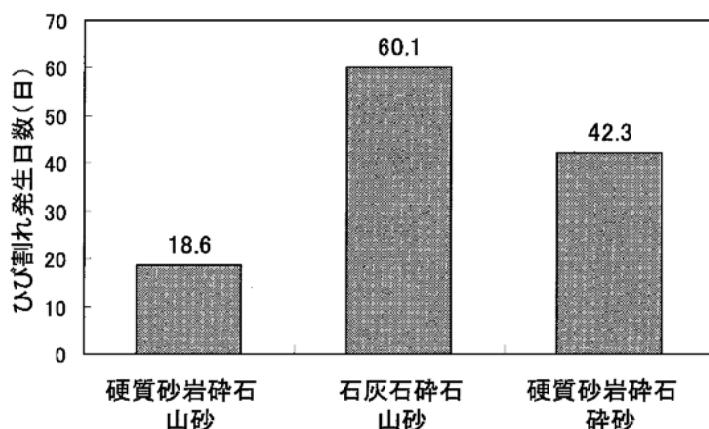


図-4.1.8 ひび割れ発生日数(拘束鉄筋比 4.0%、前養生期間 7 日)

4. 2 ひび割れ発生時の応力強度比

ひび割れ抵抗性試験におけるひび割れ発生時のコンクリートの割裂引張強度および引張応力から、ひび割れ発生時の応力強度比を算出した。結果を図-4.1.9に示す。なお、コンクリートの引張応力は4.1の式(1)より、また、コンクリートの割裂引張強度は式(2)より、ひび割れ発生材齢時の値を算出した。式(2)は割裂引張強度の回帰曲線であり、実測値を表すように式中の a, b を最小二乗法により定めた。なお、式中の $f'c(t)$ は、式(3)で表す圧縮強度の回帰曲線であり、割裂引張強度と同様に式中の a, b を定めた。式(2)の回帰式の定数を表-4.1.1に、式(3)の回帰式の定数を表-4.1.2に示す。

$$f_{tk}(t) = a \times f'c(t)^b \quad (2)$$

ここに、 $f_{tk}(t)$ ：材齢 t 日におけるコンクリートの割裂引張強度 (N/mm^2)

$f'c(t)$ ：材齢 t 日におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)

a, b ：回帰定数

$$f'c(t) = \frac{t}{a+bt} d(i) f'ck \quad (3) \quad (\text{土木学会 コンクリート標準示方書[設計編]p.340 を引用})$$

ここに、 $f'c(t)$ ：材齢 t 日におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)

$f'ck$ ：コンクリートの設計基準強度または試験値 (N/mm^2)

t ：材齢 (日)

i ：設計基準強度の基準材齢 (日)、 $i=28$ または 91

a, b ：回帰定数

$d(i)$ ：材齢 28 日に対する材齢 91 日の強度の増加率。また、セメントの種類によらず、 $d(91)=1$ とする。

いずれのセメントを用いた場合も、拘束鉄筋比が高いほど総じて応力強度比は小さくなる傾向を示した。水セメント比や骨材岩種と応力強度比には明確な傾向は認められなかった。

また、セメントの種類では、N および BB の応力強度比が 0.4~0.7 となるのに対して、L の応力強度比は 0.6~1.1 と大きくなった。

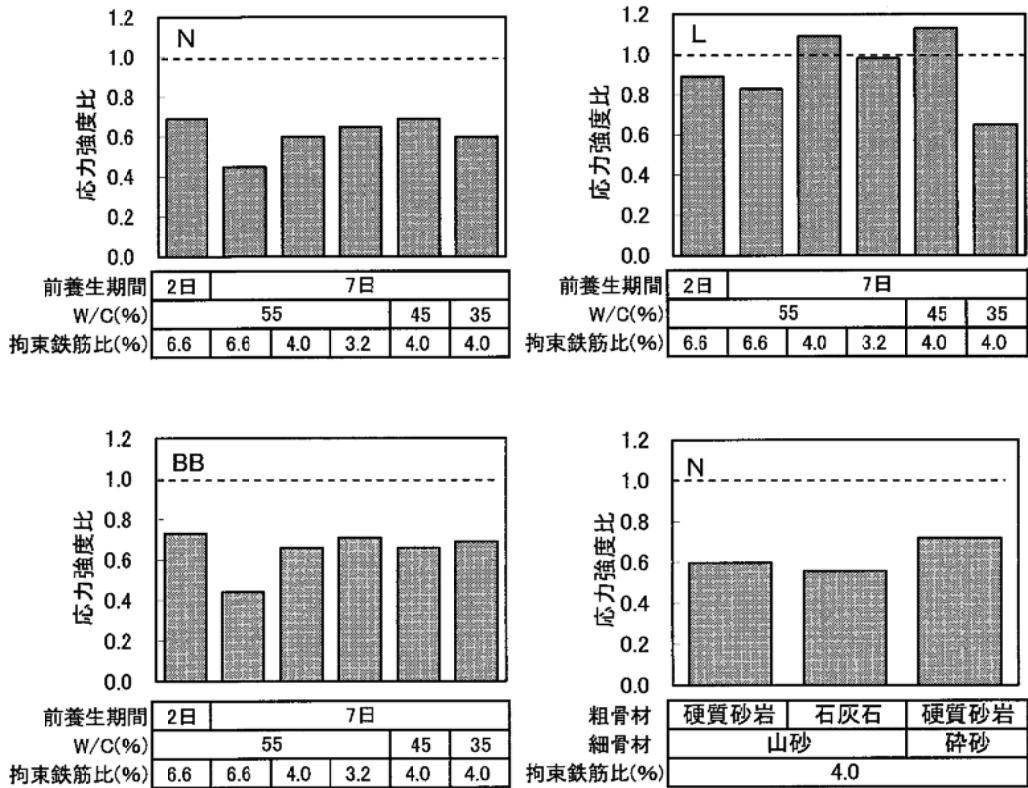


図-4.1.9 応力強度比

表-4.1.1 割裂引張強度の回帰式における定数

配合 記号	前養生期間	回帰定数	
		a	b
N55	2日	0.14	0.79
	7日	0.26	0.64
L55	2日	0.22	0.62
	7日	0.21	0.68
BB55	2日	0.09	0.97
	7日	0.16	0.79
N45	7日	0.13	0.80
L45	7日	0.20	0.65
BB45	7日	0.14	0.82
N35	7日	0.09	0.90
L35	7日	0.31	0.55
BB35	7日	0.45	0.49
N55Li	7日	0.35	0.53
N55s	7日	0.35	0.56

