

論文

[1049] 高性能 AE 減水剤を用いた高炉スラグ高含有コンクリート
の中性化および発熱特性

中本純次*1・戸川一夫*2・岡沢智*3・木虎久人*4

1. まえがき

高炉スラグ微粉末（以下高炉スラグという）をセメントに多量に置換えて使用すると水和熱を低減できる[1]。しかしながら、高炉スラグをセメントに多量に置換えたコンクリートは中性化が著しく進行する[2]。本研究ではセメントに対して高炉スラグを70%以上置換えた高炉スラグ高含有コンクリートの中性化低減対策として、高性能 AE 減水剤の利用方法とその効果を検討する。特に高炉スラグをセメント内割で高含有したコンクリートは普通コンクリート（高炉スラグ無置換）と比べて圧縮強度が低減するが、中性化速度は圧縮強度の逆数と比例するので[2]、高性能 AE 減水剤を利用してこの強度低下を防いで、普通コンクリートと同じ強度にして高炉スラグ高含有コンクリートの中性化の抑制を検討した。ここでは高炉スラグ高含有コンクリートの促進中性化特性、圧縮強度特性および断熱温度上昇特性について報告する。

2. 実験概要

2.1 実験計画

高性能 AE 減水剤を使用した高炉スラグ高含有コンクリートの中性化を検討するために次の3シリーズの実験を計画した。

シリーズ①：

高性能 AE 減水剤を使用して、配合条件として各コンクリート間のスランプ同一（単位水量同一）、水結合材比同一（単位結合材量同一）とした時の中性化の検討

このシリーズでは各コンクリート間の圧縮強度を同一にしようとしていない。

シリーズ②：

高性能 AE 減水剤を使用して配合条件として各コンクリート間のスランプ同一（単位水量同一・シリーズ①で得られた単位水量使用）、圧縮強度同一（単位結合材量を調整）とした時の中性化の検討

シリーズ③：

高性能 AE 減水剤を使用して、配合条件として、各コンクリート間の単位結合材量同一（シリーズ①の単位結合材量使用）、圧縮強度同一（シリーズ②の水結合材比使用）として、各コンクリートのスランプを高性能 AE 減水剤の添加率を調整して同一にした時の

表-1 本実験実施計画

高炉スラグ 置換率 (%)	シリーズ実験実施項目		
	①	②	③
0	●		
70	●	●	●
85	●	●	●
95	●	●	●

他に、AE 減水剤使用の比較用コンクリートを実験に用いる

他に、AE 減水剤使用の比較用コンクリートを実験に用いる

*1 和歌山工業高等専門学校助教授 土木工学科、(正会員)

*2 和歌山工業高等専門学校教授 土木工学科、工博(正会員)

*3 エヌエムビー(株)中央研究所、(正会員)

*4 大阪セメント(株)中央研究所

表-2 各種コンクリートの示方配合
比較用コンクリートの配合 (A E減水剤使用)

W/ C+B (%)	B/ C+B (%)	s/a (%)	水 W (kg)	セメント C (kg)	スラグ B (kg)	細骨材 S (kg)	粗骨材 (kg) G		混和剤 (cc)	
							5~13 (mm)	13~20 (mm)	※ A E剤	※※ AE助剤
46.4	0	44	167	360	0	765	498	498	3600	2300

※ 4倍液使用 ※※ 100倍液使用

高性能A E減水剤使用シリーズの配合

シ リ ー ズ	No.	W/ C+B (%)	B/ C+B (%)	s/a (%)	C+B (kg)	水 W (kg)	セメント C (kg)	スラグ B (kg)	細骨材 S (kg)	粗骨材 (kg) G		混和剤(cc)	
										5~13 (mm)	13~20 (mm)	※※※ 高性能	※※ AE助剤
①	1	46.4	0	42	306	142	306	0	775	548	548	3672	0
	2	46.4	70	42	306	142	92	214	769	544	544	3825	1500
	3	46.4	85	42	306	142	46	260	767	542	542	3825	3000
	4	46.4	95	42	306	142	15	291	767	542	542	3825	10000
②	5	50	70	42	282	142	85	197	777	549	549	3550	1400
	6	45	85	42	316	142	47	269	764	539	539	3950	3100
	7	33	95	42	431	142	22	409	721	509	509	5375	14000
③	8	50	70	42	306	153	92	214	757	535	535	3213	2000
	9	45	85	42	306	138	46	260	772	545	545	4590	4000
	10	33	95	42	306	101	15	291	811	573	573	7650	12000

