

$H$  だけ前部が群から切り離されるとした場合の速度  $v_{H2}$  はそれぞれ次式で示される。

$$v_{H1} = \sqrt{\frac{2g}{L(1+\rho)} \left\{ \delta(H) + \frac{1}{2000} \{c\} \cdot H^2 \right\}} \quad (91)$$

$$v_{H2} = \sqrt{\frac{2g}{(L-H)(1+\rho)} \delta(H)}$$

ただし  $\delta(H) = \lambda \{ F_n(L) - F(L+H/\lambda) + F(H/\lambda) \} + F_n(L) - F_n(L-H)$

$$F_n(L) = \int_0^L f_n(l) dl, F(L) = \frac{1}{1000} \int_0^L \int_0^{l \cdot \lambda} \varphi(x) dx \cdot dl$$

VI. むすび

この種の研究には高精度のしかも数多くの実測値が

必要であるにもかかわらず、この不備から確率的な検討に不十分な箇所があり、また紙数の関係で研究の一部分をしかも非常に圧縮して記述したため不明確な点が多いことと思われる。これらの点について諸賢の御叱正が戴ければ幸甚である。終りに本論文の完成にあたり終始御指導を賜った京都大学小林勇教授並びに同村山朔郎教授に対し、また実験及び調査などに多大の御援助を与えられた国有鉄道技研八木健二次長、同岡鶴吉停車場課長、同電気局雑賀武技師並びに関係諸彦に対し深甚なる感謝の意を表する。

(昭27.10.17)

UDC 666.972:620.192.46  
539.378.2

コンクリートの癒着について

准員 村田二郎\*

ON THE AUTOGENOUS HEALING OF CONCRETE

(JSCE March 1953)

Jirō Murata, C.E. Assoc. Member

**Synopsis** This paper explains the results of the fundamental test on the autogenous healing of concrete by using beam specimens. In this paper, the author describes the effects of age, composition and depth of crack on the autogenous healing of concrete, after the crack has been closed again by pressure.

**要旨** 本文は、梁供試体を用い、コンクリートの癒着について基礎的に実験した結果の報告であつて、ひびわれの生じた供試体に圧力を加えてひびわれを閉ぢさせた場合における、供試体の材令、配合及びひびわれの状態等がコンクリートの癒着に及ぼす影響について述べたものである。

1. 緒言

コンクリートの癒着については、Abrams<sup>1)</sup>, Earley<sup>2)</sup>, Hollister<sup>3)</sup>, Turner<sup>3)</sup> 氏等が鉄筋コンクリートの橋梁や建築物等に生じたひびわれが数年後には自癒した実例を報告しており、興味ある問題である。また従来癒着に関して、花房<sup>4)</sup>, Gilkey<sup>5)</sup>, Turner<sup>3)</sup>, Davis<sup>6)</sup> 氏等の有益な研究がある。しかしこれ等の研究では、いずれも円筒供試体による圧縮試験、あるいはブリケットによる引張試験によつており、試験値の偏差も割合に多く、なお不明な点があるので、筆者は昭.24.4.より癒着について基礎的に研究した。筆者は梁供試体を用い、曲げ試験によつて生じたひびわれを、適当な圧力を加えて閉ぢさせた場合の癒着について研究した。これは、セメントペースト<sup>7)</sup>及びモルタルの予備

試験の結果から、破面を十分密着させれば、癒着強さはいちじるしく増大し、試験値の偏差も減じて、癒着現象を研究する上に良好な方法であることが明らかになつたからである。本文はこの試験方法に基づき、コンクリートの癒着について実験した結果を取りまとめたものである。

2. 使用材料

セメントは野沢セメント彦根工場製の普通ポルトランドセメントで、その試験成績は表-1のごとくであつた。

表-1 用いた野沢ポルトランドセメントの試験成績

比 重	3.16					
	2.3 %					
物 質	真 度	真 度	水 温	水 量	時 間	試 験
試 験	18.6c	8.8%	19.6c	27.0%	2時間 5分	4時間 55分
影 響	異状なし (基準法による)					
ひびわれ	フロ-					
強 度	平均養生	曲げ強度 (kg/cm <sup>2</sup> )			圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	
	温度 °C	3日	7日	28日	3日	7日
	19.6	30 19.5	33 19.0	33.1 59.3	75.3	164 30.9
		28 20.2				
		28 20.0				

