

## 論文

## [1025] 超早強性材料を用いた転圧コンクリート舗装の早期開放時期の検討

正会員○浅野文男（大阪セメント中央研究所）

正会員 森濱和正（建設省土木研究所）

正会員 河野広隆（建設省土木研究所）

正会員 小林茂敏（建設省土木研究所）

## 1. はじめに

転圧コンクリート舗装（Roller Compacted Concrete Pavement、以下RCCPと略す）は、汎用機械を利用し、合理的な施工が可能となることから急速に広まっており、1992年2月末現在の施工累積は70万 $m^2$ を越え、試験施工の段階から実用段階へと移行している。転圧コンクリート（以下RCCと略す）はローラで十分に転圧されることから、骨材の噛み合わせ効果により初期材令時の耐荷力に優れ、早期に交通開放ができるとも言われている。しかしながら、その早期交通開放に関して、（社）日本道路協会から発行された『転圧コンクリート舗装技術指針（案）』（以下、技術指針（案）と略す）では「湿潤養生期間は、普通ポルトランドセメントを用いた場合には3日間、早強ポルトランドセメントを用いた場合には1日間を標準とする」としており、施工後、短時間で交通開放を行えないのが実状である。

そこで建設省土木研究所と民間セメント会社4社により共同開発された超早強性材料<sup>1)</sup>をRCCに適用することで、早期交通開放の解決に取り組んだ。

本研究は、その超早強性材料を使用したRCCの初期材令における各種強度特性を把握し、それらのデータをもとに多層弾性理論を用いて舗装構造解析上からみた、早期交通開放時期の検討を目的とし、その結果をここに報告する。

## 2. 実験概要

## 2.1 使用材料

本実験に使用した超早強性材料は、LD、OD2、SDのセメントタイプと早強ポルトランドセメントに5%内割りする混和材タイプDD1の4種類である。また初期材令時の強度発現性を比較するために、普通ポルトランドセメント(OP)と早強ポルトランドセメント(HP)も使用した。混和剤は、リグニンスルホン酸塩ポリオール複合体を主成分とするAE減水剤で、セメント重量の0.25%を添加した。骨材は、細骨材には富士川産の川砂（比重2.60、FM=3.27、吸水率2.05%）を、粗骨材には笠間産の硬質砂岩（道路用碎石5号、6号を1:1の割合で混合、比重2.66、FM=6.68）を使用した。

## 2.2 実験方法

配合は、マーシャル締固め率98%、修正VC値20~30秒程度を目標に試験練りを行い、セメント量290 $kg/m^3$ 、単位水量110 $kg/m^3$ 、細骨材率42%の一定配合とした。圧縮および曲げ強度供試体を締固め率96%で技術指針（案）に準じて作製した。曲げ強度供試体は即時脱型式自動成形機により作製した。練混ぜ後、3、6、9、12時間、1、3、7、28、91日でJIS A 1106、JIS A 1108に準拠して各強度試験を行った。圧縮強度試験時にはコンプレッソメータにより縦ひずみも測定し、静弾性係数を求めた。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 曲げ強度

曲げ強度  $\sigma_b$  と材令  $t$  との関係を定量的に述べるために、図-1のように強度発現が大きい区間をS I 区間、その後の強度増進が小さい区間をS II 区間とし、次の式で回帰して求めた。

$$\text{S I 区間} \quad \sigma_b = \sigma_{inf} (1 - \exp(-\alpha \cdot t^\beta)) \quad (1)$$

$$\text{S II 区間} \quad \sigma_b = a \cdot \log t + b \quad (2)$$

ここに、 $\sigma_{inf}$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $a$ 、 $b$  : 実験値から得られる係数、 $t$  : 材令 (日)

