

V-7

岩盤の風化防止を目的とした吹付けコンクリートの硬化特性

北海道開発局 開発土木研究所 正会員 吉田 行
北海道開発局 開発土木研究所 正会員 山崎 勲
北海道開発局 開発土木研究所 正会員 熊谷 守晃

1. はじめに

最近相次いで発生した岩盤崩落は、岩盤の風化及び浸透水の凍結融解作用による亀裂の発達などが主な原因となり発生したものと考えられる。岩盤崩落対策工として、モルタル・コンクリート吹付工がある。とりわけ繊維補強吹付けコンクリートは、岩盤の風化及び亀裂の発生の抑制に有効と考えられる。しかしながら、岩盤の風化防止を目的とした吹付けコンクリートについては従来あまり研究が行われておらず、特に対凍害性に代表される耐久性に関する研究は行われていない現状にある。

本研究では、各種ベースコンクリート及び吹付けコンクリートについて圧縮強度試験、凍結融解試験、気泡・細孔分布測定を行い、吹付けコンクリートの硬化特性について検討を行った。

2. 試験概要

2. 1 使用材料

表-1に本研究で使用した材料の物性を示す。セメントには普通ポルトランドセメントを使用し、細骨材には苫小牧樽前産海砂を、粗骨材には小樽市見晴産の砕石を使用した。補強繊維

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント、比重3.16
細骨材	苫小牧樽前産海砂：比重2.72、吸水率1.08、実積率71.8
粗骨材	小樽市見晴産砕石：最大寸法15mm、比重2.67、吸水率1.64
繊維	鋼繊維 (ST)：繊維長30mm、繊維径0.8mm、比重 8
	ポリプロピレン (PP)：比重0.91、繊維長30mm、繊維径0.76mm
混和剤	リグニルスルホン酸化合物及びポリオール複合体：比重1.25
急結剤	無機塩（液体）、比重1.55

には、鋼繊維及びポリプロピレン繊維の2種類を使用した。また、混和剤を使用したケースではAE減水剤を使用し、吹付けの際には急結剤を併せて使用した。なお、本研究では急崖斜面の風化防止を目的とした吹付けコンクリートを想定しており、実際の施工では高揚程・長距離圧送が予想されることから、現状では粉体急結剤よりも長距離圧送が可能である液体急結剤を使用した。

2. 2 コンクリートの配合

表-2 配合

表-2に各コンクリートの配合を示す。法面保護工で使用されている吹付けコンクリートの配合は、圧送性等の観点から一般的に、セメント、細骨材及び粗骨材の混合比は1：4：1（重量比）、モルタルフロー値が120（ほぼゼロスランプ）程度の硬練が最適と

No	配合	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)				急結剤 (%)	AE減水剤 (%)	繊維混入率 (vol%)
				W	C	S	G			
1	Plain	48.6	80	175	360	1439	352	—	—	—
2	ST					1417	347	—	—	(ST) 1.0
3	PP					1428	350	—	—	(PP) 0.5
4	Pl-Ad					1439	352	C×5	C×0.25	—
5	PP-Ad					1423	347			

されている。また、単位セメント量は360～380kg程度、細骨材率は80%程度である。これらの現状を踏まえて、吹付けコンクリートの基本配合は単位セメント量を360kg/m³、細骨材率を80%と固定し、モルタルフロー値が120となるように配合試験を行い決定した。なお、モルタルのフロー試験にはコンクリートをウエットスクリーニングした試料を使用した。

繊維補強コンクリートの繊維混入率は、鋼繊維は一般的な実績に基づきコンクリート容積の1%とし、ポ

Properties of hardened shotcrete to control weathering of rock-bed.
by Susumu Yoshida, Isao YAMAZAKI, Moriaki Kumagai

リプロピレン繊維に関しては国内での使用実績が殆どないことから、諸外国における他の資料¹⁾を参照し、コンクリート容積の0.5%とした。なお、繊維補強コンクリートの配合は、基本配合に単純に繊維を加えた配合とし、その容積分骨材全体の容積を減らした。また、耐久性向上の観点からA E減水剤を使用したケースについては、混和剤の添加率は標準添加量であるセメント質量の0.25%とし、配合No.1及び3のそれぞれに練混ぜ水の一部として単純に加えフロー値等の調整は行わなかった（No.4、5）。なお、フレッシュ時の各性状は省略する。²⁾