表-4.1.2 圧縮強度の回帰式における定数

配合 記号	前養生期間	回帰定数				
		a	b	i	d(i)	fck
N55	2日	2.1	1.01	28	1.1	29.2
	7日	3.2	0.96	28	1.1	33.8
L55	2日	10.8	1.10	28	1.5	13.2
	7日	17.9	0.81	28	1.5	18.3
BB55	2日	4.3	1.25	28	1.4	21.9
	7日	7.6	1.10	28	1.4	28.2
N45	7日	2.1	0.92	91	1.0	43.4
L45	7日	6.8	0.85	91	1.0	29.6
BB45	7日	4.3	0.92	91	1.0	38.0
N35	7日	1.9	0.97	91	1.0	62.7
L35	7日	4.3	0.87	91	1.0	42.8
BB35	7日	3.7	0.93	91	1.0	50.6
N55Li	7日	2.5	1.01	28	1.1	36.0
N55s	7日	2.8	1.02	28	1.1	45.4

5. コンクリートの乾燥収縮率がひび割れ抵抗性に及ぼす影響

5. 1 コンクリートの乾燥収縮率とひび割れ発生日数の関係

ひび割れ抵抗性試験と同一養生（封緘 2 日または 7 日）したコンクリートの乾燥期間 26 週の乾燥収縮率と一軸拘束試験におけるひび割れ発生日数の関係を図-5.1.1 に、標準養生したコンクリートの乾燥期間 26 週の乾燥収縮率と一軸拘束試験におけるひび割れ発生日数の関係を図-5.1.2 に示す。

図において、前養生期間、拘束鉄筋比、水セメント比、骨材岩種の違いに係わらず、本実験における乾燥期間 26 週の乾燥収縮率とひび割れ発生日数には明確な傾向は認められない。

