

耐食性 PC 鋼材の諸特性について

川 端 義 則*
山 岡 幸 男*

1. 結 言

現在、プレストレスト コンクリート用緊張材としては主として、炭素鋼線が用いられており、レラクセーション挙動^{1),2)}、低温での機械的性質^{3),4)}、新しい施工法⁵⁾など種々の研究が行われている。一方、伸線加工をうけたオーステナイト系ステンレス鋼線は高炭素鋼線に匹敵する強度をもち、しかも耐食性がすぐれていると考えられるが、緊張材という観点から特性を調べた報告は見あたらない。そこで、強加工したステンレス鋼線について機械的性質、レラクセーション挙動やステンレス鋼線として特徴を示す磁性、応力腐食、耐食性、耐酸化性などを調べるとともに、鋼より線を製作し、高炭素鋼線と比較することによって緊張材としてのステンレス鋼線の特徴を明らかにした。

2. 供 試 材

表—1 に供試材の化学成分を示す。材料は JIS G 4308 (1972) に規定されているステンレス鋼線材で通常 18-8 ステンレスと呼ばれているものである。

表—2 に種々の特性値を調べるために伸線加工によって製作したステンレス鋼線の機械的性質を示す。ステンレス鋼線は 500°C で 5 分間のブルーイング処理を行うと、レラクセーション値がもっとも小さくなることがわかっている⁶⁾、表—2 の供試材の値もブルーイング処理を施したものを示した。引張強さは 180 kg/mm²

表—1 供試材の化学成分 (wt %)

材 料	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
SUS 304	0.084	0.48	0.77	0.034	0.020	8.58	19.10

表—2 供試材の機械的性質 (500°C 5分ブルーイング処理)

線 径 (mm)	引 張 強 度		降 伏 強 度		伸 び (%) GL=100mm	ヤング率 (kg/mm ²)
	引張荷重 (kg)	引張強さ (kg/mm ²)	降伏荷重 (kg)	耐 力 (kg/mm ²)		
4.0	2260	180	2150	171	2.5	16 000

* 神鋼鋼線工業 (株) 研究開発部

である。ヤング率は 16 000 kg/mm² であり、高炭素鋼線より 20% ほど低い。

なお、ステンレス鋼線の特徴を明らかにするため、比較材としては JIS G 3502 SWRS 77 B に規定されている高炭素鋼線の種々の線径 (2.9~5 φmm) や処理 (ホットストレッチング、ブルーイング) のものを用いた。

3. 実験方法

表—2 の供試材について、機械的性質、レラクセーション、磁気特性、応力腐食、耐食、耐酸化性を調べた。また、表—2 の供試材と同じ方法で製作した 5.20 φmm と 5.0 φmm の wire を用いて呼び径 15.2 mm (0.6 in) のステレレス鋼より線を製造し、機械的性質を調べ、実際の緊張作業も行った。線についての特性値は次の方法によって求めた。比較材の高炭素鋼線も同様である。

(1) 引張試験

−160~750°C までの温度でインストロン型引張試験機を用いて引張速度 5 mm/min で行った。200~750°C までは管状電気炉によって加熱し、−100°C、−160°C は液体窒素を気化して雰囲気調整を行った低温槽を用いた。

(2) レラクセーション試験

JIS G 3536 に準じて室温の引張強さの 70% の初荷重で 10 時間後のレラクセーション値を求めた。100~200°C での試験は熱風循環方式の間接加熱によった。温度はいずれの場合も ±1°C 以内に制御した。用いた試験機は容量 10 t の自動平衡式レラクセーション試験機で、試験片に伸び計を取り付け差動変圧器でひずみを検出し、そのひずみ変化量に応じて送錘の位置を自動的に移動させて試験片の全ひずみを一定に保つ機構になっている。

(3) 疲労試験

ヘイロバートソン式繰返し曲げ疲労試験機を用いて室温で 2×10^6 回繰返して破断しない最高の曲げ応力を求めて疲労強度を決定した。応力繰返し数は 3 600 rpm である。

