

注入路内における PC グラウトの w/c に関する 2, 3 の実験

林 正道* 伊藤洋二** 鎌野輝雄***

I. ま え が き

ポストテンショニング方式 PC 桁におけるケーブルホールは、PC 鋼の腐食を防止しあわせて PC 鋼との付着を良好にするために、良質のグラウトで十分に満たされることが必要である。しかし、グラウトの配合・注入管の配置・注入方法などが適切でない場合には、注入路内に空隙を残す危険があり、また、PC 鋼に付着している洗浄水やメタルシースを用いる場合シース内壁に付着している洗浄水がグラウト注入によって完全に除去されないで一部が残留するようなことがあれば、時にはそれだけで凍結による悪影響が生ずる可能性があるし、また、その水が後にグラウトに吸収されればそれだけグラウトの w/c は混合時よりも大きくなる。

本文は、模型シースによる空隙の発生状況、現場桁・試験桁・模型シースなどから採取した硬化グラウトの w/c の試験結果、それから求めた洗浄水の残留量、シース内の PC 鋼の配置とグラウトの注入抵抗などについて述べ、さらに、試験桁から採取したシースの内部状況からセンタースパイラルの使用法について再検討の必要があることを述べたものである。

II. 実 験 方 法

実施した試験の内容は次のとおりである。

1. 現場桁 A より採取した硬化グラウトの水量試験
2. 試験管による各種グラウトの分離水の吸収に関する実験
3. 模型シースによる注入試験およびその硬化グラウトの水量試験
4. 現場桁 B による硬化グラウトの水量試験
5. 現場桁の各シース中の硬化グラウトの水量試験

これらの実験における硬化グラウトの水量試験では、採取したグラウト試料をできるだけ乾燥の生じないように手早く秤量し、さらに、105°C 乾燥重量および 900°C 強熱減量を測定の上、原セメントの強熱減量を補正して全水量と結合水量とを求めた。

試料の大きさは、実験 3~5 ではシースの長さ約 5 cm

で、全断面から試料を採取したので同じ断面内の小部分の水量のバラツキは試験の対象としなかった。また、実験 5 では切断した長さ約 5 cm のグラウトを湿度約 90% の恒温室 (20°C) 内で手早く粉碎し、0.85~0.30 mm 間の粒径のもの 1 g を秤取して乾燥・強熱用試料とした。実験 2~4 では切断したままの塊状または粗粒状の試料をそのまま用いた。なお、実験 1 では塊状試料と粉碎試料の両者について行なった。

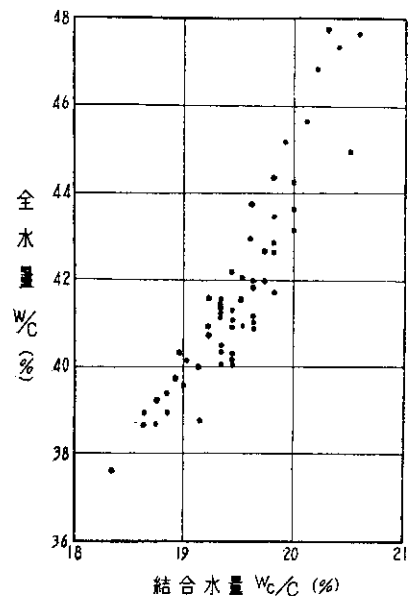


図-1 全水量と結合水量との関係

結合水量を測定した理由は、1) セメントの水和程度を確認するため、2) 図-1 に明らかなように、同一養生条件下においては結合水量と全水量との間に相関関係が認められるので、測定した全水量が同一実験における他のものにくらべて著しい違いがあったとき初期水量の判断の参考にするためなどである。

III. 実験結果とその考察

1. 現場桁 A に関する実験

現場桁 A は、支間 20 m の単純桁で、冬期グラウト注入後約 3 週間でシース沿いに多数のひびわれが発見されたものである。現場資料によれば、グラウトに用いた

*構造研究室副室長 **応用理化学研究室副室長 ***構造研究室、現札幌開発建設部

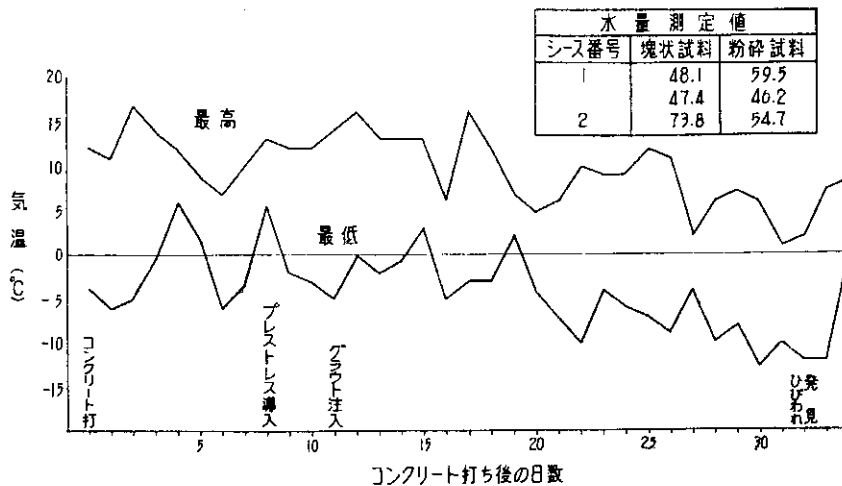


図-2

セメントは早強ポルトランドセメントで、 $w/c = 0.45 \sim 0.50$ 、ポゾリス No. 8、0.25% 混和、1,725 cc の漏斗を用いるいわゆるフロー試験による流過時間 13~15 秒となっているが、グラウト注入後約 6 カ月でシースを破り(写真-1) 取り出した試料をビニール袋に密閉して実験室に運搬し化学分析を行なった結果、使用セメントは早強ポルトランドセメントであるが、水量は図-2 に示すとおり、比較的近接した部分の塊相互間で水量の大きな違いが認められた(図-2 中の塊状とあるのは採取したままの塊状の試料 1 個ずつについて測定したもので、粉碎とあるのは同様の塊を粉碎し化学試験に供したものの 2 個の平