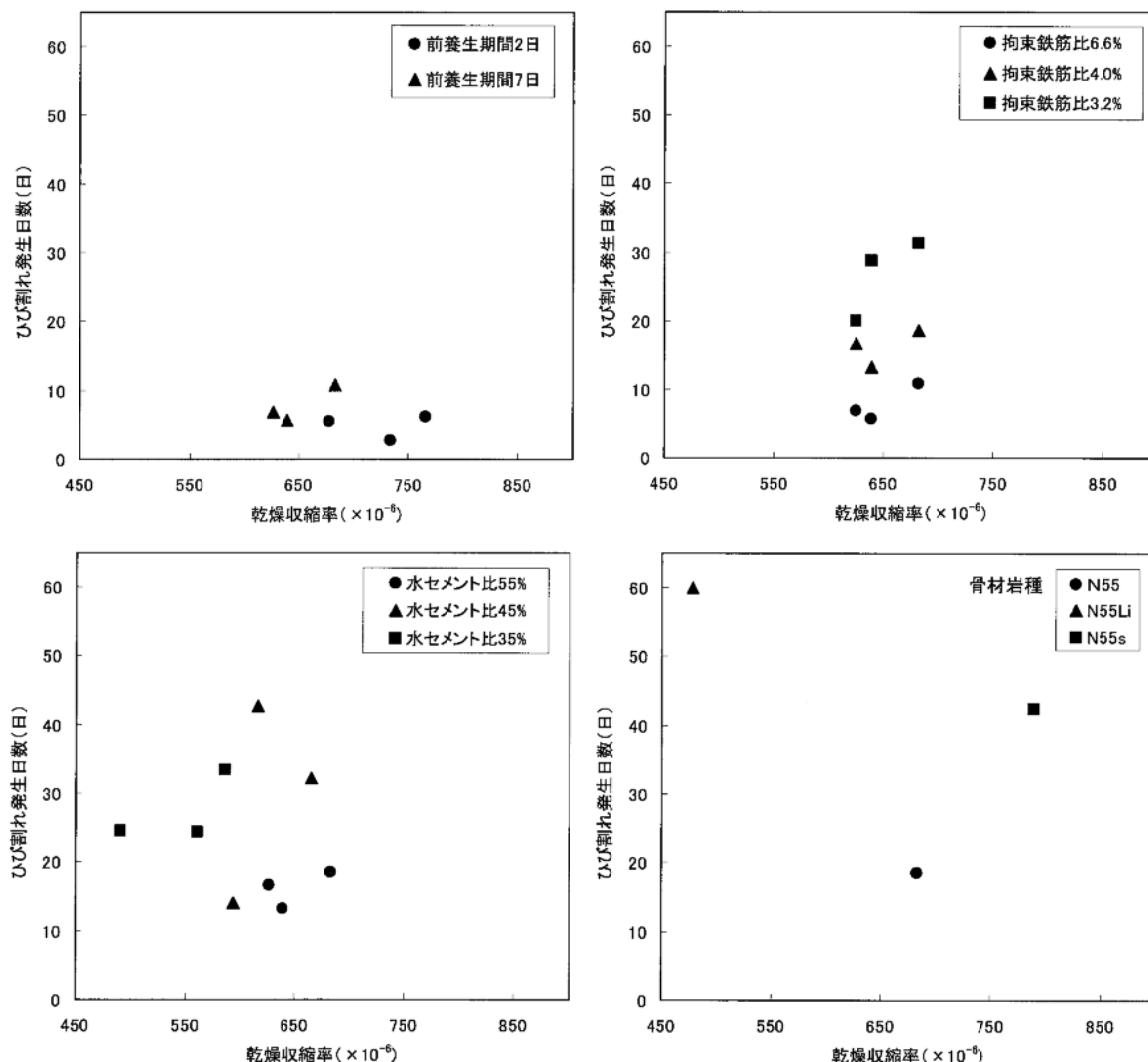


図-5.1.1 乾燥期間 26 週の乾燥収縮率とひび割れ発生日数の関係（封緘 2 日または 7 日）

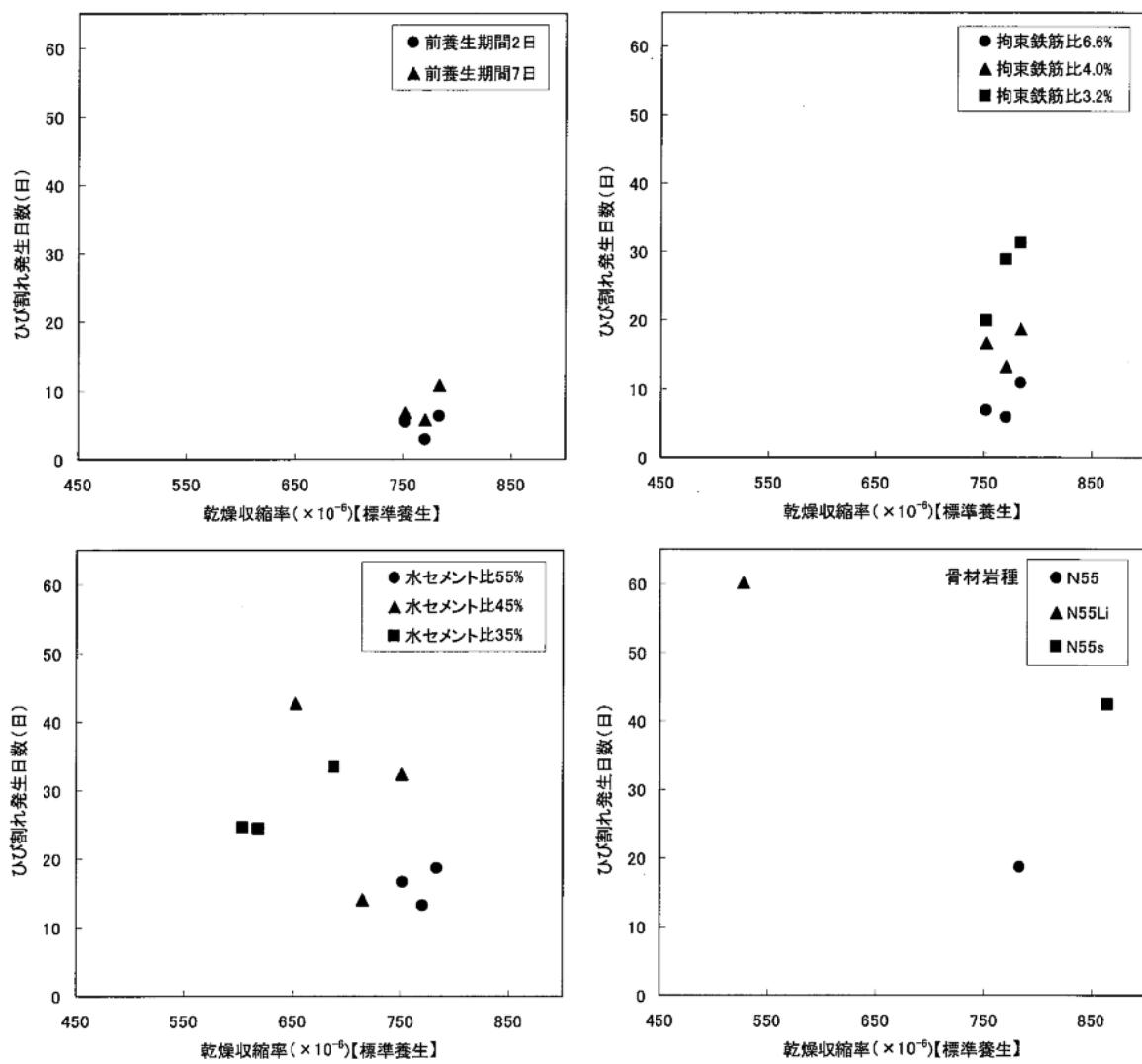


図-5.1.2 JISによる乾燥期間 26 週の乾燥収縮率とひび割れ発生日数の関係(標準養生)

5. 2 弹性理論に基づく推定ひび割れ発生日数とひび割れ発生日数との関係

(弹性計算した推定ひび割れ日数)

5.1において、コンクリートの乾燥期間 26 週の乾燥収縮率と一軸拘束試験におけるひび割れ発生日数には明確な傾向は認められなかった。そこで、3 章の結果より、JIS によるコンクリートの乾燥収縮率、コンクリートの割裂引張強度および静弾性係数を用いて弾性理論に基づく推定ひび割れ発生日数を算出した。

3 章の実測値より式(4)でコンクリートの静弾性係数を、式(5)でコンクリートの乾燥収縮率を回帰した。

$$E_c(t) = a \times f'c(t)^b \quad (4)$$

ここに、 $E_c(t)$: 材齢 t 日におけるコンクリートの静弾性係数(N/mm²)