(4) 透磁率の測定

焼鈍したままのステンレス鋼線は常磁性であり、磁性

はないが、冷間加工を施すと少し磁気を帯びてくる。そこで、表—2 に示す 4.0 mm の供試材を製作する途中の段階で各加工度ごとに磁気の帯びやすさ（透磁率）を測定した。測定は 200 エルステッドの磁場をもつソレノイド中に試験片をそう入し、ソレノイドの磁場を逆転させたときの ガルバノメータの振れの読みから式（1）を用いて透磁率 μ を計算した。比較のため 89% 加工した高炭素鋼線についても行った。

$$\mu = 1 + 0.98 \times \frac{T}{A} \dots\dots\dots (1)$$

ここに μ : 透磁率

T : ガルバノメータの読み (mm)

A : 試験片断面積 (mm²)

（5） 応力腐食、耐食性および耐酸化性試験

ステンレス鋼線でも高炭素鋼線と同様にある種の環境（塩化物溶液など）では、応力腐食が発生するといわれている。そこで片持ちばり式の治具を用いて引張強さの 70% の応力を負荷し、3% NaCl, 20% NaCl, 3% NaCl + 0.05% および 0.13% H₂SO₄ 水溶液中で室温放置による長時間応力腐食試験を行った。割れの有無は数か月ごとに浸漬試験片を取り出し、肉眼観察によった。

耐食性試験は 5% NaCl + 1% H₂SO₄ 水溶液中に試験片を浸漬し、室温で 100 hr までの試験を行って、腐食量を求めた。比較材としては Zn めっきおよび Al めっきを施した高炭素鋼線を用いた。

耐酸化性を調べた試験は、空气中で 500~1000°C の温度で 3 時間加熱し、酸化増量を求めて酸化抵抗を高炭素鋼線と比較した。

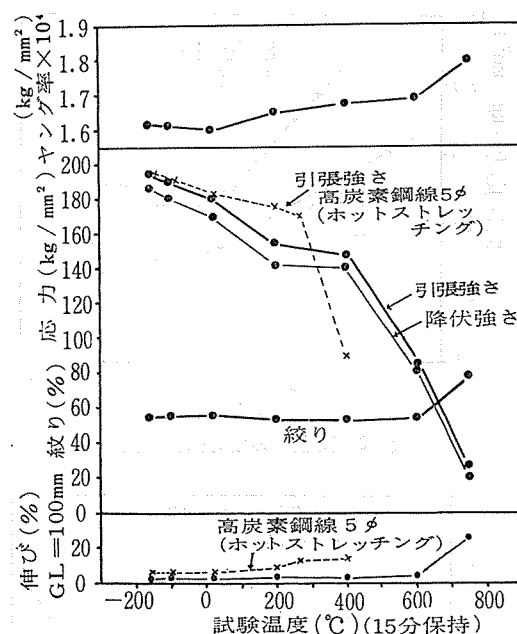
4. 実験結果および考察

（1） 機械的性質

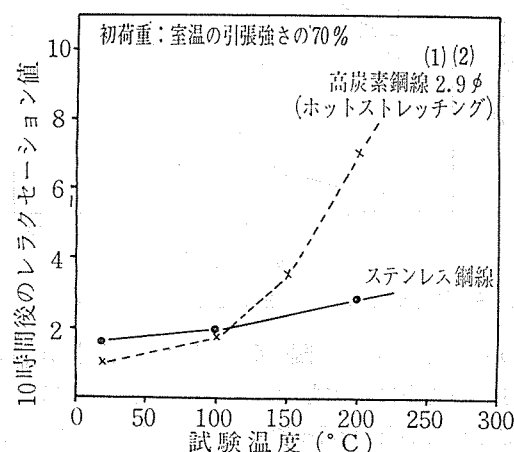
図—1 に試験温度によって機械的性質がどのように変化するかを示す。高炭素鋼線とのもっとも大きな違いは 300°C 以上の高温でステンレス鋼線は強度が高いということであり、これは Cr を 19%, Ni を 8.5% も含有することにより再結晶温度が高くなることが原因である。また、ヤング率は 16 000~17 000 kg/mm² であり高炭素鋼線の 20 000~21 000 kg/mm² と比べて 20% ほど低い。この点はコンクリートの乾燥収縮、クリープなどによる応力低下量が高弾性材料と比べて少なくてすむことを意味している。

ただ、伸びが高炭素鋼線より若干小さいことは緊張時に注意を要する点であるが、後述するように緊張作業はとくに問題がないことを確認している。

図—2 は 20~200°C のレラクセーション値を高炭素鋼線のホットストレッチング材^{1), 2)}と比較したものであ



図—1 試験温度による機械的性質の変化
(ステンレス鋼と高炭素鋼の比較)



