

[40] 風作用を受けるコンクリートの収縮特性に関する基礎研究

正会員 ○庄 谷 征 美 (秋田工業高等専門学校)

正会員 徳 田 弘 (秋田大学)

1 まえがき

筆者らは、モルタル小形供試体を用いて、風作用がその乾燥収縮および重量変化特性に及ぼす影響を調べ、既に一部報告した。^{1,2)}乾燥収縮ひずみは、乾燥初期に風作用により促進され速やかに増加する様相を示し、その程度は全般的にペースト量が多いほど、水セメント比が低下するほど、および試験材令が若いほど大きくなり、風速の増加するに伴ないほど比例的に収縮ひずみは増加すること、などが認められたのである。したがって乾燥を促進、助長する因子としての風の作用には看過できないものがあると思われる。特に厳しい風作用を受けると考えられる海洋構造物などのひびわれ発生、劣化などによる機能低下の問題と関連して、コンクリートの収縮、重量変化、および中性化などの程度に及ぼす風速の影響を把握しておくことは意義あることと思われる。

本報告は、以上の考えに基づき、ひき続き実施したモルタル、コンクリートについての実験結果を述べるもので、収縮、重量変化特性に及ぼす風作用の影響を、風速レベル、配合特性、湿潤養生期間、内部鉄筋の有無などを関連において把握すること、収縮応力に及ぼす風の影響を考察し、併せて中性化程度など劣化に関連する性状変化にも検討を加えること、などを目的としている。

2 実験概要

(1) 材料および配合 セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は陸砂と河口砂の混合洗い砂（比重2.57、吸水率2.20%、粗粒率2.65）を使用し、粗骨材は、最大寸法25mmの陸砂利A（比重2.58、吸水率1.98%）最大寸法25mmおよび15mmの川砂利B（比重2.58、吸水率2.56%）および最大寸法15mmの川砂利C（比重2.54、吸水率2.80%）を使用した。なお、非造粒タイプのS社人工軽量細粗骨材も1日吸水させた状態で一部の実験に使用した。

表-1 用いた配合

用いた配合を表-1に示す。水セメント比を40～70%に変化させ、モルタル4種（M-40～MW-60）、普通コンクリート9種（A-25～40～C-15～60）および第2種軽量コンクリート2種（L-15～40～L-15～60）の総計15種の配合となった。

(2) 供試体および試験条件 供試体は10×10×20cmの角柱状のものを主に使用し、同一試験条件で各2本～4本を供試体数とした。練りまぜには、可傾式および強制練りミキサを用いてこれを行った。

実験計画の概要を表-2に示した。収縮および重量変化の測定を中心に行ったが、一部中性化深さ等の測定も実施した。なお、乾燥条件は、一面および全面乾燥の2条件とした。

風速は20℃、50% R.H.恒温恒湿室内に設置した風洞部を有する試作送風機により発生させた。風速レベルは、0、6、8および9m/sec程度の場合を検討した。装置の略図を図-1に示す。

長さ変化は、供試体表面ひずみとして求め、検長100mmとしてコンタクトゲージで測定した。標点用プラグとしては、真鍛製平チップを使用した。重量は10kg秤量、5g感量の台秤により測定した。中性化深さは、収縮試験終了後の供試体を端部より5cmの位置でコ

Type and Sym. of Mixes	Max. Size of Aggr. (mm)	W/C (%)	Slump or (Flow) (mm)	S/a (%)	Unit Content (kg/m ³)	W	C	S	G
Mortar	M 40	—	40 (190)	—	280	700	193	—	—
	M 60	—	60 (190)	—	280	700	1390	—	—
	MW 40	—	40 (210)	—	293	745	130	—	—
	MW 60	—	60 (215)	—	305	509	1201	—	—
Normal -Weight -Concrete	A-25 40	25	40	8.5	405	184	260	681	1006
	B-25 40	25	40	8.0	465	193	276	843	973
	B-25 60	25	60	7.5	37.5	172	430	652	1092
	B-25 70	25	60	8.5	39.9	178	297	700	1076
Concre- te	B-15 40	15	40	8.0	282	193	473	74	895
	B-15 55	15	55	8.0	282	193	351	836	883
	B-15 70	15	50	8.0	51.5	197	281	912	882
	C-15 40	15	40	7.0	25.9	188	469	724	904
LightW- Conc.	C-15 60	15	60	8.5	28.0	194	323	838	891
	L-15 40	15	40	8.0	42.6	184	460	472	521
	L-15 60	15	60	7.0	46.6	190	317	549	514