$f'c(t)$: 材齢 t 日におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

a, b : 回帰定数

$$\varepsilon_{cf}(t') = \frac{t'}{a + bt'} \quad (5)$$

ここに、 $\varepsilon_{cf}(t')$: 乾燥期間 t' 日の乾燥収縮率

t' : 乾燥期間 (日)

a, b : 回帰定数

上式で求めた乾燥収縮率およびコンクリートの静弾性係数より、コンクリートの拘束引張ひずみを式(6)で、また、コンクリートに発生する引張応力を式(7)で算出した。なお本実験ではコンクリートのクリープを評価していないので、引張応力を算出する上で、クリープの影響は考慮しなかった。

$$\varepsilon_{cr}(t') = \frac{\varepsilon_{cf}(t')E_c(t)A_c}{E_s A_s + E_c(t)A_c} \quad (6)$$

$$\sigma_c(t) = \frac{\varepsilon_{cr}(t')E_s A_s}{A_c} \quad (7)$$

ここに、 $\varepsilon_{cr}(t')$: 乾燥期間 t' 日の拘束引張ひずみ

t' : 乾燥期間 (日)

$E_c(t)$: 材齢 t 日におけるコンクリートの静弾性係数(N/mm²)

A_c : コンクリートの純断面積 (mm²)

E_s : 拘束鉄筋のヤング係数 (=2.0×10⁵N/mm²)

A_s : 拘束鉄筋中央部の断面積 (mm²)

式(7)で求めた引張応力 ($\sigma_c(t)$) が 5 章の式(2)から求めた割裂引張強度 ($f_{ik}(t)$) より大きくなるときにひび割れが発生すると仮定し、ひび割れ発生日数を推定した。これらの結果を表-5.2.1 および図-5.2.1 に示す。また、3 章の実測値より求めたコンクリートの静弾性係数の回帰式の定数

を表-5.2.2 に、乾燥収縮の回帰式の定数を表-5.2.3 に示す。

図より、コンクリートの乾燥収縮率、割裂引張強度および静弾性係数を含めた弾性計算で求めた推定ひび割れ発生日数は、ひび割れ発生日数の実測値と概ね対応している。

本結果より、コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性は、乾燥期間 26 週の乾燥収縮率だけでなく、コンクリートの力学的特性も含めて総合的に評価するのが適切であると考えられる。

表-5.2.1 乾燥収縮率、割裂引張強度および静弾性係数から推定したひび割れ発生日数と実測値

前養生期間	配合記号	前養生期間 (日)	ひび割れ発生日数 (日)	推定ひび割れ発生日数 (日)
		2d	6.2	7.3
N55		7d	10.8	13.5
	L55	2d	5.5	3.9
L55		7d	6.8	5.8
BB55		2d	2.8	3.9
	7d	5.7	10.6	
拘束鉄筋比	N55	配合記号	鉄筋比 (%)	ひび割れ発生日数 (日)
			6.6	10.8
			4.0	18.6
	L55		3.2	31.3
			6.6	6.8
			4.0	16.6
			3.2	19.9
	BB55		6.6	5.7
			4.0	13.2
			3.2	28.8
水セメント比	水セメント比	配合記号	水セメント比 (%)	ひび割れ発生日数 (日)
		N55	55	18.6
		N45	45	32.3
		N35	35	33.4
		L55	55	16.6
		L45	45	42.7
		L35	35	24.4
		BB55	55	13.2
		BB45	45	14.0
		BB35	35	24.6
骨材岩種	骨材岩種	配合記号	骨材岩種	ひび割れ発生日数 (日)
		N55	山砂 +硬質砂岩碎石	18.6
		N55Li	山砂 +石灰石碎石	60.1
		N55s	碎砂 +硬質砂岩碎石	42.3
				24.4

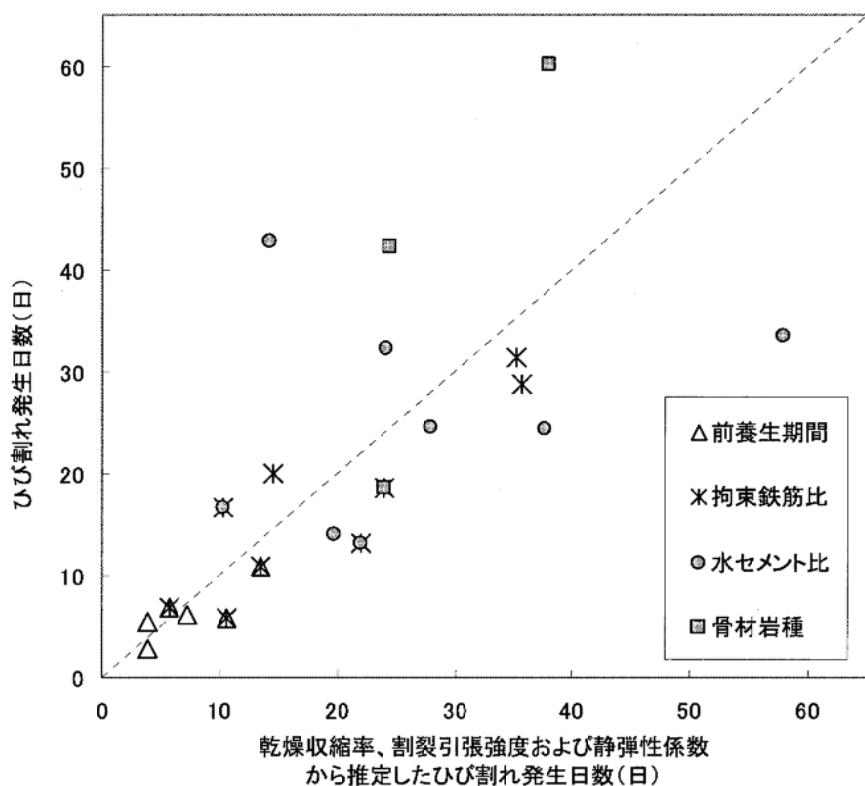


図-5.2.1 推定値ひび割れ発生日数とひび割れ発生日数の実測値の関係

表-5.2.2 コンクリートの静弾性係数の回帰式における定数

配合 記号	前養生期間	回帰定数	
		a	b
N55	2日	10.50	0.25
	7日	23.20	0.04
L55	2日	8.30	0.30
	7日	12.30	0.20
BB55	2日	7.40	0.35
	7日	10.10	0.26
N45	7日	21.0	0.08
L45	7日	14.0	0.16
BB45	7日	10.0	0.28
N35	7日	20.5	0.10
L35	7日	16.9	0.13
BB35	7日	9.3	0.29
N55Li	7日	31.3	-0.02
N55s	7日	17.0	0.13

