

# 格子パネルによる埋設ジョイント舗装体の 補強効果についての定量的評価

高橋 修<sup>1</sup>・丸山暉彦<sup>2</sup>・稲葉武男<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 長岡技術科学大学助手 環境・建設系 (〒 940-21 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 長岡技術科学大学教授 環境・建設系 (〒 940-21 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

<sup>3</sup>ジャパンコンステック(株) (〒 222 神奈川県横浜市港北区新横浜2-7-3 フジビル3F)

埋設ジョイントの主な破壊形態は桁の継ぎ目付近における横断クラックの発生であり、それに対する抵抗性が埋設ジョイントの長期供用性を左右することになる。格子パネルを用いた型式では、桁端部の変位による伸縮作用の影響を軽減するためにせん断層が配備されており、さらに鋼製の格子パネルによって舗装体が補強されている。低スティフネス状態のアスファルト混合物は応力緩和が著しいため、この種の埋設ジョイントでは舗装体を補強することが重要となる。本研究では、格子パネルを用いた埋設ジョイントの変形挙動を実験において観測するとともに、格子パネルを埋め込むことによる舗装体の強度特性(応力緩和性状)の改善について直接引張試験によって評価し、その補強効果について時間温度換算則を適用して定量的に検討した。

*Key Words* : buried joint, asphalt mixture, grid panel, deformation, relaxation modulus

## 1. はじめに

埋設ジョイントは道路橋におけるノージョイント工法の一つであり<sup>1)</sup>、施工性と経済性に優れていることから、多くの既設および新設の橋梁に採用されている。埋設ジョイントの主要な破壊形態は、桁の継ぎ目(遊間)付近における横断クラックの発生である。このようなクラックは、床版を含めた桁端部が橋軸方向に変位することによって引き起こされるもので、その桁端の変位は温度変化による主桁の伸縮が主に起因している。温度変化による桁の伸縮は、その速さは極めて緩慢としているが、それによる桁端相互の相対変位はかなり大きいものである<sup>2),3)</sup>。したがって、埋設ジョイントの長期供用性は、このような変形作用に対する舗装体の破壊抵抗性能が重要ということになる。

著者らが検討している格子パネルを用いた型式の埋設ジョイントは、主桁の遊間部に集中的に生じる桁端部の相対変位を、埋設ジョイント舗装体の全域に広く分散させて、横断クラックが生じ難くなるように設計されたものである。先の報告<sup>4)</sup>では、桁端における伸縮変位を効率よく分散させるためには埋設ジョイント舗装体の強度特性が重要で、格子パネルを用いた型式ではハニカムセル状の格子パネルに舗装体の応力緩和を抑制する補強効果があることを定性的に明らかにした。そして、この型式の合理的設計法の構築を旨とするには、格子パネルによる補強効果を定量的に評価するとともに、アスファルト混合物と格子パネルによって複合体

を構成した場合の力学特性を具体的に把握することが優先課題であると指摘した。

本研究は以上のような経緯から、格子パネルを用いた埋設ジョイントにおいて、格子パネルによる舗装体の補強特性について検討し、引張作用に対する補強効果、およびアスファルト混合物と格子パネルの複合体の強度特性を定量的に把握することを目的としている。アスファルト混合物の力学特性に関する既往の研究は、主に交通荷重を外力と考えた一般の道路舗装を対象にしており、埋設ジョイントのようにひずみ速度が極めて遅い変形作用についての検討はあまり見られない。ここでは、横断クラックに対する抵抗性と本工法で最も大切なひずみ分散機能<sup>4)</sup>を考慮して、定ひずみ速度の直接引張試験を実施し、レオロジーの分野で経験的に用いられている時間温度換算則を適用して、ひずみ速度が遅い場合の引張特性を評価した。この場合、引張特性の評価指標としてどのような物理量に着目するかが問題となるが、本研究では次の理由から緩和弾性率を選択した。ひずみ分散機能で最も重要となるのが、ひずみ速度が非常に遅い低スティフネス状態でも埋設ジョイントの舗装体全域に応力を伝達することであり、このことと直接関係するのが舗装体の応力緩和性状である。材料が有する応力緩和の程度は、緩和弾性率によってある程度の説明ができることから、実際のひずみ速度域における緩和弾性率を推定した。補強効果については、アスファルト混合物単体と格子パネルを埋め込んで複合体とした場合の結果を比較するこ