※※※ 原液使用

中性化の検討

シリーズ②とシリーズ③の考え方の相違点は高炉スラグの置換率が変化しても各コンクリートの圧縮強度を同一にするために、シリーズ②では単位結合材量を調整するのに対してシリーズ③では単位水量と高性能A E減水剤量を調整する点である。

本実験実施計画を表-1に示す。

2.2 コンクリートの示方配合

全実験を通してコンクリートの目標スランプは8cm、空気量は4.0%である。

比較用コンクリートは高炉スラグ無置換でA E減水剤を使用して、単位結合材量は360kg/m³とした。比較用コンクリートの単位結合材量を360kg/m³としたのは、シリーズ①~③で比較用コンクリートと同一圧縮強度を得るために高性能A E減水剤を使用した時、その使用効果が適切に得られるようにするために、単位結合材量の下限值が270kg/m³程度確保できるように考慮したためである。

シリーズ①の高炉スラグ無置換のNo.1コンクリートの配合は比較用コンクリートとスランプ、空気量および圧縮強度が同一となるように決定した。なお、No.1コンクリートの単位水量は比較用コンクリートよりも15%減水させることにし、スランプ8cmが得られるように高性能A E減水剤の添加率を決めた。

以下、シリーズ①、②、③で述べた方針にしたがって各コンクリートの配合設計をした。得られ

た各コンクリートの示方配合を表-2に示す。

2.3 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。細骨材は徳島県那賀川産の川砂（比重2.56、吸水率2.00%、F.M2.84）を使用した。粗骨材は和歌山県由良産の硬質砂岩碎石（最大寸法20mm、比重2.62、吸水率1.10%）を使用した。使用に際して20~13mmと13~5mmを50%ずつ混合使用した。使用した高炉スラグは比表面積8000cm²/g、比重2.90である。この高炉スラグはこれまでの実験で[1]コンクリートの温度ひび割れ抵抗性を一番高めるものである。混和剤はリグニンスルホン酸化合物ポリオール複合体のAE減水剤とポリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複合体の高性能AE減水剤を使用した。

2.4 各種試験方法

(1) 促進中性化試験

材令28日まで水中養生（20±3°C）した角柱供試体（10×10×40cm）は打設上面、底面および端面に炭酸ガスの進入を遮断するためにペンキを塗り打設一側面からのみ炭酸ガスが進入するようにした。ペンキが乾いた後CO₂濃度7%、相対湿度60%の室内で促進中性化試験を開始した。以後所定の材令において、供試体をコンクリートカッターで切断し、その切口にフェノールフタレイン1%溶液を噴霧して、中性化深さを測定した。1種類の供試体は2本作製し、中性化深さは2本の平均値である。

(2) 断熱温度上昇試験

断熱温度上昇試験は空気循環方式で、内槽円筒容器にコンクリートを満たした容器（容量約40ℓ）を設置し、コンクリート中心と内槽の間の温度勾配が生じないようにヒータを制御することにより、コンクリートを擬似的な断熱状態に保つようになっている。測定はコンクリートの中心の上昇温度が定常状態になるまで行った。測定結果の回帰式は現在提案されている断熱温度上昇式のうち、最も一般的な下記に示す式[3]について最小二乗法により求めた。

$$T = K [1 - \exp(-\alpha t^{\beta})]$$

T : 温度上昇量 (°C)

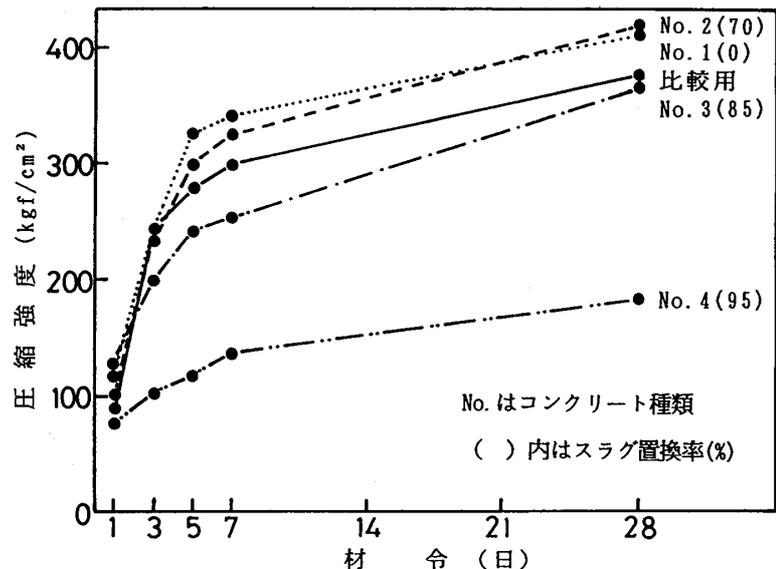


図-1 圧縮強度と材令との関係 (シリーズ①)

