

論 文

[1067] 低発熱性特殊水中コンクリートの諸物性について

中條 昇 (熊谷組技術研究所)

正会員 佐藤 孝一 (熊谷組技術研究所)

正会員 ○土田 達 (熊谷組技術研究所)

1. はじめに

特殊水中コンクリートは、水の洗い作用に対する材料の分離抵抗性に優れているため、①水中でも強度の低下が少ない、②水質の汚濁が少ない、③目的に応じた流動性を得ることができる等の特長を活かして様々な水中構造物に適用されている。特殊水中コンクリートは粘性に富んでいるため、所要の流動性を得るために通常のコンクリートと比較し単位水量が多くなり、単位結合材量も増加することとなる。このため、適用の対象となる構造物の大型化に伴い、マスコンクリートとしての対応が要求される。特殊水中コンクリートは、水面下の施工となるため、マスコンクリートとしての対策も限られ、材料面での温度抑制対策が重要となる。

一般には、マスコンクリートの温度抑制のために、中庸熟ボルトランドセメント、高炉セメント、フライアッシュセメント等が用いられているが、その抑制効果が充分でないのが現状である。

本研究は、材料によるコンクリートの温度抑制を主眼として、中庸熟セメントに高炉スラグ微粉末やフライアッシュを高率で置換し、このセメントを用いた特殊水中コンクリートの強度特性及び熱特性を把握すると共に、得られた結果について、解析モデルを設定し温度応力解析を行い比較検討したものである。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

実験に使用した材料は、N社製中庸熟ボルトランドセメント、D社製高炉スラグ粉末、J社製フライアッシュ、細骨材（大井川水系陸砂）、粗骨材（青梅産砕石）、S社製特殊混和剤、N社製A E 減水剤及び高性能減水剤であり、主な特性を表-1に示す。

表-1 使用材料の主な特性

種 别	主 な 特 性	
中庸熟ボルトランドセメント	比重 : 3.20、比表面積 : 3250cm ² /g	
高炉スラグ粉末	比重 : 2.90、比表面積 : 4300cm ² /g	
フライアッシュ	比重 : 2.06、比表面積 : 3390cm ² /g	
細 骨 材	比重 : 2.63、F.M. : 2.63、吸水率 : 1.33%	
粗 骨 材	比重 : 2.64、F.M. : 6.72、吸水率 : 0.72% 最大寸法 : 20mm	
特殊混和剤	セルロース系高分子化合物	

表-2 試験条件

試 験 No.	セメント の種類	コンク リート の温度 (°C)	水結合 材比 (%)	S/a (%)	スランプ フロー (cm)	空気量 (%)	結合材量 100 kg 当り (ml)	単 位 量 (kg/m ³)							
								AE 減水剤	高性能 減水剤	結 合 材			細骨材	粗骨材	
										M	B	F			
1	M	20	5.8	4.0	50±2.5	4±1	400	700	2.3	220	379	—	—	655	985
2	MF	20	5.8	4.0	50±2.5	4±1	400	500	2.3	220	227	—	152	626	942
3	MB	20	5.8	4.0	50±2.5	4±1	400	300	2.3	220	38	341	—	642	966
4	MBF	20	5.8	4.0	50±2.5	4±1	400	400	2.3	220	114	151	114	629	945
5	M	20	6.5	4.0	50±2.5	4±1	400	800	2.3	220	338	—	—	668	1003
6	MF	20	6.5	4.0	50±2.5	4±1	400	600	2.3	220	203	—	135	642	969
7	MB	20	6.5	4.0	50±2.5	4±1	400	400	2.3	220	34	306	—	658	987
8	MBF	20	6.5	4.0	50±2.5	4±1	400	500	2.3	220	101	136	101	644	969
9	M	30	5.8	4.0	50±2.5	4±1	400	700	2.3	220	379	—	—	655	985
10	MF	30	5.8	4.0	50±2.5	4±1	400	500	2.3	220	227	—	152	626	942
11	MB	30	5.8	4.0	50±2.5	4±1	400	300	2.3	220	38	341	—	642	966
12	MBF	30	5.8	4.0	50±2.5	4±1	400	400	2.3	220	114	151	114	629	945

注1) 記号説明 M : 中庸熟ボルトランドセメント

注2) 結合材の混合重量比

M : M (100%)

MF : M (60%) + F (40%)

