

PC グラウト

(2)

樋 口 芳 朗*

3. 明らかにされてきた問題点

(2) 凍結に対する安定性

PCグラウトが重視されるきっかけとなったのは、PC部材に生じた縦ひびわれであったといえる。この間の事情を1951年から1961年ころまでの欧州の文献からうかがうと、つぎのとおりである。

1951年春に西ドイツでPCのアーチつり材に縦ひびわれのはいったのが発見された。このひびわれは、静的あるいは動的載荷が原因となったものでないことが試験の結果判明したので、気温低下の結果としてグラウトが凍結膨張したことが原因ではないかと疑われた。というのは、注入後12時間で気温が -1.5°C 、8日後に -3°C 、21日後 -6°C に下がったからである。また1953年秋には、多径間のPC橋と同様な縦ひびわれが発見されたが、この橋でも注入後あるスパンでは12時間で気温が -2°C に低下し、この温度が7日まで続き、その後は -15°C までになっていた。Röhnischは、縦ひびわれの原因がグラウトの凍結によって起こりうることを実験で確かめ、空気量と未結合水の比が9%以上であると凍結によるひびわれの発生を防ぐことができると主張した(後に9%以上を12%以上と改めている)。

PC国際連盟(FIP)の第1回会議が1953年にロンドンで開かれたときには、PCグラウトについての論文は発表されていないが、第2回会議が1955年にアムステルダムで開かれたときには5論文、第3回会議が1958年にベルリンで開かれたときには5論文が発表されるというように世界的関心を呼ぶようになり、1959年にはアムステルダムでRILEM-FIPの合同PCグラウト会議、1961年には北欧でPCグラウトだけについての国際会議が開かれるというように発展していった。

以上で紹介したPCグラウトについての異常なまでの関心は、以後薄れはじめたように判断される。これはすでに紹介したように、各国で示方書あるいは施工指針が作成され一応の基準が示されたことにもよると思われる

* 工博 国鉄鉄道技術研究所 構造物研究室長

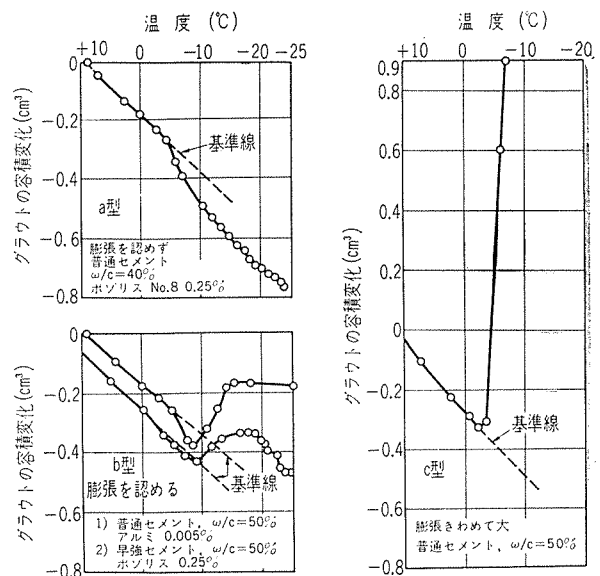
が、PCグラウトの研究が活発化した原因である凍結安定性についての検討がほぼ一段落し、目安がつけられたことによると思われる。この目安の主なものは、1) シース内を水で満たしておいて凍結させてもひびわれを生じない場合もあり、PC部材の縦ひびわれはPCグラウトの凍結だけが原因となつて生じたものではないこと、2) PCグラウトの空気量/未結合水の値が一定値以上であると、凍結に対してグラウトは安定であること、3) PCグラウトを注入してから一定期間以上一定温度以上で養生すればグラウトは凍結に対して安定となること、の3点である。以下順を追って研究結果を紹介する(日本鉄道技術協会から出された「PC桁の耐寒性の研究」*は貴重な資料を多数収録している)。

a) PC部材の縦ひびわれとPCグラウトの凍結膨張との関連

Röhnisch・1955 : シース上部にたまった水は、PC部材の凍結に対する抵抗性は重要な意義をもたないことが実験的に確かめられた。

横道英雄・1960 : 多くのグラウトにつき実測した結果 -25°C までに対する容積変化曲線には図-1に示すような3つの型のあることがわかった。これは、いずれも -5°C 付近まではほぼ直線となっているが、これはコンクリートの線膨張係数から推定しうる線と大体一致して

