

報告 湿式吹付けコンクリートの壁面における衝撃力と品質の関係

小林裕二^{*1}・岡田 喬^{*2}・保岡哲治^{*3}・魚本健人^{*4}

要旨:本研究は、施工条件や配合条件を変化させた吹付けコンクリートの実験を行い、吹付け面での衝撃力を固定した鉄板に吹付けた時に生じるひずみの振動状態を測定するといった方法で評価し、その値とリバウンドや硬化物性とを比較することで、衝撃力と品質の関係を明確にすることを試みた。その結果、さまざまな施工条件や配合条件における吹付け面での衝撃力の変化状況を得るとともに、衝撃力の大小がリバウンドや強度、空隙特性に及ぼす影響についての知見を得た。

キーワード:吹付けコンクリート、衝撃力、リバウンド率、圧縮強度、空隙率

1. はじめに

吹付けコンクリートの施工において、圧送空気流量やノズルから吹付け面までの距離などの施工条件は明確に規定されておらず、それらはノズルマンの経験やかんに委ねられている。そのため、吹付け面に衝突する力（以下、「衝撃力」と称す）の強さも各現場毎においてさまざまである。

これまで、この衝撃力についてはほとんど考慮されず、材料や配合等の条件と、それに対する硬化物性等の結果のみが比較評価されてきた。しかし、衝撃力の強弱が、吹付けコンクリートの品質やリバウンドに影響を及ぼすとすれば、このことが、吹付けコンクリートの品質がばらつく要因のひとつになっていると考えられる。したがって、これを適切に管理することは吹付けコンクリートの品質を向上させる重要な項目になると判断できる。

本研究では、吹付け面での衝撃力を、鉄板にひずみゲージを貼付し、吹付けを行った際に生じるひずみを測定する方法で評価することを試みた。そして、吹付け面での衝撃力とリバウンドや硬化品質との関係を比較することで、その影響を明確にすることを試みた。

2. 吹付け実験概要

2.1 配合と吹付けシステム

本実験に使用したベースコンクリートの配合を表-1に、吹付けシステムおよび基本設定を図-1、表-2に示す。

基本配合は、単位セメント量を 360kg/m³、とした一般強度配合 (No. 1) と 450kg/m³ とした高強度配合 (No. 2) の 2 種類とし、混和材添加の影響を調べるために No. 3~No. 5 の配合も作成し実施した。吹付け機は空気搬送方式を使用し、基本条件は表-2 のようにした。コンクリートの搬送空気量は、空気の供給口に設けたデジタル式空気流量計により時間当たりの空気流量を管理する方法により行った。

表-1 ベースコンクリート配合

配合 No.	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水結合材比 W/P (%)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤	
						水 W	セメント C	混和材	細骨材 S	粗骨材 G	A1 C× (%)	A2 C× (%)
1	13	12	55.6	2.0	60	200	360	—	1056	705	—	—
2	13	21	44.4	2.0	58	200	450	—	979	705	0.9	0.006
3	13	21	44.4	2.0	58	200	405	SF 45	964	705	1.84	0.011
4	13	21	44.4	2.0	58	200	450	FA 84	882	705	0.9	0.006
5	13	21	44.4	2.0	58	200	450	LS100	882	705	1.02	0.008

C: 普通ポルトランドセメント (密度 3.15g/cm³)
 S: 千葉県君津産山砂 (密度 2.61g/cm³, 吸水率 1.7%, F.M.2.76)
 G: 東京都八王子産砕石 (密度 2.66g/cm³, 吸水率 1.02%, F.M.6.24)
 A1: 高性能減水剤 NT-1000s A2: 消泡剤 マイクロエア 404A
 SF: シリカフューム 940-U (エルケムジャパン, 密度 2.2g/cm³)
 FA: フライアッシュ 磁石火力発電所産 (密度 2.27g/cm³)
 LS: 石灰石微粉末 TM-1 (密度 2.71g/cm³)

- *1 佐藤工業 (株) 土木本部技術部門トンネルグループ係長 (正会員)
- *2 (株) 熊谷組土木事業本部土木推進部部長
- *3 (株) 大林組土木技術本部技術第二部課長代理
- *4 東京大学国際・産学共同研究センター 教授 工博 (正会員)