骨材は山梨県釜無川産のもので、砂の比重は 2.65、吸水量は 1.85%、粗粒率は 2.81 であつて、使用に當つては、室内乾燥状態のものへ有効吸水量に相当する

\* 山梨大学講師，工学部土木教室

水を加え、湿布でおほつて約 15 分間放置し、表面乾燥飽和状態とみなして用いた。砂利の比重は 2.66、吸水量は 0.9%で、最大寸法は 25 mm とし、粒度はあらかじめ篩分けたものを土木学会で規定した標準の範囲の中央にあるよう一定の割合に混合した。粗粒率は 6.95 であった。使用に際して 15~20 時間吸水させ、粒の表面を布で拭き表面乾燥飽和状態とした。

水は実験室内の水道の水を用いた。実験中の水温は 18.9~22.0°C であった。

3. コンクリート

実験に用いたコンクリートの配合は表-2のごとくである。このセメントを用いたプラスチックなコンクリートのセメント水重量比  $e/w$  と材令 28 日の圧縮強度  $\sigma_{28}$  との関係は次式であらわせた。

$$\sigma_{28} = -285 + 299 e/w$$

表-2 実験に用いたコンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント重量比	コンクリート 1m <sup>3</sup> に用いたセメント量 (kg)	コンクリート 1m <sup>3</sup> に用いた水量 (kg)	粗骨材の重量比
25	7.5	0.45	385	173	1.40
25	7.5	0.55	325	179	1.25
25	7.5	0.65	286	186	1.10
25	0.5	0.55	240	132	2.50
25	14.0	0.55	350	193	1.10

4. 供試体の製造及び試験方法

供試体は 7.5×10×45 cm の梁を用いた。コンクリートは供試体 4~5 ケ分を同時に手練りで練り混ぜ、型枠に 2 層に詰め、各層を標準の突棒で 27 回均等に突いた後、型枠の壁に沿いナイフでスベージングした。ただし、スランプ 0.5 cm のコンクリートは、あらかじめ型枠をフローテーブル上に据え、上記と同様な方法で詰め、各層にそれぞれ 75 回上下動を与えて締め固めた。

製造した供試体は翌日脱型して養生水槽につけ、所定の材令で曲げ試験（以下第 1 次試験という）をしてひびわれを生ぜしめた。次に破面がずれぬように注意して供試体を圧縮試験機に縦に据え、ひびわれが肉眼で認められなくなる程度まで、すなわち大部分の試験では 10~50 kg/cm<sup>2</sup> の圧力を梁の軸方向に加えてひびわれを閉ぢさせ、再び所定の期間養生水槽につけた（以下癒着進行期間という）後、供試体を水槽から取りだしてただちに曲げ試験（以下第 2 次試験という）をして癒着強さを求めた。この時、最初にひびわれを生ぜしめた面を常に引張側とした。梁のスパンは 30 cm とし、スパンの中央の 1 点に毎分 7 kg/cm<sup>2</sup> の荷重速

度で載荷した。そして、ひびわれを梁のほぼ上縁まで入れた場合と、最大荷重に達し、ひびわれが肉眼で認められた時ただちに荷重を除いてなるべくひびわれを少なくした場合とについて実験して比較した。

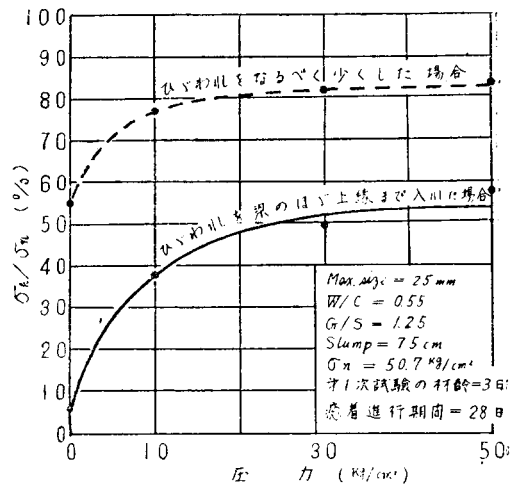
梁供試体を用いた理由は、予備試験の報文<sup>7)</sup>に述べたごとく円筒供試体による圧縮試験では、ひびわれの状態が非常に複雑になり、破面を十分密着させることもできないし、高強度のコンクリートでは破面が飛散する等の欠点がある。引張強さ係数試験では、第 1 次試験により供試体の載荷部がつぶれ、癒着強さを求めることができないし、ブリケットを用いることは設備上不可能であったからである。