図-1 凍結安定性試験におけるグラウト容積変化線の例(横道英雄)



いることがわかったので、この直線の延長を基準線とするとき、容積変化曲線がこれより上の方に出なければ膨張を示さないと認定してよい。したがって図-1のa型

* 日本国有鉄道の委託を受けた日本鉄道技術協会が、国分東大教授を委員長、横道北大教授ほかを委員に委嘱して検討した結果、昭和36年3月、昭和37年3月、昭和38年3月の3回に分けて提出した報告書をさす。

はこれに該当するので“膨張を認めない”と認定しうるのに対し、b型は“膨張を認める”と認定すべく、c型はいちじるしく基準線より離れてその上方に出ているので“膨張はきわめて大である”と認定すべきである。そしてこれらのグラウトを使用した場合、a型のものではP C桁にひびわれを生ずるおそれがないのに対し、b型ではそのおそれがあり、c型ではいちじるしく発生するものと予想される。試験用P C桁(15×15×80 cm)を低温室において-25°Cに下げた場合の代表的な試験例によると、a型のグラウトを用いた場合は、ひびわれがなく、b型を用いた場合はひびわれが生じ、c型を用いた場合は特にいちじるしいことがわかった。グラウトの収縮によってシース内部に空げきが生ずれば、凍結圧を減じて凍害に有利であるとするものもあるが、これは誤りである。たとえば、ひびわれの生じた試験桁から取り出したシースの断面を見ると、収縮または注入施工の不備によって生じた空げきがあっても、ひびわれの防止に効果のないことが示されていた。すなわち、凍害の発生はグラウトそのものの凍結安定性によるものであることがわかるのである。

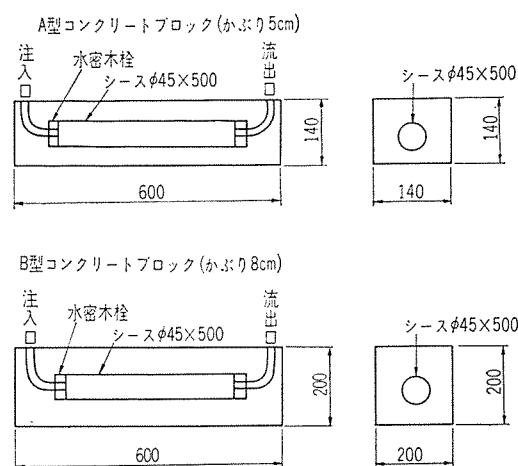
林 正道・1961：シースの直径 d を3~6 cm、かぶり i を2.75~12.75 cmと変化させて、グラウト注入路内に発生する内圧が、かぶりコンクリートのひびわれにおよぼす影響をしらべた実験結果を要約するとつぎのとおりである。

内圧によるコンクリートのひずみは、かぶりの最小なコンクリート面に大きく発生するが、シース中心線に最大ひずみが生じるとは限らない。シース側コンクリート外表面のひずみは、シース付近が引張りで最大であり、シースから離れば、シースの位置にもよるが、ひずみが急に小さくなって圧縮ひずみの生じる部分があり、さらに離れば圧縮ひずみは小さくなる。プレストレスを与えた場合、種々の原因でコンクリートに2次応力の生じることがある。この2次応力は、場合によってはかなり大きく、かぶりコンクリートを破壊することがある。したがってシースは波打ちの生じないように十分注意して配置する必要がある。かぶり i とシース径との比 i/d とひびわれ発生時の内圧との関係は、 $i/d=0.7\sim 1.5$ の実用上の範囲ではほぼ直線と考えてよい。したがって、かぶりはなるべく大きく、シース径はなるべく小さくした方が有利であり、 i/d は少なくとも1.0以上、できれば1.5以上にとることが望ましい。プレストレスを与えた場合のかぶり i とシース径との比 i/d と、ひびわれ発生時の内圧との関係は、プレストレスを与えない場合のような明瞭な関係は得られないが、低下の関係は認められる。これはプレストレスを与えることによって生じるポアソ