表-2 試験計画の概要

Kind of Mixes	Periods of Wet Curing	Test Items and Conditions	Size of Speci- mens(cm)	Duration exposed to Wind	Wind Speed (m/s)
M	1,7 days	Shrinkage and Weight Loss. (Reinforcement)	10x10x20 10x10x40	0,50, 80 days	6.0
MW	8 hrs 17,28d	Shrinkage, Weight Loss. Depth of Neutralized Area,	10x10x20 10x10x40	0,5,50 0,80	9.0 9.0
A-25	7,15h 13,7,28d	Shrinkage, Weight Loss. Depth of Neutralized Area,	10x10x20	0,80	9.0
B-25	8h 17,28d	Dynam- ic Modulus of Elasticity.	10x10x20 10x10x40	0,5,50, 0,25, 50	9.0 (9.0)
B-15	1,7d	Shrinkage, Weight	10x10x20	0,100	9.0
C-15	7 d				
L-15	7 d				

ンクリートカッターにより切断し、切断面にフェノールフタレイン1%溶液を吹き付けて、赤色に着色した面を未中性化面として、プランメーターを用いてその面積を求め、それより平均中性化深さを求めた。動弾性係数は縦振動法により乾燥の段階で隨時測定を行った。

(3) データの整理 収縮および重量変化測定データは、全て双曲線形実験式で整理し、最終収縮量 S_{∞} 、 $S_{\infty}/2$ に達する日数 N_s 、最終逸散水量 W_{∞} などを算定した。上式の適用にあたり最小二乗法を適用した。

3 結果および考察

(1) 乾燥収縮性状に及ぼす風速の影響 収縮量に及ぼす風速の影響を調べるために、A-15およびMシリーズを除いた全データを双曲線式で整理した結果を表-3に示した。表中の S_{∞} 、 W_{∞} などの傾向を調べると、全般的には風作用を受けることにより逸散水量は増加し、最終収縮値も増加する場合が多いこと、収縮のたちあがりの遅速の尺度とみなせる N_s 値が無風に比べ減少している場合が多く、収縮の進行が促進される傾向が強いこと、などが理解される。そこで、これらの傾向を詳しく検討するため、図-2には、B-15コンクリートについて、前者は水セメント比、後者は湿潤養生期間をバラメーターとして、無風時の収縮量を1とした場合の風速9m/sec下の収縮比率を乾燥日数毎に示したものである。図-2より水セメント比が低下するほど、乾燥初期での風作用による収縮促進傾向が顕著になり、W/C 40%では、無風時に比べ4割程度も収縮量が増大する場合が認められる。乾燥が進めば、この増加率は漸減してゆくが、W/C 70%では最終的に無風時を下回るような結果を示す。表-4より、A-25、B-25シリーズとも W/C 40%では、材令が若いほど乾燥初期での収縮増加の傾向が強いが、これに対し、W/C 60%の場合 B-25コンクリートは材令の若いほど、MWモルタルではいく分養生期間を経た場合に風による収縮低下の程度が大きいことがわかる。図-3は、B-25コンク

