

論文 中部国際空港エプロン舗装に使用したスリップフォーム工法用コンクリートの収縮特性

小林隆芳*¹・君島健之*²・国田淳*³・福手勤*⁴

要旨：本研究では，中部国際空港エプロン舗装における目地間隔の妥当性を検討するために，スリップフォーム工法用として使用した高炉スラグ微粉末混入コンクリートについて，高炉スラグ微粉末混入量と力学特性および収縮特性の関係を実験により求め，応力解析によりひび割れ抵抗性の検証を行った。その結果，高炉スラグ微粉末混入量がセメントの40%置換程度であれば，収縮目地間隔を5.0～7.5mとすることで収縮によるひび割れを誘発できることが明らかになった。

キーワード：スリップフォーム工法，高炉スラグ微粉末，収縮ひび割れ，応力解析

1. はじめに

2005年2月開港の中部国際空港(セントレア)では，航空機を駐機するエプロンの舗装工事に工期短縮，省力化を目的として，型枠を使用せずに連続舗装が可能なスリップフォーム工法が国内の空港では初めて適用された。スリップフォーム工法用のコンクリートには，環境に配慮しセメントの一部を高炉スラグ微粉末を置換したものが使用され，高炉スラグ微粉末と普通ポルトランドセメントおよびその他の材料をバッチャープラントで混練りして製造する方法が採用された¹⁾。

しかし，エプロン舗装コンクリートの設計基準曲げ強度は 5.0N/mm^2 で単位結合材量が約 400kg/m^3 と富配合となり，高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートは自己収縮が大きくなること²⁾，セントレアのエプロン舗装は版厚が最大で46cmと厚いことから，収縮および温度応力によるひび割れが懸念された。

そこで，セントレアのエプロン舗装における目地計画に資することを目的に，高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートについて各種試験

を行い，高炉スラグ微粉末混入量と力学特性および収縮特性の関係を求め，応力解析によりひび割れに対する抵抗性の検証を行った。

2. 試験概要

2.1 使用材料およびコンクリート配合

本試験で使用したコンクリート材料は表-1に示す通りであり，セントレアのエプロン舗装に使用したものと同一である。コンクリートの

表-1 使用材料

材料	記号	品 名	密度 (g/cm^3)	備考
セメント	C	普通ポルトランドセメント	3.15	
混和材	BF	高炉スラグ微粉末	2.88	比表面積 $4011(\text{cm}^2/\text{g})$
細骨材	S1	川 砂	2.60	川砂：スラグ=7：3 (容積比)
	S2	高炉スラグ細骨材	2.74	
粗骨材	G1	砕石 4020	2.74	4020：2005=1：1 (容積比)
	G2	砕石 2005	2.97	
混和剤	Ad	AE減水剤	---	

表-2 コンクリート配合

記号	W/B (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m^3)							
			W	C	BF	S1	S2	G1	G2	Ad
NC	38.0	31.9	150	395	0	390	175	625	677	4.21
BF-20		31.7		316	79	385	175			4.21
BF-40		31.4		237	158	380	173			4.21
BF-60		31.2		158	237	377	170			4.21

* 1 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 (正会員)

* 2 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 所長 (正会員)

* 3 中部国際空港(株) 建設部 工務グループリーダー

* 4 東洋大学 工学部 環境建設学科教授 工博 (正会員)

配合は表－2に示す通りであり，高炉スラグ微粉末混入量をセメントに対して0, 20, 40, 60%置換の4水準とし，高炉スラグ微粉末混入量が舗装コンクリートの各種特性に与える影響を検討した。なお，練上り後の性状は，スランプ4.5cm，空気量5.5%となるようにAE減水剤により調整した。