梁の軸方向に圧力を加えた理由は、これにより破面が十分密着して、癒着強さはいちじるしく増大し、試験値の偏差を減少するので、癒着現象の基礎研究に良好な方法と思つたからである。

5. 実験結果

(1) 梁の軸方向に加えた圧力の影響 図-1 は圧力の大きさと癒着強さとの関係の一例を示したもので、水セメント重量比 0.55、スランプ 7.5 cm のコンクリートを用い、第 1 次試験の材令を 3 日、癒着進行期間を 28 日とし、圧力を 0, 10, 30, 50 kg/cm<sup>2</sup> と相異させた場合の実験結果であつて、癒着強さ  $\sigma_h$  は同材令（この場合は 31 日）のひびわれのない供試体の曲げ強度  $\sigma_n$  の百分率で示してある。図中、実線は第 1 次試験においてひびわれを梁のほぼ上縁まで入れた場合、破線はひびわれをなるべく少なくした場合である。図-1 より、ひびわれを梁のほぼ上縁まで入れた場合は、加圧しないときの  $\sigma_h/\sigma_n$  は 6% 程度でほとんど癒着しないが、30 kg/cm<sup>2</sup> 以上の圧力により  $\sigma_h/\sigma_n$  は約 55% となり、加圧しない場合の 10 倍近くになる。ひ

図-1 軸方向に加えた圧力と癒着強さとの関係



びわれをなるべく少なくした場合は、 $10 \text{ kg/cm}^2$  以上の圧力で  $\sigma_u/\sigma_n$  は約 80%、加圧しない場合の約 1.5 倍となることがわかる。しかし 4. で述べたごとく、加圧は第 1 次試験の直後に行つただけで、それ以後は供試体を縦にして養生水槽中に貯蔵したのであるから、この間破面には約  $0.5 \text{ kg/cm}^2$  の自重が加わっているに過ぎないのである。予備試験におけるセメントペースト供試体では、載荷重を除いた後の破面のゆるみを防ぐため、癒着進行期間中連続して  $5 \text{ kg/cm}^2$  の圧力を加えることにより、 $\sigma_u/\sigma_n$  は連続加圧しない場合より約 10% 増加した。従つてコンクリートでも相当の圧力を連続して加えれば、癒着強さは図-1 に示したより大になるものと思われる。

また、ひびわれを梁のほぼ上縁まで入れた場合の癒着強さは、ひびわれをなるべく少なくした場合の平均約 50% となつた。これは第 1 次試験で前者はほとんど完全に切断したのであり、後者は梁の高さの大部分は切れていないのであるから当然と思われる。

次に、試験値の偏差率は、加圧しない場合は約 50% に達したが、加圧した場合は最大 14.5% であつた。

表-3 はコンクリート及び予備試験で実施したセメントペースト、モルタルの圧力と癒着強さとの関係であつて、圧力が 0 及び  $30 \text{ kg/cm}^2$  の場合の  $\sigma_u/\sigma_n$  を示してある。これはセメントペーストでは  $5 \text{ kg/cm}^2$

表-3 セメントペースト、モルタル及びコンクリートの圧力と癒着強さとの関係

		オ 1 次試験の材料 3 日 養生進行期間 28 日		
		セメントペースト	モルタル	コンクリート
		W/C 0.55	W/C 0.55	W/C 0.55
		C/S 1:2 70・246	C/S 1:2 70・246	C/S 1:2 70・246
		G/S 1.25 37・7・75	G/S 1.25 37・7・75	G/S 1.25 37・7・75
ひびわれの程度	圧力 (kg/cm <sup>2</sup> )	セメントペースト	モルタル	コンクリート
梁のほぼ上縁まで	0	37	10	6
て入れた場合	30	78 (2.1)	6 (6.2)	5.0 (8.3)
ひびわれを少なくした場合	0	37	35	55
た場合	30	78 (2.1)	73 (2.1)	82 (1.5)