図—2 レラクセーション特性の温度依存性

る。ステンレス鋼線はレラクセーションの温度依存性が小さく、とくに 100°C 以上で高炭素鋼線との差が明瞭になる。レラクセーションは、ある時間内に動いた格子欠陥（転位）の数と速さによって決まると考えられており¹⁾、ステンレス鋼線の高温レラクセーション値が小さいのは、含まれている多量の Cr, Ni などが転位を動きにくくしていることとかかわりがあると推定される。

図—3 は疲労試験の結果である。ステンレス鋼線は一般に耐久比（疲労強度／引張強さ）が小さく、0.15~0.25 の間にあるが、高炭素鋼線では 0.25~0.35 であるため、図—3 のようにステンレス鋼線の疲労強度は、やや低くなっている。

（2） 磁氣的性質

ステンレス鋼線を冷間加工すると強磁性相（マルテンサイト）が発生することは著者ら⁶⁾によって詳しく調べられている。そこで、本実験でも加工による磁性変化を

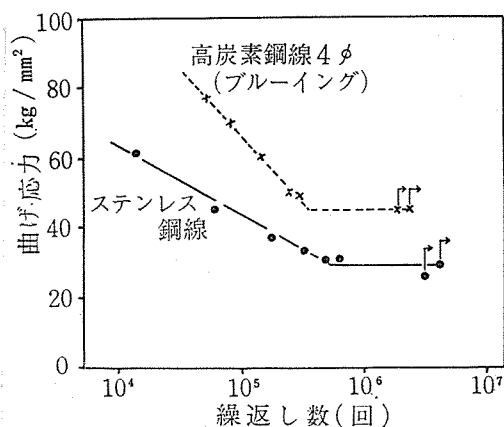


図-3 室温での疲労強度特性

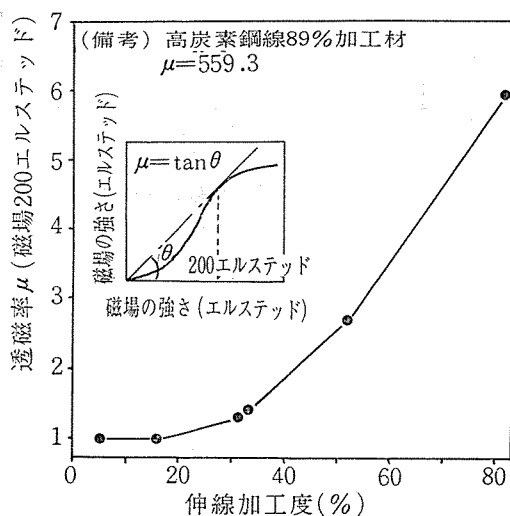
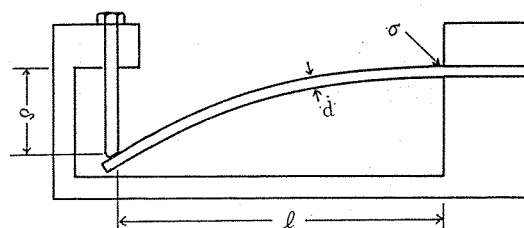


図-4 伸線加工による磁性の変化(ステンレス鋼線)

確かめてみた。結果を図-4に示す。透磁率 μ は、ある強さの磁場中に物体を置いた場合、その物体がどの程度磁化されたかという磁化倍率を示したもので、 $\mu=1$ という値は常磁性であり磁気に感じない。ステンレス鋼線を80%ほど加工すると $\mu=6$ となるが、この値はかなり強い磁石を近づけても、かすかに動く程度である。一方、高炭素鋼線は図-4に併記したように $\mu=560$ である。したがって、ステンレス鋼線は、高炭素鋼線の約1/100であり、磁性はないと考えて取り扱ってもよいといえる。

(3) 応力腐食・耐食性および酸化抵抗

図-5は供試材に 136 kg/mm^2 (引張強さの70%)の曲げ応力を負荷し、室温で主としてNaCl系の溶液に浸漬して応力腐食割れを調べた結果である。最長3年間での結果では割れは認められず、孔食も発生していない。一般にステンレス鋼を含めて金属材料は海洋生物が付着するような自然海水環境では激しい孔食(隙間腐食)が発生するが⁹⁾、単にNaClを溶解しているだけではステンレス鋼は良好な耐食性を示す。ステンレスの応力腐食は通常 60°C 以下では起こらないといわれており⁹⁾、本



$$\sigma = \frac{3Ed\delta}{2l^2} = 136 \text{ kg/mm}^2 \quad (\text{引張強さ} \times 0.7)$$