2.2 試験項目および試験方法

(1) 力学特性試験

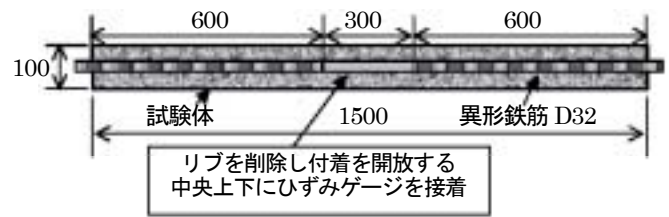
力学特性を把握することを目的に， $\phi 15 \times 30\text{cm}$ 供試体を用いて JIS A 1108 により圧縮強度試験を，JIS A 1149 により静弾性係数試験を行った。さらに， $15 \times 15 \times 53\text{cm}$ 供試体を用いて JIS A 1106 により曲げ強度試験を， $\phi 12.5 \times 25\text{cm}$ 供試体を用いて JIS A 1113 により割裂引張強度試験を行った。これらの供試体は，コンクリート打込みの翌日に脱型し，所定材齢まで 20°C で水中養生を行った。また，一軸拘束試験体における耐力を把握するために用いる割裂引張強度は，ひび割れ抵抗性評価試験の一軸拘束試験体と同じ養生条件とした。

(2) 収縮特性試験および断熱温度上昇試験

収縮特性を把握する事を目的に，日本コンクリート工学協会(JCI)の「コンクリートの自己収縮試験方法」²⁾に準じて自己収縮を，JIS A 1129 により乾燥収縮を測定した。乾燥収縮試験における基長の測定は材齢7日とし，それまでは 20°C で水中養生を行った。なお，粗骨材の最大寸法は40mmであるが，両試験とも供試体断面寸法は $100 \times 100\text{mm}$ とした。また，断熱温度上昇量の把握および応力解析のためのデータ収集を目的に，空気循環式の断熱温度上昇試験装置を用いて10日間断熱温度上昇量を測定した。

(3) ひび割れ抵抗性評価試験

高炉スラグ微粉末混入量がひび割れ抵抗性に与える影響を把握することを目的に，JCIの「コンクリートの自己収縮応力試験方法」²⁾に準じて一軸拘束によるひび割れ抵抗性評価試験を行った。JCIの測定方法と異なる点は，乾燥収縮

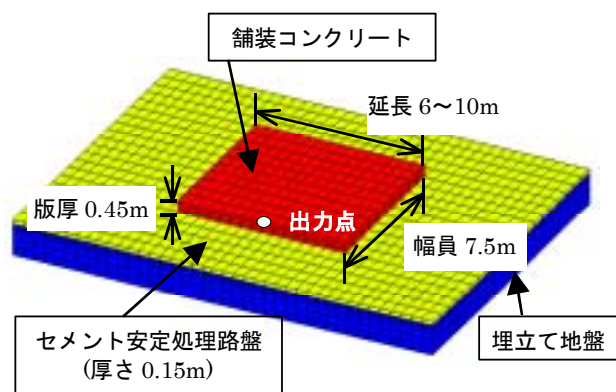


図－1 一軸拘束試験体

ひずみによって発生する応力，ひび割れを確認するため，型枠残置期間を1日とした後，材齢3日まではポリエステルフィルムによって封緘状態とし，その後ポリエステルフィルムを除去し，室温 20°C ，湿度60%で気乾養生を行ったことである。一軸拘束試験体は図－1に示す通りで，D32の异形鉄筋を配置しており型枠への打込みが困難であるため，20mmふるいを使用してウェットスクリーニングしたコンクリートを用いて試験を行った。

(4) 応力解析

ひび割れに対する危険性を照査する事を目的に，3次元FEMによる応力解析を行った。解



図－2 舗装コンクリートの解析モデル

表－3 解析に用いた熱特性値・力学特性値

項目	単位	舗装	路盤	地盤
熱伝導率	$\text{W/m}^\circ\text{C}$	2.7	3.0	3.0
密度	kg/m^3	2400	1900	1900
比熱	$\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$	1.15	0.79	0.79
温度上昇	---	実験値	考慮しない	考慮しない
初期温度	$^\circ\text{C}$	20.0	20.0	20.0
ヤング率	N/mm^2	圧縮強度より	1000	500
圧縮強度	N/mm^2	実験値	10.0	5.0
引張強度	N/mm^2	実験値	考慮しない	考慮しない
ポアソン比	---	0.18	0.15	0.15
線膨張係数	$\mu/^\circ\text{C}$	10.0	8.0	8.0
乾燥収縮	---	実験値	考慮しない	考慮しない
自己収縮	---	実験値	考慮しない	考慮しない