均值である)。これは、分離水が局部的にたまり、その場所でグラウトに吸収されたためと思われる。また、図-2 に示す当時の気象条件を考慮すれば、ひびわれ発見の数日前の最低気温が約 -13°C であり、ひびわれの原因は分離水あるいは十分硬化していないグラウトが凍結によって膨脹したため推定される。ひびわれ発見後間もなくシースを破って内部のグラウトを取り出して見たところ、頁岩を削り取るようなもろさのものがあつたり、白墨が湿っているようなものもあつたといわれている。

2. 試験管による各種グラウトの分離水の吸収に関する実験

水量の多いグラウトが容器中に密閉された場合、その分離水が相当長期間グラウト上面に残留することがあるが、この水がグラウト中に吸収されて外見上水の存在が認められなくなったとき、このグラウト中の上下部の水の分布がどうなっているかは重要な問題である。グラウト上面に分離水が残留していればもちろん凍結による被害の危険があるが、分離水が残留していなくてもグラウトの下部に多量に集まるようなことがあれば、この場合もまた凍結の危険が生ずる。この実験は、グラウト上下

表-1 試験管中のグラウト上下の w/c の差 (材令 28 日) ((上部の w/c) - (下部の w/c), 単位 %)

セメント	w/c (%)	混和材料 なし	P 0.25%	Al		P 0.25% Al 0.0025%	P 0.25% FA 20%
				0.0025%	0.025%		
早強セメント	A	55	3.0	0.3		-0.5	
		50					
		45					
	B	50	0.6	0			
		45					
		40					
		35					
	C	45				4.5	4.5
		40					
普通セメント	D	45	2.0	2.5		9.1	
		40	4.5	0.6			
		35		-0.2			

P: ポゾリス No. 8 Al: アルミ粉 FA: フライアッシュ (内割)

部における水の分布状況を明らかにするために行なったもので、セメントの水和熱試験に用いる $\phi 17 \times 100$ mm のペースト養生用試験管に各種グラウトを填充し、密閉して鉛直に養生した後、これを上中下3つの部分にほぼ3等分して各部の水量を試験した。材令(7, 28, 91日)による差はあまり認められなかったので28日のものについて上下のw/cの差を表-1に示す。

表-1によれば、セメントの種類・混和材料・w/cなどによって上下の水量分布は異なった傾向を示すことが明らかになった。微粒で沈下速度の遅いと考えられる早強セメントでは、w/cが大きくてもはっきりした差は現れないが、普通セメントはw/cの大小による影響が認められ、ポゾリス混入は水量差を小さくするため有効であるが、アルミ粉は混入量が多くなると上下のw/cの差が大きくなるように思われる。

実際のPC桁においては、注入路断面の大きさや形状の違いあるいはシース内壁の材質・構造・PC鋼の配列などによりこの実験結果と必ずしも一致するとは限らないが、水の分布の傾向は類似しているものと考えてよいであろう。

3. 模型シースによる実験

種々の形状のシース模型をビニール管・鉄板などで作り注入試験および硬化グラウトの水量試験を行なった。

(i) 模型実験 I 軟質透明内径32mmのビニール管を図-3のように配置し(PC鋼は用いなかった)一端よりグラウトを注入し、水の分離状況とグラウト表面の状態とを観察した。なお、ビニール管は乾燥したまま用いた。

グラウトは、A社早強セメントを用いたw/c=0.53の混和材料を含まないもので、上下2層式のポンプ付きグラウトミキサーで混合した。混合終了時のグラウト温度は21°Cで、1,725ccの漏斗を流過する時間は18秒であ

った。また、注入終了時のグラウト温度は19.5°C、実験中の室温は日中約15°C、夜間は約5°Cであった。注入終了後はビニール管の両端を木栓で閉じパラフィンで密封し管内の水分損失を防止した。注入終了後は水の分離と移動の状況を観察し、材令7日と28日で全長の1/2ずつをビニール管とともに金切鋸で長さ約5cmに切断の上、管から硬化グラウトを取り出し直ちに秤量、w/c算出の基礎とした。材令7日で中央部を切断した後の材令28日試験用のものは切口をビニールテープで巻きパラフィンで密封して水分の損失を防止した。

グラウト注入終了後まもなく材料の分離が生じ始め、水平部では時々小さな気泡が管の両端に移動し、傾斜部では気泡が上方に移動すると同時に両端部に分離水が徐々にたまり始め、数時間後には分離水が両端に約1.5cmの深さでたまったのが観測された。注入終了後3時間45分で水平部上面に縦方向のひびわれが認められたが、これはグラウトの沈下収縮によるものと思われる。また、その後約1時間で傾斜部にも同様のひびわれが一部に認められた。これらのひびわれは深さが浅く表面のみと思われるが、桁自体にどのような影響を与えるかは不明である。しかし、w/cの大きいグラウトでは分離水がこの部分に多くたまり、これが後にグラウトに吸収されて局部的にw/cを大きくし、凍結に対する安定性を低下させることも想像される。この点からも収縮の小さいグラウトの使用が望まれる。

両端にたまった分離水は、一方は翌朝(注入終了後17時間)全く認められなくなったが、他方は前夜の分離水量とはほとんど変わっていなかった。しかし、この分離水も注入後27時間ではいく分減少し41時間(注入の翌々日朝)では全く認められなかった。これらのことから、注入後17時間で認められなくなった分離水はグラウトに

徐々に吸収されたのではなく、グラウトの収縮・室温の変化などにもとづく管とグラウトとのわずかの隙間から流下しグラウト中に吸収されたものと思われる。したがって、表-3に示すように比較的w/cに大きなバラッキのないグラウトとなったものであろう。この点、実際の鋼製シース内では内壁がビニール管と異なるので一様なw/cのグラウトがえられるかどうかは疑問である。