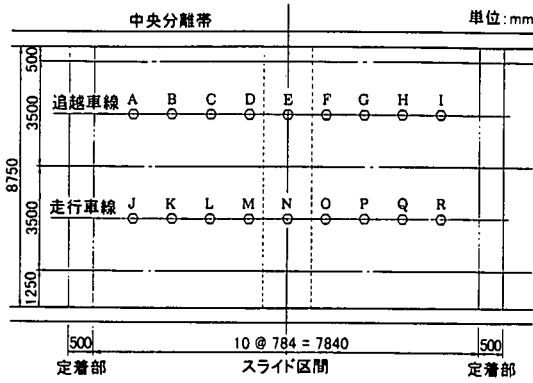


図-1 舗装体のひずみ測定位置

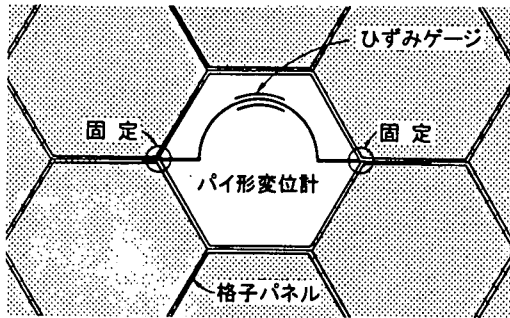


図-2 舗装体ひずみの測定方法

とによって検討した。実際の埋設ジョイントでは、舗装体は表層と基層の2層構造であるが、格子パネルを埋め込んで複合体を構成しているのは基層部分であり、また表層用の混合物は施工現場によって種々異なることから、ここでは主に基層用混合物に対する補強について検討した。

## 2. 格子パネルを用いた埋設ジョイントの変形挙動とそのひずみ速度

定量的な引張特性の評価に先立ち、埋設ジョイントの舗装体に生じるひずみの速さについて調査した。本型式の埋設ジョイントにおける実際の変形挙動を検討するために、施工現場の舗装体にセンサー類を配置して長期の測定を実施した<sup>5)</sup>。測定箇所は、新潟県長岡市における国道17号線の高架橋上である。測定対象の桁ジョイント部は3径連続PC箱桁橋が連なった箇所であり、設計の伸縮桁長は80.9m、設計伸縮量は40.5mm（温度範囲-15～+35℃）であった。舗装体の構成は表層40mm、基層40mmであった。

### (1) 測定方法

測定現場は供用中の高架橋であるため、センサー類は予め舗装体の中に配置しておき、データロガーを用い

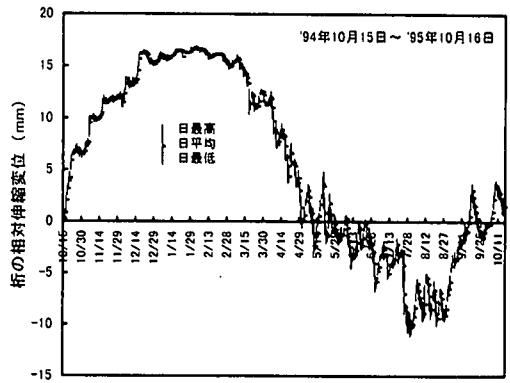


図-3 桁の相対伸縮変位の季節変化

た自動計測とした。本工法の施工区域において、図-1に示す18箇所に変位計を格子パネルと共に埋め込んで、舗装体の変形を2時間頻度で約1年間測定した。舗装体の変形は、ひずみゲージを円弧部に接着した真鍮製のひずみ変換型変位計を、図-2に示すように空洞にした格子パネルの一つのセルの中に固定し、格子パネルの変形を舗装体の変形と見なして測定した。このような方法で得られたひずみデータは、実際の舗装体の変形よりも約30%ほど大きく測定されることが室内試験で予め確認されている（詳しくは付録を参照のこと）。

また、同時に桁の継ぎ目部分（桁遊間）の変動、すなわち桁端部間の相対伸縮変位も測定して、埋設ジョイントに強制的に働くことになる変形作用についても把握した。さらに、舗装体内には数箇所において被覆熱電対を埋設し、舗装体の温度もモニターした。

### (2) 測定結果および考察

主桁端部間の相対伸縮変位について、図-3に約1年間の変動の様子を示す。これは、測定を開始した'94年10月15日の午前0時の状態を基準として、1本の縦線が1日あたりの相対伸縮変位の変動幅を、線分上のドットがその日の平均値を示している。舗装体の引張ひずみが正の値となるように符号を決めたため、桁のほうは正の値が収縮を、負の値が伸長を表している。12月から3月までの冬季は桁の伸縮が少なく、春季および秋季では多いものとなっており、大略的には正弦曲線に近い周期的な変動を呈している。

桁の相対伸縮変位の変動が比較的大きい'95年5月について、桁の伸縮変位と舗装体ひずみの変動を図-4に示す。これは5月1日の午前0時を基準にしたもので、舗装体のひずみは変形が最も大きい遊間付近の図-1に示したE点、N点の値を平均したものである。舗装体の変形は桁の伸縮と連動した挙動となっている。温度変化が小さい、すなわち桁の伸縮がほとんどない冬季のことを考えると舗装体も変形しないはずであるから、