S I 区間は、セメントおよび混和材の水和反応が加速度的に進行し、強度発現が活発に行われる区間であるといえる。曲線上における各材令ごとの傾き  $v$  をそれぞれ求め、最大となる傾きを  $v_{max}$ 、その材令を  $t_1$  (hr) とする。またS II 区間は初期の活発な水和反応が終了し、強度増進が緩やかに進行する区間であり、

ある材令  $t_2$  (day) 以上で強度と  $\log t$  がほぼ線形関係を示す。ここでは、材令  $t_2$  で式(1)と式(2)およびそれぞれの1階微分が連続となるように、式(2)で回帰を行ったが、この材令  $t_2$  における傾きを  $v_2$  とした。

図-2にOP、HPおよびLDの曲げ強度  $\sigma_b$  と材令との関係を示し、各材料の式(1)、式(2)で回帰した係数を表-1に示した。また上述の  $v_{max}$ 、 $t_1$ 、 $v_2$ 、 $t_2$  の数値を表-2に示す。単位水量、単位セメント量を一定で行ったことにより、

OD 2は適正な配合からはずれた配合で実験を行ったために、他の超早強性材料より強度発現が遅い傾向を示している。また、DD 1は、HPとほぼ同等となり、

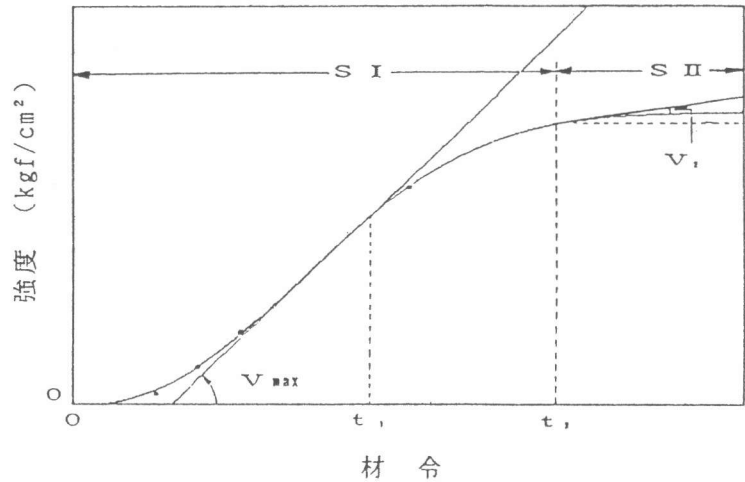


図-1 強度発現性状の模式図

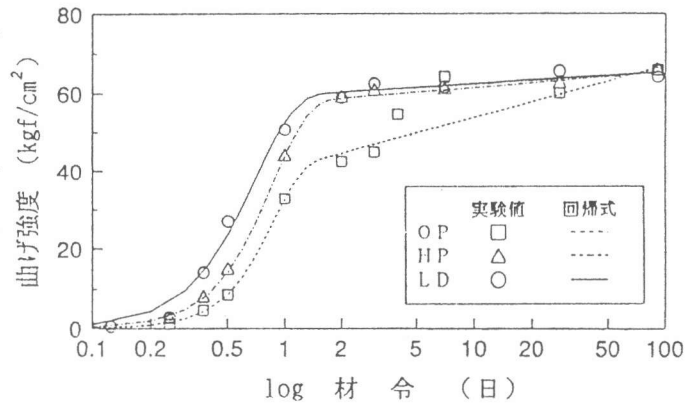


図-2 曲げ強度と材令との関係

表-1 曲げ強度と材令との回帰係数

| セメント<br>および<br>混和材の種類 | $\sigma_b = \sigma_{inf} (1 - \exp(-\alpha \cdot t^\beta))$ |          |         | $\sigma_b = a \cdot \log t + b$ |      |
|-----------------------|---|----------|---------|---------------------------------|------|
|                       | $\sigma_{inf}$  | $\alpha$ | $\beta$ | $a$                             | $b$  |
| OP                    | 43.7  | 1.39     | 2.65    | 13.2                            | 40.7 |
| HP                    | 58.8  | 1.38     | 2.31    | 3.9                             | 57.6 |
| LD                    | 60.2  | 2.08     | 2.07    | 3.1                             | 59.4 |
| OD 2                  | 50.5  | 1.92     | 2.55    | 15.5                            | 47.7 |
| SD                    | 58.8  | 2.19     | 1.83    | 5.7                             | 57.3 |
| DD 1                  | 54.6  | 1.25     | 1.81    | 10.0                            | 50.9 |