2. 3 コンクリートの練混ぜ及び吹付け方法

コンクリートの練混ぜは実験棟内で行い、200 ℓ ボルテックスミキサを使用した。練混ぜ時の実験室内は温度18℃前後、湿度50%程度であった。表-3に材料の投入順序及び練混ぜ時間を示す。

表-3 コンクリートの練混ぜ順序

配合No.	材料投入順序及び練混ぜ時間
1,4	C+S⇒30秒+G⇒10秒+W⇒120秒
2,3,5	C+S⇒30秒+G⇒10秒+繊維⇒10秒+W⇒120秒

コンクリートの吹付けは、空気圧送式の吹付け機を用いて湿式で行った。吹付けには直径50mmのマテリアルホースを使用し、搬送距離は水平距離で40mとした。吹付け機へのコンクリートの投入にはベルトコンベアを使用した。吹付けは実験棟から離れた実験施設内で行い、各種型枠に対して吹付けを行った。吹付け時の施設内の環境は、温度4℃前後、湿度60%以上であった。なお、本研究ではコンクリートのコンシステンシーが各ケースにより異なることから、吐出可能な範囲で吐出圧力を調整した。

2. 4 試験概要及び供試体

圧縮強度試験は3、7、28及び91日の4材齢で行った。凍結融解試験は材齢28日から試験を開始し、試験法はJSCE-G 501に準じて行った。また、コンクリートの組織構造を検討するために、水銀圧入法による細孔分布測定及びリニアトラバース法による気泡分布測定を行った。

圧縮強度試験ではφ10×20cmの円柱供試体を、凍結融解試験では10×10×40cmの角柱供試体をそれぞれ用いた。供試体の作製は、ベースコンクリートでは、繊維無混入の場合はJIS A 1132に準拠し、繊維補強の場合はJCI-SF 2に準拠して、それぞれ木づちにより打ち込みを行った。吹付けコンクリートでは、円柱供試体は60×60×30cmの下方を解放した木製型枠に吹き付け、材齢に併せて吹付け面から内部方向にコアリングを行い作製した。角柱供試体は60×65×20cmの下方を解放した木製型枠に吹き付け、所定の材齢に併せて10×10×40cmの角柱供試体をコンクリートカッターにより切り出した。細孔及び気泡分布測定用試料については、材齢28日経過した角柱供試体から試料を採取した。ベースコンクリートの供試体は、打設後20℃湿気養生槽で養生し材齢1日で脱型した。脱型後は各種硬化コンクリート試験の材齢まで20℃で水中養生した。吹付けコンクリートの供試体は、吹付け後供試体表面を濡れた布で覆い、その上からブルーシートで包み倉庫内で1日養生した。また、試験は12月から3月にかけて行われたため、供試体が凍らないよう倉庫内に電気ストーブを設置した。夜間における施設内温度はおおむね8から9℃前後であった。供試体は翌日実験室に移動し、所定の材齢まで20℃の水中養生を行った。

3. 試験結果及び考察

3. 1 圧縮強度

図-1にベース及び吹付けコンクリートの圧縮強度を示す。ベースと吹付けでは傾向が異なり、ベースコンクリートの場合、ブレーンの強度が最も大きく、以下鋼繊維、ポリプロピレン繊維の順であった。一方、吹付けコンクリートの場合は、鋼繊維が最も大きく、以下ブレーン、ポリプロピレン繊維の順となった。また、混和剤及び急結剤を使用したコンクリートは、圧縮強度が極端に低下し、材齢の経過に伴う強度の増加も他のものよりも小さかった。

ベースと吹付けコンクリートの圧縮強度を比較すると、ブレーンにおいて4週以降で逆転が見られたが、基本的にはベースよりも吹付けの方が強度が大きい結果となった。吹付けコンクリートの圧縮強度に関して

は一般的にベースコンクリートよりも小さくなると報告しているものも多く見られる³⁾が、本試験においては、必ずしも従来言われているような結果とはならなかった。これは、供試体の作製方法が圧縮強度に影響を及ぼしたものと考えられ、ベースコンクリートの供試体は、型枠側面を木づちで叩くことにより締固めを行っているが、スランプが3cm以下と小さく硬練りなため十分な締固めが行われず、特に繊維を混入したコンクリートでは、突き棒による締固めを行っていないため影響が大きくなったものと考えられる。一方、吹付け供試体は圧縮空気でコンクリートを吹付けることにより作製され、その際粗骨材が跳ね返ることでモルタルに近くなり、吹付け圧の作用により締固めが良好となり圧縮強度が大きくなったものと考えられる。また、繊維補強コンクリートの圧縮強度に関しては、一般的には繊維を混入したコンクリートの方が圧縮強度は増加するとされているが、その効果は小さく、