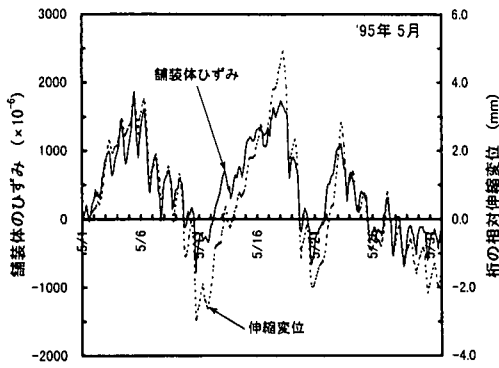


図-4 '95年5月の桁伸縮と舗装体の変形

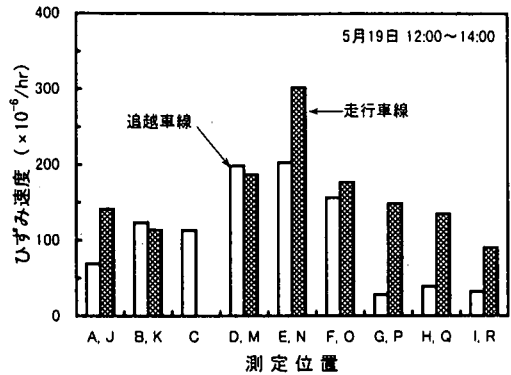


図-6 各測定位置における最大ひずみ速度

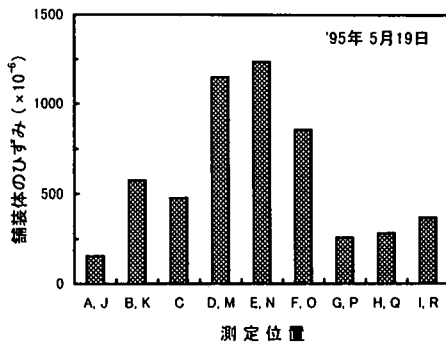


図-5 '95年5月19日の舗装体の変形

ひずみ速度の最小値はほぼゼロに近いものと推察される。ここで知りたいのはひずみ速度の詳しい数値ではなく、現場におけるオーダー的な概略値である。最小値の察しがつくことから、ここでは1年間における最大のひずみ速度を求めることによって、ひずみ速度の実際的な範囲を把握することにした。

1日の桁の伸縮変位が最も大きい'95年5月19日における、舗装体ひずみの1日の変動幅を橋軸方向の各測定点についてまとめると図-5に示すようになる。図に示した値は、横断方向の位置が同じ2箇所の測定値をそれぞれ平均したものである。変形の分布は均等でなく桁の遊間付近で大きくなっているが、広範囲に変形が分散している様子がうかがえる。先に付記したように、ここで測定された数値は30%程度割り引いて考える必要があるため、実際では最大でも1日当たり $900 \times 10^{-6}$ 程度の変形が生じているものと予想される。この日における1日の伸縮変位は、実に3.6mmであった。そして、この日においてひずみ速度が最大となる時間帯(12:00~14:00)での各測定点の値を図-6に示す。なお、ひずみ速度は、2時間頻度でサンプリングしたひずみデータから1時間あたりの速度として計算した。また、L点については計器が破損したためデータを得られなかった。これらより、最大ひずみ速度は位置によって差が見られる

が $50 \sim 300 \times 10^{-6}/hr$ の範囲であり、実際に生じるひずみ速度としてはおおむね1時間あたり $10^2 \times 10^{-6}$ 以下のオーダーの値であることが確認される。

### 3. 直接引張試験による緩和弾性率の推定

埋設ジョイントに見られる横断クラックは、前章で示したように、桁端部の変位に伴って舗装体が橋軸方向に強制的に引き伸ばされることによって生じるものと考えられる。一般に、アスファルト混合物の引張特性を評価する場合、試験方法が規定されている曲げ試験か圧裂試験<sup>7)</sup>を実施するが多い。しかしながら、これらの試験方法は埋設ジョイントが受ける変形作用の条件と大きく異なっており、定量的な評価には適していないと判断される。そこで、本研究では、供試体を軸方向に引き伸ばすひずみ制御方式の直接引張試験を実施して引張特性を評価した。基層用混合物、格子パネルとの複合体、そして表層材料として一般的な密粒度アスファルト混合物(13)について、温度とひずみ速度をパラメトリックに変化させた試験を実施し、それぞれの材料の緩和弾性率を求めて結果を整理した。

以後本文では、供試体の種別について、基層用混合物の単体を基層単体、密粒度アスファルト混合物(13)の単体を密粒単体、格子パネル単体をパネル単体、基層用混合物と格子パネルの複合体を単に複合体とそれぞれ簡略して称する。

#### (1) 使用材料

まず、供試体に使用したアスファルト混合物について説明する。本研究では、格子パネルを用いた埋設ジョイントの基層用混合物とその表層に一般的に用いられる密粒度アスファルト混合物(13)について取り扱った。各混合物で規定されている粒度範囲と直接引張試験で使用した実際の配合割合を表-1に示す。基層用混合物としては、伸縮性と遮水性の高いグースアスファルト