セメントおよび混和材との相性を現在検討中である。

超早強性材料を使用した場合の特徴は、練混ぜ後3～5時間程度で凝結の終結時間を迎え、6～9時間程度から強度発現がみられる。そして $t_1$ の値からわかるように、10～13時間で強度発現速度が最も大きく、HPに比べると4時間程度早いことがわかる。その後、材令2日まで活発な強度発現を示し、以降穏やかに強度が増進する。

初期材令時の強度発現性を数値的に表す $v_{max}$ は、超早強性材料を使用した場合、OPの1.4倍にもなるが、今回の実験ではHPとほぼ同等の傾向を示した。またHP、超早強性材料を用いれば、材令1日で45 kgf/cm<sup>2</sup>がほぼ確保でき、OPはその75%程度に過ぎない。しかしながら例えば、35 kgf/cm<sup>2</sup>を得るのに必要な時間を求めると、OP、HP、LDではそれぞれ38、20、16時間程度となり、超早強性材料を使用すれば、OPよりも22時間程度、HPよりも4時間程度早く必要な強度が得られ、早期開放の可能性を検討する上で、超早強性材料をRCCに適用することの有利さがうかがえる。超早強性材料は、主成分が普通ポルトランドセメントに準じているため、長期材令91日における曲げ強度をOP、HPと比較してもほぼ同等以上の値となった。

### 3.2 圧縮強度

圧縮強度 $\sigma_c$ と材令との関係を図-3に示す。図中には曲げ強度と同様に、式(1)、式(2)の回帰による曲線も描いており、その回帰係数を表-3に示す。材令1日においてHPと超早強性材料の強度にあまり違いはないが、9～12時間の強度を比較してみるとHPは、超早強性材料の約60%程度である。また図からわかるように、超早強性材料を使用した場合、材令1日までの強度発現の傾向は曲げ強度と同様である。しかし、直線的な強度増進を示す傾向がほぼ材令1日以降から開始するという点に関して、曲げ強度と異なるといえる。材令1日で得られるOPの圧縮強度

表-2  $v_{max}$ 、 $t_1$ 、 $v_2$ および $t_2$ の数値

| セメント<br>および<br>混和材の種類 | $v_{max}$ | $t_1$ (hr) | $v_2$ | $t_2$ (day) |
|-----------------------|-----------|------------|-------|-------------|
| OP                    | 52.3      | 17.7       | 3.69  | 1.6         |
| HP                    | 64.1      | 16.4       | 0.88  | 1.9         |
| LD                    | 75.3      | 12.2       | 0.78  | 1.7         |
| OD2                   | 66.8      | 15.3       | 4.85  | 1.4         |
| SD                    | 73.3      | 10.2       | 1.49  | 1.7         |
| DD1                   | 49.9      | 13.6       | 2.09  | 2.1         |