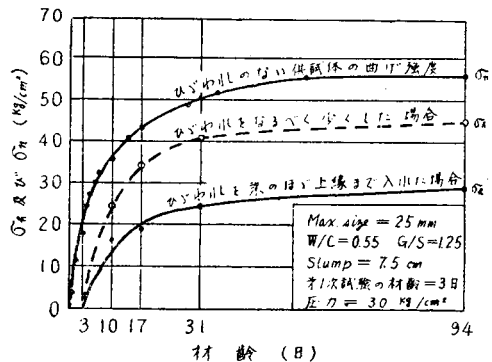
\* このセメントペースト供試体は、オ 1 次試験で最大荷重に達したとき直ちに荷重を除いても、ひびわれは梁のほぼ上縁まで入らなかった。  
( ) 内は圧力が 0 の場合の癒着強さに対する倍率である。

以上、モルタル及びコンクリートでは  $30 \text{ kg/cm}^2$  以上の圧力を加えても、癒着強さにいちじるしい変化が認められなかつたからである。表-3 より、ひびわれを梁のほぼ上縁まで入れた場合のセメントペースト、モルタル、コンクリートの  $\sigma_u/\sigma_n$  は、加圧により、加圧しない場合のそれぞれ約 2, 6, 8 倍となり、加圧の影響はコンクリートが最もいちじるしい。これは癒着進行期間中セメントペースト、モルタルはゴムバンドにより約  $1 \text{ kg/cm}^2$  の圧力を受け、コンクリートは自重により約  $0.5 \text{ kg/cm}^2$  の圧力を受けているが、セ

ントペーストはこの程度の圧力でも比較的容易にひびわれを閉ぢるが、モルタル、コンクリートでは相当の加圧をせねば閉ぢないので、加圧しない場合のモルタル、コンクリートの癒着強さが非常に小さくなつたことが主な原因と思われる。ひびわれをなるべく少なくした場合は、コンクリートは他に比して加圧の影響が少なく、加圧によりセメントペースト、モルタルの癒着強さはともに約 2 倍、コンクリートでは約 1.5 倍となつた。これは第 1 次試験で最大荷重に達した時だけに荷重を除いても、供試体の形状及び寸法、脆弱の程度等が相異なるため、生ずるひびわれの深さがそれぞれ異なり、コンクリートに生ずるひびわれが最も浅いためであつて、コンクリートの  $\sigma_u/\sigma_n$  が他に比して大になつたものこのためと思われる。

(2) 材令の影響 図-2 は水セメント重量比 0.55、スランプ 7.5 cm のコンクリートを用い、第 1 次試験の材令を 3 日とし、 $30 \text{ kg/cm}^2$  の圧力を加え、以後 7, 14, 28 日及び 3 月癒着させた場合の実験結果であつて、セメントペースト、モルタルと同様に、 $\sigma_u$

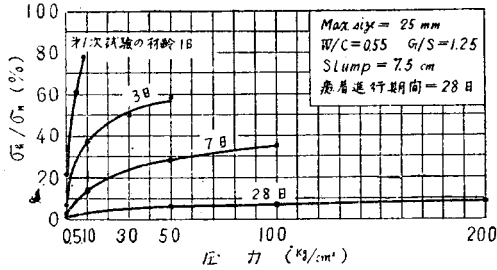
図-2 癒着進行期間と癒着強さとの関係



は癒着進行期間の増加にともない  $\sigma_n$  の曲線とほぼ平行に増加し、癒着進行期間 3 月における  $\sigma_u/\sigma_n$  は、ひびわれを梁のほぼ上縁まで入れた場合約 52%、ひびわれをなるべく少なくした場合は約 81% となつた。これは癒着がセメントの水和作用によつて生ずることを示すものである。なお、予備試験で実施したセメントペースト、モルタルの癒着進行期間 3 月における  $\sigma_u/\sigma_n$  は、ひびわれをなるべく少なくした場合で、それぞれ約 76% 及び約 80% であつた。

図-3 は同様なコンクリートを用い、第 1 次試験の材令を 1, 3, 7, 28 日とし、ひびわれを梁のほぼ上縁まで入れ、28 日癒着させた場合の実験結果であつて、圧力は供試体の強さに応じて適当に加えた。すなわち第 1 次試験の材令が 1 日のものは  $0 \sim 8 \text{ kg/cm}^2$ 、3 日は  $0 \sim 50 \text{ kg/cm}^2$ 、7 日は  $0 \sim 100 \text{ kg/cm}^2$ 、28 日は  $0 \sim 200 \text{ kg/cm}^2$  とした。図-3 に第 1 次試験の材令が