ン比にもとづく横ひずみ、シースの波打ちなどによるかぶりコンクリートに生じる2次応力などに起因しているものと思われる。これらの結果から、かりに内面にひびわれが生じても外面には生じないようにするため、スターラップの増量、径の小さいものを小さなピッチで配置することなどが望ましい。

杉田秀夫・1960：図-2に示した2種類のコンクリートブロックを、 $w/c=34\%$ 、 $S/A=36\%$ 、C(早強セメン

図-2 凍結試験用ブロック(杉田秀夫)



ト)=450 kg/m³、ポゾリス No. 10 および塩化カルシウムを各セメントの1%混和としたコンクリートでつくって3日間蒸気養生した($\sigma_3=446$, $\sigma_7=550$, $\sigma_{28}=645$ kg/cm²)。グラウトは w/c を40, 55, 70%の3種、セメントを普通ポルトランド、早強ポルトランドの2種、防凍剤をアルコール、Stan Vac不凍液の2種、グラウトの養生日数を0, 3, 5, 7日の4種(養生室温は+9°C~16°C)とした。グラウトに対する所定の養生日数を経過したのちブロックは戸外(-12~+3°Cまでの範囲で最低温度は変動した)に放置されたが、結局ひびわれの認められたブロックはなかった。グラウトの代りに水を注入したブロックにおいても水の凍結していることが確認されたにもかかわらずブロックにひびわれは認められなかった。混合後ただちに屋外に放置したグラウトは、防凍剤を使用しなかったものは全部凍結した。ひびわれの生じなかった原因としては、試験時期がおくれてもっとも気温の下がる時期をはずれてしまったこと、コンクリートブロックの強度が大となりすぎたこと、シースのかぶりが大きかったこと、ブロックにプレストレスが導入されていなかったことなどがあげられる。

国鉄東京工務局、鉄道技術研究所・1963：P C桁にグラウトを注入凍結させ、ひびわれ発生要因の分析を行なった。ひびわれ発生因子として、かぶり、グラウトの w/c 、グラウトの養生状態、シースの種類、シースの4つを考え、各因

表-4

因子	水準	1	2	3
A かぶり (cm)		A ₁ = 2	A ₂ = 3	A ₃ = 5
B グラウトの w/c (%)		B ₁ =51	B ₂ =34	B ₃ =35
C 5°C としたグラウトの養生日数		C ₁ = 2	C ₂ = 3	C ₃ = 5
D シース		D ₁ = 1	D ₂ = ワイン デイン グ	D ₃ =なし

子について表-4のような水準をとるよう計画した。

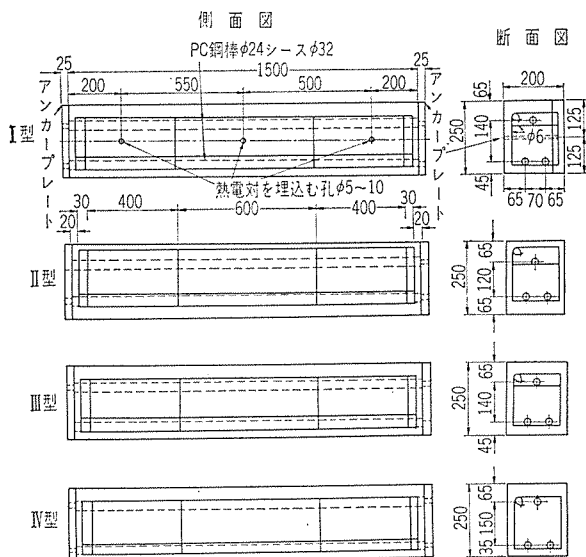
しかし、0,0'桁を用いて行なった予備試験の結果、ひびわれ発生因子をよりシビアにする必要が認められたので、グラウト養生日数を 5°C、2・3・5 日の3水準と計画したのを 5°C、1・3・5 日に変更した。結局試験桁は表-5 の条件で製作した。