水溶液の種類	試験期間	
	3か月後	3年後
3%NaCl (噴霧)	割れなし	割れなし
3%NaCl	割れなし	割れなし
20%NaCl	割れなし	割れなし
3%NaCl+0.05% H_2SO_4	割れなし	—
3%NaCl+0.13% H_2SO_4	割れなし	—

E : ヤング率 d : 線径 δ : たわみ
 l : スパン σ : 最大表皮応力

図-5 片持ばり式治具による室温での各種溶液中におけるステンレス鋼線の応力腐食試験結果

実験の場合も、自然海水中で使用されない限りは、応力腐食の活性化エネルギー^{9)~11)}から考えても実用的には応力腐食は起こらないと考えて取扱っても問題はない。

ただ、加工度が5~15%と小さい場合、応力腐食が非常に起こりやすいことはすでに著者の一人が報告しており¹²⁾、応力が高いと大気中暴露のみによっても数年で応力腐食破断が起こる場合があるので、緊張材としては弱加工したものは注意を要する問題である。

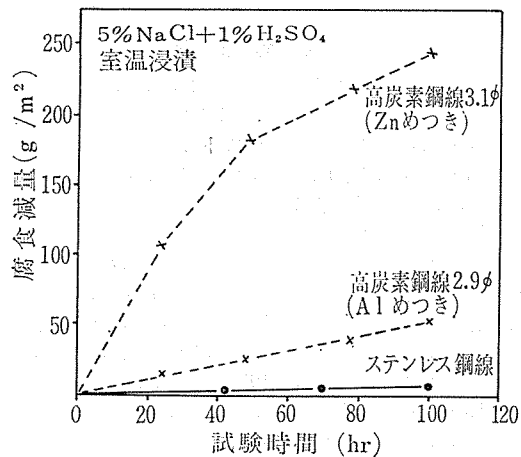
図-6に腐食試験結果を示す。ステンレス鋼は耐食性が優れており、上述の自然海洋での腐食を除けば他の自然環境では良好であり、高炭素鋼線と比較すれば数十分の1から百分の1である。

図-7は空気中での酸化抵抗を示したもので、ステンレス鋼線は高温で緻密な酸化膜が形成されるため、酸化されにくいことがうかがえる。

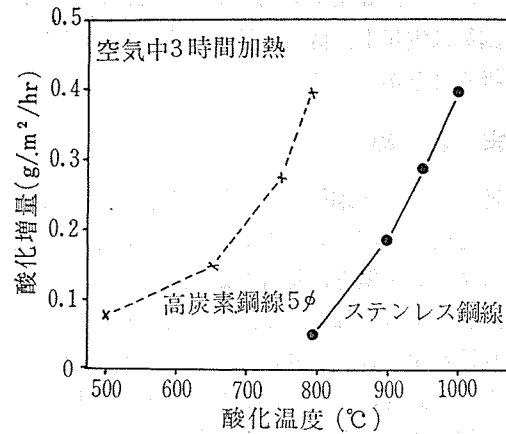
(4) 耐食性ステンレス鋼より線の特性

以上の議論はステンレス鋼線の特徴を明らかにするために調べたのであるが、実際に呼び名7本より15.2mm(0.6in)の鋼より線についても特性値を求めた。表-3に結果を示す。引張強さ 21900 kg (157 kg/mm^2)、10時間後のレラクセーション値1.02%が得られた。ヤング率は図-1で述べたようにやはり高炭素鋼線より20%ほど低い。透磁率は3.64でありほとんど磁性はない。

ところで、表-3の鋼より線を緊張時に用いる定着用チャック(ステンレス製)でつかみ、引張試験を行ったところ定着効率は97%であり、高炭素鋼より線と比べて特に問題はなかった。また、長さ5000mm×幅2000mm×厚さ400mmのコンクリート板について、ポスト



図—6 室温での 5% NaCl+1% H₂SO₄ 水溶液中の耐食性 (高炭素鋼線めっき処理材との比較)



図—7 空气中で酸化したときの耐酸化性の比較

表—3 耐食性ステンレス鋼より線の機械的性質 (500°C ブルーイング処理)

