

軟練り・硬練りコンクリートのひびわれ性状

高橋久雄
長尾覚博

Cracking Properties of High and Low Slump Concretes

Hisao Takahashi
Kakuhiro Nagao

Abstract

This report describes the results of studies on drying shrinkage and properties of cracking concerning two types of concrete, high and low slump. The studies consist of examinations and calculations. In the examinations, two factors are taken into consideration, namely, value of slump and curing conditions at early age. In the calculation study, the model, a modification of the specimen in the examination, is analyzed by an equation which applies Neville's theoretical equation. The results confirm that concrete of low slump is more effective in reducing cracking than concrete of high slump.

概要

本報告はランプの異なる、軟練り・硬練りコンクリートの乾燥収縮性状および収縮ひびわれ性状を、実験および計算によって比較・検討したものである。実験では、スランプ 21cm, 8cm の普通コンクリートについて、材令初期の養生条件を変化させた場合の、乾燥収縮性状、強度および収縮を拘束した場合のひびわれ発生性状の差異を検討した。さらに計算では、Neville の収縮応力計算式を応用し、実験の場合と同一の拘束モデルについて、計算上の軟練り・硬練りコンクリートのひびわれ発生性状の差異を検討した。検討の結果、特に顕著な差はなかったが、軟練りよりも硬練りの方がひびわれ低減に有効な傾向のあることを確認した。

1. はじめに

近年、一般の建築工事では、ポンプ工法の普及に伴い、スランプ値の大きい、いわゆる軟練りコンクリートを用いることが多く、乾燥収縮ひびわれの発生頻度の増大をまねいているのではないかという疑問が生じている。本報告は、このような背景にもとずき、スランプが収縮ひびわれの発生にどのような影響を持っているか、実験および計算によって検討した結果を述べたものである。すなわち、従来、物性的にしかとらえられていなかったコンクリートの乾燥収縮性状を、拘束ひびわれという観点から、スランプ値の大小とひびわれとの関連を考察したもので、スランプ値 21 cm を軟練りとし、スランプ値 8 cm を硬練りとして、両者について比較・検討した。

2. 実験概要

2.1. 使用材料およびコンクリートの調合

2.1.1. 使用材料

- a. セメント：普通ポルトランドセメント
 - b. 骨材：粗骨材；最大粒形 25 mm, f.m. 6.8 川砂利
細骨材；最大粒形 2.5 mm, f.m. 2.72 川砂
 - c. 混和剤：AE 剤（商品名ヴィンゾル）
- 2.1.2. コンクリートの調合 コンクリートの調合条件は以下に示す通りである。
- a. スランプ：21cm(軟練りコンクリート), 8cm(硬練りコンクリート)
 - b. 空気量：4°/vol
 - c. 設計基準強度： $F_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ ($\sigma = 25 \text{ kg/cm}^2$)
- 上記の調合条件に従って、試し練りを行ない、表-1

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)		空気量 (°)		水セメント比 (%)	粗骨材率 (%)	単位水量 (kg/m ³)	絶対容積 (ℓ/m ³)			重量 (kg/m ³)			表面活性剤の使用量 (g/m ³)
	所要	指定	所要	指定				セメント	粗骨材	粗骨材	セメント	粗骨材	粗骨材	
25	21	—	4.0	—	61.0	42.7	196.1	102.1	285.3	377.2	321.5	747.4	1,003.5	80.3
25	8	—	4.0	—	61.0	40.8	155.1	80.7	298.2	426.2	254.3	781.4	1,133.6	38.2

(注) 表乾燥状態

表-1 コンクリートの調合表

に示す調査を決定した。

2.2. 供試体の種類および形状寸法

供試体として、表-2に示す、拘束ひびわれ試験用供試体、自由収縮測定用供試体、および圧縮強度、純引張強度、割裂係数試験用供試体を用いた。

供試体の種類	試験の目的	試験体の形状寸法：mm	同一条件の供試体数
拘束試験体	コンクリートの自由収縮を拘束し、拘束ひびわれを発生させる。	100(幅)×150(高)×1,000(長)	2
自由収縮試験体	コンクリートの自由乾燥収縮量を測定する。	100(幅)×150(高)×1,000(長)	2
割裂係数用試験体	拘束試験体のひびわれ発生時におけるコンクリートの引張強度の確認。	150φ シリンダー供試体	3
純引張強度用試験体	拘束試験体のひびわれ発生時におけるコンクリートの引張ひずみ-応力関係の確認。	100φ シリンダー供試体	3
圧縮強度用試験体	経時的なコンクリート強度の変化を確認する。	100φ シリンダー供試体	3