析にあたっては、セントレアのエプロン舗装で施工された代表的な舗装体を図-2に示すようにモデル化した。セントレアで採用されたスリップフォーム工法は、延長約180～330mを連続施工するもので、一定間隔でひび割れ誘発目地を設ける必要がある。そこで、解析モデルの延長方向長さを6, 8, 10mの3水準に設定し、ひび割れの誘発が可能な目地間隔の検討を行った。結果の出力には、図-2に示すように最も収縮応力が大きくなると思われる点を選択した。応力解析における熱特性値および力学的特性値は表-3に示す通りであり、セントレアのエプロン舗装では打設直後に養生剤を散布し、マット・散水による湿潤養生期間を7～10日としていることから、材齢7日までは自己収縮のみを、それ以降は乾燥収縮も考慮に入れ、1ヶ月間の挙動を解析した。

3. 試験結果と考察

3.1 力学特性

圧縮強度試験結果を図-3に、割裂引張強度試験結果を図-4に示す。圧縮強度は高炉スラグ微粉末混入量が多いほど初期強度発現が小さいが、材齢91日においては逆転する傾向が見られた。一方、割裂引張強度は初期の強度差が圧縮強度よりも顕著であり、長期において逆転するという傾向も認められず、圧縮強度とは大きく異なった。また、BF-60は強度の伸びが特に小さい結果となった。

曲げ強度試験結果を図-5に、静弾性係数試験結果を図-6に示す。曲げ強度は材齢7日でBF-20が若干大きくなっているが、材齢28日以降ではその差がほとんどなくなっている。一方、静弾性係数は材齢28日までは高炉スラグ微粉末混入量が多いほど小さくなる傾向が認められるが、材齢91日では差がほとんどなくなっている。いずれも、高炉スラグ微粉末混入量による影響が小さい結果となった。