表-5.2.3 乾燥収縮率の回帰式における定数

記号	配合 前養生期間	回帰定数	
		a	b
N55	封緘養生 2 日	0.02321	0.00118
	封緘養生 7 日	0.02984	0.00130
	標準養生 7 日	0.02282	0.00115
L55	封緘養生 2 日	0.03003	0.00130
	封緘養生 7 日	0.02933	0.00144
	標準養生 7 日	0.03212	0.00112
BB55	封緘養生 2 日	0.01634	0.00132
	封緘養生 7 日	0.02611	0.00147
	標準養生 7 日	0.02060	0.00121
N45	封緘養生 7 日	0.02977	0.00137
	標準養生 7 日	0.02389	0.00124
L45	封緘養生 7 日	0.03189	0.00148
	標準養生 7 日	0.02978	0.00140
BB45	封緘養生 7 日	0.02679	0.00159
	標準養生 7 日	0.02060	0.00121
N35	封緘養生 7 日	0.02989	0.00161
	標準養生 7 日	0.02299	0.00139
L35	封緘養生 7 日	0.03249	0.00167
	標準養生 7 日	0.02552	0.00153
BB35	封緘養生 7 日	0.02514	0.00197
	標準養生 7 日	0.01710	0.00164
N55Li	封緘養生 7 日	0.03646	0.00187
	標準養生 7 日	0.03406	0.00170
N55s	封緘養生 7 日	0.02698	0.00110
	標準養生 7 日	0.02719	0.00099

6. 結言

コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性に影響を及ぼす要因として、①前養生期間（封緘養生 2 日および 7 日）、②拘束鉄筋比（3.2～6.6%）、③水セメント比（普通コンクリートを想定した 55%および 45%、高強度コンクリートを想定した 35%）、④骨材岩種（細骨材：山砂、碎砂、粗骨材：硬質砂岩碎石、石灰石碎石）を取り上げ、一軸拘束による収縮ひび割れ抵抗性試験を実施した。

本試験により得られた結果をまとめると、以下の通りである。

(1)圧縮強度

いずれのセメントも、前養生期間が 2 日と 7 日では、材齢 7 日の圧縮強度は同等となるが、材齢 7 日以降の圧縮強度は前養生期間 7 日のものが高くなつた。また前養生期間 2 日の場合、標準養生に比べ、圧縮強度は低くなつた。

水セメント比が小さくなるほど圧縮強度は高くなつたが、前養生期間 7 日の場合、標準養生に比べ、材齢 28 日の圧縮強度が低くなり、BB および L でその傾向が顕著となつた。

骨材岩種の違いでは、圧縮強度は、山砂+石灰石碎石 ≈ 山砂+硬質砂岩碎石 < 碎砂+硬質砂岩碎石の順となつた。

(2)静弾性係数

前養生期間、水セメント比、骨材およびセメントの種類の違いが静弾性係数に及ぼす影響はいずれも圧縮強度の場合と同様の傾向となつた。

(3)割裂引張強度

圧縮強度と同様に、いずれのセメントも、前養生期間が 2 日と 7 日では、材齢 28 日までの割裂引張強度は前養生期間 7 日のものが高くなつた。また前養生期間 2 日の場合、標準養生に比べ、割裂引張強度は低くなつた。

水セメント比が小さくなるほど割裂引張強度は高くなつたが、L を使用した水セメント比 45%および 35%のコンクリートでは、前養生期間 7 日の場合、標準養生に比べ、材齢 28 日の割裂引張強度が低下した。

骨材岩種の違いでは、割裂引張強度は、圧縮強度と同様に、山砂+石灰石碎石 ≈ 山砂+硬質砂岩碎石 < 碎砂+硬質砂岩碎石の順となつた。

(4)乾燥収縮率

乾燥期間 26 週の乾燥収縮率は、封緘養生 7 日 < 封緘養生 2 日 < 標準養生 7 日の順となつた。また、水セメント比が大きくなるほど、乾燥収縮率も大きくなつた。骨材岩種の違いでは、乾燥期間 26 週の乾燥収縮率は山砂+石灰石碎石 < 山砂+硬質砂岩碎石 < 碎砂+硬質砂岩碎石の順となつた。

(5)ひび割れ発生日数

拘束鉄筋比が大きくなるほど、前養生期間が短いほど、一軸拘束によるひび割れ発生日数は短くなつた。石灰石碎石を用いた方が、硬質砂岩碎石を用いたものよりもひび割れ発生日数は長くなつた。水セメント比が小さくなるほど乾燥収縮に起因した引張応力は小さくなるが、自

己収縮に起因した引張応力が大きくなるため、水セメント比とひび割れ発生日数に明確な傾向は認められなかった。

(6)応力強度比

拘束鉄筋比が高いほどひび割れ発生時の応力強度比は小さくなつた。また、セメントの種類では、N および BB の応力強度比は 0.4~0.7 となつたが、L は 0.6~1.1 と大きくなつた。水セメント比や骨材岩種の違いが応力強度比に及ぼす影響は明確にならなかつた。