コンクリートの状態によっては締固め等の影響により効果が見られなかったり、繊維量が多い場合などは低下するケースもあるとされている⁴⁾。本研究では、吹付けにおいては鋼繊維コンクリートの強度がプレーンよりも大きく、これは一般的にいわれている繊維補強の効果と一致しており、このことから吹付けで締固めが良好になったと考えることができる。しかしながら、ポリプロピレン繊維においては吹付けた場合でもプレーンより強度が小さく繊維補強による効果は認められなかった。これはポリプロピレンの比重が鋼繊維に比べて非常に小さく、鋼繊維はその自重により吹付けによる締固め効果が大きくなるが、ポリプロピレンの場合吹付けにより跳ね返りが多くなり、締固めにはほとんど影響を及ぼさなかったためと考えられる。

混和剤及び急結剤を使用したコンクリートの圧縮強度が低かったことに関しては、吹付け時の圧送圧力及び急結剤の特性が影響したものと考えられる。空気圧送方式の吹付けコンクリートの特徴としては、一般的に硬練りのコンクリートは吐出性が良好となる反面、リバウンドロスが大きくなる傾向にあり、軟練りの場合は急結剤の併用によりリバウンドロスが小さくなるものの、圧送性に関してはマテリアルホース内での閉塞や脈動が生じやすくなる。このことから、軟練りのコンクリートに関しては基本的に圧送圧力を高くする必要があるが、本研究では急崖斜面における岩盤の安定対策を対象としており、基本的に高圧の吹付けは二次災害を起こす可能性があること及び現状では機械による吹付けが困難であることから、混和剤を混入したコンクリートの吹付け圧力はホース内で閉塞を起こさない範囲での最低の圧力とした。しかしながら、この吹付け圧力では締固め効果が低いことに加えて、急結剤の併用により先に吹き付けられたコンクリートが硬化し、その上に圧力が低いコンクリートが吹き付けられるためコンクリートの間隙に充填されず、供試体内部にいわゆる「す」(空洞)が生じ、これが圧縮強度に影響したものと考えられる。なお、供試体内部の鬆に関しては各種供試体を切削する際にその存在が確認されている。また、材齢の経過に伴う強度増進が殆ど見られない点については、急結剤の特性が影響したことが考えられるが、前述の通り供試体内部の欠陥が影響しているとも考えられ、それらが複合したものと思われる。

3. 2 凍結融解抵抗性

図-2に凍結融解試験の結果を示す。ベースコンクリートでは鋼繊維を混入したものの耐久性が良く、プレーン及びポリプロピレンは120及び90サイクル程度でそれぞれ相対動弾性係数が60%を下回る結果となった。一方、吹付けコンクリートの場合、プレーン及び鋼繊維の対凍害性が良好となり、ポリプロピレンに関

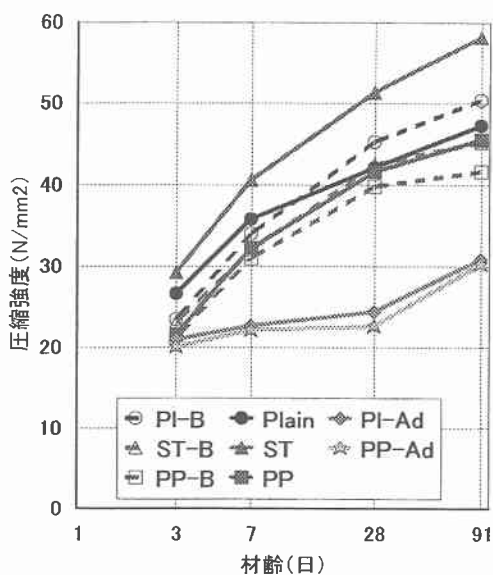


図-1 圧縮強度

してはベースよりも良好であったが、120サイクルで相対動弾性係数が60%を下回る結果となった。ポリプロピレンで相対動弾性係数が急激に低下したのは試験結果にばらつきが生じたためで、試験供試体3本中2本は90及び240サイクルでそれぞれ相対動弾性係数が60%を下回ったが、残りの供試体は300サイクルで相対動弾性係数が74%と比較的良好な結果であった。