表-1 各アスファルト混合物の配合

ふるい目 (mm)	通過質量百分率 (%)			
	基層 粒度範囲	供試体	密粒 粒度範囲	供試体
19.0	100	100	100	100
13.2	95 ~ 100	99.8	95 ~ 100	99.4
4.75	75 ~ 95	85.0	55 ~ 70	65.2
2.36	52 ~ 67	60.0	35 ~ 50	44.6
0.6	40 ~ 60	48.0	18 ~ 30	25.9
0.3	20 ~ 45	27.9	10 ~ 21	14.1
0.15	15 ~ 30	19.6	6 ~ 16	7.9
0.075	13 ~ 20	16.7	4 ~ 8	6.6
アス量 (%)	7 ~ 9	8.0	5 ~ 7	5.8

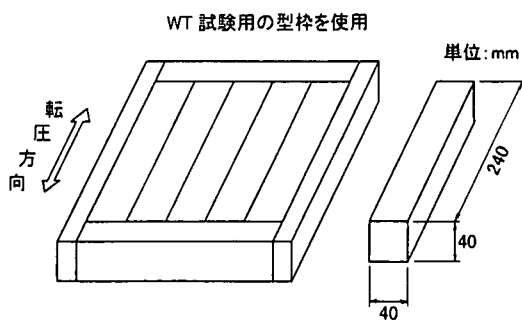


図-7 供試体の切り出し要領 (混合物単体)

の使用が推奨されているが、グースアスファルトを現場に用意することが容易でないことから、これに準ずるものとして表に示したような特殊配合のアスファルト混合物が多く使われている。この混合物は通常のストレートアスファルトと骨材を使用したもので、グースアスファルトの物性に近くなるように配合が決められている。フィラーと細骨材、およびアスファルト量が多い配合で、一般の道路舗装用混合物とはかなり物性が異なっているものと推察できよう。密粒度アスファルト混合物(13)については、アスファルト舗装要綱<sup>6)</sup>に掲載されている一般的な配合である。なお、今回使用した材料は、骨材は新潟県産のもの、ストレートアスファルトは針入度 60/80 のものであった。

格子パネルは鋼製であり、実際に現場で活用されているものを所定の大きさに切断して使用した。格子パネルの詳しい形状および寸法については、先の報告<sup>4)</sup>を参照されたい。

## (2) 供試体および試験方法

### a) アスファルト混合物単体の場合

補強効果の評価において、基準となるアスファルト混合物単体の場合の直接引張試験は、吉田らの方法<sup>8)</sup>に準じて実施した。供試体は、ローラコンパクタを使用し

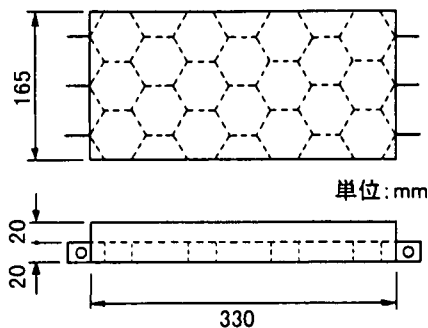


図-8 試験供試体の概要 (複合体)

て 300 × 300 × 40(mm) のものを作製し、図-7 に示す要領でダイヤモンドカッターで切断して、40 × 40 × 240 の棒状のものを用意した。そして、供試体の上下端面に引張用の治具をエポキシ系接着剤で、それぞれの芯が通るように張り付けた。

引張試験は恒温槽を具備した試験装置を使用し、試験温度とひずみ速度をコントロールして実施した。供試体を恒温槽の中で十分に養生した後、供試体を載荷用のロッドにセットし、所定の温度、所定の変位速度で供試体を引き伸ばした。供試体の治具と載荷用ロッドの間にはユニバーサルジョイントが装備されており、偏心荷重が作用しないようになっている。試験結果の整理に時間温度換算則を適用するために、試験は温度とひずみ速度をパラメトリックに変化させて行った。具体的には、試験温度は 15, 20, 25, 30, 35 °C の 5 水準とし、それぞれについて変位速度を 0.1, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 10.0 mm/min の 7 とおとした。(変位速度については、供試体の自重と出力データを A/D 変換する際のサンプリング周波数が影響しないようにその範囲を設定し、結果の整理に後述する対数表示の換算時間を用いることから、各速度レベルでのデータが得られるように間の設定値を決定した。) なお、一つの試験条件についてサンプル数は 5 体を標準とした。