呼 び 名	引 張 強 度		降 伏 強 度		ヤング率 (kg/mm ²)	伸 び (%) GL=600mm	レラクセーション		透 磁 率 (μ) 200 エルステッド
	引張荷重 (kg)	引張強さ (kg/mm ²)	降伏強度 (kg)	耐 力 (kg/mm ²)			レラクセーション値 (%)	試験時間 (hr)	
7本より 15.2mm	21900	157	19000	137	16250	4.6	1.02	10	3.64

テンション方式で CCL ジャッキを用いて緊張を行ったが、作業上特に問題はなかった。

なお、ステンレス鋼線は 図—1 のように引張試験での絞り率は 50~60% と大きいのでヘッディング加工は容易であり、ヘッディングによって強度が低下することはない。

5. 耐食性ステンレス鋼線および鋼より線の標準特性

ステンレス鋼線は伸線加工性が劣るので太径材では高炭素鋼線および鋼より線のような高強度は得にくい、表—4 に示すように 7 本よりステンレス鋼より線 15.2 mm (0.6 in) で引張荷重 20 200 kg 以上 (引張強さ 145 kg/mm² 以上) のものが製作可能であり、レラクセーション特性などより考えて緊張材として十分実用に供しうる。ステンレス鋼線および鋼より線は伸びが低い。ヤン

グ率は高炭素鋼線より 20% ほど小さくコンクリートの乾燥収縮およびクリープによる応力低下という点で高炭素鋼線では得られない特性も備えており、以下に示すような特殊な用途での緊張材として有用性を発揮すると考えている。

- 1) 耐食性を必要とする場合：ステンレス鋼線は高炭素鋼線の数十分の 1 の耐食性を示す。
- 2) 磁性をきらう場合：ステンレス鋼線はほとんど磁気を感じないので、磁場ある環境でも使用できる。
- 3) 高温レラクセーションを小さくしたい場合：200 °C でも十分実用に耐えうるといえられる。
- 4) 高温強度を必要とする場合：高炭素鋼線は室温強度が半減する温度は約 400°C であるが、ステンレス鋼線は 600°C であり、特に 300°C~500°C の温度で高炭素鋼線より高強度を示す。
- 5) 低温脆性の心配がある場合：現用の高炭素鋼線で

表—4 耐食性ステンレス鋼線および鋼より線の標準特性

材 料	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
SUS 304*	0.08 以下	1.0 以下	2.0 以下	0.04 以下	0.03 以下	8.0~10.5	18.0~20.0

種 類	呼 び 名	標 準 断面積 (mm ²)	引 張 強 度		降 伏 強 度		伸び*** (%)	レラクセーション***	
			引張荷重 (kg)	引張強さ (kg/mm ²)	降伏荷重 (kg)	耐 力 (kg/mm ²)		レラクセーション値 (%)	試験時間 (hr)
鋼 線	4.0	12.6	2150 以上	170 以上	1750 以上	140 以上	2.0 以上	2.5 以下	10
	5.0	19.6	3050 以上	155 以上	2550 以上	130 以上	2.0 以上	2.5 以下	10
	7.0	38.5	5400 以上	140 以上	4450 以上	115 以上	2.0 以上	2.5 以下	10
鋼より線 (7本より線)	12.4	92.9	13900 以上	150 以上	11600 以上	125 以上	2.0 以上	2.5 以下	10
	15.2	138.7	20200 以上	145 以上	16700 以上	120 以上	2.0 以上	2.5 以下	10

* JIS G 4308(1972), ** 鋼線は測定長 100 mm, 鋼より線は 600 mm, *** 初荷重は耐力×0.8

もかなり低温まで実用に供し得るが、ステンレス鋼線は実用上、低温脆性を示さないと考えて取り扱うことができる。

6. ま と め

耐食性ステンレス鋼線および鋼より線を用いて、緊張材として必要な強度、レラクセーション、応力腐食、耐食性やステンレス鋼線に特有な磁氣的性質などを調べた結果、ステンレス鋼線および鋼より線は高炭素鋼線に比べて耐食性がすぐれており、高温でのレラクセーション値も小さく、磁性はほとんど感じないので磁場のある環境でも使用できるなど、すぐれた特徴を備えており、特殊用途の緊張材として十分実用に供しうることがあきらかとなった。