3.2 収縮特性および断熱温度上昇量

自己収縮測定結果を図-7に、乾燥収縮測定

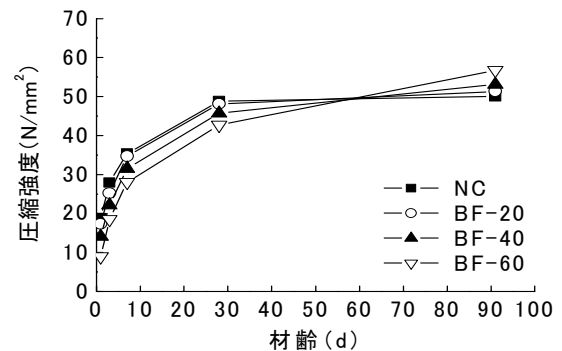


図-3 圧縮強度試験結果

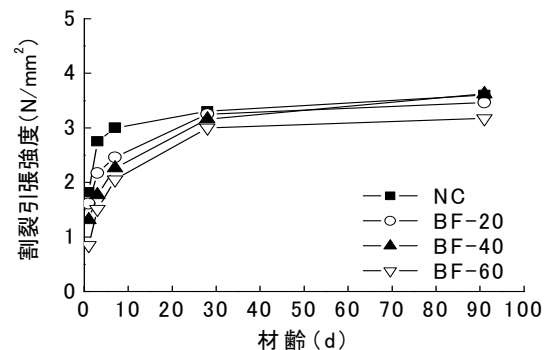


図-4 割裂引張強度試験結果

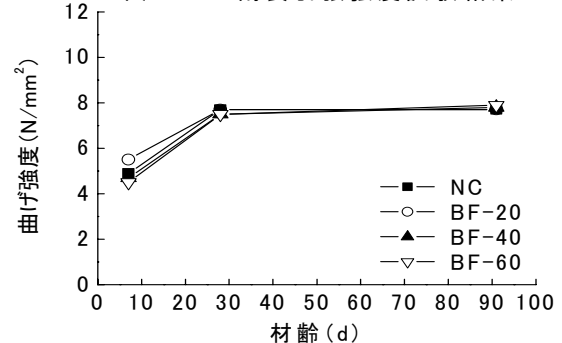


図-5 曲げ強度試験結果

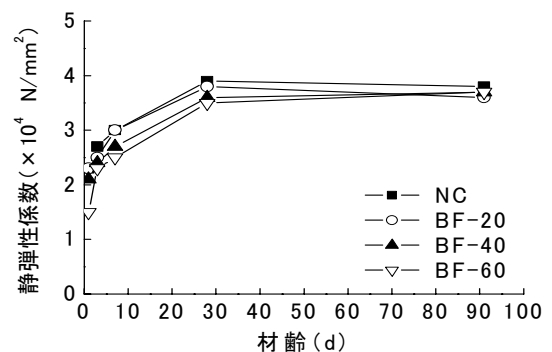


図-6 静弾性係数試験結果

結果を図-8に示す。高炉スラグ微粉末混入量の増加に伴いコンクリートの自己収縮は大きくなっており、材齢28日でNCと比べ最大100μ程度の差が生じている。特に、NCとBF-20の差が大きく、高炉スラグ微粉末混入が自己収縮に与える影響が大きいことが分かる。一方、乾燥収縮はNCとBF-20の差がわずかで、BF-40で若干大きくなっている。BF-40と

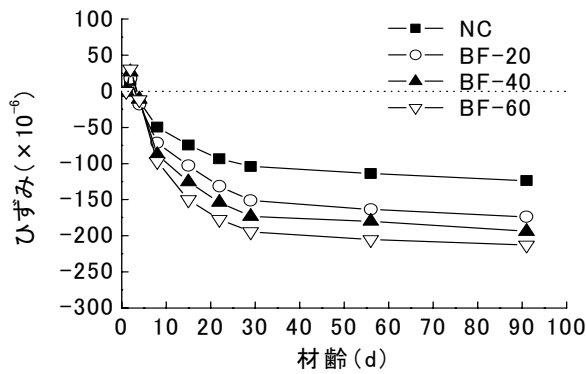


図-7 自己収縮測定結果

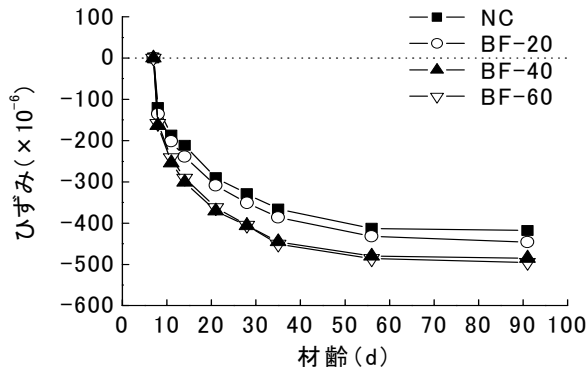


図-8 乾燥収縮測定結果

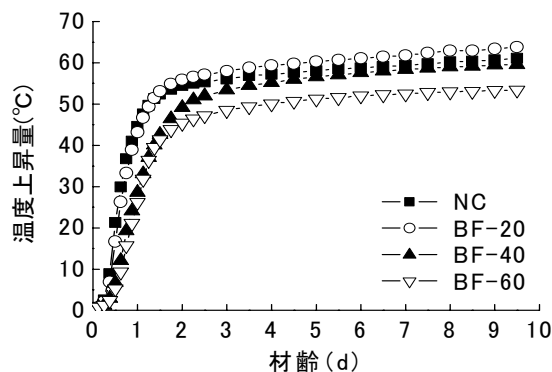


図-9 断熱温度上昇試験結果

表-4 断熱温度上昇式

種別	打設温度 (°C)	$Q(t)=Q_{\infty}\{1-\exp(-\gamma t)\}$	
		Q_{∞}	γ
NC	20	59.2	1.17
BF-20		62.1	1.12
BF-40		59.5	0.71
BF-60		53.5	0.75