### b) 基層用混合物と格子パネルの複合体の場合

複体の供試体は図-8 に示す形状寸法で、実際の埋設ジョイントの基層部分と全く同じ構造である。複体の場合は、ある程度の面積をもった格子パネルを埋め込まなければならないので、比較的大型のものとした。格子パネルはハニカムセル構造を崩さないように所定の寸法で切り出し、プライムコートを施して混合物内に埋め込んだ。使用材料はすべて実際に使われているものと同じで、アスファルト混合物の転圧はローラコンパクタを使用して十分に締め固めた。供試体には、予め図-9 に示す引張用治具をエポキシ樹脂系の接着剤と鉄ピンで固定しておいた。鉄ピンの使用は、治

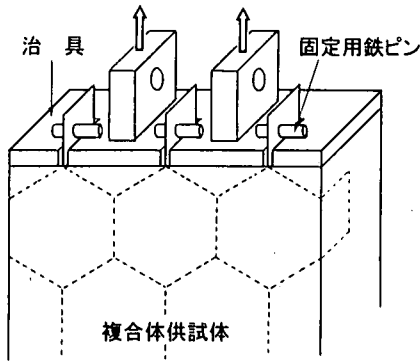


図-9 複合体の引張試験用治具

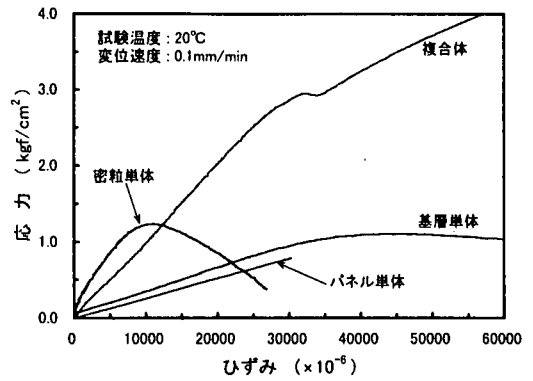


図-10 各供試体の応力-ひずみ曲線

具を試験機で引き伸ばすときに、供試体の混合物部分と格子パネルの両方に力が伝わって、断面全体で引張作用に抵抗させるためである。

試験方法と試験条件は混合物単体の場合と全く同じであり、サンプル数については、変位速度が10.0mm/minの場合は3体とし（ばらつきが少ないため）、それ以外の変位速度では5体とした。複合体の場合は、鋼製の格子パネルがあるため供試体が破断するまで引き伸ばすのではなく、応力-ひずみの関係が十分に得られるまで引き伸ばして、その後試験を中断した。

### (3) 緩和弾性率の求め方

一般に、定ひずみ速度試験によって得られる応力-ひずみ曲線と緩和弾性率の関係は線形粘弾性理論より次式のように表される。

$$Er(t) = \frac{d\sigma(t)}{d\varepsilon(t)} = \frac{1}{R} \frac{d\sigma(t)}{dt} \quad (1)$$

ここに、 $Er(t)$  は緩和弾性率、 $\sigma(t)$  は応力、 $\varepsilon(t)$  はひずみでそれぞれ経過時間  $t$  の関数であり、 $R(=d\varepsilon/dt)$  は試験時のひずみ速度である。すなわち、この式は応力-ひずみ曲線の接線の傾きがそのときの緩和弾性率であることを示す。実際の試験データに基づいて緩和弾性率を式(1)から求めようとする場合、接線の引き方や傾きの読み方に誤差が混入しやすい。さらに、生の試験データには測定時の電気的および機械的なノイズが既に混入している。そこで本研究では、接線の傾きのみから直接的に求めるのではなく、式(1)を以下に示すように変形して、スティフネスとの関係から緩和弾性率を求めた。スティフネスを  $S(t) = \sigma(t)/\varepsilon(t)$  で定義し、 $\varepsilon(t) = Rt$  の関係を用いると、その時間における微分値と緩和弾性率の関係が次式で表される。

$$\begin{aligned} \frac{dS(t)}{dt} &= \frac{1}{\varepsilon(t)^2} \left[ \frac{d\sigma(t)}{dt} \varepsilon(t) - \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \sigma(t) \right] \\ &= \frac{1}{\varepsilon(t)} \frac{d\sigma(t)}{dt} - \frac{R}{\varepsilon(t)} \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)} \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{t} [Er(t) - S(t)]$$

$$\therefore Er(t) = S(t) + t \frac{dS(t)}{dt} \quad (2)$$

さらに、式(2)の右辺第2項について、分母分子の各変数の対数をとったものとの関係、すなわち、

$$\frac{d \log S(t)}{d \log t} = \frac{\frac{d \log S(t)}{dt}}{\frac{d \log t}{dt}} = \frac{t}{S(t)} \frac{dS(t)}{dt}$$

の関係を用いると、最終的に次式を得る。

$$Er(t) = S(t) \left[ 1 + \frac{d \log S(t)}{d \log t} \right] \quad (3)$$

これは、応力-ひずみの関係からいったんスティフネス-換算時間の関係を求め、そのスティフネスと両対数座標で表したスティフネス-換算時間の曲線の傾きから緩和弾性率を計算する式である。直接引張試験では、出力データをA/D変換してデジタルで収録し、この式(3)から緩和弾性率を算出した。