(ii) 模型実験 II 実験Iと同じく内径32mmの透明ビニール管

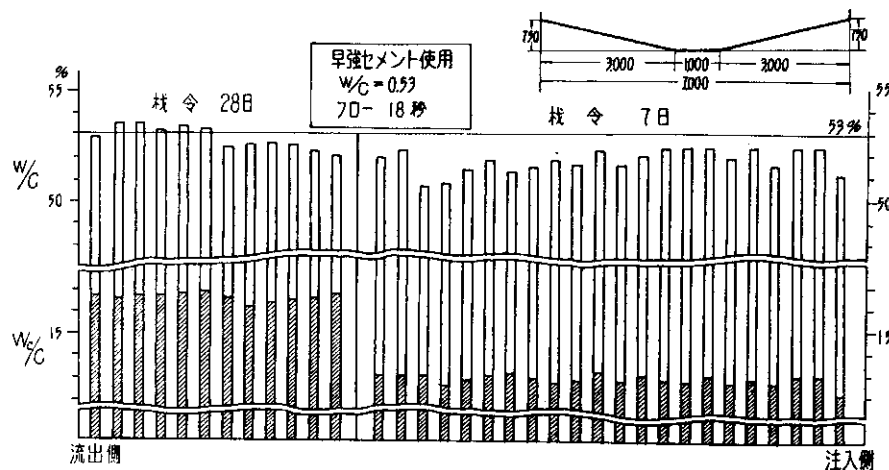


図-3

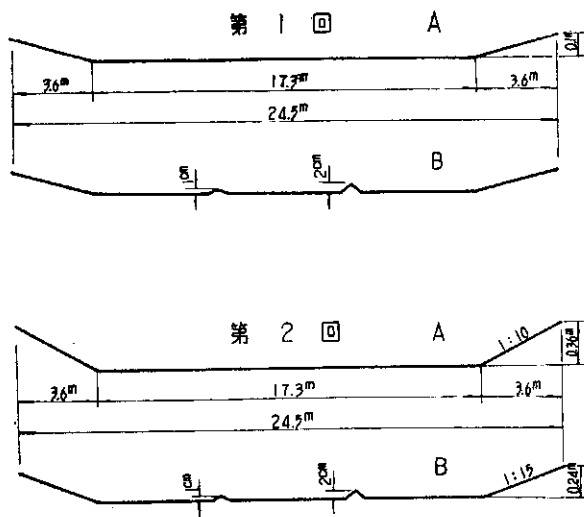


図-4

を用い、図-4に示すとおり水平部の長い全長24.5mの管A、B2本とし、Bには、上下の波打ちのあるものを対象として水平部に1cmと2cmの突起を各1箇所設け、A、Bとも2回使用した。

第1回のグラウトは、B社普通セメントを用いた $w/c = 0.55$ の混和材料を含まないもので、グラウト温度23°C、沈入⁽¹⁾13秒という流動性のきわめて良好なものであった。一端からグラウトを注入し、終了後は両端を木栓で閉じたが、グラウト混合中に混入する気泡がビニール管中各所に小気泡として上面に分散残留するのが、A、Bともに認められた(写真-2)。しかし、実験Iで認められたような水平部気泡の端部への移動はほとんど認められなかった。これは、実験Iのような水平部の短いシースでは気泡が傾斜部へ移動するが、水平部が長い場合には傾斜部に近いごく短い区間のみが移動の対象となり、傾斜部から離れた水平部では傾斜部の影響をほとんど受けないからであると考えられる。また、実験Iで認められたような多量の分離水が管の両端高所に集まることもなく、水平部の分離水は水平部に位置し端部には傾斜部の分離水が集まる程度であった。これは、シースの傾斜によってグラウトの沈下収縮が異なるためであろう。シースの波打ちとして設けた管Bの突起箇所では、水平部よりも分離水が幾分多く認められた。また、2cmの突起箇所では、注入終了後まもなく上面に横断方向のひびわれが多数発生したが、これはグラウトが高所から低所へ沈下移動するのを管壁との摩擦によってある程度拘束されるからであると思われる。また、水平部上面には縦方向に多数のひびわれが認められた(写真-2)が、実験Iの場合と同様の理由によるものと思われる。

第2回のグラウト注入は、上述の試験終了後ビニール

管中のグラウトを洗い流して行なった。したがって、管の透明度は幾分低下し、内壁には若干の水滴が付着していた。管の長さは第1回と同じであるが、端部の勾配をAは1/10、Bは1/15とした。

グラウトの材料・配合は第1回のもと同じで、混合終了時のグラウト温度は23°Cであった。なお、このグラウトの押ふた缶による時間の分離水は5.2%、24時間の収縮率は5.8%であった。

管Aの注入端1/10下り勾配部では、注入時に大きな気泡が残る傾向があるが、Bの1/15下り勾配のように緩勾配の場合には気泡が残らないことが明らかとなった。これは、グラウトの流動性・注入速度・注入路の勾配・注入路の摩擦抵抗・排気孔の有無などによって定まるものと思われる。すなわち、下り勾配部の全断面を満たしながらグラウトが流下すれば気泡は残らないが、比較的急勾配でグラウトが全断面を満たさず自然流下するような場合には、

図-5に示すようにグラウト流の先端が注入路の水平部に達して全断面を満たしてしまうため傾斜部に空隙

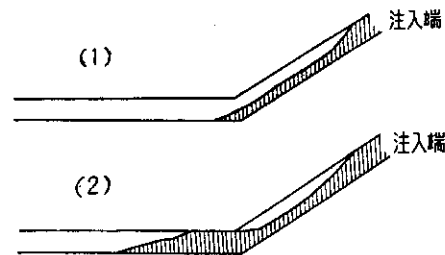


図-5

が残留するのである。この場合、注入を続けてもグラウトだけが流出端へ移動して空隙はそのまま残留する。したがって、注入路内に空隙を残さないためには、注入路の全断面を満たしながら注入する必要がある。このためには、注入路の最低点に設けた注入口から注入する必要がある。やむをえない場合には、注入速度を大きくすることなどを考えなければならない。あるいは、グラウトの損失は大きくなるが注入路内に水を填充したまま注入する必要の生じることもある。