BF-60 の差はほとんど認められず、自己収縮と比べると高炉スラグ微粉末混入の影響が小さい事が明らかである。しかし、いずれも高炉スラグ微粉末混入により収縮が増大していることから、収縮応力の増大が懸念される結果となった。

次に、断熱温度上昇量試験結果を図-9に断熱温度上昇式を表-4に示す。BF-20では断熱温度上昇速度がNCとほぼ同じであるが、終局温度上昇量は若干大きくなっている。一方、

BF-40では断熱温度上昇速度が遅くなっているが、終局温度上昇量はNCとほぼ同じである。また、BF-60では断熱温度上昇速度が遅くなるとともに、終局温度上昇量も低下している。この様に、高炉スラグ微粉末混入量により断熱温度上昇速度と終局温度上昇量に大きな違いが認められた。

3.3 ひび割れ抵抗性評価

一軸拘束試験体に発生した応力と別途供試体で測定した割裂引張強度の結果を基にした近似曲線を図-10示す。なお、図中の×印はひび割れ発生を表す。高炉スラグ微粉末混入量に関係なく、材齢30日以内で付着開放区間にひび割れが確認され、そのほとんどがひび割れ幅0.5mm程度の貫通ひび割れであった。高炉スラグ微粉末混入量の増加とともにコンクリートに発生する収縮応力は大きくなり、その応力の増加速度も速くなっているが、BF-40とBF-60ではその差はわずかである。しかし、BF-60のように初期の引張強度が小さい場合には、ひび割れが発生しやすいという結果が得られた。BF-40では発生する応力がBF-60と同等程度であるにもかかわらず、ひび割れ発生がNCと

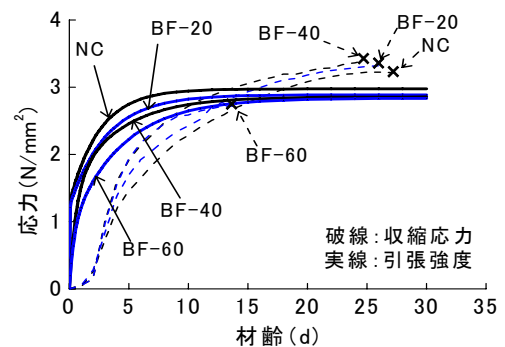


図-10 拘束試験による収縮応力

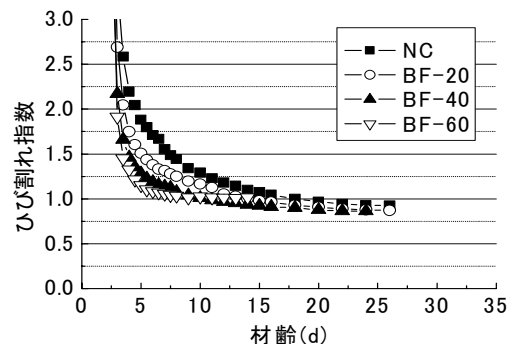


図-11 ひび割れ指数算出結果

同時期であることから、高炉スラグ微粉末混入量がセメントの40%置換程度であれば、高炉スラグ微粉末を混入しないコンクリートと同程度のひび割れ抵抗性を有していると考えられる。

次に、引張強度と引張応力の比であるひび割れ指数を図-11に示す。BF-60では応力が引張強度を上回った時点(ひび割れ指数1)でひび割れが発生しているが、それ以外では応力が上回った後もしばらくは明確なひび割れが確認されなかった。これは、一軸拘束試験体作製に用いたコンクリートは20mmふるいでウエットスクリーニングしたものであるため、収縮応力がウエットスクリーニングしていないコンクリートに比べて大きく測定されていることが影響していると考えられる。また、若材齢においては高炉スラグ微粉末混入量が増加するほどひび割れ指数が小さくなることが明らかである。