試験桁は 図-3 に示すとおりである。グラウトの配合

表-5

桁番号	かぶり A	グラウトの w/c B	養生 C	シース D
0,0'	A ₂			D ₂
1,1'	A ₁	B ₁	C ₁	D ₁
2,2'	A ₁	B ₂	C ₂	D ₂
3,3'	A ₁	B ₃	C ₃	D ₃
4,4'	A ₂	B ₁	C ₂	D ₃
5,5'	A ₂	B ₂	C ₃	D ₁
6,6'	A ₂	B ₃	C ₁	D ₂
7,7'	A ₃	B ₁	C ₃	D ₂
8,8'	A ₃	B ₂	C ₁	D ₃
9,9'	A ₃	B ₃	C ₂	D ₁

図-3 凍結試験用 PC 桁



粗骨材の最大寸法 mm	スランブの範囲 cm	水セメント比 %	細骨材率 %	単 位 量 kg			
				水	セメント	細骨材	粗骨材
25	5±2	39	43.5	160	410	185	1060

セメント：早強ポルトランドセメント
 細骨材：相模川産，FM=3.37，比重 2.64
 粗骨材：多摩川産原石を砕いた碎石，FM=6.68，比重 2.65

表-6

w/c (%)	普通ポルトランドセメント (kg)	水 (kg)	ボゾリス No.8 (g)	200メッシュアルミ粉 (g)
51	50	25.5	125	3.5
43	50	21.5	125	3.5
35	50	17.5	125	3.5

w/c (%)	フリージング率 (%)		膨張率 (%)		フロー (秒)	グラウト度 (°C)	気温 (°C)	圧縮強度 σ ₂₈ (kg/cm ²)	
	3 h	20 h	3 h	20 h				抑制	自由
51	3.6	3.7	2.8	1.7	4.1	12.0~12.2	2.5~5	194	192
43	3.0	2.8	4.9	5.5	5.1	13.5~15.5	5~6	261	242
35	2.4	0	6.5	7.3	24.6	13.2~16.0	5~6	328	276

図-4 試験用桁へのワイヤーゲージ貼付位置

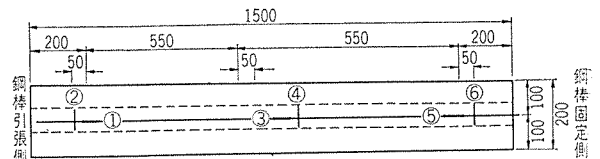


表-7

桁番号	かぶり (cm)	シース	(①+⑤)/2	(②+⑥)/2	③	④				
1'	2	ユ	608	-250	636	-104				
2'	〃	ワ	683	667	-273	-248	719	636	-145	-102
3'	〃	なし	710	-200	550	-57				
4'	3	なし	638	-193	649	-97				
5'	〃	ユ	664	638	-234	-211	594	642	-116	-111
6'	〃	ワ	614	-206	683	-121				
7'	〃	ワ	655	-161	627	-118				
8'	〃	なし	642	639	-200	-181	584	610	-105	-117
9'	〃	ユ	608	-180	617	-128				

および性質は表-6のとおりである (2分練りませ)。

養生後コンクリートが所定の強度 350 kg/cm² を有するのを確認の上緊張を行なった。図-4 のようにワイヤーストレインゲージを貼付してひずみ (10⁻⁶) を測定した結果は表-7のとおりである。

桁端部では、応力分布が複雑であるからさらに多数のゲージを貼付して測定を行なったところ、プレストレスによる圧縮応力が桁中央部と比べて大きいこと、プレストレス導入にともなう横ひずみは中央部に比較して相当大きく、アンカープレートに近づくにつれてその影響は大きいこと、かぶり 2 cm、プレストレス 200 kg/cm² の場合で横ひずみ 620×10⁻⁶ という実測値も得られることなどがわかった。