(イ) 模型実験 III 実験I、IIでは注入路内にPC鋼を入れなかったが、この実験では実際のメタルシース(フ

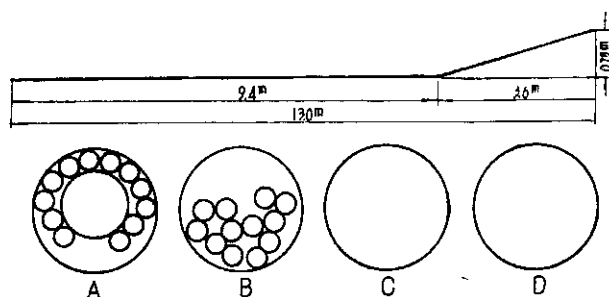


図-6

表-2 注入路構造と注入時間

記号	シース材料	内径 (mm)	鉄線	センター スパイラル	注入時間 (秒)	摘 要
A	ビニール	32	あり	あり	35	鉄線を 50 cm ごとに結束鉄線で結束
B	ビニール	32	あり	—	32	鉄線を 50 cm ごとにブラケットで結束
C	メタル	32	—	—	27	フレキシブルシース
D	ビニール	32	—	—	27	

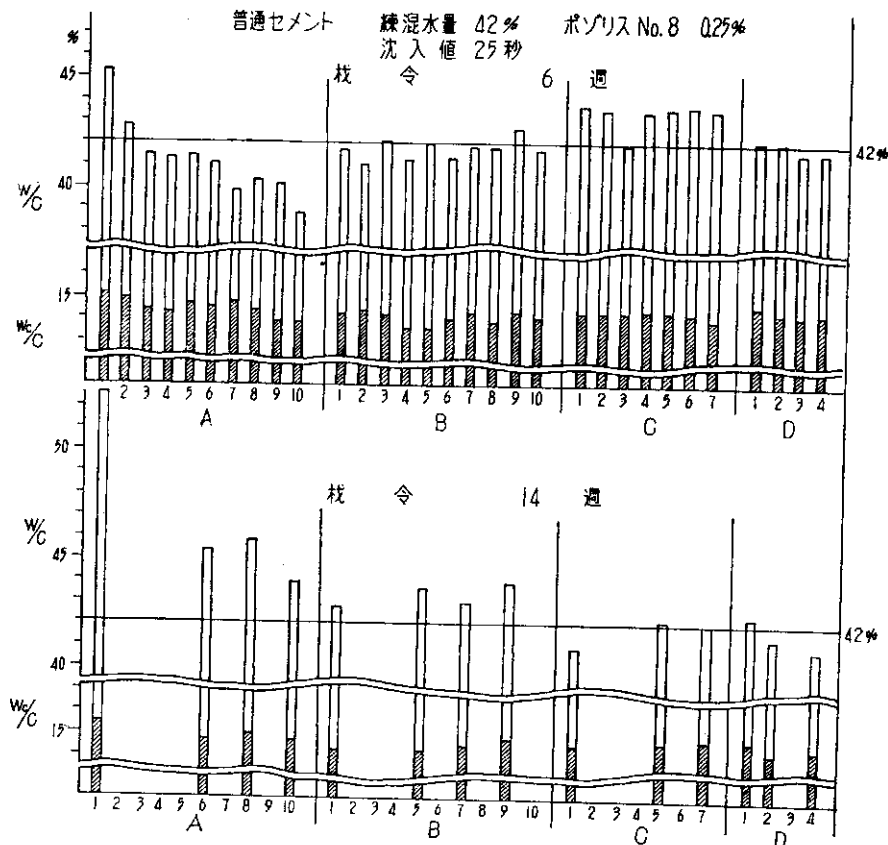


図-7

フレキシブルシース)をも用い、図-6に示すように鋼線の代わりに鉄線(12本)を入れたもの入れないもの、および鉄線の配置を良好にするためにセンタースパイラル(写真-3)のあるものとセンタースパイラルがなく鉄線のみを数箇所縛ってまとめたもの(写真-4)など(写真-5)4種について、注入抵抗・硬化グラウトの水量試験を行ない、センタースパイラルの有無による鋼線間に残留する水量の差、凹凸のあるメタルシースの内壁に残留する水量などを試験した。グラウトはA社普通セメントにポゾリス No. 8を0.25%混和した $w/c=0.42$ 、沈入25秒という比較的流動性の良いものであった。これら4種の注入路構造と注入所要時間を表-2に示す。

表-2から、鉄線の存在は明らかに注入抵抗を増大させ

るが、メタルシースをビニール管とでは差は認められなかった。また、センタースパイラルは鉄線を円形に配列する(A)ので鉄線の全周がグラウト注入に抵抗を与えるのに対し、センタースパイラルを用いないBの場合にはグラウトと接触しない面があってグラウトの注入抵抗が減少するから、AとBとが注入時間に差が生じたものと解される。4.で後述する現場桁Bと同じ多数の桁(センタースパイラルのあるものとなないものおよびフレキシブルのメタルシースと平鉄板製シースとを用いた)について注入所要時間を測定した結果でも同様の傾向を示した。しかし、注入抵抗の小さい方が注入しやすいのは当然であるが、反面細部まで注入されないおそれもあることを考えなければならない。

屋外で6週間養生の後、シースを切断して(写真-6)長さ13mの全長にわたる水量の分布を測定した結果を図-7の上方に示す。また、試料採取後、切断面を密閉して室内に保存した残部(長さいずれも約1.5m)の中央から鉄線を切断しないで採取した試料の材令14週の測定結果を下方に示す。材令6週の鉄線のあるA、Bは切断時に鉄線がかなり加熱され、グラウト中に水分が蒸発したもので、 w/c が注入時よりも概して小さい。材令14周の場合には、鉄線を切断しないでグラウト試料を採取したので材令6周におけるような試料採取時の鉄線加熱による水分変化は考えられないが、メタルシースCでは水量が材令6周のものよりも幾分少なく、室内放置期間中にフレキシブル構造の帯鉄板の隙間から水分が多少失われたのではないかと推定される。

4. 現場桁 B に関する実験

表-3によれば、 $w/c=0.38$ のグラウトを注入した①～

また、別に桁をこわしてシース ②, ⑤, ⑧ を取り出し、図-7 に示した位置でケーブルを切断したが、その切口を写真-7 に示す。これらのケーブルはセンタースパイラル

