

論文 砕石粒径が小さい場合の結合材の分布状態がポーラスコンクリートの強度特性に及ぼす影響

大谷 俊浩*1・村上 聖*2・佐藤 嘉昭*3・三井 宜之*4

要旨：砕石粒径が小さい場合の結合材の分布状態がポーラスコンクリートの物性に及ぼす影響を調べるために、今回、粒径が5～13mmの砕石6号を使用して振動締固め時間を変化させることによって結合材の分布状態を変化させた供試体を作製し、粒径が13～20mmの砕石5号を使用した場合と比較検討を行った。その結果、砕石6号を使用した場合の圧縮強度は振動締固め時間の影響を大きく受けるが、砕石5号を使用したものよりもその影響度が小さいことがわかった。その一因として、結合材の分布状態を調べることで、砕石5号より砕石6号の方が同一量の振動締固めによる結合材の垂れが少ないことが示された。

キーワード：ポーラスコンクリート、結合材の分布、空隙の分布、振動締固め

1. はじめに

近年、ポーラスコンクリートはエココンクリートとして注目され様々な研究が行われており、その強度特性は骨材粒径、結合材強度および空隙率に大きく依存していることが明らかになっている^{1)・2)}。しかしながら、これらの結果は結合材の分布状態が一様であることが前提とされており、結合材が不均一に分布した場合の影響についての検討はほとんど行われていない。打設時に振動締固めを行う場合、適切な加振時間を選定できれば問題ないが、それが不可能な場合は結合材の分布状態は不均一となり、強度特性は大きく変化してしまうことが予想される。また、ポーラスコンクリートの調合設計を行い最適な打設成型方法を求める上においても、結合材の分布状態が強度特性に及ぼす影響を把握する必要があると考えられる。

筆者らはこれまでに緑化ポーラスコンクリートの骨材として最も一般的に使用されているものの一つである粒径が13～20mmの砕石5号を使用したポーラスコンクリートの結合材の分布状態が物性に及ぼす影響について実験を行った。その報告で振動締固めによる結合材の分布状態

の推移を調べ、その分布状態の変化、すなわち結合材の垂れがポーラスコンクリートの物性に及ぼす影響を明らかにし、空隙率の測定のみではその圧縮強度を推定することはできないことなどを示した³⁾。しかしながら、緑化ポーラスコンクリートの骨材には粒径が砕石5号より小さな砕石6号(5～13mm)もよく使用されており、使用する砕石粒径が変化した場合、振動締固めが結合材の分布状態に及ぼす影響度が変化することが考えられることから、本論文では砕石6号を使用して同様に結合材の分布状態がポーラスコンクリートの物性に及ぼす影響を調べ、砕石粒径が異なる場合のその影響度の違いについて検討を行った。以下はその報告である。

2. 実験

2.1 供試体作製

実験に使用した材料を表-1に示す。セメントは、緑化コンクリートを想定して、硬化後のpHが低く緑化に適している高炉セメントB種、骨材は砕石6号、混和剤はポリカルボン酸エーテル系の高性能AE減水剤をそれぞれ使用した。

調合を表-2に示す。調合条件は、水セメン

*1 大分大学助手 工学部福祉環境工学科 工修(正会員)

*2 熊本大学助教授 大学院自然科学研究科 工博(正会員)

*3 大分大学教授 工学部建設工学科 工博(正会員)

*4 熊本大学教授 工学部環境システム工学科 工博(正会員)

ト比を25%で一定、かつ、結合材であるセメントペーストの空隙充填率を40%(空隙率26.1%)で一定とし、高性能AE減水剤の添加量を調整して結合材のフロー値を150mm, 175mm および200mmの3段階とした。

混練方法は、セメントペーストプレミックス法とした。まず、セメント、水および減水剤を容量50ℓモルタルミキサに投入して30秒間練り混ぜ、セメントの掻き落とし作業をした後、さらに90秒間練り混ぜた。次に、容量100ℓ二軸ミキサに骨材および作製したセメントペーストを投入して、60秒間練り混ぜた。練り上がったコンクリートはφ10×20cmの円柱供試体用型枠に、JIS A 1132に準拠して2層で詰め、各層を突き棒で11回突いた。締固め条件をできる限り同一とするため、かつ、この段階での結合材の垂れを生じさせないため、木槌等は用いずに突き棒だけによる突固めとした。2層まで詰めた供試体は、卓上バイブレータ(振動数3000vpm, 振幅1.5mm)で加振して結合材の分布状態を変化させた。加振時間は0, 2, 4, 6, 10 および20秒の6段階とした。加振後、コンクリートが沈下した供試体は沈下した分(1~2cm)のコンクリートを追加投入し、供試体の表面をコテでならして成型した。供試体数は、1調合につき圧縮強度試験用と、結合材分布状態測定用の各々に対して加振時間ごとに3本の計36本である。