参 考 文 献

- 1) 富岡, 倉内: 材料 22 (1973) 232 p. 25
- 2) 土井: 東京大学博士論文 (1972) p. 76
- 3) Doi, Tomioka 等: プレストレスト コンクリート 16 (1974) 第7回 FIP 大会特集号 p. 109
- 4) 平坂, 南雲等: 第15回プレストレスト コンクリート講演概要集 (1975) p. 5
- 5) 川端: プレストレストコンクリート 17 (1975) 2, p. 42
- 6) 川端, 山岡ほか: 鉄と鋼 61 (1975) 8 p. 30
- 7) 藤井, 熊田等: 日本金属学会誌 34 (1970) 5 p. 534
- 8) 下平: 日本金属学会誌 24 (1960) 10, p. 223 A
- 9) 須永: ステンレス 7 (1974) 7, p. 26
- 10) Kohl: Corrosion 23 (1967), p. 39
- 11) 下平: 鉄と鋼 55 (1967) 7, p. 68
- 12) 川端等: 鉄と鋼 61 (1975) 7, p. 166

1976.1.22・受付

プレストレスト コンクリート 第7回 FIP 大会特集増刊号 (英文)

昭和 49 年5月発行 B5判 117 頁

定 価: 1800 円 (会員特別頒価 1500 円)

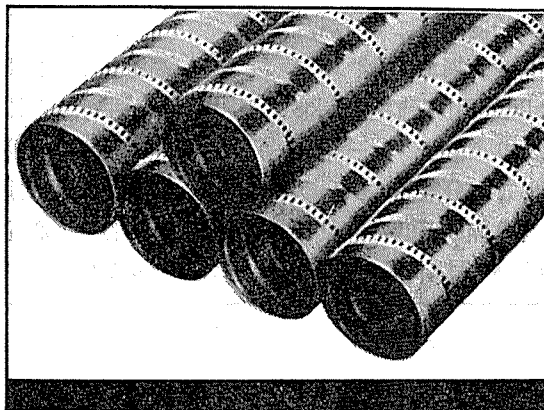
送 料: 200 円

内 容: 1974 年5月ニューヨークで開かれた FIP (国際プレストレッシング連盟) 大会にわが国より提出された論文 (英文) をとりまとめたもので、詳細は会誌 16 巻2号参照。

スパイラル・シース®

〈標準型・WS型〉

●PC構造物・
工法に抜群の好
評をいただいて
おります



スパイラル・シースには標準型とWS型の二種類があり、用途、工法などによりご選択いただけます。

●用途
道路橋・鉄道橋、モノレール桁、ダム、水槽、タンク、海洋開発、沈埋トンネル、PCセグメント、舗装、プール、PCパイル、PCヒューム管、他各種のPC構造物。

■神奈川県工業試験所で製品の優秀性実証!

■国土建設に貢献する一



PC器材の専門メーカー

鋼弦器材株式会社

取締役社長 平野勝之助

本社工場 〒220 横浜市西区中央2丁目42番6号

電話 横浜045(321) 5851番 (代表)

大阪工場 〒570 大阪府守口市大久保町2丁目166番地

電話 大阪06(902) 6473~4番

重要構造物にはマイテイ

日本は、現在コンクリートの高強度化で世界の最先端を行っています。すでに設計基準強度 $800\text{kg}/\text{cm}^2$ という超高強度マイテイコンクリートを用いたPCトラス鉄道橋が施工されているのです。

マイテイを添加するとどうして高強度コンクリートが作れるのでしょうか!?

1919年D・A・Abramsにより提唱された水セメント比説(アブラムの理論)を思い出して下さい。「清浄で強硬な骨材を用いる場合、そのコンクリートがプラスチックでワーカブルであるならば、コンクリートの強度はセメントペーストの水セメント比によって定まる」という理論です。つまり生コンクリートがプラスチックでワーカブルであるならば混練水が少なければ少ない程そのコンクリートの強度は高くなるという訳です。マイテイは、この50年も前の夢を今実現し世界の最先端をゆく超高強度コンクリートを作り上げたのです。山陽新幹線岩鼻PCトラス橋のコンクリートは水セメント比=23%、スランプ=12cmという理論水和水量近傍の高強度マイテイコンクリートです。

高強度コンクリート用減水剤

マイテイ

説明書、技術資料をご請求ください。

花王石鹼株式会社 建設資材事業部

本社 東京都中央区日本橋茅場町1-1 ☎103 ☎東京(03)665-6322(代)