を用いていなかったの、各 PC 鋼線はプレストレス導入時に束になりさらにケーブルの曲げ上げ、シースのわずかの波打ちなどのためにシース中央に位置することが少なくシース周辺に集まってきわめて不規則な配列になっている。各 PC 鋼線が互に接触して束になっている場合、鋼線相互の間隙にグラウトが十分注入されていない部分があり、鋼線の腐食防止上適当なスペーサーを用いることが必要であると思われる。なお、シースの切断時にシース内部に分離水が残っていた例はなかったので、既述のような配合のグラウトでは長期間分離水がシース内に残留することはないと考えてよい。

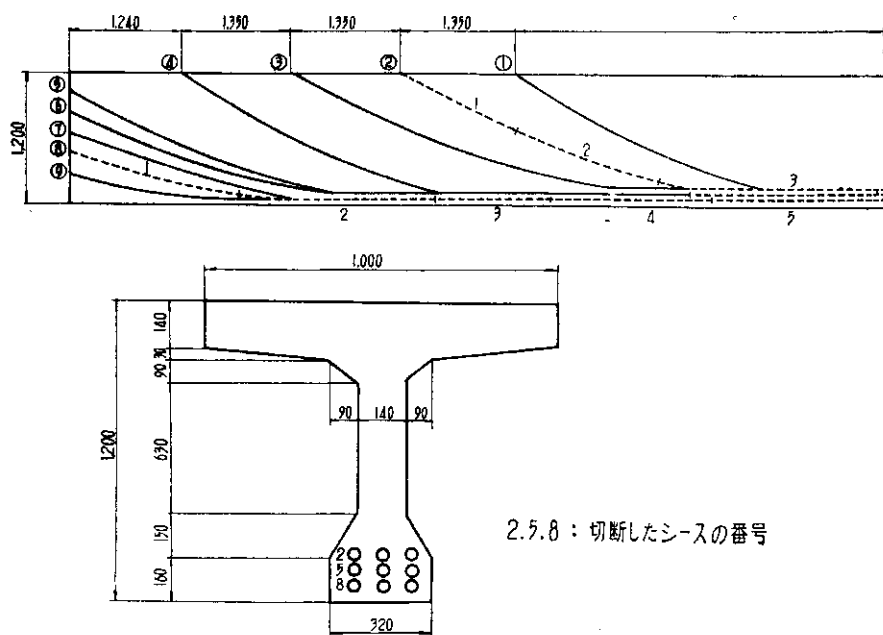


图-8

表一3 現場桁 B から採取した硬化グラウトの水量試験結果 (%)

シ ー ス 番 号	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
混合時グラウトの w/c	38	38	38	38	38	38	38	40	40
硬化グラウトの w/c	40.6	39.6	40.4	39.9	30.5	36.4	39.1	41.6	40.2
硬化グラウトの結合水	18.3	17.9	18.4	18.4	17.9	16.7	17.8	18.0	18.0

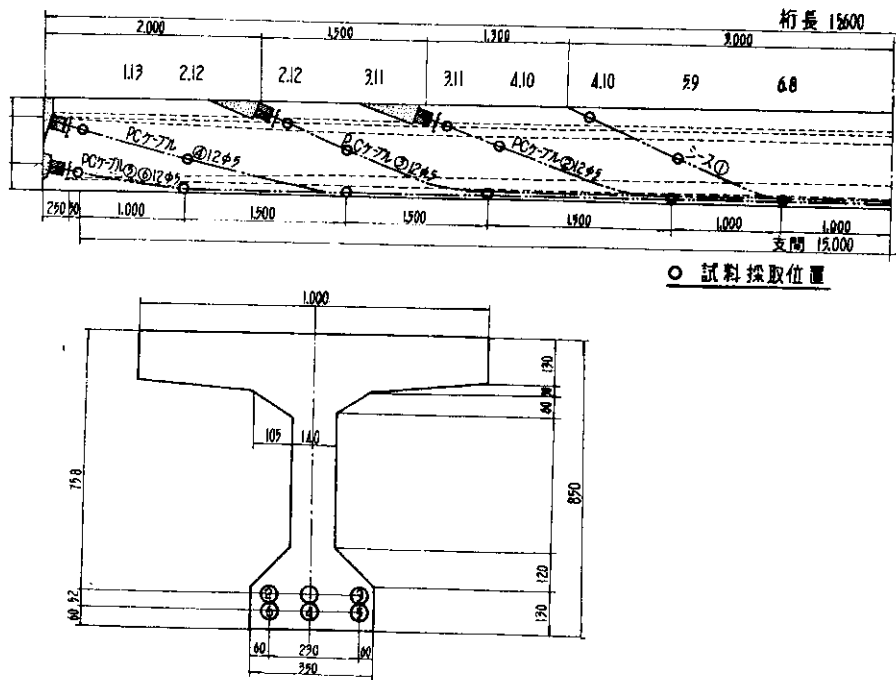


図-9, 10

5. 試験桁による実験

試験桁は図-9, 10に示す支間15mの Freyssinet 方式単純桁で、直径32mmのワインディングシースを用いた。ケーブルホールは6個あるが、①はPCケーブルのないもので、②～⑥の5個はPCケーブルが入っている。5個のケーブルのうち②～⑤はセンタースパイラル(線径2.0mm, コイルの使用ピッチ30mm)を用いたもので、プレストレス導入直後①～⑥のすべてにグラ

ウトを注入した。

グラウトは、注入前にシース内を水で十分洗浄し Compressed air でこの水を排除(この方法は各国で一般に行なわれている²⁾)したのちケーブルホールの一端から他端に向かって膜ポンプで注入した。グラウトは A 社普通セメントにポゾリス No. 8 を0.25% 混和したもので、w/c は0.375 と0.395 との2種とした。

グラウト注入後16ヵ月経過してから桁をこわしシースを取り出して(写真-8)、図-9に示す位置の硬化グラウト試料について水量試験を行なった。試験結果は図-11のとおりである。図-11によれば、注入側では各ケーブルホールとも大きな水量のバラッキはない