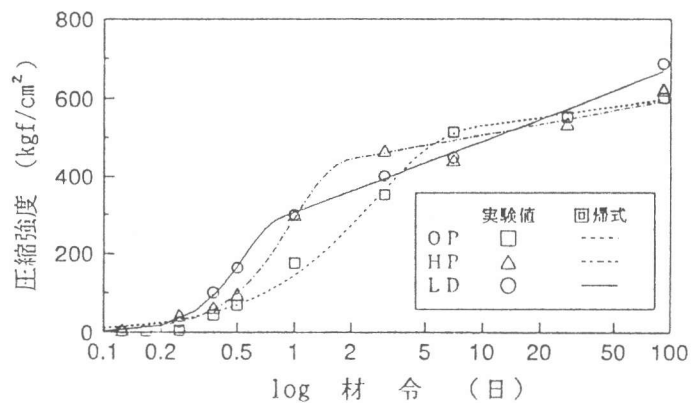


図-3 圧縮強度と材令との関係

表-3 圧縮強度と材令との回帰係数

| セメント<br>および<br>混和材の種類 | $\sigma_b = \sigma_{int} (1 - \exp(-\alpha \cdot t^\beta))$ |          |         | $\sigma_b = a \cdot \log t + b$ |     |
|-----------------------|---|----------|---------|---------------------------------|-----|
|                       | $\sigma_{int}$  | $\alpha$ | $\beta$ | a                               | b   |
| OP                    | 536   | 0.32     | 1.17    | 70                              | 460 |
| HP                    | 449   | 1.05     | 2.10    | 90                              | 417 |
| LD                    | 302   | 5.53     | 2.77    | 185                             | 306 |
| OD2                   | 254   | 7.39     | 3.77    | 321                             | 274 |
| SD                    | 335   | 5.24     | 2.90    | 182                             | 337 |
| DD1                   | 405   | 1.33     | 1.96    | 162                             | 358 |

が180 kgf/cm<sup>2</sup>であるのに対し、HPおよび超早強性材料を使用すると、材令1日で300 kgf/cm<sup>2</sup>以上を確保できた。またOP、HPの材令91日における強度が600 kgf/cm<sup>2</sup>程度であるのに対し、超早強性材料を使用すると700 kgf/cm<sup>2</sup>程度得られ、長期的にも大きな強度増進をすることがわかる。

### 3.4 静弾性係数

各材料の圧縮強度 $\sigma_c$ と静弾性係数 $E_c$ との関係を図-4に示す。

普通および軽量コンクリートの静弾性係数は、一般に密度と圧縮強度の関係として、式(3)が与えられている(ACIでは、 $a=4270$ )。しかし本実験において、圧縮強度の低い範囲で式(3)では、実験値との適合性が良くなかったため、低い範囲で検討した結果から式(4)を誘導した。

$$E_c = a\sqrt{\rho^3\sigma_c} \quad (3)$$

$$E_c = \alpha\sigma_c - \beta\sigma_c^2 \quad (4)$$

ここに、 $a$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ ：実験値から得られる係数， $\rho$ ：コンクリートの密度

表-4にこの2式から求まる係数を示す。舗装の早期供用性に関する構造解析を行う際には、低強度における静弾性係数は重要なファクターとなり、図-4からわかるように、圧縮強度50~750 kgf/cm<sup>2</sup>程度の範囲で、この部分をより正確に表す式(4)により回帰を行うことが有効であると考えられる。