3.4 応力解析結果

応力解析結果として、出力点における主応力の経時変化を図-12に高炉スラグ微粉末混入量毎に示す。いずれも、ごく初期に温度応力により収縮応力が増加し、その後若干緩和されるが、材齢7日以降の乾燥により急激に収縮応力が増加している。コンクリート版延長が長くなると初期の応力緩和は小さく、その後の収縮応力も大きくなる傾向がある。しかし、材齢7日までの発生応力はおおむね 0.5N/mm^2 前後で引張強度に比べてかなり小さいことから、ひび割れの危険性は低く、高炉スラグ微粉末混入量の違いによる温度応力や自己収縮の差にあまり影響受けないという結果となった。一方、乾燥収縮の影響は大きく、コンクリート版延長が長くなるほど収縮応力が増大し、また高炉スラグ微粉末混入量が多くなるほど引張強度との差が小さくなりひび割れの危険性が高くなっている。

次に、ひび割れ指数算出結果を図-13に示す。ひび割れ指数は、コンクリート版の延長に関係なく高炉スラグ微粉末混入量の増加に伴い小さくなる傾向を示し、その程度はコンクリート版延長が短くなるほど顕著であった。しかし、ひ

び割れの危険性を検討すべき範囲がひび割れ指数2.0以下であることを考慮に入れると、版延長が長いほど高炉スラグ微粉末混入量によるひび割れ指数の差が重要となっている。コンクリート版延長6mでは、最もひび割れ指数が小さいBF-60においても3.0以上確保されており、ひび割れ発生の危険性はほとんどない結果となっている。コンクリート版延長が8mになると、全体的にひび割れ指数が小さくなり、特に