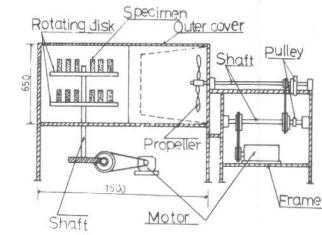


図-1 送風装置の略図

表-3 双曲線式による実験結果の整理

Kind of Mixes	Periods of Wet Curing	Wind Velocity (m/s)	S_{∞} Final Shrinkage ($\times 10^{-4}$)	N_s Time to reach $S_{\infty}/2$	W_{∞} Final Moisture Loss (g)	W_{∞} Final Moisture Loss (%)	Periods of Measurements (days)
A-25-40	7 hrs	0-80	7.6	15.7	208.3	4.34	160
	15	0-80	11.5	20.6	190.6	3.30	160
	1 day	0-80	12.1	24.8	158.5	3.28	160
	3	0-80	11.0	30.3	155.3	3.26	160
	7	0-80	11.7	37.9	142.4	3.02	160
	28	0-80	11.0	38.7	139.5	2.90	160
	0-80	12.5	41.2	134.2	3.07	160	
	2	0-80	8.7	47.5	137.8	2.78	160
A-25-70	7 days	0-80	13.1	38.4	240.7	5.19	100
	2	0-80	12.8	33.5	234.8	5.34	100
	8 hrs	0-5	8.2	21.1	217.5	4.68	160
	9-50	8.5	21.8	235.8	4.86	160	
	1 day	0-5	7.7	15.6	232.8	4.70	160
	28	0-5	9.5	24.8	189.5	4.04	155
	0-50	9.0	26.8	195.8	4.19	155	
	7	0-5	6.9	47.0	148.9	3.06	70
B-25-40	28	0-5	6.2	23.6	149.6	3.09	155
	1 day	0-50	6.3	27.4	136.8	2.86	155
	7	0-5	6.8	27.8	146.6	2.99	155
	28	0-50	5.9	27.4	138.6	2.91	155
	1 day	0-25	7.1	28.0	190.0	3.91	155
	7	0-25	7.8	23.8	198.3	4.09	155
	2	0-25	7.3	25.3	186.5	3.47	155
	8 hrs	0-5	10.0	23.3	281.0	6.11	155
B-25-80	9-50	6.5	21.8	281.0	6.07	155	
	1 day	0-5	7.8	21.9	291.8	6.30	80
	28	0-5	6.3	341.6	232.4	5.96	155
	0-50	6.8	27.8	134.5	2.91	155	
	1 day	0-25	5.6	31.7	235.6	5.47	155
	7	0-25	6.5	23.4	200.3	4.20	100
	28	0-5	7.1	24.0	191.7	4.12	100
	1 day	0-50	7.1	24.8	191.2	4.05	100
B-15-40	1 day	0-5	7.9	51.9	134.2	2.77	70
	28	0-5	7.3	42.4	131.2	2.78	70
	1 day	0-50	5.6	19.5	243.6	5.14	155
	7	0-25	5.6	24.4	242.1	5.13	155
	2	0-25	8.2	29.5	213.0	4.50	155
	8 hrs	0-5	7.4	22.4	216.2	4.55	155
	9-50	7.4	23.8	163.9	3.53	155	
	1 day	0-5	7.7	25.4	123.8	3.24	80
B-15-80	28	0-5	8.0	29.0	170.4	3.66	155
	1 day	0-50	8.0	25.4	177.8	3.72	80
	7	0-5	8.6	23.4	200.3	4.20	100
	2	0-5	7.1	24.0	191.7	4.12	100
	8 hrs	0-5	7.1	24.8	191.2	4.05	100
	9-50	7.1	24.8	191.2	4.05	100	
	1 day	0-5	7.7	51.9	134.2	2.77	70
	28	0-5	7.3	42.4	131.2	2.78	70
B-15-40	1 day	0-5	5.6	19.5	243.6	5.14	155
	7	0-25	5.6	24.4	242.1	5.13	155
	2	0-25	8.2	29.5	213.0	4.50	155
	8 hrs	0-5	7.4	22.4	216.2	4.55	155
	9-50	7.4	23.8	163.9	3.53	155	
	1 day	0-5	7.7	25.4	123.8	3.24	80
	28	0-5	8.0	29.0	170.4	3.66	155
	1 day	0-50	8.0	25.4	177.8	3.72	80
B-15-55	7	0-5	8.6	46.7	147.4	2.93	155
	2	0-5	8.6	47.0	147.0	2.92	155
	8 hrs	0-5	7.4	18.0	347.4	3.05	155
	9-50	8.7	33.8	145.5	3.05	155	
	1 day	0-5	6.6	32.7	230.7	4.88	155
	28	0-5	6.6	32.0	232.0	5.05	155
	1 day	0-50	6.6	32.0	232.0	5.05	155
	7	0-5	7.4	34.8	215.9	4.62	155
B-15-55	2	0-5	7.4	28.5	233.2	4.70	155
	8 hrs	0-5	7.4	28.5	233.2	4.70	155
	9-50	7.7	28.9	220.0	4.61	155	
	1 day	0-5	5.9	26.2	283.3	5.01	155
	28	0-5	5.4	26.6	300.2	6.38	155
	1 day	0-50	5.2	21.5	294.6	6.13	155
	7	0-5	6.6	32.7	230.7	4.88	155
	2	0-5	6.6	32.0	232.0	5.05	155
B-15-70	1 day	0-5	6.6	32.7	230.7	4.88	155
	28	0-5	7.1	31.1	262.5	5.62	155
	1 day	0-50	7.1	26.9	238.6	5.64	155
	7	0-5	7.2	31.5	266.6	5.68	155
	2	0-5	7.3	31.5	266.6	5.68	155
	8 hrs	0-5	7.1	31.1	262.5	5.62	155
	9-50	7.1	31.1	262.5	5.62	155	
	1 day	0-5	7.7	31.1	262.5	5.62	155
MW-40	7	0-5	16.3	37.4	204.6	5.87	160
	28	0-5	12.8	32.2	165.0	5.96	160
	1 day	0-5	16.3	37.4	204.6	5.87	155
	2	0-5	16.3	37.4	204.6	5.87	155
	8 hrs	0-5	15.5	30.5	313.0	6.55	155
	9-50	13.4	17.1	386.2	6.79	155	
	1 day	0-5	12.8	35.4	165.7	3.70	155
	7	0-5	12.7	32.2	165.0	3.64	155
MW-60	28	0-5	12.8	32.2	165.0	3.64	155
	1 day	0-5	16.3	37.4	204.6	5.87	155
	2	0-5	16.3	37.4	204.6	5.87	155
	8 hrs	0-5	13.9	20.5	310.0	6.55	155
	9-50	13.4	17.1	386.2	6.79	155	
	1 day	0-5	16.0	26.9	272.1	6.23	100
	7	0-5	16.2	26.7	272.1	6.17	100
	2	0-5	16.2	28.0	268.6	6.13	100
MW-40	7 days	0-5	17.6	11.6	150.7	3.29	70
	2	0-5	17.6	11.6	150.7	3.29	70
	8 hrs	0-5	10.7	14.1	153.1	3.35	70
	9-50	10.7	14.1	153.1	3.35	70	