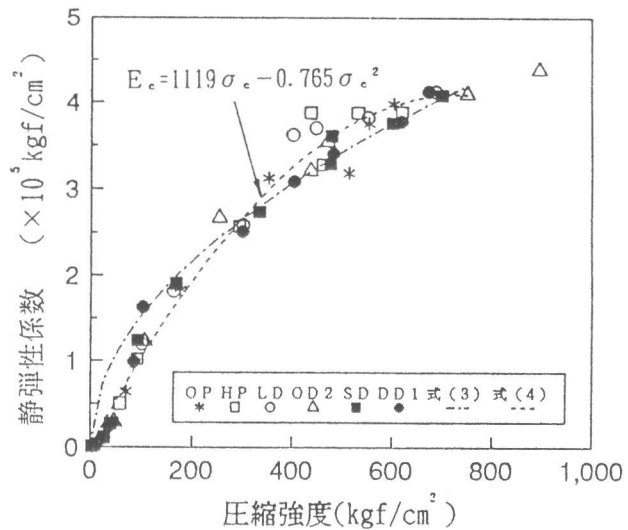


図-4 圧縮強度と静弾性係数との関係

表-4 圧縮強度と静弾性係数との回帰係数

| セメント<br>および<br>混和材の種類 | $E_c = a\sqrt{\rho^3\sigma_c}$ |      | $E_c = \alpha\sigma_c - \beta\sigma_c^2$ |         |      |
|-----------------------|--------------------------------|------|--|---------|------|
|                       | a                              | 相関係数 | $\alpha$                                 | $\beta$ | 相関係数 |
| OP                    | 3800                           | 0.97 | 1120                                     | 0.82    | 0.99 |
| HP                    | 3970                           | 0.95 | 1150                                     | 0.83    | 0.99 |
| LD                    | 4060                           | 0.96 | 1210                                     | 0.90    | 0.99 |
| OD2                   | 3810                           | 0.98 | 1080                                     | 0.68    | 0.99 |
| SD                    | 3850                           | 0.98 | 1120                                     | 0.79    | 0.99 |
| DD1                   | 3814                           | 0.98 | 1100                                     | 0.76    | 0.99 |

また表-4より、式(4)から求めた係数は各セメント、混和材についてほとんど同じ数値であることから、RCCの静弾性係数は骨材などが同じであれば、セメントおよび混和材の種類に関係なく、圧縮強度との一義的な関係で決定すると考えられる。これらのことより、図-4には全体を式(4)により回帰した曲線も示した。

## 4. 構造解析

### 4.1 概要

RCCの初期材令において、RCCPが弾性構造解析に適合すると仮定する。RCCの静弾性係数 $E_c$ を変化させることで解析により算出されるRCCP版下面に発生する載荷応力と、圧縮強度と $E_c$ との関係と同様、 $E_c$ と対応する回帰式(4)から求まる曲げ強度とを比較することにより、超早強性材料をRCCPに適用した場合の早期交通開放時期の検討を行う。本研究の構

造解析には、姫野<sup>2)</sup>らが開発した多層弾性構造解析プログラム『E L S A』を使用した。

#### 4.2 解析条件

対象とするRCCPの舗装構造モデルは、技術指針(案)を参考に路盤の種類、弾性係数およびコンクリート版厚を変化させた6断面について解析を行った。その結果、算出される載荷応力が顕著に異なる図-5に示すA、F断面について検討する。設計CBRを6%、荷重はT-20に相当する輪荷重8tとした。路盤、路床材料は完全な弾性体ではないが、それぞれ近似的な弾性定数として、表-5に示す値を使用した。舗装の各層の境界面にはすべりが生じないものとし、完全に付着している条件で解析を行った。

#### 4.3 解析結果および考察

A、F断面について、構造解析を行った結果より静弾性係数 $E_c$ とRCCP版下面に発生する載荷応力および3.4と同様にして求めた $E_c$ と曲げ強度の実験式を図-6、図-7に示す。また1日までの材令と $E_c$ との関係を式(1)と式(4)から求め、図-8に示す。図-7、図-8には解析式と実験式とが一致する交点が存在する。この点は載荷応力と曲げ強度とが等しくなる点であり、開放時期を検討するには本来、ここに安全率を考慮しなければならないが、ここでは便宜上、この点に達する時期を開放時期と述べることにする。

セメント安定処理した場合のA断面については、図-6からわかるように $E_{cs}=10000\text{kgf/cm}^2$ としたとき、開放時期の曲げ強度は $13\text{kgf/cm}^2$ 、静弾性係数 $E_c$ は $8.6 \times 10^4\text{kgf/cm}^2$ である。図-8からその時間を求めると、OP、HP、LDではそれぞれ14、11、8時間程度となり、OP、HPよりも早期に交通開放が可能となる。