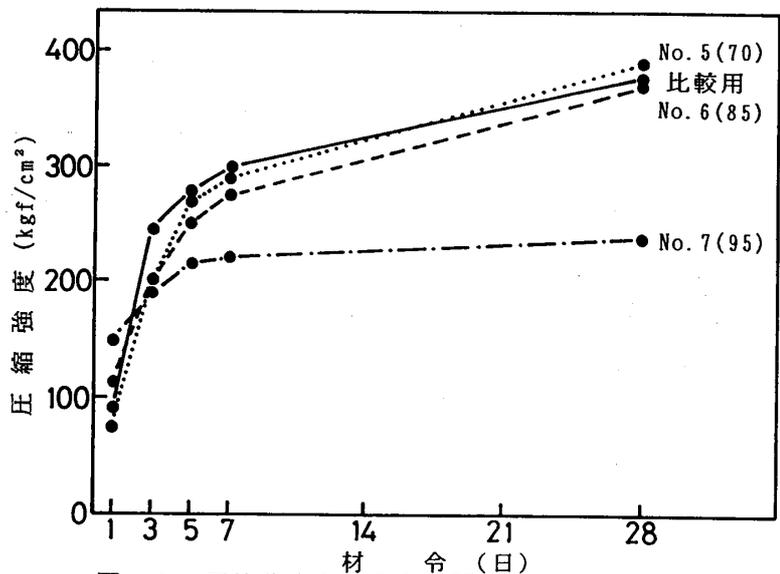


図-2 圧縮強度と材令との関係 (シリーズ②)

t : 材令 (日)

K : 実験定数 [最大温度上昇量] (° c)

α, β : 実験定数

3. 実験結果とその考察

3.1 圧縮強度特性

高炉スラグをセメントに70%以上内割で置換えると置換率が高くなるにしたがって圧縮強度は低下することはわかっている[1]。シリーズ①の結果でもそのことは認められた(図-1参照)。シリーズ②と③では比較用コンクリートと比べて強度低下のないように高性能AE減水剤を利用することで高炉スラグ高含有コンクリートの配合設計を試みた。その結果高炉スラグ置換率が85%以内では同一強度を得ることは可能であり所期の目的は達せられたが、置換率95%の場合は本実験内では強度低下がないように配合設計することはなかなか困難であると思えた(図-2、図-3参照)。

3.2 断熱温度上昇特性

図-4と図-5は断熱温度上昇試験結果を示す。いずれのコンクリートも材令3日程度で最大温度上昇量に達することがわかる。AE減水剤を用いた比較用コンクリートに比べて、圧縮強度をほぼ同一にした高性能AE減水剤を用いたNo.1コンクリートの温度上昇量は低く90%程度になることが示された。これは高性能AE減水剤を用いることで単位結合材量が低減できることに起因すると考えられる。さらにシリーズ①で、高炉スラグの置換率が高くなるにしたがって温度上昇量はかなり低下する