図-2 風作用下の収縮割合と水セメント比の関係

リートの収縮と風速の関係を示したもので、これより、水セメント比が40%の場合は乾燥初期では収縮ひずみがほぼ風速に比例して増加するに対し60%と大きい場合は、逆比例的に減少する傾向が認められよう。図-4には、B-15コンクリートについて受風期間と最終収縮量 S_{∞} との関係を示した。 W/C 40%の場合は受風日数の増加とともに最終収縮量が増大する傾向が明確に認められるに対し、 W/C が70%と増大すると受風日数に逆比例的に収縮量は低下することがわかる。

以上より、収縮量は一般に水セメント比が小さく、風速の大なるほど、材令の若い場合ほど、増加傾向が顕著に現われることが認められ、この他材令によってはペースト量の増加あるいは最大寸法の減少により収縮が増加する様相を示す場合もあることが把握された。水セメント比が60%以上、70%程度と増加すると風作用は全く逆の影響を及ぼすことが示された。これららの原因を考えると、 W/C 小なる場合の増加傾向は逸散水量の増加にきせられ、 W/C 大なる場合の減少傾向は、表面部の急激な乾燥による微細ひびわれ発生などが原因と推察されるが、炭酸化の程度によっても影響されていることが考えられる。

図-5は軽量コンクリートの収縮～時間曲線を示したもので、水セメント比の小なる場合ほど風作用の影響が大きいようである。養生期間や骨材吸水率などの影響については今後検討したい。

(2) 重量変化特性および逸散水量と収縮量の関係 養生期間の異なる場合の水分逸散特性をA-25コンクリートについて検討した。図-6には逸散水量 W と時間の関係を示したが、若材令の場合ほど風作用により逸散水量は増加し、乾燥初期の逸散割合が大きいことがわかる。この傾向はB-25コンクリートでも同様で、その程度は水セメント比が大なる場合ほど顕著であった。次に逸散水量と収縮量の関係を図-7に示した。材令7時間および1日の場合、風作用下の収縮量～逸散水量の関係は無風下のそれより分離し、同一逸散水量でも収縮量が小さく現われるような、炉乾燥状態と似た様相を示すことが認められる。図-8は水分逸散速度を検討したもので、若材令では、木材等にみられる恒率乾燥時の水分逸散速度が、9m/secの風速下で無風時のそれの約3倍程度と見積られ、Hobbsらのいう、いわゆる拡散による水分逸散が卓越する時期に相当すると考えられる減率乾燥第2段が速く現われる様相にある。また、28日養生の場合には、乾燥後直ちに上記段階に移行していると推察されること、などの事由から、