### (4) 試験結果および考察

#### a) 直接引張試験での応力とひずみの関係

試験結果の一例として、試験温度が20°C、変位速度が最も遅い0.1mm/minの場合における各供試体についての応力-ひずみ曲線を図-10に示す。これらは、直接引張試験で出力された荷重と与えた変位をそれぞれ供試体断面積と供試体長さで除して、応力とひずみの関係に書き直したものである。図にはパネル単体の場合の結果も記してある。格子パネルは、3%程度の変形であれば変形がほぼ完全に復元する線形弾性体であった。

複合体の曲線は、変形の途中で一度応力が減少し、その後徐々に再び応力が増加している。これは、このような複合体特有のもので、途中のピークで供試体表面部の混合物だけの部分にクラックが発生し、その後は底部の混合物と格子パネルの複合体で引張に抵抗している。したがって、途中のピークがこの複合体の降伏点ということになる。降伏点に達するまでのひずみ値を

破壊ひずみと定義し、各供試体の破壊ひずみについて着目すると、基層単体と複合体ではほぼ等しい値となっている。また、特殊配合の基層単体は密粒単体よりかなり大きく、この条件では約3倍ほどであることが読み取れる。基層用混合物を使用したもの（基層単体と複合体）と密粒単体での破壊ひずみの差は、ひずみ速度と温度がこの図の条件と異なると多少違うが、図に示した条件以外のものも含めて全体を平均すると、基層用混合物を使用したもののほうがおおむね2倍ほど大きい結果であった。

途中のピークより前の部分について、それぞれを比較してみると、複合体と密粒単体は曲線の傾きがかなり急で、基層単体とパネル単体は緩やかである。（各混合物単体と複合体では供試体の長さが違うため、ひずみ速度は複合体のほうが若干遅くなっている。）複合体と基層単体の傾きの違い、すなわちスティフネスの違いが格子パネルによる補強効果ということになる。基層単体もパネル単体も個々のスティフネスは小さいが、両者を組み合わせて複合体を構成するとスティフネスはかなり大きくなっている。ここで注目したいのは、補強することによってスティフネスは大きくなるが、降伏点のひずみ値はあまり大きく変化しないということである。このことは埋設ジョイントにとって非常に重要なことで、伸縮性はそのまま柔軟性を改善したということになる。一般に、応力を伝達するためには、物性は固いほうがいいが、伸縮性を大きくするには、すなわち破壊ひずみを大きくするには柔らかいほうがいい。このように考えると、格子パネルは埋設ジョイントにおいて非常に有効な補強材料といえる。補強効果については、後述する4章で補足する。

### b) 緩和弾性率

補強効果の定量的な評価は前述したように、緩和弾性率を求めて行う。緩和弾性率は前節で示したように、応力とひずみの関係に基づいて式(3)によって計算する。そして、レオロジーの分野で用いられている換算変数法によって緩和弾性率のマスターカーブを求める。具体的には以下の手順で結果を取りまとめた。まず、各測定条件での応力-ひずみの関係をスティフネス-換算時間の関係に書き直し、線形粘弾性領域と考えられるひずみ値について式(3)から緩和弾性率を計算する。既往の研究によると<sup>9),10)</sup>、通常の道路用混合物では $5000 \times 10^{-6}$ 程度までを線形の範囲と考えることができるので、密粒単体では1000, 2000, 3000,  $4000 \times 10^{-6}$ について、基層単体および複合体ではそれらの倍の2000, 4000, 6000,  $8000 \times 10^{-6}$ について緩和弾性率を求めた。そして次に、これらを試験温度によってグループ分けを行い、各グループについてひずみ速度を変えたもの、すなわち換算時間が異なるものを同一の緩和弾性率-換算時間の

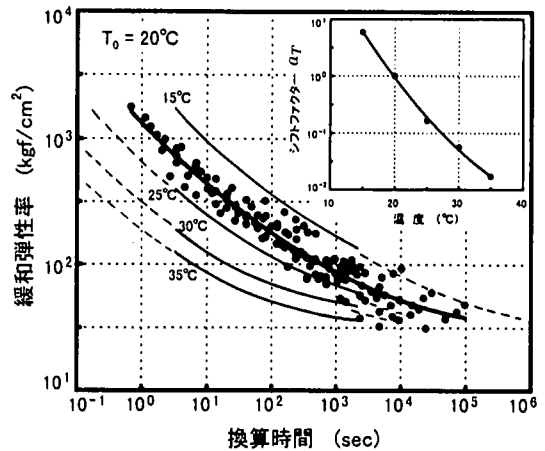


図-11 複合体のマスターカーブ

座標面に表して一本の曲線を描く。最後に、これら各グループの曲線を一つの緩和弾性率-換算時間の座標に表示し、基準とする温度のものは固定してそれ以外のものを換算時間軸について平行移動して、一本のマスターカーブを得る。