ベースに比べて吹付けで耐凍害性が良好となった結果については、圧縮強度と同様コンクリートの締固め性状が影響したものと考えられ、この傾向は圧縮強度とほぼ対応している。しかしながら、鋼繊維の場合、圧縮強度においてはベースと吹付けで明確な差が見られるものの、対凍害性においてはそれらの違いによる明確な差は見られず、どちらのケースにおいても良好な値を示していることから、鋼繊維の混入は吹付けコンクリートの対凍害性を向上させる

のに有効である可能性が示された。一方、混和剤を混入したケースでは初期の段階で相対動弾性係数が60%を下回った。混和剤を混入したケースに関しては、前述の通り供試体に鬆が存在し、この大きな欠陥部から劣化が進行し、供試体表面のスケーリングやひび割れが少ない段階から全ての供試体が破壊し分断されていた。このことから、混和剤（急結剤）を使用したケースに関しては、コンクリートの品質そのものというよりもむしろ圧送性あるいは吹付け条件等が影響したものと考えられ、コンクリートの圧送性及び締固め特性に及ぼすコンシステンシーあるいは吹付け条件の影響について検討が必要と考えられる。

3. 3 細孔径分布

細孔径分布に関しては、ベースコンクリートでは、プレーンの総細孔容積が他のものよりも若干小さかったものの分布形状に明確な差は見られなかったことから、ベースにおける圧縮強度発現の違いは締固めや繊維の種類等、細孔構造以外の要因が影響したものと考えられる。

図-3に各吹付けコンクリートの細孔径分布比較を示すが、吹付けコンクリートでは、混和剤を使用したケースで細孔容積のピークが突出しており、また、ポリプロピレンを混入したものは他のものよりも細孔径が僅かではあるが大きい方にシフトしていた。これらの傾向は圧縮強度の傾向と対応している。

図-4に各コンクリートのベースと吹付けの細孔径分布比較をそれぞれ示す。いずれの場合もベースよりも吹付けの方が細孔径が小さい方にシフトしており、圧縮強度の発現はこれらの関係を反映していることがわかる。このように、細孔径分布の結果は全体として圧縮強度の傾向と対応していたが、各種コンクリートの細孔径がシフトした要因については、コンクリート打設後の温度履歴の違いや吹付け時の骨材等のリバウンドによる実

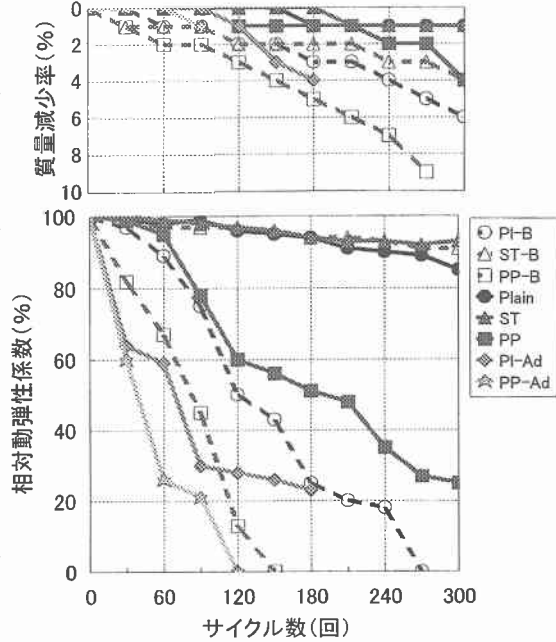


図-2 相対動弾性係数の経時変化

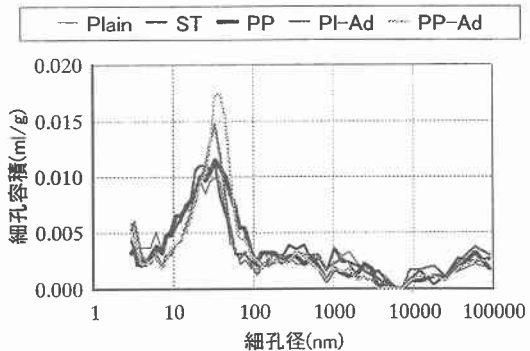


図-3 各吹付けコンクリートの細孔径分布

質配合の変化などが考えられる。また、混和剤を使用したケースでは細孔容積のピーク値が大きいが、混和剤を使用したケースでは急結剤を併用しており、急結過程での細孔組織の変化が影響したものと考えられる。