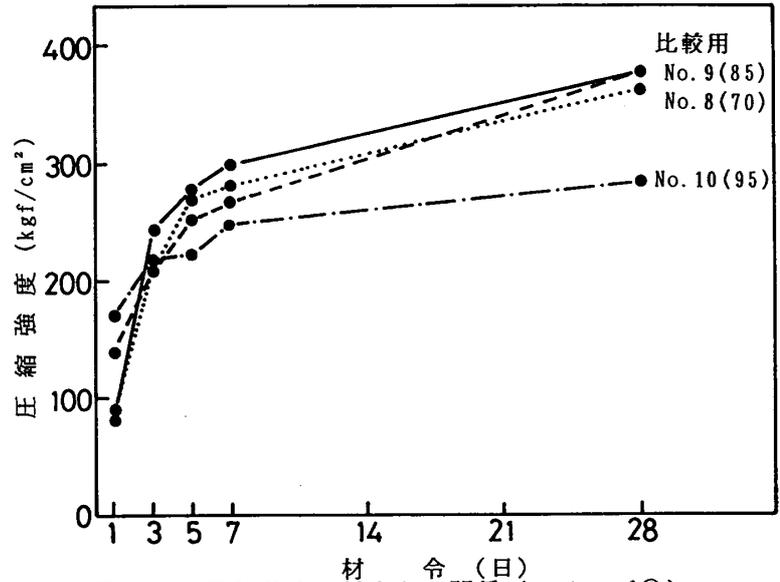


図-3 圧縮強度と材令との関係(シリーズ③)

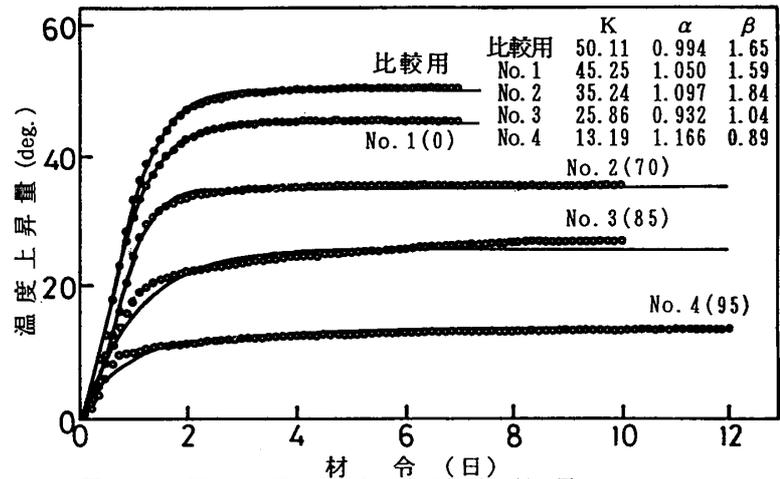


図-4 断熱温度上昇試験結果

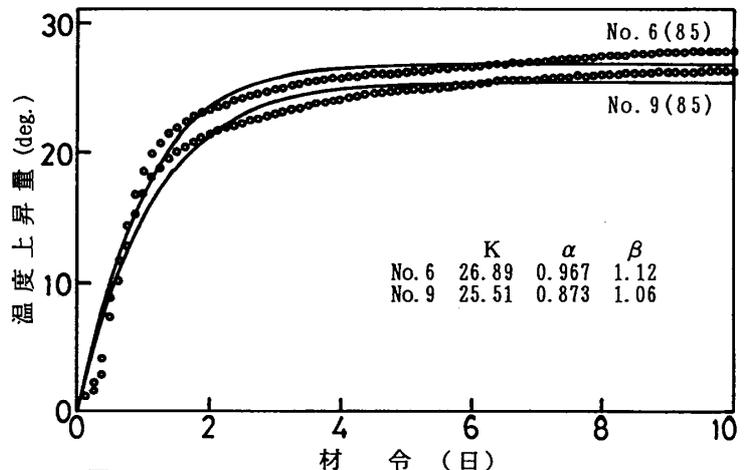


図-5 断熱温度上昇試験結果

ことがわかる(図-4参照)。図-5には同じ圧縮強度で高炉スラグ置換率が85%のときの、シリーズ②とシリーズ③における温度上昇量を比較している。シリーズ③の方が若干温度上昇量が低くなっている。これはシリーズ③の配合の方が単位結合材量が少ないことによると考えられる。

3.3 断熱強度比 (K/σ_c)

ここではコンクリートの温度ひび割れの抵抗性について最大温度上昇量 (K) と圧縮強度 (σ_c) との比 (K/σ_c) を指標として考察する。

K/σ_c が低いとひび割れ抵抗性が高いことを意味する。図-6は各コンクリートの K/σ_c と材令との関係を示す。比較用コンクリートと比べて、高性能A E減水剤を用いたNo.1コンクリートの K/σ_c はかなり低くなることわかる。また、シリーズ①では高炉スラグ置換率が高くなるほど K/σ_c は低くなることもわかる。シリーズ②と③の高炉スラグ置換率85%のコンクリートの K/σ_c を比較すると、シリーズ③の方が若干低くなっている。