MB : M (10%) + B (90%)

MBF : M (30%) + B (40%) + F (30%)

2. 2 試験条件

本実験では、混合セメントの種類、水結合材比、練り上がり温度を要因として取上げた。表-2に実験を行った12ケースの試験条件及び配合条件を示す。なお、供試体の養生は、水中標準養生とした。

水結合材比については、実用上の最大水結合材比としての65%と、中庸熱ボルトランドセメントを用いた場合の水中での設計基準強度 240 kg/cm²に対応する水結合材比58%を選定した。

2. 3 試験項目及び試験方法

容量100 mlの強制練りミキサを用い、液体以外の材料を30秒空練りした後、液体の材料を加え、120秒練りませ、排出後直ちに測定を行った。表-3に試験項目及び試験方法を示す。

3. 試験結果

3. 1 フレッシュコンクリートの性状

フレッシュコンクリートの試験結果を表-4に示す。

1) 高性能減水剤の使用量

いずれの配合も粘稠でプラスチシティーに富み通常のコンクリートに比べて流動性に優れ、かつ優れたセルフレベリング性を有していた。

高性能減水剤の使用量はM>MF>MBF>MBの順に多く、水結合材比58%と65%を比べると、同一性状を得るための使用量は65%の方が100 ml増加した。また、水結合材比58%について試験した練り上がり温度30°Cのコンクリートは、20°Cの場合と同一配合で所要の性状が得られた。

2) PH

PH測定結果は、いずれも約9.5~11.0の範囲内であり、結合材中のセメント量の多いほど、PH値は高い傾向を示した。

3) 凝結時間

低発熱性特殊水中コンクリートの凝結時間は、セメントおよび混和剤の特性上、普通セメントを使用した場合に比べて大幅に遅延し、かつフライアッシュおよびスラグ混合率が多いほど遅延した。特殊水中コンクリートは通常、始発が5時間以上で終結が30時間以下で実施されている例が多い。したがって、実施工に際しては、凝結時間の遅延が及ぼす影響について十分な検討をし、必要に応じて凝結時間の調整などの対応が求められる。

3. 2 強度特性

3. 2. 1 圧縮強度

材令と圧縮強度の関係を図-1、2に示す。

セメントの種類による強度発現は、材令7日においては、M>MF>MBF>MBの順に大きく、

表-3 試験項目及び試験方法

試験項目	試験方法
スランプ、空気量	JIS A 1101及びJIS A 1128
スランプフロー	特殊水中コンクリートマニュアル ¹⁾
凝結時間	JIS A 6204
分離抵抗性(PH)	特殊水中コンクリートマニュアル ¹⁾
圧縮強度、引張強度	JIS A 1108及びJIS A 1113 試験材令: 4、7、28、56及び91日
静弾性係数、ボアン比	ASTM C 469、試験材令: 圧縮強度試験と同じ。
線膨脹係数	銅製型枠を用いてカールソル型ひずみ計を埋め込み測定。
熱伝導率	S社製熱伝導率試験機を用いて供試体の2側面について各3箇所、計6箇所測定し、その平均とした。
断熱温度上昇	内槽に亜鉛メッキ鉄製容器(Φ29×30cm)を使用した空気循環式断熱温度上昇測定機を用い測定した。

表-4 フレッシュコンクリートの試験結果

試験No	セメントの種類	高性能減水剤(ml)	スランプ(cm)	スランプフロー(cm)	空気量(%)	コンクリート温度(°C)	単位体積重量(kg/cm ³)	凝結時間(hr) 始発 終結	PH
1	M	700	26.0	5.2.0	3.6	20.0	2254	3.2 37.5	10.9
2	MF	500	26.5	5.2.5	4.9	20.0	2169	4.1.5 47	10.5
3	MB	300	26.5	5.2.0	3.8	20.0	2220	9.0 137.5	9.2
4	MBF	400	26.5	5.2.0	4.8	20.0	2175	4.7 70	9.9
5	M	800	26.5	5.2.5	3.8	21.0	2250	3.5.5 41.5	11.2
6	MF	600	26.5	5.2.0	4.2	21.0	2180	4.1 50	10.0
7	MB	400	26.0	5.1.5	3.9	21.0	2220	101.5 148.5	9.3
8	MBF	500	26.5	5.2.0	4.5	20.0	2168	4.9.5 72.5	9.8
9	M	700	26.5	5.2.5	4.1	30.5	—	—	—
10	MF	500	26.5	5.2.5	4.8	31.0	—	—	—
11	MB	300	26.5	5.2.5	3.9	29.5	—	—	—
12	MBF	400	26.5	5.2.5	4.5	31.5	—	—	—