$E_{cs}=30000\text{kgf/cm}^2$ とした場合、その交点が存在しない。これは、版下面に発生する載荷応力が小さく、交通荷重は舗装全体で支持されることを表し、版の曲げ強度を上回ることがないため交通開放時期は主に表面の荒れを考慮に入れば良いことになる。この場合にも表面の荒れに対する強度が早く得られる超早強性材料を使用することは有利であると考えられる。

粒調砕石路盤としたF断面では、RCC版下面に発生する載荷応力が大きいことから、主としてRCC版の版作用による交通荷重支持の役割が大きいと考えられ、開放時期はRCCの強度発現に依存するものと考えられる。 $E_c=1000\text{kgf/cm}^2$ とした場合の開放時期の曲げ強度は $24\text{kgf/cm}^2$ 、静弾性係数 $E_c$ は $1.6 \times 10^5\text{kgf/cm}^2$ であり、OP、HP、LDではそれぞれ19、15、12時間に相当する。このようなことから剛性の小さい粒調砕石路盤を使用した場合にも、

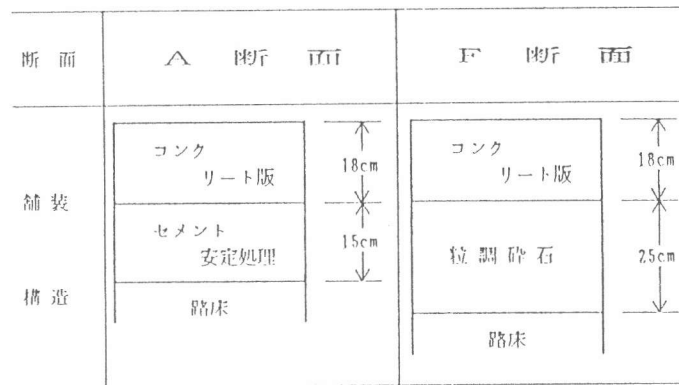


図-5 舗装構造モデル

表-5 構造解析に使用した材料定数

| 舗装材料      | 静弾性係数<br>( $\text{kgf/cm}^2$ )   | ポアソン比 |
|-----------|----------------------------------|-------|
| RCCP      | $E_c=1000\sim 500000$            | 0.25  |
| セメント安定処理  | $E_{cs}=10000, 30000$            | 0.30  |
| アスファルト中間層 | $E_s=20000, 40000$               | 0.30  |
| 粒調砕石      | $E_g=1000, 3000$                 | 0.30  |
| 路床        | $E_b=600(100 \times \text{CBR})$ | 0.35  |

超早強性材料を使用することの有利さがうかがえる。

### 5. まとめ

以上、RCCPの早期交通開放を目指し、超早強性材料を使用したRCCの初期材令における各強度特性の把握および舗装構造解析上からみた交通開放時期の検討を行った。その結果、次に示すような結論を得た。

(1) 超早強性材料をRCCに適用した場合、曲げおよび圧縮強度とも、練混ぜ後3～5時間程度で凝結の終結時間を迎え、6～9時間程度から強度発現がみられる。そして10～13時間で強度発現速度が最も大きく、材令1日で曲げ強度45kgf/cm<sup>2</sup>、圧縮強度300kgf/cm<sup>2</sup>が確保でき、1日以降も高い強度増進を示す傾向がある。

(2) 曲げおよび圧縮強度と材令との関係は、本報告中に示す式(1)、式(2)で表すことができる。

(3) RCCの静弾性係数は式(4)で表され、セメントおよび混和材の種類に関係なく圧縮強度との一義的な関係で決まる。

(4) 超早強性材料を使用したRCCPの交通開放時期を、舗装解析で検討した結果、路盤材料により異なるが、OP、HPよりもそれぞれ7、6、3時間程度早いと考えられる。

今後、超早強性材料を使用したRCCの路面性状に対する耐摩耗性、早期交通開放をした場合の初期疲労による以降の力学特性への影響、凍結融解抵抗性、発熱特性および構造解析において安全率の検討が必要であると思われる。