が、流出側では相当多量の水分が測定された。これは、注入時の overflow が不足であったために洗浄水の一部が流出しつくさずグラウト中に混合残留したためと思われる。この場合の注入終了の判定は流出グラウトの観察によって行なったものであるが、きわめて不十分であったといえる。注入終了の判定は、できれば流出グラウトの流動性試験などによって慎重に行なうことが望ましい。ラジオアイソトープの利用によって確認しようとの

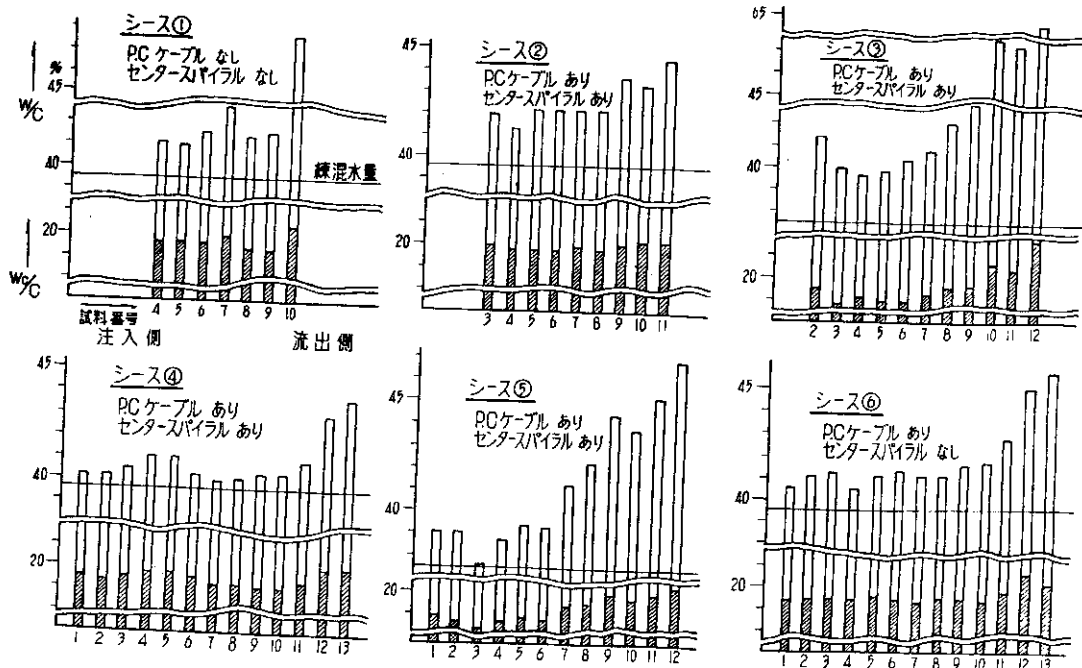


図-11

研究もあるほどである³⁾。上述のように注入側の水量はバラツキは少ないが、混合時の w/c よりも 1~2% 大きく、これは既述の模型実験 III・現場桁 B の場合と同様に凹凸のあるメタルシースの内壁に残留する水分の影響と思われる。このような問題に関する研究はきわめて乏しいが PC 鋼に付着する水膜の厚さは平均 0.06 mm であるとの報告がある⁴⁾。また、注入したグラウトは 16 カ月経過しても現場桁 B の場合と同様に注入当初の水量を保持しており、シース内では乾燥・湿潤などによる水分の変化はほとんど生じないと考えてよい。

一部流出端のグラウト上層面に厚さ数 mm の白色層が発見され、分析の結果 CO₂ の存在が認められた。この部分の強熱減量は 48.7%、そのうち CO₂ は 9.1% (Schrötter 炭酸定量装置による) で、原セメントの強熱減量を 0.70% としてセメント量に対する百分率で表わすと H₂O 76.0%, CO₂ 17.6% となる。この CO₂ の出所は明らかでないがセメント中の風化生成物の一部が水量の多い部分でレイタンスとなって浮かび上がり固化した結果とも考えられる。

取り出したシース中における PC 鋼線の配列状況を写真-9, 10 に示す。これによれば、センタースパイラルを用いないシースでは PC 鋼線は現場桁 B の場合と同様に束になってシースの周辺に片寄る傾向を示しており、かつ、密集した線の間隙に十分グラウトが行きわたっていない箇所が見受けられる。センタースパイラルを用いたシースではこの点いく分改良されてはいるが、曲線部では緊張の際スパイラルがつぶされたり片側に寄ったりして十分その効果をあげていないのが見られる。したがって、センタースパイラルの使用方法については再検討の必要があるように思われる。なお、シース切断箇所は多数あったが、グラウトの分離水が残留していた例はなかった。

また、下縁コンクリート中に埋設した自動記録の温度計感熱部 6 箇所 (写真-11, 12) によって測定された冬期間のコンクリート温度は、外気温と幾分時間的ずれはあるが、ほとんど同じ温度に達しており、グラウト温度の最低は外気温の最低に等しいものと考えらるべきである。

IV. む す び

シース内へ注入されたグラウトの材料分離・空隙の残留・材令 1 年数カ月の硬化グラウトの w/c などについて

行なった実験の結果を要約すれば、

1) 注入終了の判定は、経験と勘に頼る方法では不十分であり、流出グラウトの流動性試験を行なうなど実験的に確認することが望ましい。

2) 注入路を水で洗浄した場合の注入路内のグラウトの w/c は注入時の w/c よりも 2~3% 程度大きくなることを予想しなければならない。

3) 傾斜した注入路における下向きの注入は空隙を残す危険があるので、注入路の最低点から注入することが望ましい。

4) 注入路内のグラウトは、かなり長期間乾燥・吸湿などによって水分の変化を受けない。

5) PC 鋼をグラウトで十分に包むためには spacer を用いることが必要であり、この spacer は曲折部では緊張分力に抵抗できるだけの強さを有しかつ PC 鋼線の位置を正確に保つことのできるものでなければならない。