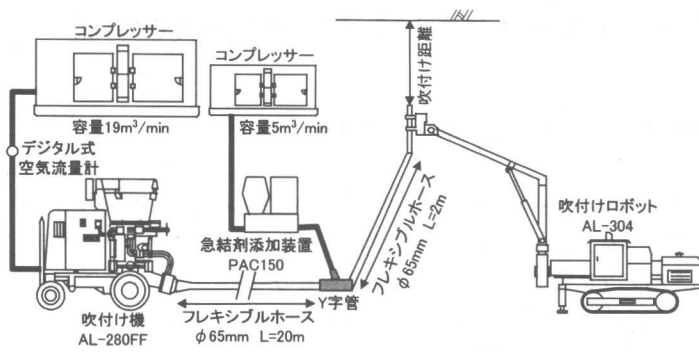


図-1 吹付けシステム

表-2 基本条件

項目	基準条件
圧送空気流量 (m³/min)	9 (360kg/m³配合)
	11 (450kg/m³配合)
コンクリート吐出量 (m³/hr)	8
吹付け距離 (m)	1.5
急結剤添加率※ (B×%)	7 (360kg/m³配合)
	5 (450kg/m³配合)

※カルシウムアルミネート系粉体急結剤
B: 結合材量

表-3 実験ケース

実験 No.	実験要因	実験水準	配合 No.	
1	吹付け距離 (m)	0.5	No.1	
2		2.0		
3		3.5		
4		0.5		
5		2.0		
6		3.5		
7	圧送空気流量 (m³/min)	7	No.1	
8		9		
9		16		
10		8		
11		11		
12		18		
13	吹付け角度 (円周方向) (°)	0	No.1	
14		45		
15		90		
16		8		
17		12		
18		18		
19	スランプ (cm)	18	No.2	
20		21		
21		25		
22		SF結合材置換		No.3
23		FA細骨材置換		No.4
24		LS細骨材置換		No.5

2.2 実験ケース

実験ケースを表-3に示す。

実験は、変化させるべき要因のみを変化させ、他の条件は表-2に示した基本設定のままとした。

3. 測定項目

3.1 衝撃力の測定方法

衝撃力は、図-2に示すように、裏面中央にひずみゲージを貼付した幅180mm×長さ410mm×厚さ6mmの鉄板に発生するひずみによって評価した。なお、急結材を添加せずに吹付けを行った。鉄板の両端部は、小型の万力4基で固定した。ひずみの測定は、デジタル動ひずみ測定装置によって5000Hz (1/5000sec)の間隔でサンプリングを行った。測定方法や測定装置は、今回実施したすべての実験ケースで同一とした。

3.2 衝撃力の評価方法

測定結果の一例を図-3に示す。

鉄板は吹付けによる時間的に変化するが規則正しく繰り返さない力の作用を連続して受け振動する。よって、得られた振動波形の振幅の大小が、吹付けによる衝撃力の大小を表しているといえる。しかし、本結果のような振動の強度を表すには、絶対最大振幅による比較は適切な指標ではなく、むしろ全パワーや2乗平均がよい指標となりうるとい

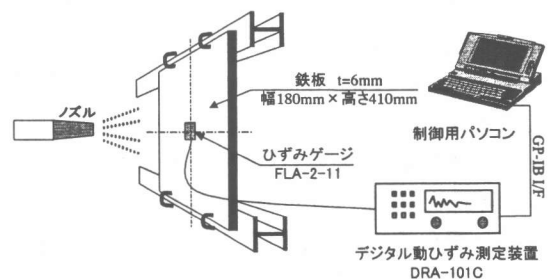


図-2 衝撃力測定概要

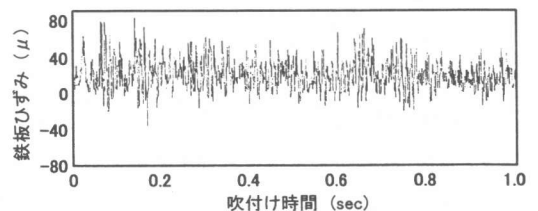


図-3 鉄板ひずみ測定結果の一例

表-4 試験項目

測定項目	試験方法
衝撃力	図-3に示すように、ひずみゲージを貼りつけた鉄板のコンクリートを吹付けたときのひずみを測定
リバウンド率	回収したリバウンド材の重量を箱型枠の吹付けに要したコンクリート重量で除して算出
圧縮強度	コア採取方法はJSCE-F 561に準じ、圧縮強度試験はJIS A 1108に準じた
空隙率	ASTM C 642に準じた