表-2 供試体の種類および形状寸法

2.3. 拘束フレームの概要

コンクリートの乾燥収縮ひずみを拘束し、ひびわれを強制的に発生させる拘束フレームは、図-1に示すようにコ形のチャンネルで作成した。拘束の方法は、コンクリート供試体端部に、収縮の方向と直角に鋼棒を埋込み、その鋼棒は、チャンネルに密着されているため、収縮力はフレームに伝達されるようになっている。さらに拘束フレームの剛性の決定は、(2.1)式に示す拘束係数を定義し、文献等¹⁾を参考にし、 $K=0.6$ 前後になるようにフレームの剛性を決定した。本実験の場合、 $n=10$ とすれば、 $A_C=150\text{ cm}^2$ 、 $A_S=23.84\text{ cm}^2$ であるから、 $K=0.614$ となり、この条件下でひびわれ試験を実施した。

$$\text{拘束係数 } K = n \cdot A_S / (A_C + n \cdot A_S) \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

$$\text{あるいは、} K = \epsilon_C / \epsilon_f \quad \dots\dots\dots (2.1')$$

ただし、 n ：フレームとコンクリートのヤング係数比

A_C ：コンクリート部の断面積 (cm²)

A_S ：拘束フレームの断面積 (cm²)

ϵ_C ：収縮拘束量

ϵ_f ：自由収縮量

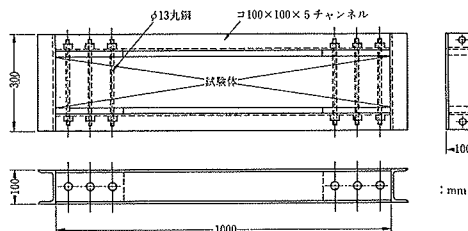


図-1 拘束フレームの概要

2.4. 純引張試験方法

純引張試験は、図-2に示す装置を用い、アムスラー

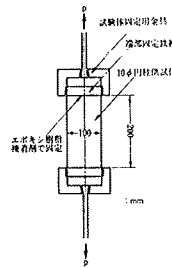


図-2 純引張試験方法

型万能試験機によって引張試験を実施した。

2.5. ひずみの測定方法

自由収縮試験体、拘束ひびわれ試験体とも、経時的なひずみの測定には、コンタクトゲージ、差動トランス、ダイヤルゲージ、および埋込ゲージ(自由収縮試験体のみ)を併用して使用した。各ゲージの取り付け位置は図-3に示す通りである。

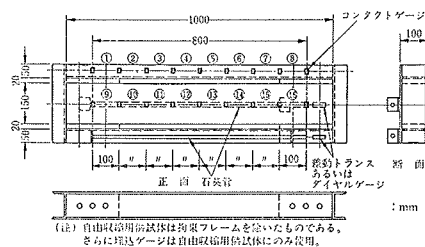


図-3 各ゲージの取り付け位置

また、純引張ひずみの測定には、張付形表面ゲージを用いた。

2.6. 供試体の養生方法

各供試体とも、養生条件は、軟練り・硬練りコンクリートについて下記の2水準とした。

- a. 成型後24時間20℃、80%RH 気中養生後脱型し、以後20℃、60±5%RH 気中養生。
- b. 成型後7日間、20℃、80%RH 気中にて、湿布養生後脱型し、以後20℃、60±5%RH 気中養生。

3. 実験結果および考察

3.1. まだ固まらないコンクリートの性質

コンクリートの種類	スランプ (cm)	フロー (cm×cm)	空気量 (%)	単位容積重量 kg/100cm ³	練り上がり温度 °C	脱型時温度 °C
軟練り	22.8	475×400	3.7	2.32	17.0	18.0
	22.5	480×470	3.9	2.30	17.0	17.0
硬練り	8.0	122×115	4.4	2.32	18.5	18.5
	7.6	212×218	3.8	2.34	18.0	19.0