作製した供試体は、室内で湿布養生を行い、2日後に脱型した。脱型した供試体は、20℃水中養生材齢28日で圧縮強度試験に供した。

2.2 圧縮強度試験および空隙率測定方法

圧縮強度試験は、供試体両端面に硫黄キャッピングを施した後、容量2000kN 万能試験機を

表-1 使用材料

セメント	高炉セメントB種		
	密度	3.04 g/cm ³	
粗骨材	碎石6号		
	表乾密度	2.58 g/cm ³	吸水率 2.55 %
	粒径	5~13 mm	実積率 56.5 %
混和剤	高性能AE減水剤 ポリカルボン酸エーテル系		

用いて行った。縦方向のひずみの測定は、アルミ板を介して装着したコンプレッソメータで行った。

全空隙率および連続空隙率の測定は、材齢14日後、日本コンクリート工学協会ポーラスコンクリートの物性試験方法(案)に準拠して容積法で行った。

2.3 切断面算定方法

全調合の中から代表してフロー値が175mmの供試体の結合材の分布状態を調べた。切断面算定方法の詳細は既報³⁾に示すが、供試体の切断は湿式のコンクリート切断機で行い、まず供試体上部の打設面約1cmを切り落とし、残りの部分の上下から約1.5cm厚で各5枚切り出して、各断面の結合材および空隙の面積を求めた。各面積は、結合材および骨材部分に着色し、デジタルカメラで撮影した画像データを用いて、断面積の比から算出した。

3. 実験結果および考察

3.1 空隙率および強度特性

表-3 に実験結果の平均値を示す。全空隙率が調合上の理論値である26.1%に対して-3.2%~+5.9%の値を示している。フロー値によるばらつきが見られるが、碎石6号を使用した場合、加振時間6秒前後で調合上の理論値と同程度の

表-2 調合およびペーストのフロー値

調合番号	水セメント比 (%)	結合材のフロー値 (mm)	CP/V (C×%)	粗骨材種類	混和剤添加量 (%)	単位置 (kg/m ³)			
						C	W	G	Sp
1	25	150	40	6号	0.38	300.5	75.1	1457.7	1.142
2		175				300.5	75.1	1457.7	1.322
3		200				300.5	75.1	1457.7	1.443

注)CP/V: セメントペースト空隙充填率, C: 高炉セメントB種, W: 水, G: 粗骨材, SP: 高性能AE減水剤

表-3 実験結果

結合材の フロー値 (mm)	加振 時間 (s)	連続 空隙率 (%)	全 空隙率 (%)	圧縮 強度 (N/mm ²)	ヤング係数 ($\times 10^4$ N /mm ²)
150	0	30.8	32.0	7.97	1.06
	2	27.9	28.9	10.24	1.16
	4	28.0	29.0	9.57	1.28
	6	25.8	27.2	10.47	1.26
	10	25.8	27.2	11.50	1.47
	20	24.6	26.2	10.38	1.42
175	0	27.5	29.4	11.04	1.25
	2	24.6	26.4	12.59	1.40
	4	24.4	26.4	13.62	1.41
	6	22.8	24.6	13.59	1.54
	10	20.9	22.9	12.97	1.49
	20	20.9	23.2	11.82	1.50
200	0	27.3	28.6	10.54	1.18
	2	24.9	26.5	11.86	1.28
	4	25.1	26.7	11.98	1.43
	6	24.0	26.0	11.50	1.43
	10	22.0	24.8	12.54	1.42
	20	23.1	25.8	11.70	1.39

空隙率を示すことがわかった。

加振時間の変化が全空隙率、圧縮強度およびヤング係数に及ぼす影響をそれぞれ図-1、図-2 および図-3 に示す。これらの図は、加振時間 0 秒の値を 100 として各加振時間の値を相対比で表したものであり、砕石 5 号の結果³⁾も合わせて示している。