このような手続きによって得られた複合体についての各温度における緩和弾性率-換算時間の曲線と、これらを平行移動して描いたマスターカーブを図-11に示す。基準温度は20°Cである。図の煩雑を避けるために、20°C以外の各温度の曲線については式(3)で計算した基となるそれぞれのデータを省略してある。したがって、この図に示されている多数の点は平行移動した後のデータである。マスターカーブは、平行移動したデータに基づいて二次式で近似した曲線である。温度が高くひずみ速度が遅い場合のデータは若干ばらついたものとなっているが、近似曲線との相関係数は0.93であった。換算時間軸に沿って平行移動する移動量は各曲線の形状に基づいて図上で決定するものであるが、これがシフトファクター  $a_T$  である。温度とシフトファクターの関係も図-11の右上に示すとおりで、ほぼ滑らかな曲線上に乗ることから、ここで用いた時間温度換算則に基づく換算変数法を本研究の舗装体に適用することの妥当性が納得できよう。図-11に示したマスターカーブの横軸の換算時間は、定ひずみ速度試験におけるひずみ値をひずみ速度で除したもので、あるひずみに達するまでに要する時間を示すものである。前章で求めた実際の埋設ジョイントでのひずみ速度に対応する換算時間は、ひずみ速度が  $300 \times 10^{-6}$ /hr 以下で生じるひずみの範囲が1%以下とすると、ほぼ  $10^6$ sec 以上のオーダーということになる。マスターカーブからこの場合の緩和弾性率を読みとると、約30~40 kgf/cm<sup>2</sup>の値である。換算時間が  $10^5 \sim 10^6$ sec 付近でマスター

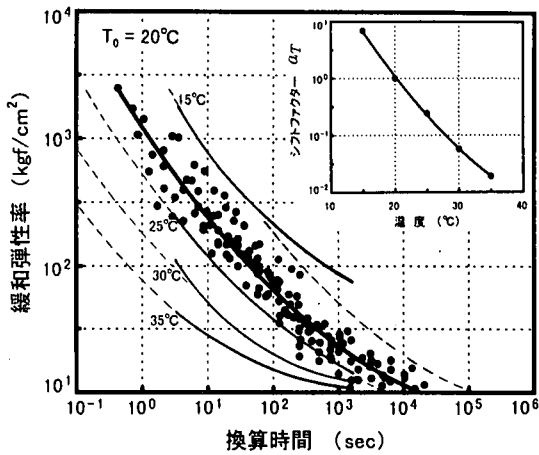


図-12 基層単体のマスターカーブ

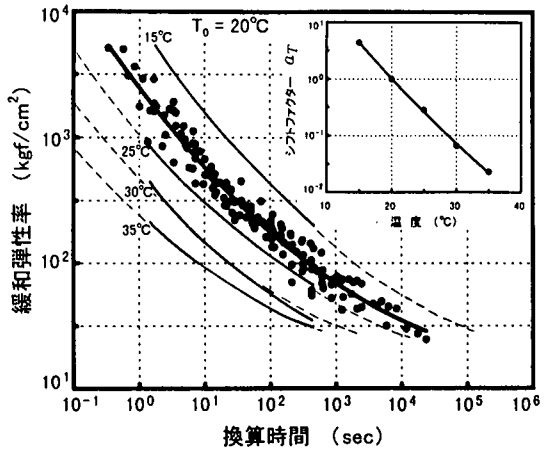


図-13 密粒単体のマスターカーブ

カーブの傾きがほぼ平らとなっていることから、これくらいの値が20°Cにおける緩和弾性率の下限値であると考えられる。

次に、全く同様の換算変数法で求めた基層単体の場合と密粒単体の場合のマスターカーブをそれぞれ図-12と図-13に示す。基層単体の結果は多少ばらつきが大きい、近似曲線の相関係数は0.91であった。また、双方とも温度とシフトファクターの関係は滑らかな曲線で表現することができた。換算時間が長い場合、すなわちひずみ速度が遅い場合には曲線の形からすると、緩和弾性率は複合体よりも小さな値となる。特に、基層単体は全体的に緩和弾性率が小さいので、ひずみ速度が遅い場合の緩和弾性率はかなり小さいと推察される。

緩和弾性率のマスターカーブに基づいた定量的な考察と格子パネルによる補強効果についての詳しい評価は次章で言及する。

### c) 特性温度

時間温度換算則におけるWLF式<sup>11)</sup>に基づいて、基準とする温度を任意に選んだ $T_0$ としたときにシフトさせる温度 $T$ についてのシフトファクター $a_T$ を与える式を導くと次式のようになる<sup>12)</sup>。

$$\log a_T = \frac{-C_1 C_2 (T - T_0)}{(C_2 + T - T_S)(C_2 + T_0 - T_S)} \quad (4)$$