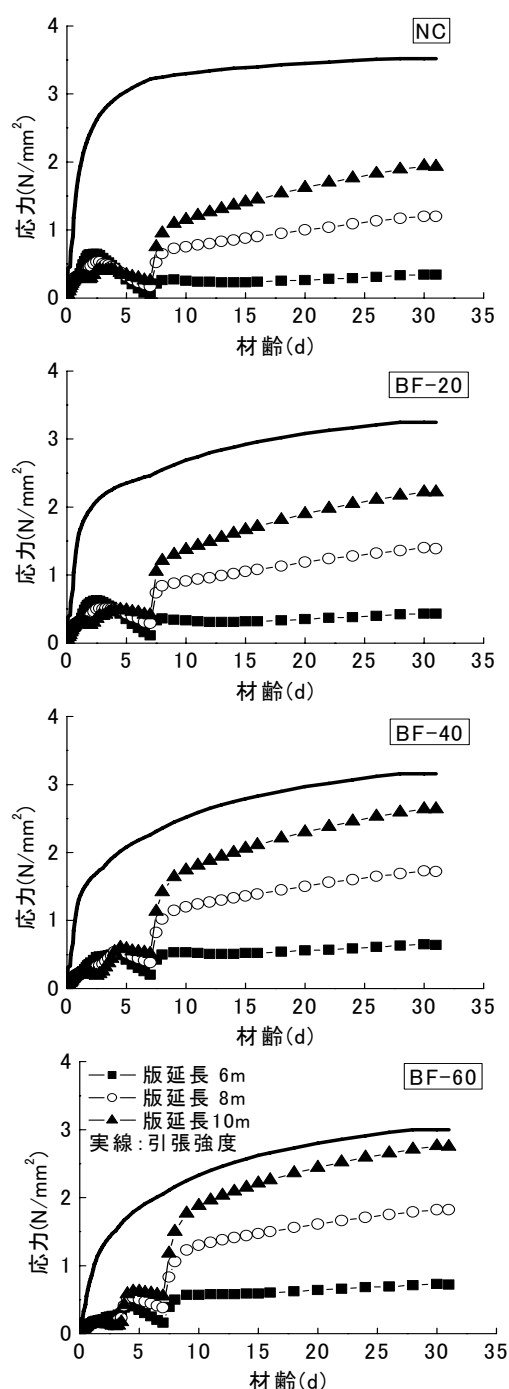


図-12 解析による主応力

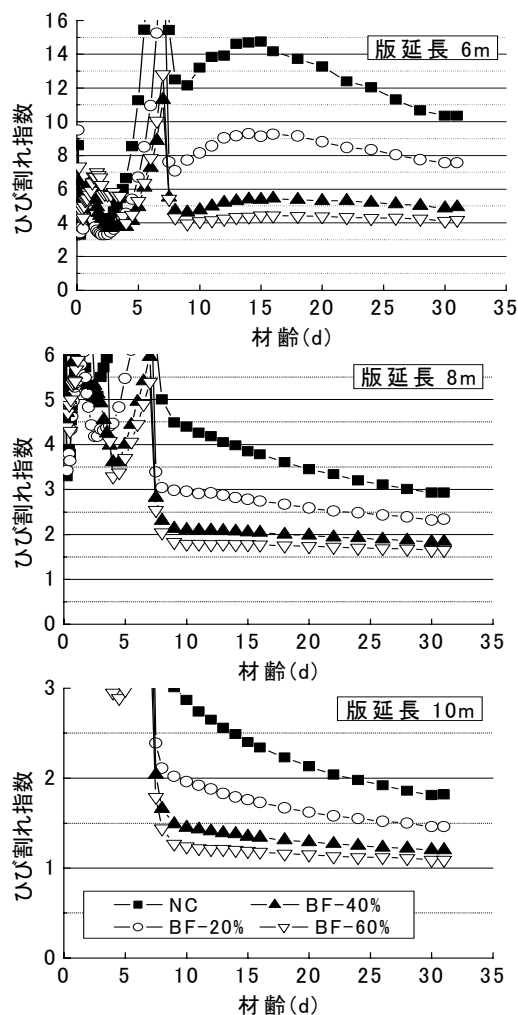


図-13 ひび割れ指数算出結果

BF-60 ではコンクリート標準示方書³⁾に示されている、ひび割れを防止したい場合の安全係数 1.75 を下回る結果となっている。さらにコンクリート版が 10m になると、NC 以外、すなわち高炉スラグ微粉末を混入すると安全係数 1.75 を保持できなくなっている。しかしながら、BF-20 ではひび割れをできるだけ制限したい場合の安全係数 1.45 以上を、BF-40、BF-60 でもひび割れの発生を許容するがひび割れ幅が過大とならないように制限したい場合の安全係数 1.00 以上は保持されている。以上の結果から、本解析の条件においてひび割れを防止したい場合のコンクリート版延長は、NC では 10m、BF-20 および BF-40 では 8m、BF-60 では 6m 程度になると考えられる。したがって、セントレアのエプロン舗装の一部で使用される高炉スラグ微粉末混入量がセメントの 40% 置換程度

のコンクリートであれば、空港舗装の目地間隔標準⁴⁾である版厚 300mm 以上の収縮目地間隔 5.0~7.5m でひび割れが誘発できると推察される。これらの実験および解析結果より、セントレアのエプロン舗装における目地計画の妥当性が示されたと考えられる。

4. まとめ

- (1) ひび割れ抵抗性に関する高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートの引張強度は、高炉スラグ微粉末混入量が多くなるほど小さくなる傾向を示した。特にこの傾向は、若材齢において顕著であった。
- (2) 上記コンクリートは、高炉スラグ微粉末混入量が多いほど収縮が大きくなり、収縮応力の増大が懸念される。
- (3) 高炉スラグ微粉末をセメントの 40% 程度置換したコンクリートは、収縮応力が増大するものの、無混入と同程度のひび割れ抵抗性を有していると考えられる。
- (4) 上記コンクリートを中部国際空港のエプロン舗装に使用した場合、ひび割れを誘発するために必要な収縮目地間隔は 5.0~7.5m であると考えられる。

謝辞

本研究の実施に際し、データ収集等において大成ロテック・大林道路・日本舗道共同企業体作業所にご協力頂いた。ここに、付記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 今井俊雄：セントレアの多様なコンクリートに応える製造システムと品質管理，セメント・コンクリート，NO.692，pp.1-8，2004.10
- 2) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの自己収縮研究委員会報告書，2002.9
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書施工編，pp.41-54，2002.3
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書舗装編，pp.180-189，2002.3