#### 【参考文献】

- 1) 小林茂敏：超早強コンクリートー現場打ちコンクリートで翌日供用可能な構造物をつくる、第250回コンクリート講演会テキスト、セメント協会、1991.2
- 2) 姫野賢治ほか：パソコン用多層弾性構造解析システム(ELSA)の開発、第18回日本道路会議論文集、1989.10

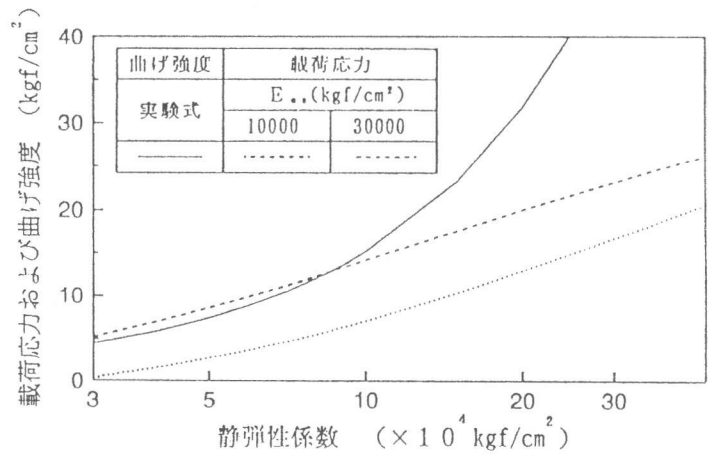


図-6 E<sub>s</sub>と載荷応力および曲げ強度との関係(A断面)

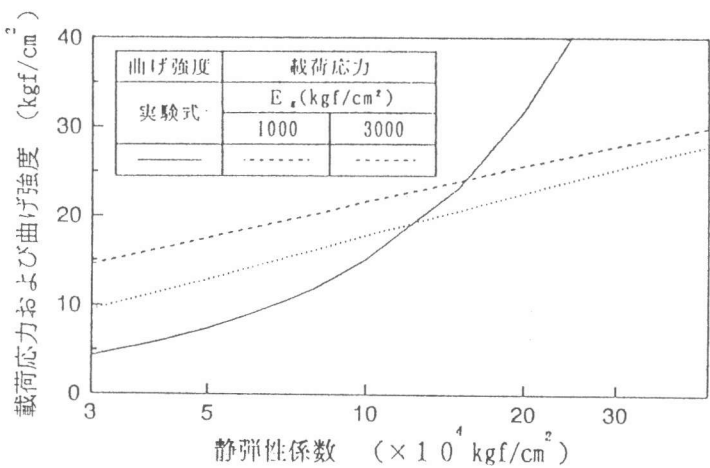


図-7 E<sub>s</sub>と載荷応力および曲げ強度との関係(F断面)

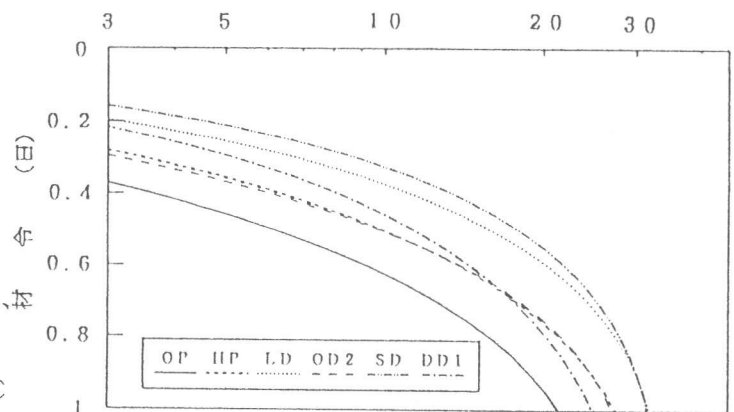


図 8 1日までの材令とE<sub>s</sub>との関係