6) グラウトの材料分離による水量の上下差は普通用いられている水量の範囲 (普通ポルト 35~40%, 早強ポルト 40~45%) では考える必要はない。また、ポゾリスを混和した場合には分離水が長期間シース内に残留することもない。

7) I 型断面のような薄い部材におけるグラウトの冬期間の温度はほぼ外気温と同じであると考えなければならない。

文 献

- 1) 北海道土木技術会：PC グラウト注入施工指針 (昭和 34 年 2 月改正) (セメントコンクリート No. 158, 1960-4)。
- 2) G. F. Janssonius: Progress in site techniques (Session II General Report, 3 rd Congress of FIP, 1958)。
- 3) V. R. Boardman: An investigation into grout mixes and the use of radio-isotopes to determine the efficiency of grouting (3 rd Congress of FIP, 1958)。
- 4) Oskar Vörter: Der Einpressmörtel, die Einpresstechnik und die Spanngliedkonstruktion (Beton und Stahlbetonbau, 1959-3)。

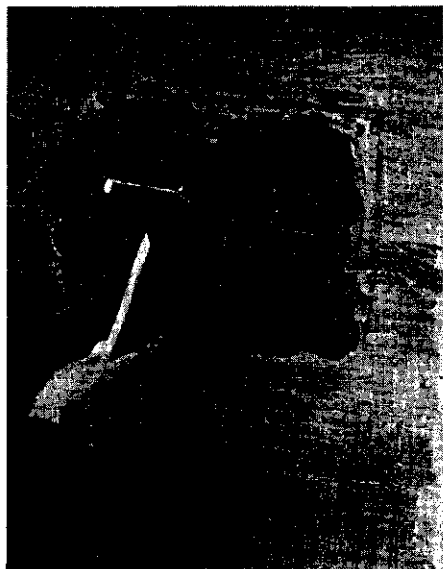


写真-1

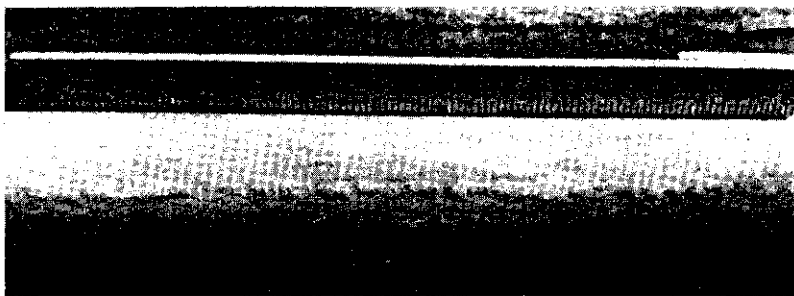


写真-2

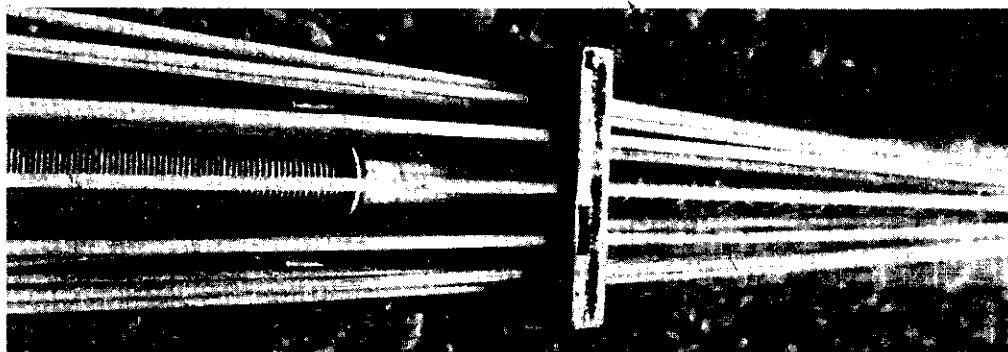


写真-3

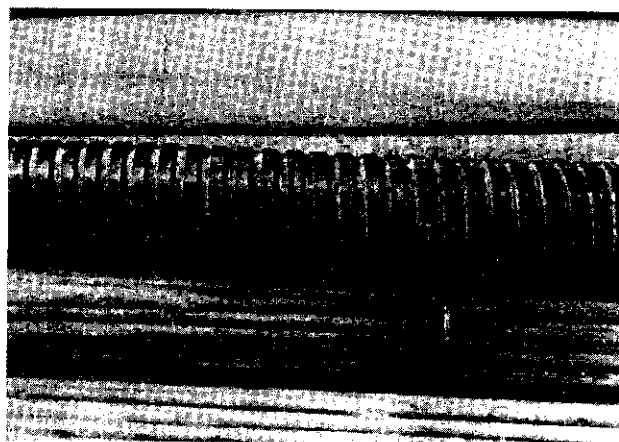


写真-4

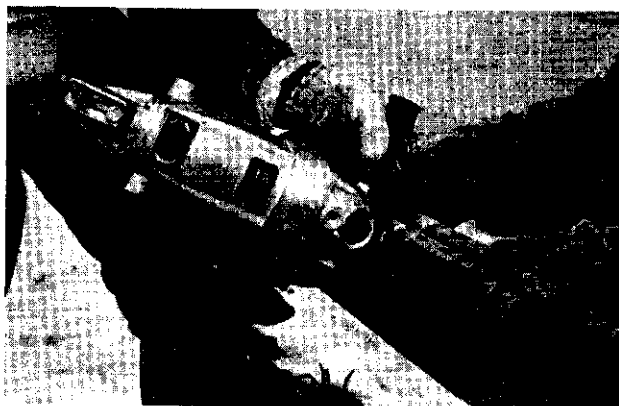


写真-6

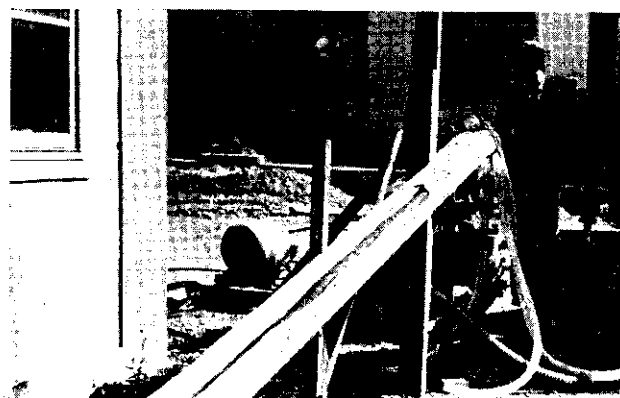


写真-5

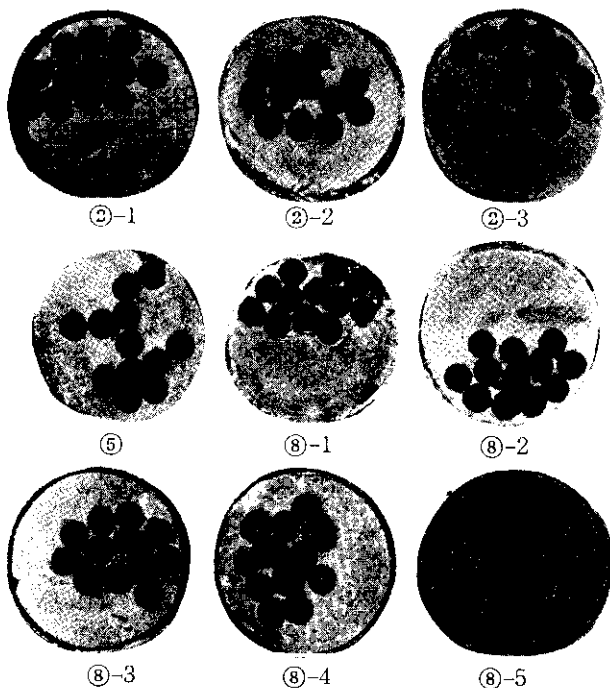


写真-7



写真-8

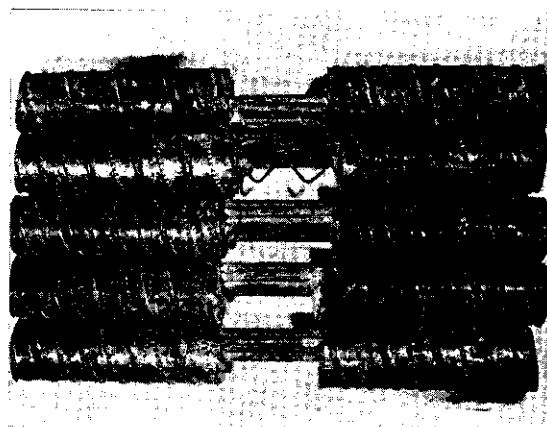


写真-9. 1

位置
ス
②-4
③-6
③-7
⑥-2
⑥-4

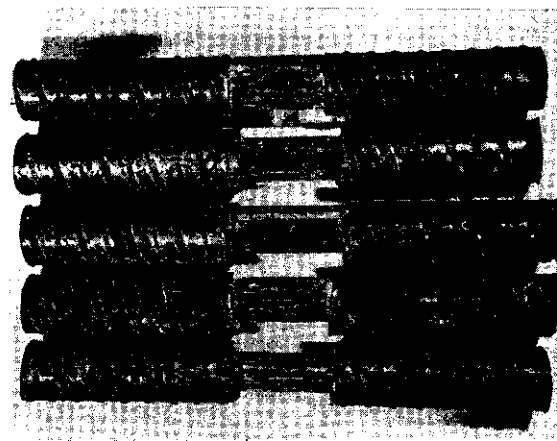


写真-9. 2

位置
ス
②-4
③-6
③-7
⑥-2
⑥-4



写真-10. 1

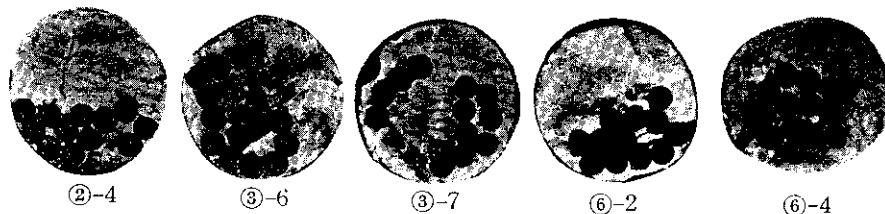


写真-10. 2

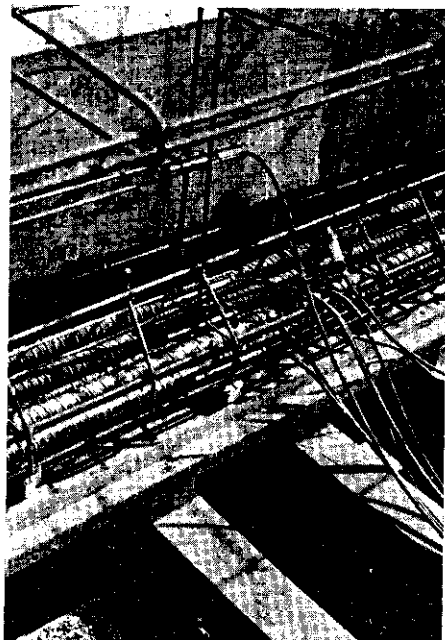


写真-11

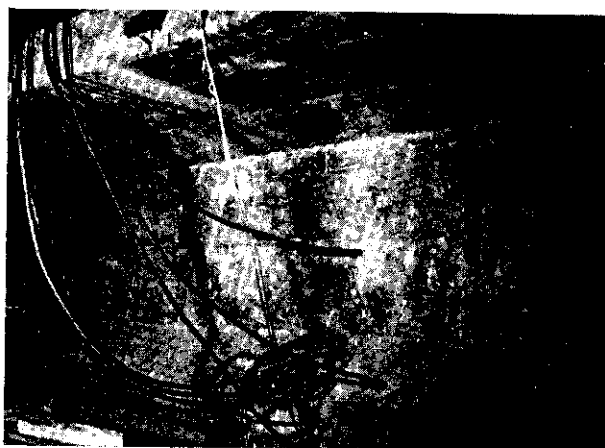


写真-12