3.4 中性化特性

促進中性化試験結果を図-7、8、9に示す。全実験を通して高炉スラグ高含有コンクリートの中性化深さ (y) も材令 (t) と $y = a\sqrt{t}$ なる関係[4]を示すことがわかった。

図中にそれぞれのコンクリートの a の値を示している。

A E減水剤を用いた比較用コンクリートと高性能A E減水剤を用いたNo.1コンクリートの中性化

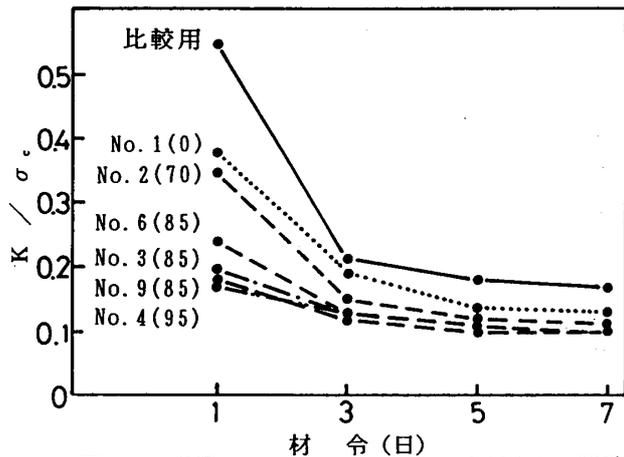


図-6 各種コンクリートの K/σ_c と材令との関係

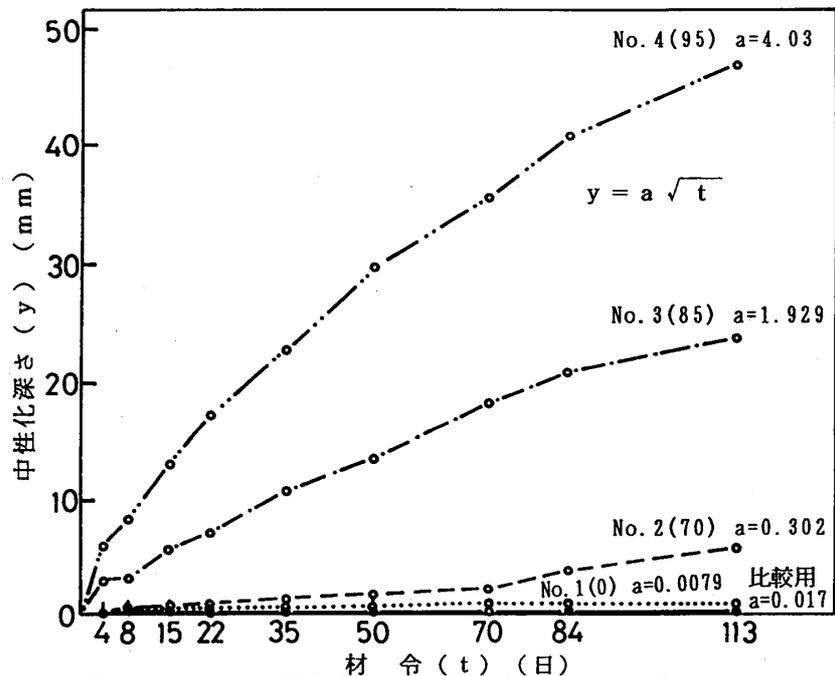


図-7 中性化深さと材令との関係(シリーズ①)

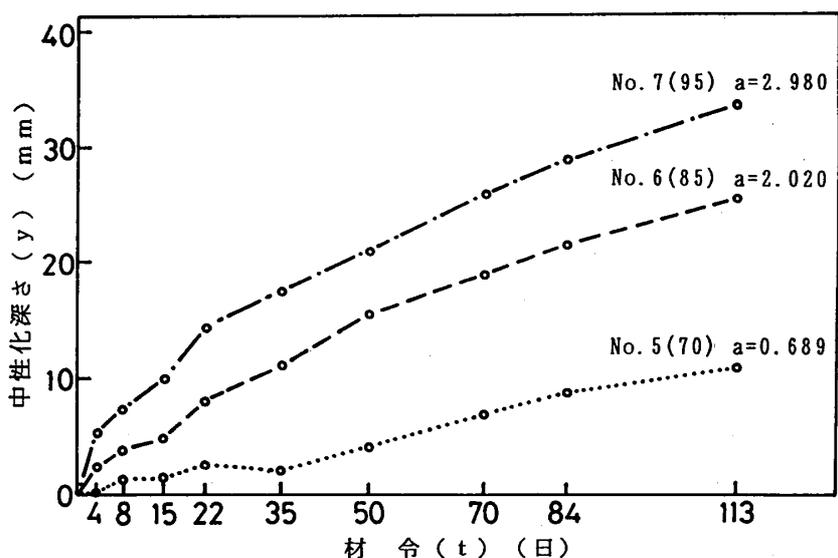


図-8 中性化深さと材令との関係(シリーズ②)