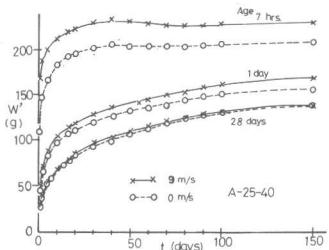


図-6 風作用下の逸散水量と時間の関係

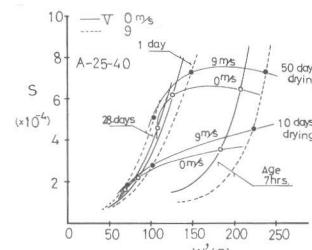


図-7 収縮と逸散水量の関係

表-4 風作用下の収縮割合と養生期間の関係

Curing periods	7 or 8 hrs	1 day	7 days	28 days	Drying Time
A-25-40	1.420	1.301	1.101	1.126	10days
	1.183	1.115	1.064	1.109	50
B-25-40	1.509	1.589	1.303	1.159	10
	1.259	1.465	1.164	1.076	50
B-25-60	0.816	0.983	0.873	1.020	10
	0.788	0.955	0.845	0.926	50
MW-40	1.133	0.976	1.199	0.965	10
	1.030	0.969	1.372	0.954	50
MW-60	1.103	1.095	1.019	0.991	10
	1.008	1.077	0.996	0.979	50

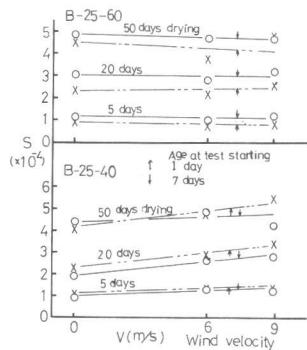


図-3 風速の収縮に及ぼす影響

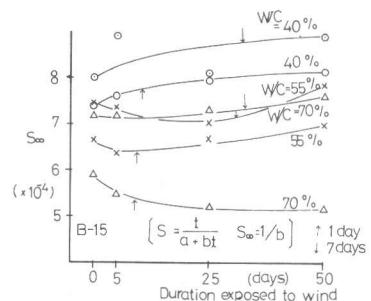


図-4 風作用期間が最終収縮量に及ぼす影響

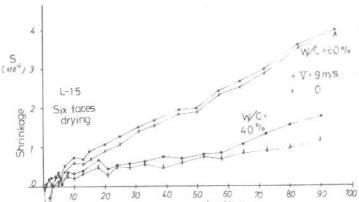


図-5 軽量コンクリートの収縮～時間の関係

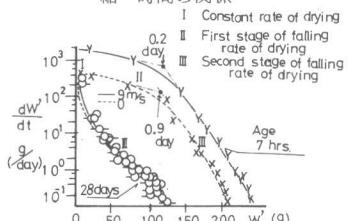


図-8 風作用における水分逸散速度と逸散水量の関係

乾燥初期に収縮が促進される主因として、風作用下において水分の逸散系態が先の拡散期に速やかに移行してゆくためと推察される。

(3) 内部鉄筋を有するコンクリートの収縮性状 図-9に、M-40の $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ 供試体について、 $\phi 6\text{ mm}$ の丸鋼を2本配置した場合および4本配置した場合の2ケースにつき風速 6 m/s 下と無風下における収縮性状を調べた結果を示した。内部鉄筋を有する場合もプレーンと同様、風作用により収縮は増加する。鉄筋を有しない場合の収縮量を基本として拘束率 μ を $(S_{\text{プレーン}} - S_{\text{鉄筋}}) / S_{\text{プレーン}}$ より求めてみた。図中に示されるように乾燥60日程度までは風作用下の方がいく分無風下よりも μ が大きくなつた。異形筋を断面中央に一本埋め込んだ場合も検討したが、水セメント比による多少の相違はあるものの拘束程度は無風下とほぼ同様の結果となつた。今後は外部拘束の場合について検討したい。

(4) 動弾性係数の変化性状 試験供試体の一部について、乾燥に伴なう動弾性係数の変化を調べた。図-10は、試験開始時の動弾性係数を100(%)として、風速 9 m/sec 下と無風下での値の経時変化をMW-60およびB-25-60の場合について示した。全般的に養生材令の若い場合ほど、風作用下の比率は無風化のそれより低下する傾向が強く、W/C 60%では40%の場合よりその程度は大きくなつた。このことは、急激な乾燥が内部組織に悪影響を及ぼすことを示すものと考えられる。