注) 高性能減水剤は結合材 100kg当りの使用量 (ml)

単位結合材中のセメント量が多いものほど大きい値を示した。しかし、材令28日以降はM>MBF>MB>MFの順に大きく、MFに比べてMBF、MBを使用したもののは7日以降の強度の伸びが大きい。なお、MBの4日強度は強度発現が十分でなかったため測定できなかった。

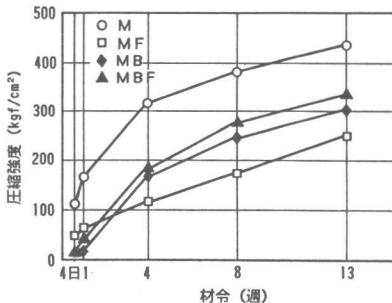


図-1 材令と圧縮強度の関係
(W/C=58%, 20 °C)

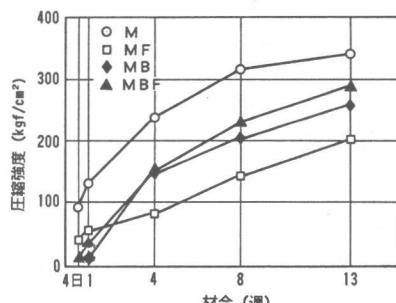


図-2 材令と圧縮強度の関係
(W/C=65%, 20 °C)

3.2.2 引張強度

セメントの種類による強度発現は、圧縮強度の場合と同様の傾向が認められた。圧縮強度と引張強度の関係を図-3に示すが、結合材および水結合材比の相違にかかわらず高度の相関関係にあり、圧縮強度に対する引張強度は約1/9であった。

3.2.3 静弾性係数およびポアソン比

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-4に示す。圧縮強度と静弾性係数の関係は、ACIの規準式 $E = 4270 \cdot W^{1.5} \sqrt{\sigma_c}$ と近似しており、通常のコンクリートと同様の関係が成立つ。

また、材令91日におけるポアソン比はセメントの種類および水結合材比にかかわらず約0.20～0.24の範囲内にあり、通常のコンクリートと同様であった。

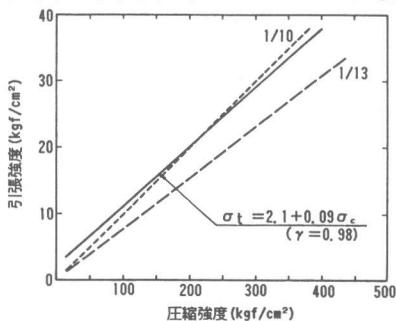


図-3 圧縮強度と引張強度の関係

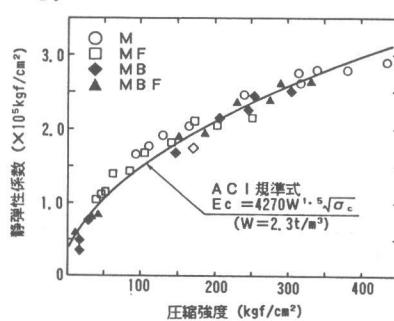


図-4 圧縮強度と静弾性係数の関係

3.3 热特性

4種類のセメントを用いた水結合材比58%のコンクリートの線膨張係数および熱伝導率を表-5に示す。

3.3.1 線膨張係数

線膨張係数の値は、 $8.3 \sim 8.9 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ の範囲にあり、通常のコンクリートに比べ若干小さめの値となっている。²⁾これは特殊水中コンクリートの配合が通常のコンクリートと異なりその単位水量が著しく多いことによるものと考えられる。

3.3.2 热伝導率

热伝導率は1.1～1.4 kcal/m·hr·°C範囲であり、通常のコンクリートに比べ小さめの値となっ

セメントの種類	水結合材比(%)	線膨張係数($\times 10^{-6}$)	热伝導率(Kcal/m·hr·°C)
M	58	8.81	1.423
MF		8.28	1.288
MB		8.47	1.409
MBF		8.87	1.145