(注) 軟練りの所定スランプは21cm、硬練りの所定スランプは8cmである。

まだ固まらないコンクリートの試験結果は表-3に示す通りで、試験体の作成にあたっては所定の品質のコンクリートを打設することができた。

表-3 まだ固まらないコンクリートの性質

3.2. 強度試験結果

3.2.1. 圧縮強度について 図-4は圧縮強度の経時変化を示したものであるが、翌日脱型、7日脱型とも、軟練り、硬練りコンクリート間には差がなく、W/Cが同一の場合、十分締め固めれば、スランプの違いによる強度の差はないものと思われる。また脱型時期による差

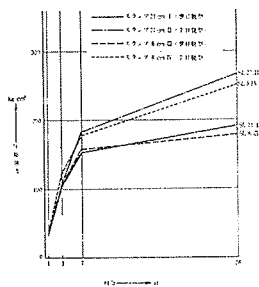


図-4 圧縮強度の経時変化

		kg/cm ²	
コンクリートの種類		7	28
軟練り	翌日脱	14.8	14.8
	7日脱	8.0	18.4
硬練り	翌日脱	6.2	12.5
	7日脱	9.2	18.1

表-4 純引張強度の試験結果(平均値)

に大きかった他は、材令、養生別において、軟練り、硬練りコンクリート間に、差は認められなかった。また、1/4 Fc 時、1/4 Ft 時における圧縮弾性係数と引張弾性係数はほぼ同一であることを確認した。

3.3. 乾燥収縮性状について

埋込ゲージによる、自由収縮ひずみの測定結果は、図-5に示す通りで、材令300日で、翌日脱型の場合28%、7日脱型の場合19%軟練りの方が硬練りよりも乾燥収縮率が大きであった。

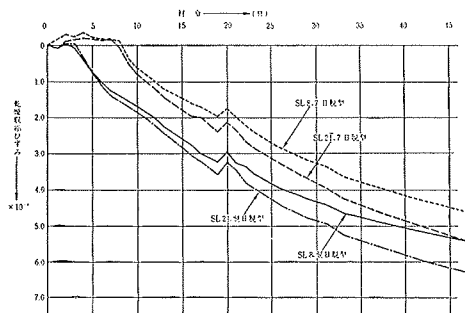


図-5 乾燥収縮率の経時変化

脱型時期の差については、軟練りコンクリートに差が認められ、材令300日で約10%、翌日脱型よりも、7日脱型の方が小さい収縮率を示した。ただし、翌日脱型と7日脱型の場合を脱型時を原点として比較すると、脱型後7日ぐらいまでは、7日脱型の方がやや収縮速度が大きく、7日以後は逆転する傾向が認められた。

またコンタクトゲージによって、供試体各部の収縮率を測定し、そのばらつきを調べた。一般的傾向として、試験体の端部は内部拘束が小さいので、中央部よりも収縮率が大きいといわれているが、今回の結果では、この

については材令28日で約30%7日脱型の方が強度が大であった。

3.2.2. 純引張強度について 表-4は純引張試験結果を示したものであるが、材令28日の場合について比較すると、7日脱型については軟練り、硬練りともほとんど差がなく、翌日脱型については、若干、軟練りの方が大であった。

3.2.3. 静弾性係数について(圧縮・引張) 翌日脱型の軟練りコンクリートにおける、材令3日時の1/4 Fc 時のセカントモデュラスが極端

傾向は認められず、各部に不確定なばらつきがあり、それは材令の進行とともに大となって、材令47日の時点で最高と最低値との差が $1\sim 2 \times 10^{-4}$ 程度となっている。

3.4. 拘束試験体のひずみの傾向およびひびわれ発生性状について

3.4.1. 拘束試験体のひずみの傾向 拘束試験体のひずみの傾向は、図-6に示すように、コンクリートの乾燥収縮ひずみが、拘束フレームに拘束されるため、自由収縮量よりもかなり小さな値となり、フレーム部とコンクリート部のひずみの履歴は、ほぼ同一の傾向を示し、フレームとコンクリートが一体となって挙動していることがわかる。またひびわれ発生以後は収縮応力が緩和されるので、フレーム部のひずみは0に近づく。さらにコンクリート部の収縮ひずみはひびわれ部分に集中し、ひびわれ幅は徐々に拡大されるが、平均ひずみはフレームと同一の傾向を示す。なお本実験の場合、ひびわれが発生した後、ひずみは瞬時に0に近づくわけではなく、2~3日を経て、0に近い状態で定常に達した。これは、全断面全域にひびわれが瞬時に進展しないため、骨材とペーストとの機械的なかみ合せにより、ひびわれが発生した直後でも、骨材とペーストが完全に分離しないことによるものと考えられる。