図-1 より、全空隙率は加振時間の増加とともに低下し、加振時間 6 または 10 秒以降、ほぼ一定の値を示している。この傾向は両骨材とも同じであるが、その変化量は砕石 6 号の方が大きい。その原因として突き棒による突固めでは締固めが不十分であったものが振動締固めによって締め固められたため空隙率が低下し、加振時間 6~10 秒で十分に締め固められたことで空隙率が安定したものと考えられる。また、砕石 6 号の方が空隙率の変化量が大きい理由として、砕石粒径が小さいほど突き棒による突固め時に骨材の移動が生じやすくなり、力が分散するため締固め量が少なかったことが挙げられる。なお、フロー値の違いが全空隙率に及ぼす影響については、明確な傾向はみられなかった。

図-2 より、圧縮強度は加振時間の増加とともに増加し、その後低傾向にある。この傾向は両骨材とも同じであるが、ピーク発生時期が 6 号の方が遅くなっており、5 号の方が急な強度

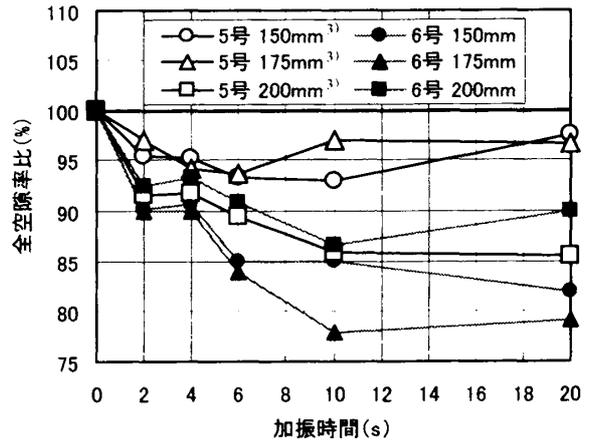


図-1 全空隙率比と加振時間の関係

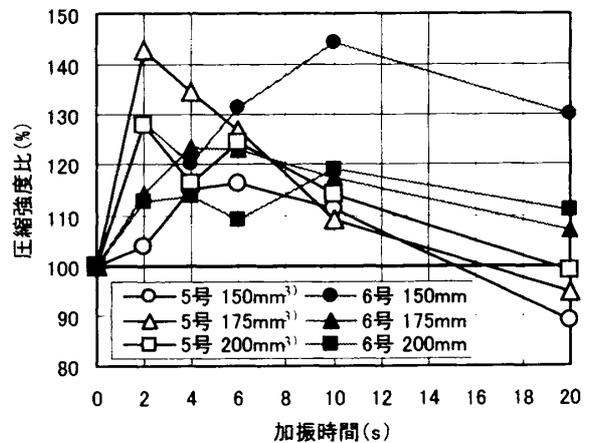


図-2 圧縮強度比と加振時間の関係

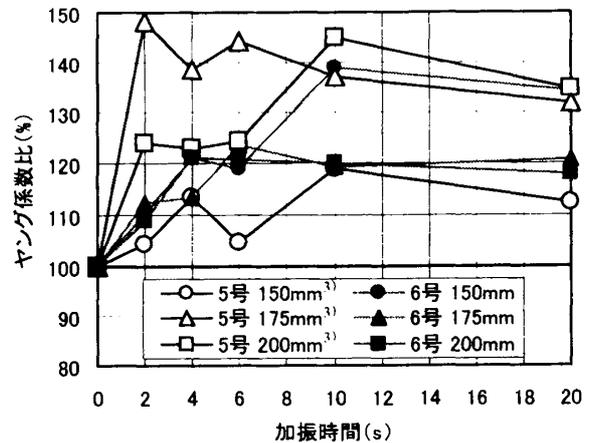


図-3 ヤング係数比と加振時間の関係

変化を示している。また、ピーク以降の強度低下量は 5 号の方が大きい。ポーラスコンクリートの圧縮強度と空隙率には負の相関関係が存在するため¹⁾、加振時間 6 秒までの圧縮強度の増加は全空隙率の低下によって説明可能であるが、それ以降の強度低下については全空隙率の変化

の影響では説明がつかず、結合材の垂れによる強度低下の影響が顕著化してきたものと考えられる。6号の方がピーク発生時期が遅れた理由として、突き棒による締固め時に上述の理由による締固め量が少なかったことが挙げられる。また、5号の方がピーク以降の低下量が大きい理由として、5号の方が振動締固めによる結合材の垂れを生じやすいものと考えられる。フロー値の違いによる影響については、6号のフロー値150mmの強度低下が小さいが、明確な傾向はみられなかった。