3. 4 気泡分布

図-5に一例としてPlainの気泡分布を示す。気泡分布に関しては、全体としてベースは吹付けしたものよりも各径における気泡数が多く、特に500 μ m以上の気泡数が多かった。これはベースよりも吹付けの方が締固めが良好になったためと考えられる。また、混和剤を使用したものは気泡径が小さい領域及び200~300 μ mが多かった。プレーン、鋼繊維及びポリプロピレンを比較すると全体として、鋼繊維の気泡数が多く、ポリプロピレンは最も少なかった。また、ポリプロピレンの場合ベース、吹付け及び混和剤使用の各ケースごとの気泡数の差が最も少なかった。

図-6に気泡間隔係数と硬化後及びフレッシュ時の空気量を示す。気泡間隔係数は一般に小さい方が凍結融解に対する抵抗性が優れているとされているが、本試験においてはプレーンを除くとベースよりも吹付けの方が小さく250 μ m以下であった。硬化後及びフレッシュ時の空気量を比較すると、ベースコンクリートでは硬化後の空気量がフレッシュ時の空気量を大きく上回っていることから、ベースの締固めが不十分であることがわかる。一方、吹付けコンクリートでは硬化後の空気量がフレッシュ時の空気量を下回っており全体に小さかった。これは、吹付けによる締固め効果で内部の気泡が消失したものと考えられる。

図-7に各コンクリートの気泡間隔係数と耐久性指数を示す。吹付けコンクリートでは、プレーンを除くと気泡間隔係数が250 μ m程度以下で、一般に気泡間隔が250 μ m程度以下でコンクリートの耐久性指数が90%以上になるとするものもある⁵⁾が、本試験では必ずしも気泡間隔係数と耐久性指数は対応しておらず、混和剤を使用したケースでは耐久性指数が低かった。これに関して、混和剤を使用したコンクリートの吹付け後

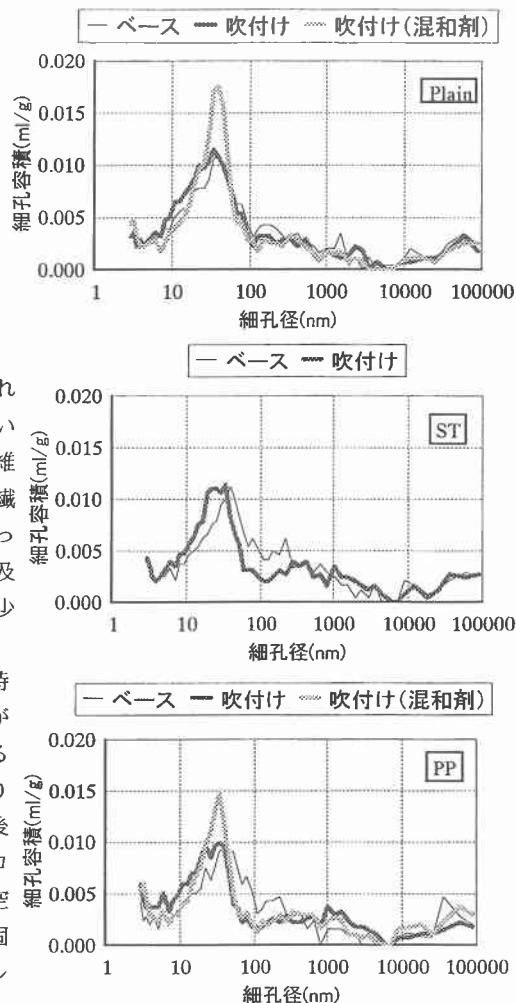


図-4 ベースと吹付けの細孔径分布比較

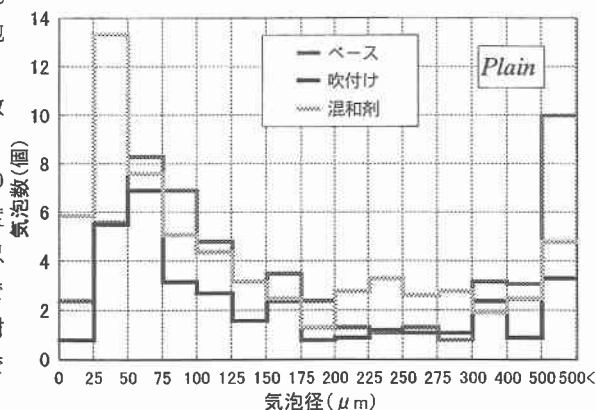


図-5 Plainの気泡分布

と吹付け前の空気量を考慮すると、他のコンクリートよりも差が大きく、前後の空気量の差は吹付け時に巻き込まれた空気あるいは空洞と考えられることから、この空洞より劣化が進行したため耐久性指数が小さくなったものと考えられる。この結果は、凍結融解試験でスケーリング等の劣化が少ない段階で供試体が破壊していた結果を裏付けるものである。また、吹付けポリプロピレンの場合は、