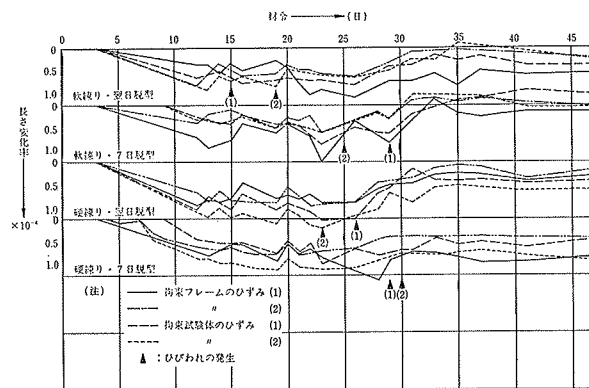


図-6 拘束ひずみの傾向(コンタクトゲージ)

3.4.2. 拘束ひびわれの発生状況 拘束ひびわれは、軟練りの一部を除いて、ほとんどが供試体の中央付近に貫通した形で発生した。脱型後および成型後、ひびわれ発生までの日数、ひびわれ発生時の諸物性値、さらに実測値にもとずきひびわれ直前の収縮応力の計算値などを表-5に示した。

これによると、翌日脱型、7日脱型とも、軟練りが硬練りよりも早くひびわれが発生した。脱型後の日数については、硬練りでは差が認められなかったが、軟練りでは翌日脱型の方が7日脱型より日数が短かった。成型後

コンクリートの種類			軟練り		硬練り		
			翌日脱型	7日脱型	翌日脱型	7日脱型	
ひびわれ発生時	実	日数(日)	脱型後	13.5	20.0	23.5	22.5
		成型後	14.5	27.0	24.5	29.5	
	値	自由収縮ひずみ $\times 10^{-4}$		2.73	3.40	3.75	3.22
		拘束収縮ひずみ $\times 10^{-4}$		0.65	0.68**	1.33	0.81**
		収縮拘束量 $\times 10^{-4}$		2.08	2.72**	2.42	2.41**
		引張強度 kg/cm^2		14.8	20.3	16.7	18.2
		引張弾性係数 $\times 10^4 \text{kg/cm}^2$		1.95	—	2.05	—
		収縮速度 $\times 10^{-7}/\text{日}$		0.202	0.170	0.160	0.143
	計算	拘束係数		0.76	0.80	0.65	0.75
		収縮応力* kg/cm^2		12.4 (12.4)	20.4 (17.90)	30.8 (24.2)	20.9 (—)
実験値	自由収縮ひずみ $\times 10^{-4}$		10.6	9.6	7.6	7.8	
計算値	ひびわれ限界拘束係数**		0.20	0.28	0.32	0.31	

(注) *1 ()内は拘束フレームの残留ひずみを差し引いて求めた場合。
 *2 ひびわれ限界拘束係数=(ひびわれ発生時の収縮拘束量)/(材令300日における自由収縮ひずみ)
 **主としてコンタクトゲージによる測定値によっているが、データ不足の場合にはダイヤルゲージ、差動トランスの測定値により補正したものを実験値として用いた。

表—5 拘束ひびわれの試験結果(平均値)

の日数では、軟練り、硬練りとも翌日脱型の方が7日脱型よりもひびわれ発生までの日数が短く、特に軟練りにおいて顕著であった。

また、ひびわれ発生直前の収縮応力を、拘束フレームの弾性係数を $E_f = 2.1 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$ と仮定して求めたところ、いずれも平均値で、軟練りの翌日脱型で 12.4kg/cm^2 、7日脱型で 20.4kg/cm^2 、硬練りの翌日脱型で、 30.8kg/cm^2 、7日脱型で、 20.9kg/cm^2 となり、軟練りよりも硬練りの方がひびわれ発生時の収縮応力が大となった。ひびわれ発生時の引張強度の実験値と、収縮応力の計算値との比較では、両者ともおおむね一致する結果となっている。