図-3より、ヤング係数は両碎石を使用した場合とも圧縮強度と同様な変化を示したが、加振時間が長い場合の圧縮強度のような低下傾向はほとんどみられない。この原因として、結合材の垂れによる結合材の減少は供試体上部で大きいと考えられ、圧縮強度はその供試体上部の局所的な影響を受けるが、ひずみの測定は供試体中央部分で行うため、その影響がコンプレッソメータによるひずみの測定に反映されなかったことが考えられる。

3.2 結合材および空隙の分布状態

図-4にフロー値175mmの供試体写真の一例を示す。写真左側が供試体上部で、加振時間の増加とともに供試体底面部分に結合材の垂れによる空隙の閉塞が確認できる。強度試験結果で確認された加振時間が長い場合の圧縮強度の低下が結合材の分布状態の変化によって起こされたことを確認するために、同フロー値の供試体内部の結合材および空隙の分布状態を調べた。

断面の算定を行った結合材および空隙の分布状態をそれぞれ図-5および図-6に示す。これらの図は縦軸に断面積に占める各面積の割合を示し、横軸に各断面位置を示している。また、横軸左側が供試体上部である。なお、図-6において加振時間が短い場合、供試体底面部分の空隙面積が他の部分と比較して大きな値を示しているが、これは型枠接触面であることから、切断面と異なり、骨材の面積が無いためである。

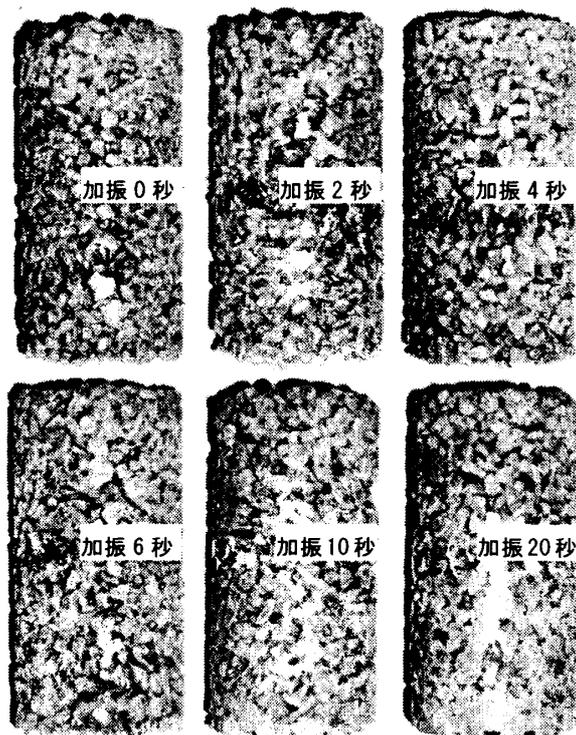


図-4 供試体写真一例（フロー値175mm）

図-5より、加振時間の増加とともに供試体底面の結合材量が大きく増加していることがわかる。また、加振時間の増加にともなう供試体下部の結合材の増加量は、碎石5号を使用した場合³⁾より少ないことがわかった。

図-6より、加振時間の増加とともに供試体底面の空隙率が大きく減少していることがわかる。そのため、空隙率の分布状態の変化は結合材の分布状態の変化と同様、底面部分が大きく変化していることから、振動締固めによる空隙の分布状態の変化は、結合材の垂れによって生じたものであると考えられる。

加振時間の増加とともに結合材に垂れが生じた場合、結合材の分布状態は結合材量が減少する上部、結合材量にあまり変化がない中間部、結合材量が増加する下部の3つに分けられると考えられることから、結合材の分布状態の変化が圧縮強度に及ぼす影響をみるためには、供試体上部の結合材の減少量を測定することが適切であると考えられる³⁾。そこで、図-7に示す