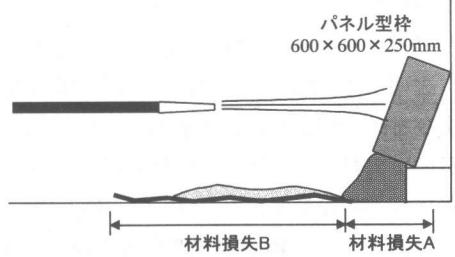


図-4 リバウンド測定方法

われている¹⁾。そこで、本報においては、得られたひずみ波形の2乗平均の平方根で定義されるrms (root mean of square) 値を算出して、吹付け面での衝撃力の大小を比較・評価することとした。

3.3 その他の測定項目

測定項目の一覧を表-4に示す。

リバウンド率の測定は、図-4に示すように、採取場所によって供試体採取用のパネル型枠直下に落ちた材料損失Aとノズル先端からパネル型枠の間に落ちた材料損失Bに分けて採取し、全体リバウンド重量の百分率としてだけでなく、材料損失の採取場所の違いからも分析評価を試みた。

圧縮強度は、パネル型枠よりφ75cm×150cmのコアを採取し、材齢28日において各4本ずつ試験を行い、その平均値と標準偏差を算出した。

空隙率の測定は圧縮強度と同様にパネル型枠より採取したφ75cm×150cmのコア3本を材齢28日で測定しその平均値を算出した。

4. 実験結果と考察

4.1 吹付け距離の変化による影響

図-5に吹付け距離と鉄板ひずみrms値およびリバウンド率の測定結果を示す。

鉄板ひずみのrms値は吹付け距離が近づくほど大きくなり、従って、壁面での衝撃力も吹付け距離が近づくにつれて強くなる。

リバウンド率は吹付け距離が1.5~2.0m付近で最小となり、距離が離れても、また、壁

面に近づいても大きくなる結果となった。

損失材料の採取場所での構成は、吹付け距離が近い場合には材料損失Aの量が著しく多く、一方、吹付け距離が離れるに従って材料損失Bの量が多くなる傾向となっていた。

このことから、吹付け距離が著しく近い場合には、壁面での衝撃力が大きすぎるために、コンクリートの付着力が壁面での跳返り力を下回ったり、一度付着したコンクリートが後からきたコンクリートによってはじき落とされてしまうためにパネル型枠直下に落ちる材料損失Aが多くなる。一方、距離が著しく離れた場合には、ノズルから出たコンクリートが壁面まで届かずにそのまま下に落ちてしま