(5) 風作用が中性化に及ぼす影響 収縮試験終了後の原断面積 A_0 の供試体について求めた未中性化面積 A から、平均中性化深さ d_{av} を $(\sqrt{A_0} - \sqrt{A}) / 2$ より算定した⁴⁾。表-5はこの結果を示した。これによると風作用は全般的に中性化を促進させ、風作用期間が長い場合ほど、養生期間が短かく、水セメント比が大なるほど、その進行程度が大きいことが認められた。

(6) 風作用下における収縮応力発現性状 C-15コンクリート一面乾燥供試体についての平均ひずみの測定から、Pickettの拡散方程式中の拡散係数 K 、表面係数 f の算定を岡田法と筆者らの試算法により行い、これを用いて収縮応力の弾性解析を行つた。この結果を図-11に示す。風作用により、収縮応力のピーク発現がいく分速まる傾向にあることが認められる。モルタル供試体についての検討でも同様の結果を示しておる、ひびわれ発生の問題と関連して、考慮すべき傾向と思われる。

4 むすび

風作用を受けるコンクリートの収縮性状、重量変化特性、中性化、および、収縮応力特性などについて概略的に述べたが、風作用が厳しい場合には、上記諸性状の変化に十分留意する必要があろう。今後は、温湿度条件を変化させ、さらに残された諸点の解明のために実験を続ける予定である。

参考文献

- 1) M. Shoya, H. Tokuda; Proc. of 20th J.C.M.R., 1977.
- 2) 庄谷征美；材料28巻305号，1979。
- 3) Hobbs D.W., A.R. Mears; Magazine of Concrete Research, vol. 23, 1971.
- 4) 林、西村、前田；第34回土木学会年講，1979。
- 5) 岡田、川村；土木学会論文報告集142号，1967。
- 6) 庄谷征美；第一回コンクリート工学年次講演会論文集，1979。

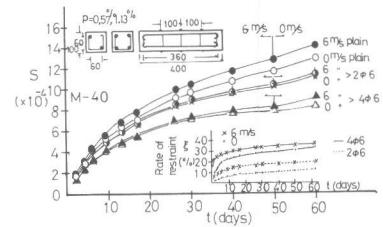


図-9 内部鉄筋を有するコンクリートの収縮性状

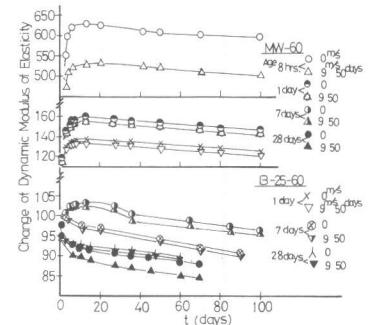


図-10 風作用下における動弾性係数の変化性状

表-5 風作用が中性化に及ぼす影響

Kind	Wind Velocity (m/s)	Periods of Wet Curing	Age of Measurement (days)	Test Results		
				Non-Neutralized Area (cm ²)	Estimated Max. Depth of Neutralized Area (mm)	Depth of Neutralized Area (mm)
MW	0	8 hrs	2 2 0	89.5	2.69	5.0
	9~5			85.8	3.68	3.88
MW	0	1 day	2 0 0	85.1	3.55	6.6
	9~5			87.6	3.20	6.3
B	0	8 hrs	2 2 0	86.8	3.43	6.5
	9~5			83.6	4.29	6.0
B	0	1 day	2 0 0	86.3	3.55	6.7
	9~5			88.5	2.92	4.52
B	0	8 hrs	2 1 0	80.7	2.42	5.5
	9~5			89.1	3.34	5.5
B	0	1 day	2 8 0	72.3	7.49	9.0
	9~5			76.1	6.40	10.0
B	0	1 day	2 8 0	67.9	7.82	10.0
	9~5			67.7	8.90	-
B-15	0	1 day	3 9 0	81.0	5.01	6.2
	9~5			79.0	5.62	6.6
B-15	0	1 day	3 6 5	77.8	5.93	7.6
	9~5			64.0	1.07	1.5
B	0	1 day	3 3 0	71.1	1.90	2.5
	9~5			62.5	1.45	2.5
B	0	7 days	2 7 0	79.1	5.53	9.5
	9~5			72.6	7.40	12.5
B	0	7 days	2 7 0	71.5	7.77	12.0

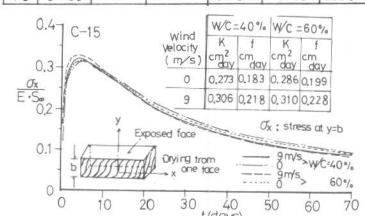


図-11 風作用下における収縮応力発現特性