ている²⁾。これも線膨張係数の場合と同様にコンクリートの単位水量が著しく多いことによるものと考えられる。

3. 3. 3 断熱温度上昇

断熱温度上昇試験結果を図-5～7および表-6に示す。断熱温度の上昇カーブは、通常のコンクリートの場合に比べ、初期のゆるやかな上昇が顕著になっている。温度上昇の立上がりは、結合材中の混和材量が多いほど遅くなっている。上記温度上昇カーブは一つの回帰式では表わせないため、本報では温度上昇の立上がりに変曲点を設け、その変曲点までを直線式、以降を一般の指數式で回帰させて示している。

試験温度20℃における断熱温度上昇量はM>MF>MBF>MBの順に大きく、Mで46～47℃、MFで42～43℃、MBFで37～39℃、MBで25～26℃であった。この断熱温度上昇量は図-8に示すように結合材中のセメント量が多いほど大きくなっている。また、試験温度20℃の場合と30℃の場合では断熱温度上昇量に大きな差は認められなかった。

表-6 断熱温度上昇

セメントの種類	水結合材比(%)	コンクリートの温度	変曲点 t'(日)	T1		T2	
				a	K	α	T_{∞}
M	58	20℃	0.75	5.07	43.48	1.21	47.4
			0.75	4.73	40.78	0.48	43.2
			4.00	1.90	19.21	0.70	26.7
			0.75	3.76	39.75	0.35	39.1
MF	65	20℃	0.75	5.24	40.03	1.03	46.2
			0.75	4.24	39.87	0.47	42.6
			4.00	2.09	16.70	0.73	25.4
			0.75	3.76	41.57	0.23	37.0
MB	58	30℃	0.75	4.50	47.23	1.60	49.9
			0.50	3.10	39.49	0.86	40.4
			2.00	2.98	18.36	1.57	25.1
			1.75	7.15	23.51	1.32	36.2
MBF			0.75	4.50	47.23	1.60	49.9
			0.50	3.10	39.49	0.86	40.4
			2.00	2.98	18.36	1.57	25.1
			1.75	7.15	23.51	1.32	36.2

$$0 < t < t' \text{ のとき, } T_1 = a t - \alpha(t - t') \quad \text{ここに, } T_1, T_2 : \text{断熱温度上昇} \\ t' < t < \infty \text{ のとき, } T_2 = K \{1 - e^{-\alpha(t - t')}\} \quad K : \text{実験定数} \\ T = T_1 + T_2 \quad a : \text{初期発熱勾配} \\ \alpha : \text{温度上昇の速さ} \\ e : \text{自然対数の底} \\ t, t' : \text{材令(日)} \\ 0 < t < t' \text{ のとき, } T_1 = a t - \alpha(t - t') \quad \text{ここに, } T_1, T_2 : \text{断熱温度上昇} \\ t' < t < \infty \text{ のとき, } T_2 = K \{1 - e^{-\alpha(t - t')}\} \quad K : \text{実験定数} \\ T = T_1 + T_2 \quad a : \text{初期発熱勾配} \\ \alpha : \text{温度上昇の速さ} \\ e : \text{自然対数の底} \\ t, t' : \text{材令(日)}$$

4. 温度応力解析

マッシブなコンクリートの温度ひびわれ低減のために求められるセメントの性質は、水和熱が小さく、強度発現特性が優れていることである。しかしほんどの発熱特性と強度特性はいずれも水和速度に依存するものであり、発熱が小さいということと強度発現性が良いという性質は相反するものと言える。今回試験を行った4種類のセメントは、低発熱性を主眼としたものであり、その強度発現性には、かなりの遅延が見られる。このような強度特性、熱特性を持つコンクリートの温度応力、ひびわれ危険度の評価を行うために、解析モデルを設定

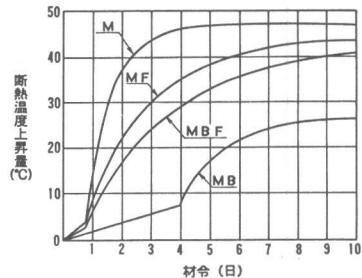


図-5 断熱温度上昇
(W/C=58%, 20 ℃)