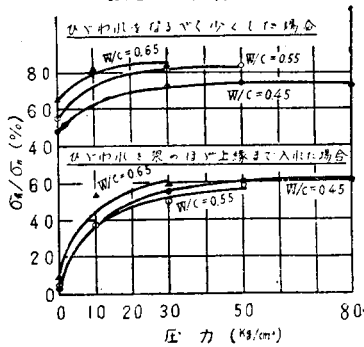
図-3 第1次試験の材令と癒着強さとの関係  
(ひびわれを梁のほぼ上縁まで入れた場合)



若いほど癒着強さが大であることが明らかに示されている。例えば圧力 8 kg/cm<sup>2</sup> の場合の  $\sigma_t/\sigma_n$  は、第1次試験の材令が1日では約 78%，3日では約 35%，7日では約 12%，28日では約 3%である。また第1次試験の材令が28日では、いかに圧力を大にしてもほとんど癒着しないことが示されている。これ等は材令にともなうセメントの水和作用が一樣でないことから当然と思われる。この関係はひびわれをなるべく少なくした場合も全く同様であることを確かめた。

(3) 水セメント重量比の影響 図-4 は水セメント重量比 0.45, 0.55, 0.65, スランプ 7.5 cm のコ

図-4 水セメント重量比と癒着強さとの関係



ンクリートをを用い、第1次試験の材令を3日、癒着進行期間を28日とした場合の実験結果であつて、圧力は水セメント重量比 0.45 のものは 0~80 kg/cm<sup>2</sup>、0.55 は 0~50 kg/cm<sup>2</sup>、0.65 は 0~30 kg/cm<sup>2</sup> とした。 $\sigma_n$  は水セメント重量比が小なるほど大で、これは然であるが、 $\sigma_t/\sigma_n$  は図-4 に示すごとく、ひびわれを梁のほぼ上縁まで入れた場合は大体一樣であるが、ひびわれをなるべく少なくした場合は水セメント重量比が小なるほど小となり、例えば圧力 30 kg/cm<sup>2</sup> で、水セメント重量比が 0.45 では約 72%，0.65 では約 83% となつた。これは第1次試験で生じたひびわれの深さが、水セメント重量比の相異によつて異な

るためであつて、予備試験におけるセメントペースト、モルタルでも同様な傾向を示した。

(4) コンシステンシーの影響 表-4 は水セメント重量比 0.55, スランプが 0.5, 7.5 及び 14 cm のコンクリートをを用い、4. に述べた方法で供試体をつくり、第1次試験の材令を3日、圧力を 30 kg/cm<sup>2</sup>、癒

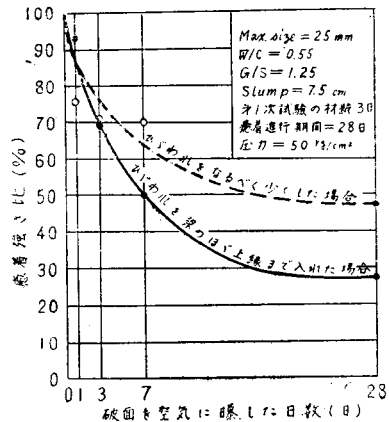
表-4 コンシステンシーと癒着強さとの関係

水セメント重量比	0.55			
ス ラ ン プ (cm)	0.5	7.5	14	
また固まりやすいコンクリート / 中のセメント量 (kg)	24.0	32.5	35.0	
粗細骨材中量比	2.50	1.25	1.10	
ひびわれと梁のほぼ上縁まで入れた場合	$\sigma_t/\sigma_n$ (%)	23.0	24.8	25.9
	$\sigma_t/\sigma_n$ (%)	5.2	5.0	5.2
ひびわれをなるべく少くした場合	$\sigma_t/\sigma_n$ (%)	36.7	41.0	41.4
	$\sigma_t/\sigma_n$ (%)	8.2	8.2	8.3
$\sigma_n$ (kg/cm <sup>2</sup> )	44.7	50.7	50.2	

着進行期間を28日とした場合の実験結果であつて、水セメント重量比が一定で、プラスチックでウォークアブルなコンクリートなら、コンシステンシーが相異しても癒着強さにほとんど変化がないことが示されている。このことからセメント使用量が癒着強さに及ぼす影響も小さいことが推定される。

(5) 破面を空気に曝した期間の影響 図-5 は水セメント重量比 0.55, スランプ 7.5 cm のコンクリートをを用い、材令3日で生ぜしめたひびわれの破面を