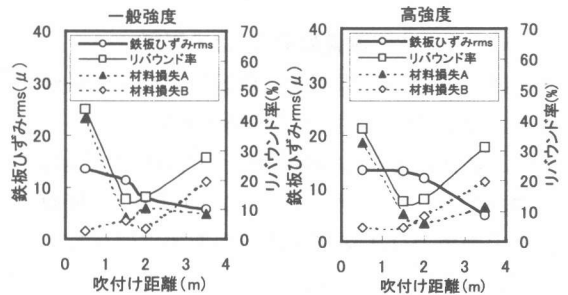


図-5 吹付け距離と衝撃力・リバウンド率の関係

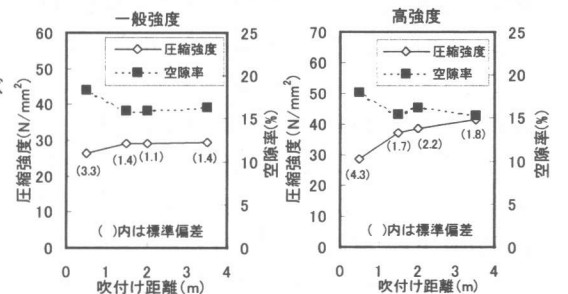


図-6 吹付け距離と圧縮強度・空隙率の関係

う部分が材料損失Bとして多くなること、リバウンド率が多くなった原因と考えられる。

図-6に吹付け距離と材齢28日圧縮強度および材齢28日空隙率の関係を示す。材齢28日の圧縮強度をプロットした点には、コア試験体4本の標準偏差を()内に示す。

材齢28日圧縮強度は吹付け距離1.5m～3.5mでは、ほぼ同等か、あるいは距離を離すほど強度が増加する傾向が認められ、最も近づけた吹付け距離0.5mで強度が最も低い結果となった。強度低下の原因としては、コア試験体4本の標準偏差が吹付け距離0.5mで著しく大きいことから、強度のばらつきが大きいためである。

空隙率も圧縮強度と同様な傾向を示し、圧縮強度が小さい吹付け距離0.5mの場合に大きくなった。

この原因として、吹付け距離を著しく近づけた場合、コンクリートの内部空隙が多くなりがちとなるため、硬化体物性が均一でなくなり、品質にばらつきが生じ、結果的に強度低下が生じたと考えられる。

4.2 圧送空気流量の変化による影響

図-7に圧送空気流量と鉄板ひずみのrms値およびリバウンド率との関係を示す。

圧送空気流量の増加に伴って鉄板ひずみのrms値も大きくなり、条件一定の場合なら壁面での衝撃力は圧送空気流量の増加に伴って大きくなる結果となった。

リバウンド率は、圧送空気流量の増加つまり衝撃力の増加に伴って増加する傾向にある。ただし、高強度配合の圧送空気流量の小さいケースでも、リバウンド率が大きくなった。これは、このケースで材料損失Bの量が著しく多くなっていることから、圧送空気流量が著しく少なくなると、ノズルから飛び出すコンクリートの速度が低下し、壁面まで届かずに落下してしまう損失部分の割合が多くなったことによるものである。

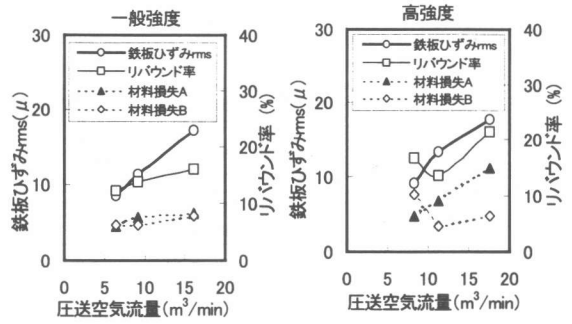


図-7 圧送空気流量と衝撃力・リバウンド率の関係

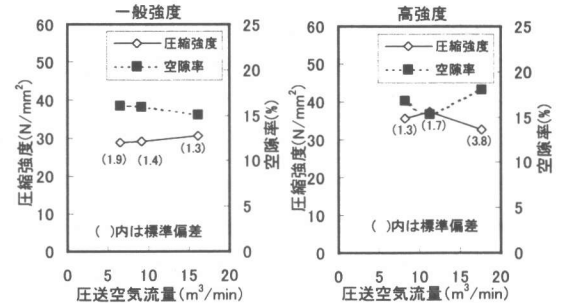


図-8 圧送空気流量と圧縮強度・空隙率の関係

図-8に圧送空気流量と材齢28日圧縮強度および材齢28日空隙率の関係を示す。

一般強度配合においては、材齢28日圧縮強度は、圧送空気流量を増加させるに伴って僅かではあるが増加する傾向にあり、標準偏差の小さく、空隙率も減少する傾向となることから、一般強度配合に関して本実験の範囲での空気流量の増加し壁面での衝撃力が大きくすることは、均一で密実な吹付けコンクリートの硬化体を施工する上で有効であると考えられる。

一方、高強度配合の場合では、圧送空気流量を18m³/minと最も多くしたケースで、強度のばらつきが著しくなり、強度が低下し空隙率が増加する結果となった。このことも、距離を近づけた場合と同様に、衝撃力が著しく強い場合には、作成過程で空隙を巻き込みやすく、硬化物性が均一でなくなることによるものである。