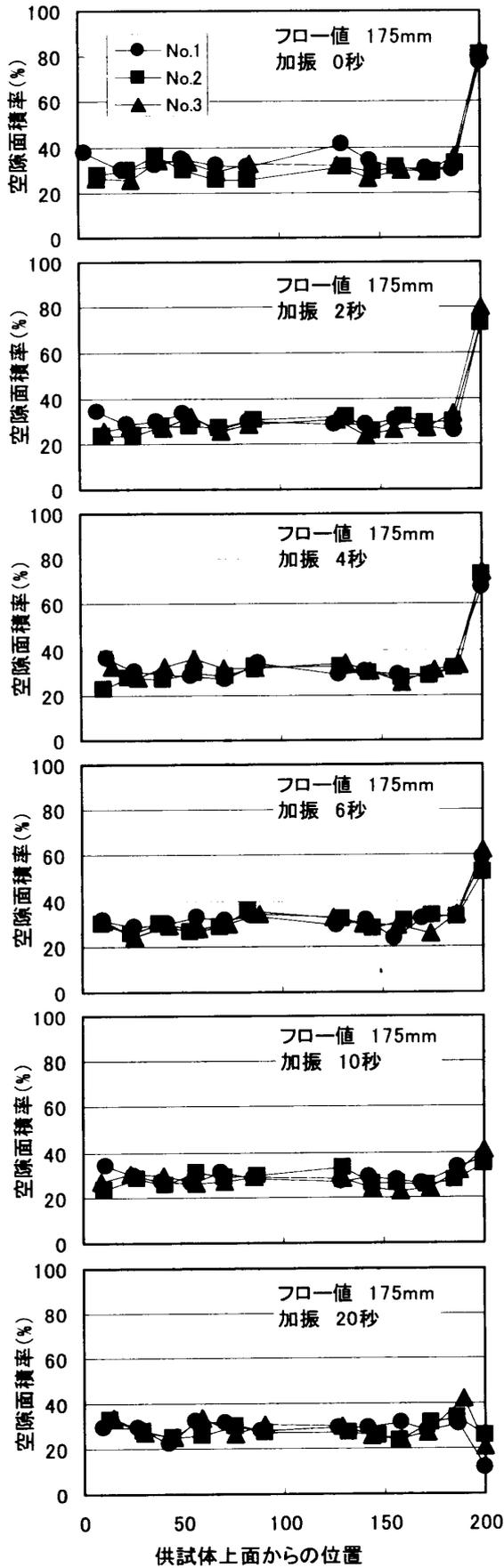


図-5 結合材の分布状態の推移

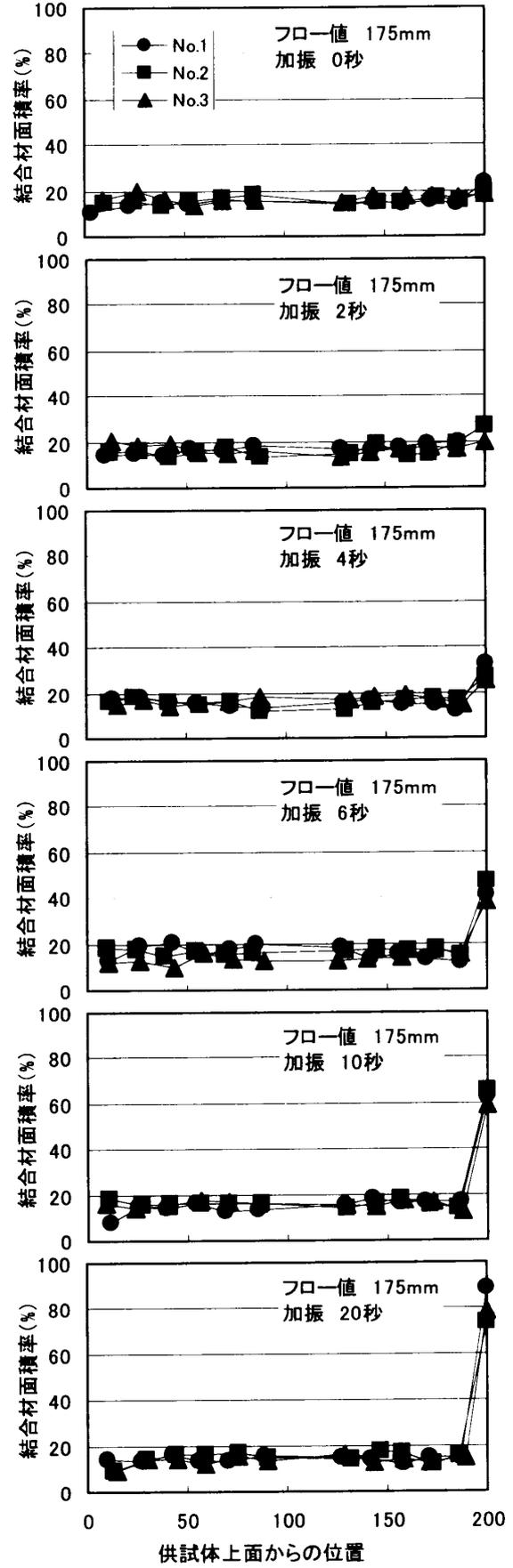


図-6 空隙の分布状態の推移

ように、コンクリートの追加投入を行った部分を除いた上部を評価区間としてその区間の結合材量の変化を求めた。その結果を図-8に示す。図中の値は評価区間の結合材面積率の平均値を加振時間0秒の平均値に対する相対比で示している。また、既報³⁾の砕石5号の結果も合わせて示している。砕石6号の場合、評価区間の結合材量はほとんど減少していないが、砕石5号では大きく減少していることがわかる。そのため加振時間が長い場合の圧縮強度の低下量が砕石5号を使用した場合よりも小さい値を示したものと考えられる。

4. まとめ

粒径が5~13mmの比較的小きな砕石6号を使用して、結合材のフロー値および振動締固め量の違いがポーラスコンクリートの空隙率や圧縮強度に及ぼす影響について調べ、粒径が13~20mmの砕石5号を使用した場合の実験結果と比較検討した。本研究の範囲で得られた結果を以下に示す。

- (1) 6号を使用した場合の方が振動締固めによって大きな空隙率の変化を示し、加振時間の増加に伴う圧縮強度のピーク発生時期が遅れることがわかった。原因として、骨材寸法の違いからくる突き棒による締固め時のエネルギー伝達量の違いの影響が考えられる。
- (2) 加振時間が長い場合の圧縮強度の低下量は砕石5号の方が大きいことがわかった。原因として、5号の方が結合材の垂れが生じやすく、供試体上部の結合材の減少が大きいことが挙げられる。