図-5 破面を空気にさらした期間と癒着強さとの関係



0, 1, 3, 7, 28 日実験室内の通常の乾いた空気に曝した後、50 kg/cm<sup>2</sup> の圧力を加えてひびわれを閉じ、28日癒着させた場合の実験結果であつて、曝気期間0日の場合の  $\sigma_n$  の百分率で示してある。3日破面を空気に曝せば、ひびわれを梁のほぼ上縁まで入れた場合の  $\sigma_n$  は約 70% に減じ、28日では約 27% に低下し、ひ

びわれをなるべく少なくした場合はそれぞれ約 71% 及び約 47% に低下した。これは主としてコンクリート中のセメントペーストが空気中の炭酸ガスを吸つて破面に炭酸カルシウムの膜ができたためと思われる。予備試験におけるセメントペースト供試体では 3 日間の曝気により  $\sigma_n$  は約 10% に低下し (ひびわれは梁のほぼ上縁まで入っている), モルタルでは約 57% に低下した (ひびわれをなるべく少なくした)。これ等はひびわれの状態, 圧力等が異なるが, 癒着強さの低下はセメントペーストが最もいちじるしく, コンクリートは比較的曝気の影響が少ない。これはセメントペーストの使用量の相異と考えれば当然と思われる。

## 6. 結語

本実験の範囲内では次のことが言えると思われる。

(1) コンクリートに生じたひびわれの深さが癒着強さにいちじるしい影響を及ぼすのであつて, ひびわれを梁のほぼ上縁まで入れた場合の癒着強さは, ひびわれをなるべく少なくした場合の約 60% である。

(2) コンクリート供試体の強度に応じて 5~50kg/cm<sup>2</sup> の圧力を加えて破面を十分密着させれば, 癒着強さは 1.3~13 倍, 平均約 5 倍となり, セメントペースト, モルタルではそれぞれ約 2 倍及び 4 倍となる。

(3) 癒着進行期間が長いほど癒着強さは大であつて, その強くなる状況はコンクリートの強度増加とほぼ同様である。

(4) ひびわれの生じた時の材令が若いほど, 癒着強さは大であつて, ひびわれの生じた時の材令が 3 日以内ならば, 圧力 30 kg/cm<sup>2</sup> 以上で, 癒着強さは同材令のひびわれのない供試体の強度の 1/2 以上に達するが, 1 日では約 1/3 となり, 28 日では 1/10 程度でほとんど癒着しない。

(5) 水セメント重量比が小なるほど, 癒着強さは大であるが, 水セメント重量比が一定で, プラスチック

クでウォークアブルなコンクリートならば, セメント使用量が癒着強さに及ぼす影響は小さい。

(6) 破面を通常乾いた空気に曝したためのコンクリートの癒着強さの低下は, セメントペースト, モルタルほどいちじるしくないが, 破面を 3 日曝せば, 圧力を 50 kg/cm<sup>2</sup> としても, 癒着強さは 2/3 程度となり 28 日では約 1/3 となる。

この研究の実施に当つては, 吉田徳次郎先生, 国分正胤先生より終始御懇篤な御指導, 御鞭撻を賜りました。謹んで厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) D.A. Abrams: Test of 40 feet Reinforced Concrete Highway Bridge A.S.T.M. Vol.13.
- 2) Question Box: Journal of A.C.I. April 1929.
- 3) L. Turner: The Healing of Cement and Concrete. Concrete and Constructional Eng. Feb. 1937.
- 4) 花房氏: コンクリートの龜裂面に於ける自癒作用, セメント界彙報 昭.13.9.
- 5) H. G. Gilkey: The Autogenous Healing of Concretes and Mortars B.S.T.M. Vol. 26. Part II. The Tensile Autogenous Healing of Portland-Cement Mixture A.S.T.M. Vol. 29, Part II. The Effect of Varied Curing Condition on the Compressive Strength of Concretes and Mortars, Journal of A.C.I. Jan. 1926.
- 6) V.C. Danis: Healing in Compression Concrete and Constructional Eng. Feb. 1937.
- 7) 村田二郎: セメントペーストの癒着について, 土木学会誌, 第 37 巻 1 号.

## その他の文献

- H.F. Gonneman: Autogenous Healing. Journal of A.C.I. Jan. 1950.  
Selbstheilung von Beton. Beton und Eisen, 1937, Hf 5, und Hf. 12

(昭.27.11.6)