試験桁にグラウトを注入し所定の養生を行なったのち、桁を低温室に入れ、+5°C から -35°C まで約6時間で低下させ、試験桁のひずみ (桁と直角方向)、温度、ひびわれを観測した (養生温度が 5°C で養生日数が4日以内のグラウトは、-4°C あたりで凍結が始まり、約-35°C で完全に凍結してしまうことがあらかじめ確かめられた)。実験の結果、グラウトの凍結膨張が認められたという桁はないこと、グラウトの代りに水を注入した場合でも、凍結による桁表面への影響は現われないこ

と、凍結試験前にひびわれのはいった桁の場合でも、このひびわれは凍結試験前後を通じて進行しないことなどが確かめられた。

グラウトの凍結による強度低下も同時に試験され、養生時間が5時間のグラウトが凍結を受けた場合、その圧縮強度はいちじるしく阻害され、標準養生のもの(凍結を受けないもの)の50%以下となること、養生温度が5°Cであれば養生日数が1~3日になると freezable water が少なくなり、その圧縮強度は標準養生のもの80%程度まで上昇すること、この結果グラウトは少なくとも5°Cで1日以上養生する必要の認められることなどが判明した。

以上の各研究結果は、実験条件の相異もあって、たがい一致しないところもあり、総合的に明瞭な結論を出すことが困難のように見受けられるが、少なくともPC部材の縦ひびわれが常にPCグラウトの凍結だけによって生じるものでないということではできるとと思われる。このことは、現場調査の結果、凍結地域以外でもPC部材に縦ひびわれの見い出されたこととも相まって、各研究者とも認めるところとなっている。

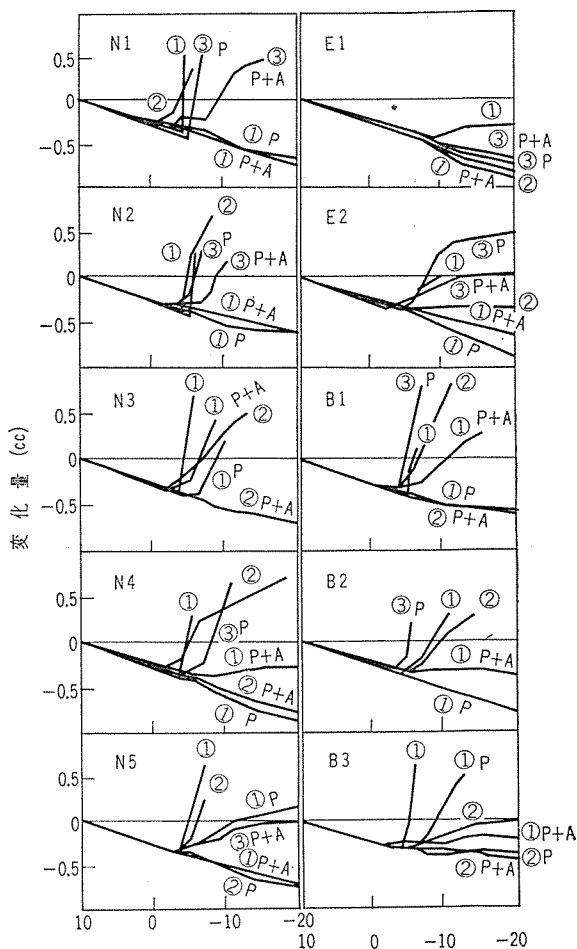
b) PC グラウトの空気量/未結合水の値と凍結安定性との関連 a) で述べたことと独立して、PCグラウトが凍結に対して安定であることが望ましいことは論をまたない。この点についてはグラウトの単位水量を少なくすればよいとか、AEコンクリートにならって適当な空気量を導入すればよいとかいわれてきたが、結局以上の両者の適当な かねあい にあることが明らかにされてきたようである。