4.3 吹付け方向の変化による影響

図-9に高強度配合における吹付け方向と鉄板ひずみのrms値の関係を、また一般強度配合

でのリバウンド率測定結果を合わせて示す。

吹付け方向別にみた鉄板ひずみの rms 値、つまり、衝撃力の大きさは、吹付け距離や圧送空気流量を変化させた場合ほど顕著ではないが、上向き、および斜め方向に角度をつけた場合に、rms 値が小さくなっており、衝撃力が弱くなることが認められた。

リバウンド率は、上向きに角度をつけるほど大きくなっており、壁面まで届かずに落下してしまう損失量の割合や、付着しても、衝撃力が弱いため十分な締固めが行われずに重力の影響で落ちてしまう部分が多くなるためと考えられる。

図-10 に一般強度配合の場合での、吹付け方向と材齢 28 日圧縮強度および材齢 28 日空隙率の関係を示す。圧縮強度および空隙率は本実験の範囲では、吹付け方向の変化による明確な傾向は認められなかった。

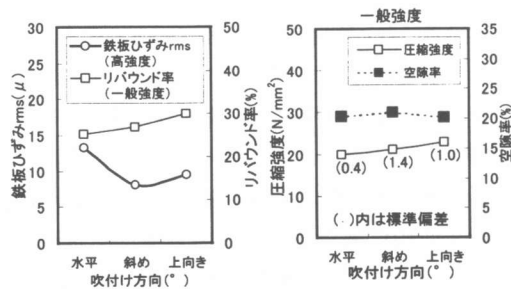


図-9 吹付け方向と衝撃力 リバウンド率の関係 図-10 吹付け方向と圧縮強度・空隙率の関係

4.4 スランプの変化による影響

図-11 にベースコンクリートのスランプを変化させた場合の鉄板ひずみ rms 値およびリバウンド率の測定結果を示す。

スランプの変化は、単位結合材量 360kg/m³ および 450kg/m³ の基本配合に対して、それぞれ3種類に変化させた。

鉄板ひずみの rms 値つまり衝撃力は圧送空気流量を 11m³/min と一定としたにもかかわらず、スランプの大きいものほど大きくなる傾向となった。このことは、スランプを大きくする

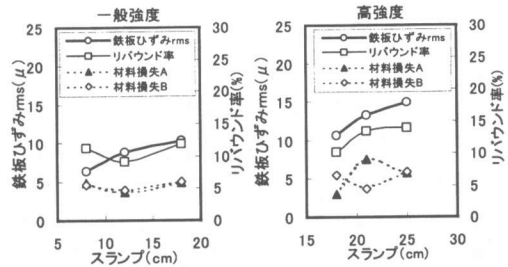


図-11 スランプと衝撃力・リバウンド率の関係

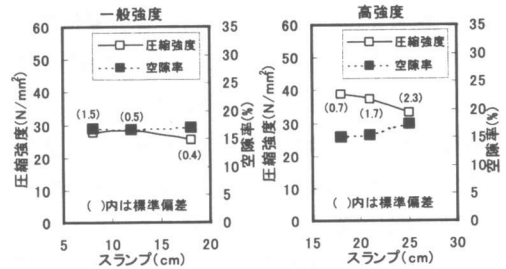


図-12 スランプと衝撃力・圧縮強度・空隙率の関係

ことで、コンクリートを空気搬送する際の配管の摩擦抵抗によるエネルギーロスが小さくなり、空気搬送しやすくなることを示している。

リバウンド率は、衝撃力の大小の差が顕著でないためか、衝撃力と関連した明確な傾向は認められなかった。

図-12 にスランプ変化と、材齢 28 日圧縮強度および材齢 28 日空隙率の測定結果を示す。

スランプが大きくなるにつれて、圧縮強度が低下し、空隙率も増加する傾向が認められた。

これは、とくに配合表には示さなかったが、スランプを変化させるために、単位セメント量を一定とし単位水量によって調整したため、結果的に W/C が変わったためである。

4.5 混和材添加による影響

単位結合材量を 450kg/m³ とした混和材無添加の基本配合、および、基本配合に対して、シリカフェーム(SF)を結合材に10%置換したものの、フライアッシュ(FA)を細骨材に10%置換したものの、石灰石微粉末(LS)を細骨材に10%置換したものの4種類で比較した。