さらに、自由収縮ひずみと拘束収縮ひずみとの差、すなわち、コンクリート自身が拘束されて吸収するひずみは、一般にいわれている引張破壊ひずみ $1 \sim 2 \times 10^{-4}$ よりも大きく、これはコンクリートの引張クリープにより応力が緩和されているためと考えられるが、本実験の場合、硬練りでは認められなかったが、軟練りについては翌日脱型よりも7日脱型の方が大であった。

前述のひびわれ発生時の、自由収縮ひずみと拘束収縮ひずみとの差を収縮拘束量とし、この値以下ではひびわれが発生しないものとすれば、平衡時(本実験の場合材令300日とした)の自由収縮ひずみから、ひびわれ限界拘束係数を求め、軟練り、硬練りコンクリートのひびわれに対する抵抗性が比較できる。拘束係数の大きいほど、ひびわれに対する抵抗が大であることを考慮すれば、軟練りの7日脱型、硬練りの翌日脱型、7日脱型はほぼ同一値で差がなく、これらに比し、軟練りの翌日脱型は、拘束係数が小さくひびわれが発生しやすいといえるが、実際の建造物の拘束係数は、壁体などの場合、

温度ひずみの長期測定から推察すると0.7前後と考えられるので、軟練り、硬練りいずれの場合も、ひびわれの発生は避けられない場合が多いと考えられる。しかし傾向としては、軟練りよりも硬練りの方がひびわれが入りにくいことがわかる。

ひびわれが発生した後、実際には、ひびわれ幅が問題となる。表—6は材令300日における、拘束供試体のひびわれ幅をコンタクトゲージで測定した結果であるが、軟練りの供試体の一部にひびわれが2箇所に分散して入り、ひびわれの貫通部分が完全には検長内に入らない場合もあったので、軟練りと硬練りで差のない結果となっているが、現実には、ひびわれ幅は自由収縮量に比例すると考えられるので、硬練りの方が軟練りより小となることが推察される。しかし実際の構造物では、ひびわれ発生以後、特にひびわれの分散がない限り、軟練りと硬練りで顕著なひびわれ幅の差はないものと思われる。

コンクリートの種類	脱型時期	ひびわれ発生箇所数	1箇所あたりのひびわれ幅の長さ(mm)	ひびわれ幅の分散数
軟練り	翌日	1-2	0.34	0.41
	7日	1-2	0.37	0.48
硬練り	翌日	1	0.35	0.58
	7日	1	0.36	0.58

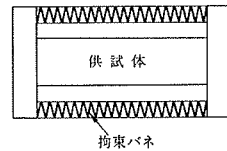
(注) *1 エンタクトゲージ検長100mmの測定値によるひびわれ幅の合計値。
 *2 ひびわれ幅(平衡時の自由収縮量) \times (拘束係数/長さ)

表—6 ひびわれ幅の実測結果

びわれ幅をコンタクトゲージで測定した結果であるが、軟練りの供試体の一部にひびわれが2箇所に分散して入り、ひびわれの貫通部分が完全には検長内に入らない場合もあったので、軟練りと硬練りで差のない結果となっているが、現実には、ひびわれ幅は自由収縮量に比例すると考えられるので、硬練りの方が軟練りより小となることが推察される。しかし実際の構造物では、ひびわれ発生以後、特にひびわれの分散がない限り、軟練りと硬練りで顕著なひびわれ幅の差はないものと思われる。

4. 収縮応力の理論計算

前節で述べた実験結果の傾向を理論的に把握するために図—7に示すモデルについて、A. M. Neville の収縮応力計算式²⁾を応用し、軟練り、硬練りコンクリートの



図—7 力学モデル

収縮応力の経時変化を解析した。試算式はコンクリート供試体の変形と拘束バネの変形が等しいという条件から、時間 K_j における収縮応力の増加分 Δf_j による、 T_j 区間の終わりにおけるひずみの増加分 $\Delta \epsilon(T_{i+1/2})$ は、時間 K_j で載荷された持続荷重による時間 T_i までのクリープ係数を $\phi(T_{i+1/2}, K_j)$ とすると、バネの変形とのつりあいから(5.1)式で表わされ、

$$\Delta \epsilon_i + \frac{1}{2} - \frac{\Delta P_j}{E_j \cdot A_c} \cdot (1 + \phi_j) = \frac{\Delta P_j}{E_s \cdot A_s} \dots \dots (5.1)$$