(7)コンクリートの乾燥収縮率とひび割れ発生日数の関係

前養生期間、拘束鉄筋比、水セメント比、骨材岩種の違いに係わらず、本実験の範囲では乾燥期間 26 過の乾燥収縮率と一軸拘束試験におけるひび割れ発生日数には明確な傾向は認められなかつた。しかし、コンクリートの乾燥収縮率、割裂引張強度および静弾性係数を含めた弾性計算で求めた推定ひび割れ発生日数は、ひび割れ発生日数の実測値と概ね対応することが明らかとなつた。

以上より、コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性は、コンクリートの乾燥収縮率だけでなく、コンクリートの力学的特性も含めて総合的に評価するのが適切であると考えられる。

参考文献

- 1) 半坂昌広、寺西浩司、森下圭輔：コンクリートの乾燥収縮に対する外的要因の影響（その3．乾燥開始材齢の影響）、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、pp.439-440、2006
- 2) 社団法人 セメント協会：コンクリート専門委員会報告 F-55（追補） 各種セメントを用いたコンクリートの耐久性に関する研究（コンクリートの乾燥収縮に関する実験結果）、pp.26-37、2011
- 3) 全国生コンクリート工業組合連合技術委員会：平成 20 年度乾燥収縮に関する実態調査結果報告書、新技術開発報告、No.33、2009
- 4) 濱幸雄、渡邊詩穂子、松下文明、柴田純夫：各種骨材を用いたモルタル・コンクリートの乾燥収縮特性、「コンクリートの収縮特性評価およびひび割れへの影響」に関するシンポジウム、pp.25-28、2010

資 料 編

圧縮強度 気乾養生

(N/mm²)

配合記号	セメントの種類	W/C (%)	粗骨材	細骨材	前養生期間 (日)	材齢(日)							
						3	7	14	28	56	91		
N55	N	55	硬質砂岩碎石	山砂	2	18.5	25.4	27.3	29.2	—	—		
N55						19.1	24.4	31.3	33.8	—	—		
N45					7	26.9	33.6	41.7	44.2	45.6	43.4		
N35		35	石灰石碎石	碎砂	39.9	48.7	57.6	62.0	60.3	62.7	—		
N55Li					21.3	28.8	34.5	36.0	36.7	—	—		
N55s					26.0	34.8	41.6	45.4	46.3	—	—		
L55	L	55	硬質砂岩碎石	山砂	2	4.9	6.9	10.6	13.2	—	—		
L55					7	4.3	6.5	13.9	18.3	—	—		
L45		45			7.8	12.4	25.5	29.0	29.2	29.6	—		
L35					16.8	25.8	40.3	43.6	45.1	42.8	—		
BB55	BB	55	硬質砂岩碎石	山砂	2	11.3	16.7	19.5	21.9	—	—		
BB55					7	10.5	17.1	25.2	28.2	—	—		
BB45		45			—	24.1	32.1	35.5	38.6	38.0	—		
BB35					—	34.3	43.2	45.8	50.1	50.6	—		

標準水中養生

配合記号	セメントの種類	W/C (%)	粗骨材	細骨材	前養生期間 (日)	材齢(日)					
						3	7	14	28	56	91
N55	N	55	硬質砂岩碎石	山砂	—	—	24.8	—	34.9	—	—
N45					—	—	35.2	—	43.9	—	—
N35					—	—	53.2	—	65.1	—	—
N55Li		55	石灰石碎石	碎砂	—	—	28.7	—	36.4	—	—
N55s					—	—	36.0	—	48.5	—	—
L55					—	—	5.6	—	16.9	—	—
L45	L	45	硬質砂岩碎石	山砂	—	—	11.2	—	34.7	—	—
L35					—	—	23.2	—	56.7	—	—
BB55	BB	55	硬質砂岩碎石	山砂	—	—	15.5	—	29.0	—	—
BB45					—	—	24.4	—	43.7	—	—
BB35		35			—	—	34.3	—	53.5	—	—

**静弾性係数
気乾養生**

(kN/mm²)

配合記号	セメントの種類	W/C (%)	粗骨材	細骨材	前養生期間 (日)	材齢(日)							
						3	7	14	28	56	91		
N55	N	55	硬質砂岩碎石	山砂	2	21.9	24.2	25.0	24.2	—	—		
N55						25.4	28.0	26.3	26.6	—	—		
N45						26.6	28.1	28.6	27.8	27.9	27.4		
N35		35	石灰石碎石 硬質砂岩碎石	碎砂	7	29.4	30.8	30.9	32.1	31.0	30.9		
N55Li						28.9	30.9	30.5	29.9	27.6	—		
N55s						25.2	28.0	28.4	26.8	27.6	—		
L55	L	55	硬質砂岩碎石	山砂	2	12.6	15.4	17.8	18.0	—	—		
L55						16.3	19.4	20.5	22.5	—	—		
L45		45			7	19.4	21.7	25.5	24.6	23.6	23.1		
L35						22.9	27.6	27.7	26.8	26.9	26.4		
BB55	BB	55	硬質砂岩碎石	山砂	2	17.3	19.6	21.4	22.1	—	—		
BB55						18.9	21.8	23.4	24.5	—	—		
BB45		45			7	—	25.6	26.1	27.4	27.0	27.8		
BB35						—	27.0	27.4	29.0	28.5	29.3		