図-13 に、各配合別の鉄板ひずみ rms 値および

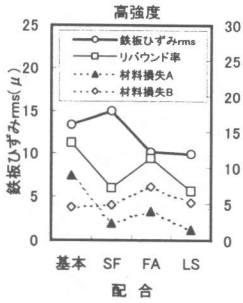


図-13 配合変化と衝撃力
リバウンド率の関係

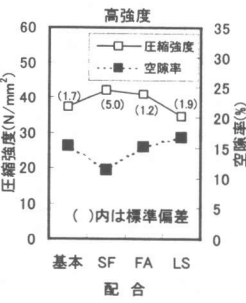


図-14 配合変化と圧縮
強度・空隙率の関係

びリバウンド率の測定結果を示す。

鉄板ひずみの rms 値つまり衝撃力は圧送空気流量を $11\text{m}^3/\text{min}$ と同一にしたにもかかわらず、SF を混和すると、基本配合よりも大きくなり、FA と LS を混和すると、小さくなった。

このことは、SF を結合材置換することで、空気搬送しやすいコンクリートとなり、反対に、FA や LS を細骨材置換すると、その粘性のために空気搬送しづらくなることを示している。

リバウンド率は、いずれの配合も無混和の配合よりも少なくなった。とくに、材料損失Aの減少が顕著であり、混和材の添加によりコンクリートの付着性が向上したためといえる。

図-14 に各配合別の、材齢 28 日圧縮強度および材齢 28 日空隙率の測定結果を示す。

SF および FA を混和した配合で、顕著な圧縮強度の増加が認められた。とくに、SF を添加した配合では、空隙率も小さくなっている。ただし、今回の実験で作成した SF を混和した配合での吹付けコンクリートは強度のばらつきが大きくなってしまっており、施工方法を改善することで、さらなる高品質化が期待できると考えられる。

5. まとめ

本実験により以下のことが明らかになった。

(1) 吹付け距離を近づけるほど衝撃力は大きくなる。リバウンド率は、吹付け距離は 1.5~2.0m のとき最も少なくなる。吹付け距離が近く衝撃力が著しく大きい場合、内部空隙が多くなり強

度がばらつき、結果的に強度低下が生じる。

(2) 圧送空気流量が多いほど衝撃力は大きくなる。リバウンド率は、圧送空気流量の増加つまり衝撃力の増加に伴って増加する。圧送空気流量が著しく多い場合、内部空隙が多くなり強度がばらつき、結果的に強度低下が生じる。

(3) 条件一定では上向きに角度をつけた場合、衝撃力が弱くなる。一方、角度をつけるほど、リバウンドが多くなる。

(4) 圧送空気流量が同一では、スランプが大きいほど圧送抵抗が減少し衝撃力は大きくなる。

(5) 圧送空気流量が同一では、シリカフュームを混和すると衝撃力は大きくなり、フライアッシュと石灰石微粉末を混和すると小さくなる。シリカフューム・フライアッシュを混和するとリバウンドが減少し、圧縮強度が増加する。

謝辞

本実験は東京大学国際・産学共同研究センターにおける「高品質吹付けコンクリートの開発」を目的とした共同研究による成果であり、東京大学生産技術研究所西村次男氏、受託研究員である平間昭信氏、石関嘉一氏、細川佳史氏、共同研究員である(株)青木建設駒田憲司氏、(株)エヌエムビー清水哲史氏、鹿島建設(株)大野俊夫氏、清水建設(株)磯部哲氏、大成建設(株)坂本淳氏、太平洋セメント(株)大森啓至氏、(株)竹中土木安藤慎一郎氏、電気化学工業(株)荒木昭俊氏、東急建設(株)伊藤正憲氏、戸田建設(株)田中徹氏、飛鳥建設(株)田中斉氏、西松建設(株)松浦誠司氏、(株)間組杉山律氏、前田建設工業(株)白根勇二氏、協力会社である富士物産(株)阿部隆夫氏、(株)北川鉄工所見浦光夫氏、(株)東京測器研究所佐藤辰也氏、(株)ブリジストン深津章文氏また千葉工大 4 年飯土井達也氏に深く感謝致します。

参考文献

1) 土岐憲三：新体系土木工学 11 構造物の耐震解析、技報堂出版、pp. 109-113, 1982. 6