速度はほぼ同じである。シリーズ①、②、③を通じて、高炉スラグ置換率が高くなると中性化速度は高くなっている。シリーズ②とシリーズ③で高炉スラグ置換率が同じコンクリートの中性化速度を比較すると、いずれの置換率の場合もシリーズ③の方が中性化速度はかなり低いことが明らかである。

4. まとめ

高性能A E減水剤を用いて、高炉スラグをセメント内割で70%以上置換した高炉スラグ高含有コンクリートの中性化および発熱特性等に関する本実験結果を要約すると次のとおりである。

①コンクリートの圧縮強度とスランプを同一にしたとき、高性能A E減水剤を用いたコンクリートの断熱温度上昇量はA E減水剤を用いたコンクリートよりも低くなる。

②高炉スラグ高含有コンクリートの断熱温度上昇量は高炉スラグ置換率が増加するにしたがって低下する。

③高炉スラグ高含有コンクリートの中性化速度は高炉スラグ置換率が増加するにしたがって高くなる。また、圧縮強度が同一の場合でも、高炉スラグを置換えたコンクリートの中性化速度は高炉スラグ無置換のコンクリートよりも高くなる。

④高性能A E減水剤を適切に用いると高炉スラグ置換率85%以内であると高炉スラグ高含有コンクリートの強度低下を防止できる。その際、強度低下防止方法として単位水量を変化させないで単位結合材量を調整する方法と単位結合材量を変化させないで単位水量と高性能A E減水剤を調整する方法の2方法を考えた。その結果、後者の方が前者よりも高炉スラグ高含有コンクリートの中性化速度を低減できることが明らかになった。

謝辞：本研究を実施するにあたり、高炉スラグは新日鐵化学㈱に提供していただいた。また、実験は本校の真田・谷岡技官および卒業研究生の諸君にお世話になりました。付記して深謝いたします。

参考文献

1) 中本純次・戸川一夫・藤井学：高炉スラグ高含有コンクリートの強度・発熱特性に関する研究、セメントコンクリート論文集、No. 47, pp. 396-401, 1993

2) 中本純次・戸川一夫・藤井学：高炉スラグ高含有コンクリートの中性化に関する研究、コンクリートの炭酸化に関するシンポジウム論文集、pp. 23-30, 1993

3) 塚山隆一・宮地日出男：各種セメントを用いたコンクリートの温度上昇、セメント技術年報25巻、pp. 220-224, 1971

4) たとえば、岸谷孝一・西澤紀昭：コンクリート構造物の耐久性シリーズ（中性化）、技報堂出版、pp. 34-40, 1986

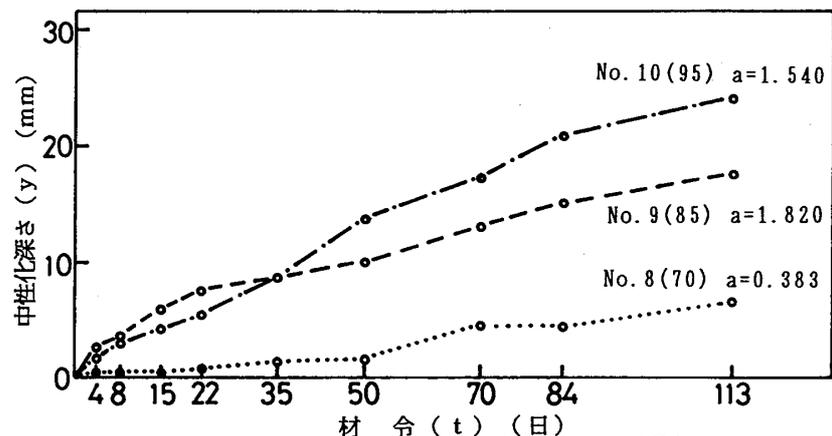


図-9 中性化深さと材令との関係 (シリーズ③)