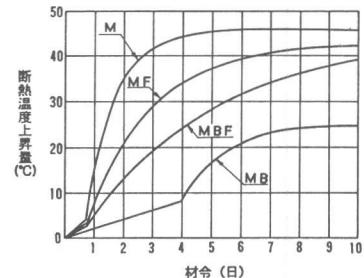


図-6 断熱温度上昇
(W/C=65%, 20 ℃)

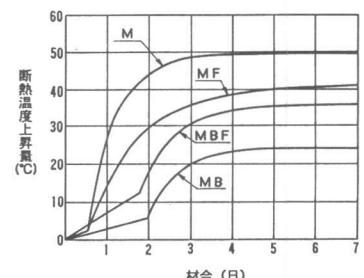


図-7 断熱温度上昇
(W/C=58%, 30 ℃)

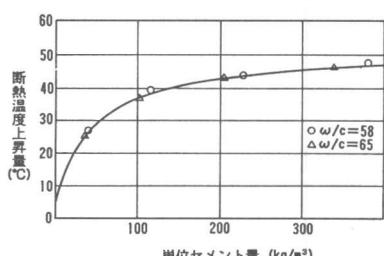


図-8 単位セメント量と断熱温度上昇

し、 $w/c=58\%$ のコンクリートについて実験で求められた強度特性、熱特性を用いて温度応力解析を行った。なお、解析にあたっては、各セメントを用いたコンクリートの相対比較を目的としたため、境界条件においては、水中打設としての条件は考慮していない。以下にその結果を示す。

4. 1 解析条件

1) 解析方法

解析は有限要素法により行った。

2) 解析定数

解析に用いた定数を表-7に示す。

拘束コンクリートについては、中庸熟ボルトランドセメントを用いたコンクリートとして設定した。

3) 解析モデル

解析モデルを図-9に示す。解析モデルは、相対比較の結果が顕著に表れるように、拘束コンクリートは、高さ10m、幅40mの大きな部材を設定し、解析対象部分のコンクリートは、リフト高1.5mを設定した。

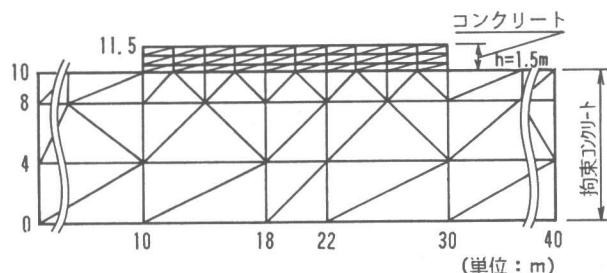


図-9 解析モデル

表-7 解析定数

	断熱温度上昇量	熱伝導率	比熱	熱伝達率	線膨張係数	比重	ポアソン比	引張強度	弾性係数	温度
コンクリート	表-6の値	表-5の値 Kcal/ kg.°C	0.22 Kcal/ kg.°C	5.0 Kcal/ m².hr.°C	表-5の値	2.20 t/m³	1.67	$1.4\sqrt{Fct}$ $Fct:$ 図-3 の値	$15300\sqrt{Fct}$ $Fct:$ 図-4 の値	20°C (打設温度)
拘束コンクリート	—	1.423 Kcal/ m.hr.°C	0.22 Kcal/ kg.°C	—	8.81×10^{-6} /°C	2.20 t/m³	1.67	—	2.7×10^5 kg/cm²	20°C

4. 2 解析結果

1) 温度解析結果

温度解析結果を図-10に示す。この図では最も温度上昇量の大きい部材中心部の温度履歴を示している。温度上昇量はM>MF>MB>MBFの順に大きく、最高温度はそれぞれM=58°C、MBF=49°C、MF=47°C、MB=38°Cとなっている。MBFとMFの最高温度が断熱温度上昇量と逆の結果となっているが、これは熱伝導率と断熱温度上昇速度が影響したものと考えられる。

2) 応力解析結果

応力解析結果を図-11に示す。最大発生応力はM>MBF>MF>MBの順に大き

く、M=35.6kgf/cm²、MBF=21.7kgf/cm²、MF=12.5kgf/cm²、MB=11.7kgf/cm²となっている。温度解析結果では、MFとMBの最高温度の差は9°Cであったが、発生応力ではその差はほとんどなくなっている。これはMFの圧縮強度の発現が遅く、弾性係数が小さいためと考えられる。