標準水中養生

配合記号	セメントの種類	W/C (%)	粗骨材	細骨材	前養生期間 (日)	材齢(日)					
						3	7	14	28	56	91
N55	N	55	硬質砂岩碎石	山砂	—	—	25.1	—	27.5	—	—
N45						—	—	28.9	—	30.8	—
N35						—	—	31.6	—	33.8	—
N55Li		55	石灰石碎石 硬質砂岩碎石	碎砂		—	—	29.2	—	33.7	—
N55s						—	—	28.0	—	33.9	—
L55	L	55	硬質砂岩碎石	山砂		—	—	15.5	—	24.8	—
L45						—	—	22.8	—	28.3	—
L35						—	—	25.9	—	33.0	—
BB55	BB	55	硬質砂岩碎石	山砂		—	—	19.5	—	26.0	—
BB45						—	—	24.5	—	32.7	—
BB35						—	—	26.7	—	35.3	—

割裂引張強度 気乾養生

(N/mm²)

配合記号	セメントの種類	W/C (%)	粗骨材	細骨材	前養生期間(日)	材齢(日)							
						3	7	14	28	56	91		
N55	N	55	硬質砂岩碎石	山砂	2	1.42	1.95	1.73	2.25	—	—		
N55						1.71	2.17	2.44	2.41	—	—		
N45						1.81	2.03	2.73	2.57	2.65	2.63		
N35		35	石灰石碎石 硬質砂岩碎石	碎砂	7	2.19	2.79	2.99	3.15	3.2	3.5		
N55Li						1.74	1.97	2.43	2.41	2.15	—		
N55s						2.32	2.36	2.92	3.18	3.02	—		
L55	L	55	硬質砂岩碎石	山砂	2	0.53	0.76	0.99	1.01	—	—		
L55						0.6	0.9	1.28	1.58	—	—		
L45		45			7	0.79	0.99	1.78	1.9	1.8	1.51		
L35						1.44	1.94	2.47	2.63	2.25	2.42		
BB55	BB	55	硬質砂岩碎石	山砂	2	0.87	1.46	1.57	1.56	—	—		
BB55						1.16	1.57	2.04	2.22	—	—		
BB45		45			7	—	1.74	1.97	2.48	2.62	2.39		
BB35						—	2.69	2.72	3.21	3.09	2.84		

標準水中養生

配合記号	セメントの種類	W/C (%)	粗骨材	細骨材	前養生期間(日)	材齢(日)					
						3	7	14	28	56	91
N55	N	55	硬質砂岩碎石	山砂	—	—	1.96	—	2.20	—	—
N45						—	—	—	—	—	—
N35						—	—	—	—	—	—
N55Li		55	石灰石碎石	山砂	—	—	2.10	—	2.56	—	—
N55s			硬質砂岩碎石			—	—	2.61	—	3.76	—
L55	L	55	硬質砂岩碎石	山砂	—	—	0.53	—	1.64	—	—
L45						—	—	0.91	—	2.37	—
L35						—	—	1.65	—	3.4	—
BB55	BB	55	硬質砂岩碎石	山砂	—	—	1.42	—	2.16	—	—
BB45						—	—	1.86	—	2.52	—
BB35						—	—	2.35	—	3.1	—

関係報告

報告書番号	発行年月	専門委員会報告名
F-1	昭和 28 年 5 月	最近のポルトランドセメントを用いたコンクリートのセメント水比と圧縮強度の関係に関する報告(1)
F-2	昭和 29 年 5 月	最近のポルトランドセメントを用いたコンクリートのセメント水重量比と圧縮強さの関係に関する報告(II)
F-3	昭和 30 年 5 月	最近のポルトランドセメントを用いたコンクリートのセメント水重量比と圧縮強度の関係に関する報告(III)
F-4	昭和 31 年 5 月	最近のポルトランドセメントを用いたコンクリートのセメント水重量比と曲げおよび圧縮強さとの関係に関する報告
F-5	昭和 32 年 5 月	最近のポルトランドセメントを用いたコンクリートのセメント水重量比と圧縮強度および引張強さ係数との関係に関する報告
F-6	昭和 33 年 5 月	最近のポルトランドセメントを用いた舗装用コンクリートを対象とする AE コンクリートのセメント水重量比と曲げおよび圧縮強度との関係に関する報告
F-7	昭和 34 年 5 月	各種セメントを用いた舗装用 AE コンクリートのセメント水重量比と強度との関係に関する報告(その 2 早強および中庸熟ポルトランドセメント)
F-8	昭和 35 年 4 月	各種セメントを用いた舗装用 AE コンクリートのセメント水重量比と強度との関係に関する報告(その 3 高炉セメント)
F-9	昭和 36 年 4 月	各種セメントを用いた舗装用 AE コンクリートのセメント水重量比と強度との関係に関する報告(その 4 シリカセメントおよびフライアッシュセメント)
F-10	昭和 36 年 4 月	コンクリート強度におよぼす細骨材の影響に関する共同試験報告
F-11	昭和 36 年 4 月	コンクリート圧縮強度におよぼす試験方法の影響に関する共同試験報告
F-12	昭和 37 年 5 月	コンクリート圧縮強度におよぼす試験方法の影響に関する共同試験報告(その 2)
F-13	昭和 38 年 3 月	コンクリート圧縮強度におよぼす試験方法の影響に関する共同試験報告(その 3)
F-14	昭和 39 年 6 月	各種のセメントを用いたコンクリートの圧縮強度に関する共同試験報告(その 1)
F-15	昭和 40 年 8 月	各種のセメントを用いたコンクリートの圧縮強度に関する共同試験報告(その 2)
F-16	昭和 41 年 9 月	スランプの相違をも含めたコンクリートのセメント水比と圧縮強度との関係に関する報告
F-17	昭和 42 年 4 月	各種のセメントを用いたコンクリートの長期強度に関する共同試験報告
F-18	昭和 42 年 9 月	硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告
F-19	昭和 43 年 5 月	富配合かた練りコンクリートのセメント水比と圧縮強度および引張強度との関係に関する報告
F-20	昭和 43 年 10 月	碎石を用いた舗装用コンクリートの圧縮強度および曲げ強度に関する報告
F-21	昭和 44 年 9 月	碎石を用いた軟練りコンクリートの配合および強度に関する報告
F-22	昭和 45 年 9 月	舗装用コンクリートの曲げ強度および引張強度に関する共同試験報告
F-23	昭和 46 年 3 月	硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告(その 2)
F-24	昭和 47 年 9 月	コンクリートの強度試験方法に関する共同試験報告(その 1) I 圧縮強度試験におけるキャッピング材料およびキャッピング方法 II 引張強度試験における支承材の有無および支承材の材質 III 曲げ強度試験における供試体の寸法および載荷方法
F-25	昭和 48 年 10 月	レデーミクストコンクリート工場の回収水を用いたコンクリートに関する共同試験報告