Röhnisch・1955：前述したとおり凍結によるPC桁の縦ひびわれを防ぐには空気量/未結合水の値を9% (後に12%と訂正) とすればよいと主張している。

関 慎吾・1957：PCグラウトでなく、AEコンクリートを対象としているが、つぎのような興味ある結論を導いている。凍結融解作用に対する耐久性をもととして配合を決定する場合には、特にコンクリートの w/c と空気量とを考慮し、象象作用が激しい場合には $F \cdot W/A$ を1.7以下、気象作用が中程度の場合には $F \cdot W/A$ を1.85以下に定めるのがよい。たとえ w/c を相当小さくしても $F \cdot W/A$ 1.7があるいは1.85より大きければ、凍結融解作用に対する耐久性は小さくなり所要の耐久性が期待できなくなる (ここに $F \cdot W$ は、Freezable Water の略であり、Röhnisch のいう未結合水と同様のものである)。

横道・藤田・林・松井・1961：図-5のような実験結果を示し、減水剤混和による単位水量の低減、AE剤あるいは発泡剤混和による空気泡の存在、初期の一定期間

図-5 PC グラウトの耐寒性 (横道・藤田・林・松井)



	w/c (%)	材 令 (B)	(缶内 10°C 養生)
①	45	5	A: アルミ粉 C × 0.002 5%
②	40	5	P: ポソリス No.8
③	45	3	

一定温度以上に保つことの重要なことを明らかにしている。

c) 凍結安定性を十分ならしめるための養生条件
 デンマーク土木学会：PC桁のコンクリート温度を +5°C 以上に保てばグラウトの凍結に対して安全であり、+2°C で2日間保てば、なんら危険な凍結を生じない。

西ドイツ指針・1957：構造物の温度が +5°C を下がる場合は、PCグラウトの注入を中止しなければならない。注入後寒冷がおとずれた場合は、適当な手段によってPC鋼材周辺の温度が最初の5日間 +5°C を下がらないよう注意しなければならない。

+5°C 以下の気温のもとで注入しなければならなかった場合は、注入後5日間は十分暖かく (注入路領域を少なくとも +5°C) しなければならない。

アメリカPC協会指針・1960：注入時のコンクリート温度は約 7°C 以上とし、現場養生を行なった 5 cm 立

方体の強度が約 56 kg/cm^2 に達するまで、この温度に保たなければならない。

イギリス指針・1962 (本誌上で紹介) : 約 7°C 以下の温度のときにグラウトを注入する場合は、コンクリート部材を氷結から完全に防ぐ準備をする必要がある。非常に気温が低い場合には注入を延期することが望まれる。

RILEM—FIP 国際指針・1962 (本誌上で紹介) : 特別な用意をしないならば寒中のグラウト注入は延期する必要がある。引き続き 48 時間にわたって 5°C 以下に構造物の温度が下がらないことが確実な場合には、空気量 6~10% のエア—エントレインドグラウトを用いて注入を維持してもよい。48 時間以内に凍結のおこるおそれのあるときは部材を加熱し、注入後 48 時間にわたってグラウトの温度が 5°C 以下とならぬようにしなければならない。

アメリカ ACI 建築規準・1962 : 注入時の部材の温度は約 10°C 以上であり、少なくとも 48 時間この温度に保たなければならない。

たとえグラウトの凍結によって PC 桁に縦ひびわれを生じないとしても、グラウトの強度におよぼす悪影響を考えると、注入後一定期間 PC グラウトの温度を一定温度以上に保つことは当然必要であり、各国ともその必要を十分認めているといえる。わが国の土木学会では、5 日間 5°C 以上 (寒地では 5 日間 10°C 以上) としばり方が厳な方に属しており、現場施工のさいの困難を増しているが、この点については後に改めてふれたい。