ただし、 $\Delta \epsilon_{i+1/2}$: T_i 区間の終りにおけるひずみの増加分

ΔP_j : 時間 K_j における収縮力の増加分

E_j : 時間 K_j におけるコンクリートの弾性係数

A_c : コンクリートの断面積

(5.1)式を展開すると、(5.2)式が得られ、これによって経時的なコンクリート断面における収縮応力の変化を追

跡できる。

$$f_1 + \frac{1}{2} = \frac{p_1 - \frac{1}{2}}{A_c} + \left\{ \frac{1}{1 + \phi_{1j} + \frac{A_c}{E_j \cdot A_s}} \right\} \cdot \left\{ \sum_{j=1}^i \Delta \epsilon_j - \sum_{j=1}^{i-1} \left(p_j + \frac{1}{2} - p_{j+1} - \frac{1}{2} \right) \right\} \cdot \left\{ \frac{1 + \phi_{1j}}{E_j \cdot A_c} + \frac{1}{E_s \cdot A_s} \right\} \dots (5.2)$$

ただし、(5.2)式中の ϕ_{1j} および E_j はそれぞれ (5.3)、(5.4) 式で表わされるものとする。

$$\phi_{1j} = \phi_N \cdot \frac{1.36 \ln(i-j+1)}{5 + \sqrt{j}} \dots (5.3)$$

ただし、 ϕ_N : 終局クリープ係数
 i : コンクリートの材令
 j : 試験材令

$$E_i = 14,000 \cdot \left(\frac{f_{cu,28}}{0.75 + 7/i} \right)^{1/2} \dots (5.4)$$

ただし、 $f_{cu,28}$: 材令28日におけるコンクリートの立方体強度

この場合、弾性係数、およびクリープは圧縮も引張も同一と考え、収縮応力の追跡には、実験で得られた自由

コンクリートの種類	養生方法	$f_{cu,28}$ (kg/cm ²)	ϕ_N
軟練り	型日型	281	2.0
	7日型	301	
硬練り	型日型	292	
	7日型	296	

表-7 仮定した諸常数

収縮ひずみをデータとして与えることにより計算した。計算上仮定した諸常数は表-7に示す通りである。さらに収縮ひびわれの発生を検討するため、コンクリートの引張強度を $1/10 F_c$ と仮定し、(5.5)

$$f_t(T) = f_c' \cdot 28 \frac{0.4}{3 + 28/T} \dots (5.5)$$

ただし、 T : コンクリートの材令
 $f_c', 28$: 材令28日における円柱供試体強度
 $f_t(T)$: 材令Tにおけるコンクリートの引張強度

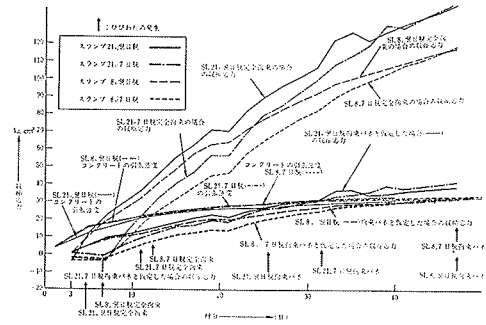


図-8 解析の結果

解析の結果は図-12に示す通りで、これによると、軟練りの方が硬練りよりもひびわれが入りやすいという結果を示しており、実験結果と同一の傾向となっている。また拘束条件によってかなりひびわれの発生が左右され、軟練り、硬練りコンクリートの収縮率の差は、実験値ではほぼ平衡時で20~30%程度であるが拘束条件とのかねあいによっては、両者のひびわれ性状にはかなりの差の生ずる可能性のあることが推察された。

5. 結語

検討の結果、軟練り、硬練りコンクリートとも、実際上ひびわれは不可避と考えられるが、拘束条件をできるだけ小さくすると同時に、ひびわれの分散化をはかり、可能なかぎり硬練りコンクリートを用いることが収縮ひびわれの低減につながるものと思われる。

参考文献

- 1) 仕入豊和: 防水に関するコンクリートの諸性質とその仕様に関する研究, 学位論文, (1961)
- 2) A. H. Neville: Creep of Concrete; Plain, Reinforced and Prestressed, (1970)