報告書番号	発行年月	専門委員会報告名
F-26	昭和 50 年 9 月	レデーミクストコンクリート工場の回収水を用いたコンクリートに関する共同試験報告(II) 1.回収水使用コンクリートの性質に及ぼす温度の影響 2.減水剤を用いたコンクリートに及ぼす回収水の影響 3.スラッジの経過日数がコンクリートの性質に及ぼす影響 4.回収水とスラッジの品質調査
F-27	昭和 50 年 9 月	レデーミクストコンクリート工場の回収水を用いたコンクリートに関する共同試験報告(III) 回収水使用コンクリートの性質に及ぼすスラッジ組成の影響 (付)F-25 における中性化試験の中間報告
F-28	昭和 51 年 12 月	細骨材の品質調査報告
F-29	昭和 52 年 10 月	粗骨材の品質調査報告
F-30	昭和 52 年 9 月	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する促進試験報告
F-25 追加報告	昭和 53 年 4 月	レデーミクストコンクリート工場の回収水を用いたコンクリートに関する共同試験 コンクリートの中性化試験結果
F-31	昭和 54 年 6 月	粗骨材の品質がコンクリートの諸性質におよぼす影響
F-32	昭和 56 年 3 月	細骨材の品質がコンクリートの諸性質におよぼす影響
F-33	昭和 56 年 3 月	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究 -材齢 5 年中間報告(その 1)-
F-34	昭和 57 年 5 月	最近のセメントによるコンクリートの初期強度に関する共同試験報告(その 1) -普通ポルトランドセメントおよび早強ポルトランドセメントを用いた場合-
F-35	昭和 57 年 7 月	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究 -材齢 5 年中間報告(その 2)-
F-36	昭和 58 年 2 月	最近のセメントによるコンクリートの初期強度に関する共同試験報告(その 2) -高炉セメント B 種およびフライアッシュセメント B 種を用いた場合-
F-37	昭和 59 年 3 月	コア供試体の圧縮強度におよぼす各種試験要因の影響
F-38	昭和 60 年 7 月	初期の乾燥がコンクリートの諸性質におよぼす影響
F-39	昭和 61 年 6 月	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究 -材齢 10 年中間報告(その 1)-
F-40	昭和 62 年 8 月	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究 -材齢 10 年中間報告(その 2)-
F-41	昭和 63 年 4 月	コンクリートによる高炉スラグ微粉末の混合率に関する研究
F-42	昭和 63 年 1 月	コンクリートによるアルカリ反応性骨材の膨張特性に関する研究(その 1) -40℃湿空条件における試験結果-
F-43	1989 年 8 月	コンクリートによるアルカリ反応性骨材の膨張特性に関する研究(その 2) -屋外暴露および 20℃海水反復浸漬条件における試験結果-
F-44	1989 年 9 月	コンクリートによるアルカリ・シリカ反応の防止に関する研究
F-45	1991 年 6 月	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究 -材齢 15 年中間報告-
F-46	1992 年 10 月	石灰石骨材コンクリートに関する研究
F-47	1994 年 3 月	石灰石骨材のアルカリ炭酸塩岩反応に関する調査・研究

報告書番号	発行年月	専門委員会報告名
F-48	1998年4月	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究 材齢20年最終報告
F-49	1999年3月	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究 —セメントの種類、養生条件および海洋暴露条件の影響(材齢10年試験)ー
F-50	1999年3月	コンクリートの断熱温度上昇試験方法に関する研究
F-51	2002年3月	各種セメントを用いたコンクリートの初期強度発現および断熱温度上昇
F-52	2006年3月	各種低発熱セメントを用いたコンクリートの海洋環境下での鉄筋の腐食に関する研究 材齢5年報告
F-53	2006年3月	蒸気養生条件がコンクリートの強度発現に及ぼす影響
F-54	2008年3月	寒冷地に暴露したAEコンクリートの耐凍害性 - 材齢20年報告-
F-55	2008年3月	各種セメントを用いたコンクリートの耐久性に関する研究
F-56	2010年3月	各種低発熱セメントを用いたコンクリートの海洋環境下での鉄筋の腐食に関する研究 材齢10年最終報告
F-55(追補)	2011年3月	各種セメントを用いたコンクリートの耐久性に関する研究 (コンクリートの乾燥収縮に関する実験結果)
F-57	2012年6月	各種セメントを用いた暑中コンクリートの諸性質に関する研究

ISBN978-4-88175-120-6 C3358

コンクリート専門委員会報告 F-58

定 価 : 本体 1,000 + 税

平成 25 年 3 月 15 日 印刷 社団法人 セメント協会
平成 25 年 3 月 19 日 発行 東京都中央区日本橋本町 1 丁目 9 番 4 号
Daiwa 日本橋本町ビル 7 階
電話 03(5200)5051(代)
発行所 社団法人 セメント協会 研究所
東京都北区豊島 4 丁目 17 番 33 号
電話 03(3914)2691(代)
印刷所 有限会社 イー・エム・ピー
東京都千代田区三崎町二丁目 14 番地 6 号 T.M 水道橋ビル 2F
電話 03(3265)6050

JCA