(3) てん充状況の不十分

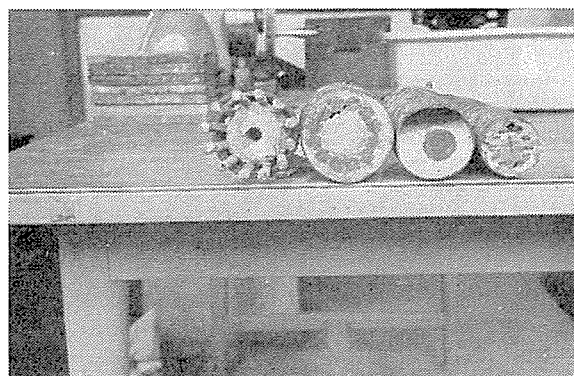
明らかにされてきた問題点の最後として、特に読者各位の注意を喚起しておきたいのは、PC グラウトの重要な役割りとして当初から強調されてきたところの「グラウトは十分に PC 鋼材を包みこれをさびないように保護する」という点が、(2) で述べた「凍結に対する安定性」についての、はなばなしい研究成果のかげにかくされ軽視されてきたきらいのあったことである。凍結に対する安定性は確かに重要な問題であったが、優秀な研究者の努力によって、すでに問題点は明らかにされてきたし、この問題は当初おそれられていたほど致命的なものであったかどうかについて疑問を抱かせるような研究結果のあることも、すでにご紹介したとおりである。ところで、問題点としてあげるのもどうかと思われる、てん充不十分という点についてはどう見られているのだろうか、アメリカ PC 協会誌 (1964. 10) にカリフォルニアの新展開としてエリオットの書いているところをべつ見してみよう。

「ポストテンションばりの PC 鋼材のさびという問題はまだ謎といってよい。われわれは、PC ばりを切断し

て不十分な注入とさびた PC 鋼材を発見した。最良の注入プラクティスも部分的にしか有効でないように見受けられる。PC 鋼材のまわりにはどうしても空げきが残ってしまい、われわれの努力にもかかわらず PC 鋼材はさびるようである。われわれの調査した結果は、われわれを安心させはしなかった。この問題はまだ解決されたとはいえない」。

PC については、アメリカの先進国であるわが国の現況がこの指摘ほど心配されなければならないものとは筆者は思わない。しかしながら写真—1 からもうかがえるように、てん充不十分の実例がわが国にも存在していることは確かめているので、このてん充不十分という問題については、さらに大きい関心が払われるべきであると判断するものである。

写真—1 PC グラウトのてん充不十分な状況



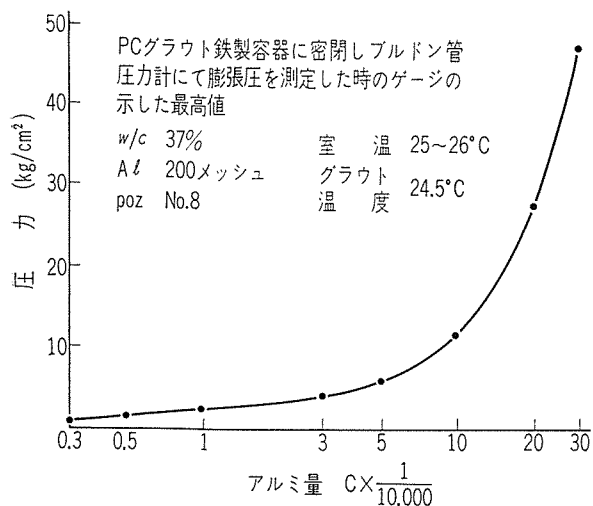
この章で述べてきたことから、PC グラウトの強度は一般にそれほど大とする必要のないこと、凍結安定性については、空気量 / 未結合水の値を大とし養生初期に注意すれば心配ないことなどを考えあわせると、アルミ粉末を発ぼう剤として混和することによりグラウトがまだ固まらない間に膨張させて、てん充を完全ならしめるという方法をとることの有利なことを推測させる。事実さきに紹介したとおりアメリカ PC 協会指針、イギリス指針 FIP—RILEM 国際指針等が 10% 程度の膨張率を認めているのも以上のような見地になっっていることを示しているものと思われる。

アルミ粉末の混和によって発生する水素ガスは、活性のものではないから PC 鋼材をさびさせる心配はまったくないが、ガス発生によって生ずる圧力が、PC 部材の縦ひびわれ発生を助けるのではないかという心配が提起されている。筆者は注入時の注入圧を上まわるような圧力をシース内で保持すること自体が本質的に困難であるという確信を実験および現場試験の結果から得ているが、実際のシースにおけるよりはるかに気密とした鉄製容器内に、アルミ粉末入り PC グラウト (表—8) を密封した場合生ずる圧力を測定したところ 図—6.7 のとおりであ