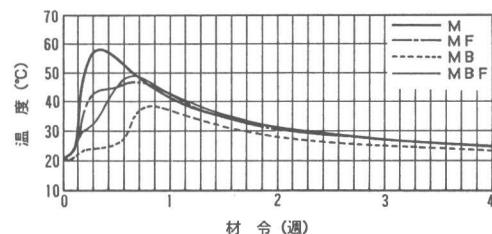


図-10 温度解析結果

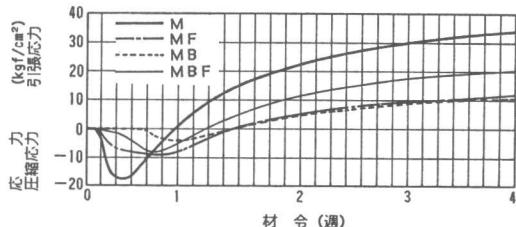


図-11 応力解析結果

4.3 強度特性・熱特性とひびわれ指数

マスコンに発生する温度応力は温度変化量から求められる拘束ひずみと弾性係数の積で表される。弾性係数は、圧縮強度の関数で表現でき、温度依存性があるため、通常温度上昇量が大きい場合には弾性係数も大きな値となる。

しかし、今回試験を行った4種類のコンクリートのうち、MFは温度上昇量は大きいが、圧縮強度（弾性係数）の発現が小さく、発生応力は小さな値となっている。また、MBは圧縮強度の発現はMBFと同程度であるが温度上昇量が小さいため、発生応力も小さく、MFとMBの応力はほぼ同じ値となっている。この結果は、図-12に示すひびわれ指数にもそのまま現れており、ひびわれ指数 F_t/σ_t は、M < MBF < MF < MB の順となっている。

5.まとめ

各種セメントを用いた特殊水中コンクリートの特徴と留意点を以下に示す。

- 1) 低発熱性セメントを使用した特殊水中コンクリートの凝結時間は、普通セメントを使用した場合に比べて大幅に遅延する。そのため、実施工時には、凝結時間の遅延が及ぼす影響について十分な検討をし、必要に応じて凝結時間の調整などの対応が求められる。
- 2) MBF、MBの初期強度は低いが、7日以降の強度の伸びは大きく、逆にMFは小さい。引張強度および静弾性係数も同様の結果であった。
- 3) M（中庸熱）：4種類中最も温度上昇量が大きく、発生応力も 35.6kgf/cm^2 と大きいが、強度発現性は最も大きい。
- 4) MF（中庸熱+フライアッシュ）：温度上昇量は大きいが、強度発現性が小さく、発生応力は小さい。所要強度を得るために他の種類に比べ、単位結合材量が増える可能性がある。
- 5) MB（中庸熱+高炉スラグ）：温度上昇量、発生応力とも最も小さく、また強度発現性もMBFと同程度であり、マスコン用セメントとしては最も適しているが、凝結時間が著しく遅延するため、施工上の考慮が必要である。
- 6) MBF（中庸熱+フライアッシュ+高炉スラグ）：温度上昇量はMFと、強度発現性はMBとほぼ同等であり、発生応力はMとMBの中間値となっている。

本報告において4種類の低発熱性セメントを用いた特殊水中コンクリートの諸物性について述べたが、低発熱性セメントとしては、混和剤の種類、混合率などを変えた種々のものが考えられる。実施工においては設計条件、施工条件などを考慮し、コンクリートの強度特性、熱特性、フレッシュコンクリートの性質を総合的に判断し、最適なセメント・配合を選定することになる。本報告がその際の参考となれば幸いである。

参考文献

- 1) 沿岸開発技術研究センター、漁港漁村建設技術研究所：特殊水中コンクリート・マニュアル（設計・施工）、昭和61年11月
- 2) 日本コンクリート工学協会：JCI-C2 マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集、昭和57年9月

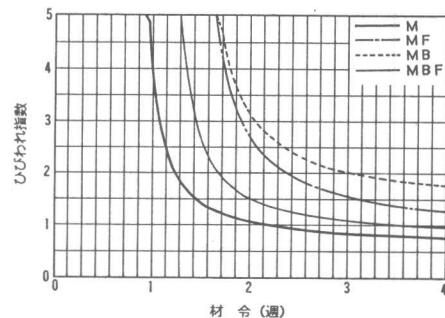


図-12 ひびわれ指數