- (3) 砕石粒径によって振動締固め適正量は異なり、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 円柱供試体を卓上バイブレータ（振動数 3000vpm, 振幅 1.5mm）締め固める場合、砕石5号では6秒程度、6号では10秒程度が適切な加振時間であると考えられる。

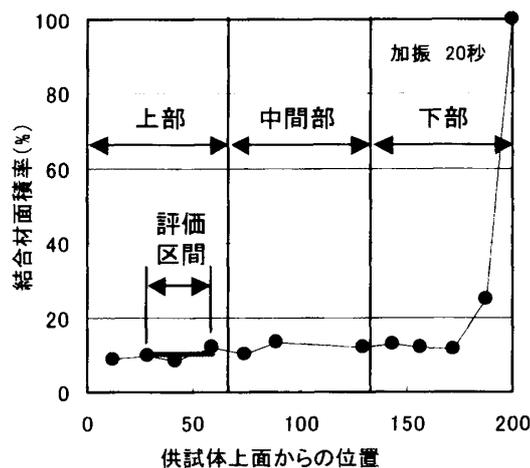


図-7 評価区間

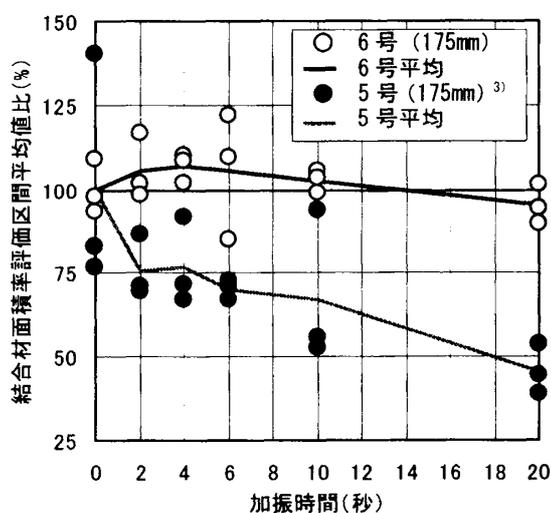


図-8 結合材面積率の評価区間平均値と加振時間の関係

謝辞

本実験において大分大学工学部建設学科清原千鶴助手並びに遠矢義秋技官、同学部学生桑原真一郎、風戸康秀および三島剛君らに御助力賜りました。ここに記して深謝いたします。

参考文献

- 1) 松川徹ほか:緑化コンクリートの空隙性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.999-1004, 1996.6
- 2) 岩佐祐一ほか:緑化用基盤としてのポーラスコンクリートの基礎物性に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.513-514, 2000.9
- 3) 大谷俊浩ほか:結合材の分布状態がポーラスコンクリートの強度特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.139-144, 2001.6