供試体毎に凍結融解試験結果がばらついており、最後まで破壊しなかった供試体に関しては耐久性指数が70%以上(図中※)と比較的良好なことから、マトリックス自体は気泡間隔係数が大きく良好であるが、供試体によっては空洞を含んでいたと考えられ、この欠陥部から供試体が破壊したため平均的な耐久性指数が小さくなったものと思われる。一方、鋼繊維のベースの耐久性指数は90%以上と良好で、気泡間隔係数やコンクリート中の空洞が比較的其他のコンクリートよりも大きいことを考慮すると、鋼繊維自体が劣化に対して効果的に作用

したものと考えられる。また、プレーンのベースにおいては気泡間隔係数が最も大きいにも関わらず耐久性指数が良好であったことに関しては、プレーンのベースは空洞が最も少なく、細孔組織が最も緻密であったことによるものと考えられるが、原因については特定できない。

4. まとめ

以上の結果をまとめると以下になる。

(1) 鋼繊維補強吹付けコンクリートは圧縮強度及び対凍害性ともに良好であったが、ポリプロピレン繊維を混入した場合は、本試験においてはその効果が認められなかった。

(2) 吹付けコンクリートの圧縮強度及び対凍害性は、コンクリート自体の品質よりもむしろ吐出性能あるいは圧送条件等に起因して生じる内部欠陥の影響を大きく受ける。従って、吹付け時の圧力等、圧送性及び施工性に関する検討が必要と考えられる。

<参考文献>

- 1) 例えば、N.Banthia, A.Dubey, L.Bell : The True Stress Transfer Capability of Polymeric Fibers Across a Crack, Singapore Conference on FRC, 1997
- 2) 山崎、吉田、熊谷：岩盤の風化防止を目的とした吹付けコンクリートのフレッシュ性状、土木学会北海道支部論文報告集 第56号第V部門(本稿同時投稿)、2000
- 3) 例えば、小林、西村、魚本：吹付けコンクリートの強度および耐久性についての実験と考察、土木学会第53回年次学術講演会、pp648-649、1998
- 4) 小林一輔：繊維補強コンクリート特性と応用一、オーム社、1981
- 5) 長谷川寿夫、藤原忠司：コンクリート構造物の耐久性シリーズ 凍害、技報堂、1988

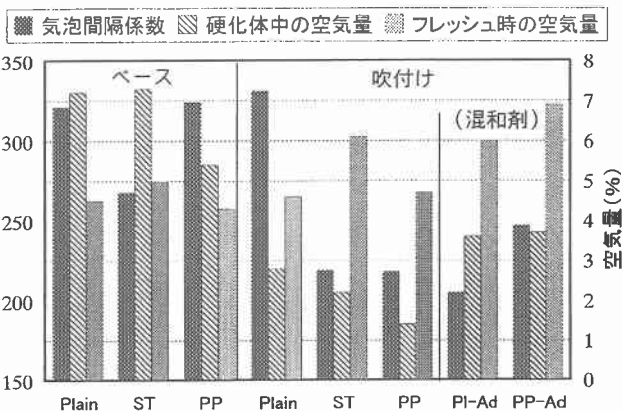


図-6 各コンクリートの気泡間隔係数と空気量

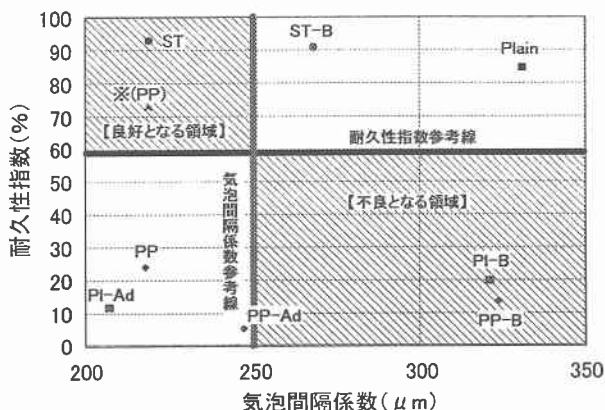


図-7 耐久性指数と気泡間隔係数の関係