表-8 膨張性 PC グラウトの品質 (樋口・杉山)

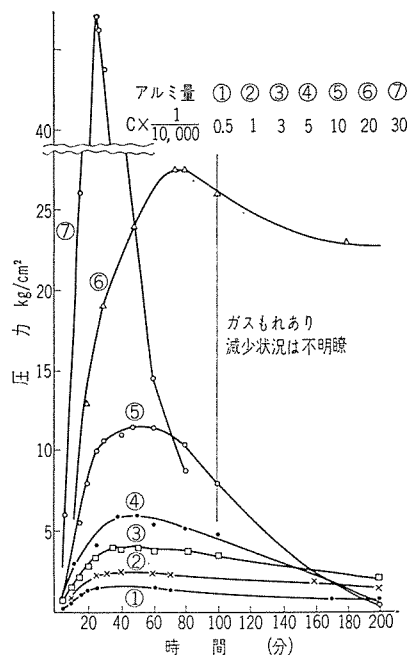
アルミ量 $C \times \frac{1}{10,000}$		0	0.3	0.5	1	3	5	10	20	30
膨張率 (%)	3 時間 後	-3.27	1.93	2.76	11.50	37.0	58.6	78.7	104.9	115.0
	20 時間 後	-4.43	1.59	2.07	11.20	38.5	59.7	81.5	106.7	114.8
ブリーディング率 (%)	3 時間 後	3.27	1.50	1.33	1.27	0	0	0	0	0
	20 時間 後	0.38	0	0	0	0	0	0	0	0
圧縮強度 (kg/cm^2) σ_7	型わく方法	—	375	365	340	—	—	—	—	—
	密閉(鉄製内)	—	365	300	253	210	185	160	140	130
	自由(ポリエチレン袋内)	480	365	250	150	76	46	31	25	18
PCグラウト $w/c=37\%$		室温 ($^{\circ}\text{C}$)	湿球 ($^{\circ}\text{C}$)	水温 ($^{\circ}\text{C}$)	グラウト温 ($^{\circ}\text{C}$)					
		25~25.2	24~24.5	18~20	24~25					

図-6 PC グラウトの圧力 (樋口・杉山)



た。これから見るとセメント重量の 1/10,000 以下とした常用のアルミ粉末を混和した PC グラウトの膨張によって生ずる圧力は、注入圧と比べても小さいし、10%程度の自由膨張を起こすグラウトについても同様のこと

図-7 グラウトの膨張圧を鉄製型わく内に密閉した場合の圧力 (樋口・杉山)



がいえるものと判断される。けた違いの量のアルミ粉末を混和し、シース全体を気密にすると高压を生ずることは確かであるが、この二条件が現場で満足されることはまずないといつてよいと思われる(この実験においては、鉄製容器とブルドン管の接合部その他を気密とすることに十分注意を払ったが、圧力が高くなるとガスもれを防ぐことはきわめて困難であった)。

無筋コンクリート内の空げきに膨張率の大きい PC グラウトをてん充した実験結果から判明したことは、コンクリートにひびわれを発生させるような高压をコンクリート内に封じておくことは不可能であった。このさいガス発生とともにグラウト中の水がコンクリート中に追放されることがわかったので、ブリージング水などはグラウトの膨張圧によってオートマチックに追放することを考えた方が得策であると判断された。

御 転 居 先 連 絡 お 願 い

最近会誌御送りして受取人不明および住所(勤務先)見当らず返送されてくる数が相当あります。当協会では変更の御通知があれば名簿を整理訂正して手落ちないように努めております。一回の郵送料が 40 円もかかり会誌作製費の増大とともに協会の経理面において非常な負担となりますので、それらの点を御考察のうえ連絡先が変更になった場合は、ただちにご連絡下さいますよう御願いたします。