ここに、 $T_S$ は材料固有の特性温度であり、 $C_1 = 8.86$ 、 $C_2 = 101.6$ である。複合体の緩和弾性率のマスターカーブを求める際に図から読み取った各温度についての $a_T$ に基づいて、逆に $T_S$ を求めてみると315~321 Kであった。また、基層単体および密粒単体では、それぞれ312~319 K、307~312 Kであった。間山らは、曲げ試験によってエポキシアスファルトと通常のアスファルト混合物について $T_S$ を求めており、それぞれ325 Kと309 Kであったことを報告している<sup>12)</sup>。本研究での直接引張試験によっても、既往の実験値とほぼ合致す

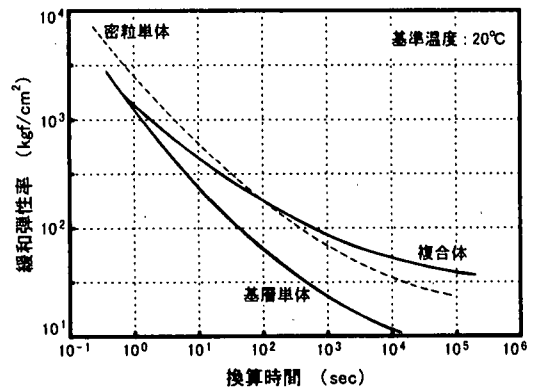


図-14 各供試体のマスターカーブの比較

る結果を得ることができた。そして、間山らはこれらの結果を種々の高分子材料<sup>11)</sup>のものと比較し、エポキシアスファルトとアスファルト混合物が高分子材料と同様の挙動を示すものと評価している。したがって、本研究で取り扱った基層用混合物と格子パネルを埋め込んだ複合体についても $(\log a_T)$ 対 $(T - T_S)$ の座表面上に表現される合成曲線<sup>11)</sup>が当てはまると考えられ、これも高分子材料に類似したレオロジー挙動を示すと予想される。

## 4. 格子パネルによる舗装体の補強効果

### (1) 緩和弾性率による評価

前章で求めた各種混合物についての緩和弾性率を比較してみる。図-11~13に示した基準温度20°Cについてのマスターカーブを重ねて表してみると図-14に示すとおりである。実線で描いた複合体と基層単体の差異が、格子パネルによる補強効果ということになる。換算時間が短い、すなわちひずみ速度が速い場合には

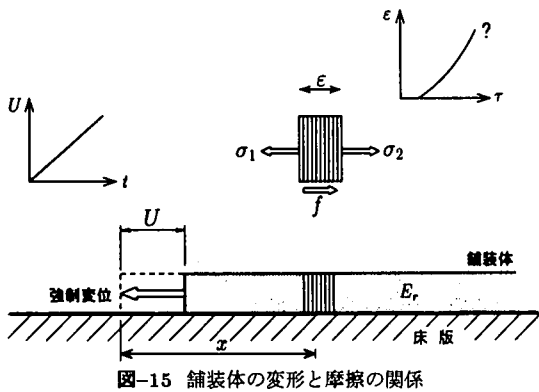


図-15 舗装体の変形と摩擦の関係

緩和弾性率に大きな違いは認められないが、ひずみ速度が遅くなるに従って両者の差が大きくなっている。基層用混合物はアスファルトリッチな特殊配合の混合物であるため、密粒度の混合物と比べると緩和弾性率が全体的に小さく、応力緩和の程度が大きい。しかしながら、格子パネルで補強することによって緩和の程度がかなり小さくなっている。そして、これによってひずみ速度が遅い場合における緩和弾性率の著しい低下が軽減されている。

実際の埋設ジョイントの変形は、ひずみ速度がほぼゼロに近い準静的な挙動であった。二次曲線で近似したそれぞれのマスターカーブにおいて傾きがゼロとなる点、すなわち緩和弾性率が最小となる場合の値を求めると、複合体では  $34\text{kgf/cm}^2$ 、基層単体では  $7\text{kgf/cm}^2$ 、密粒単体では  $18\text{kgf/cm}^2$  であった。これらは近似曲線から求めた一種の概略値であるが、格子パネルは約5倍も基層の緩和弾性率を増加させる効果を有していることになる。

## (2) 埋設ジョイントの変形挙動と緩和弾性率の関係

力学特性である緩和弾性率や応力緩和性状の違いが、埋設ジョイント全体としての変形挙動に具体的にどのように関係しているのか補足しておく。格子パネルを用いた形式の埋設ジョイントでは、桁遊間に集中する伸縮変位を舗装体の全体に分散させることが重要であり、これを阻害する因子として舗装体と床版との境界面に生じる摩擦力（付着力）が指摘されている<sup>4)</sup>。桁伸縮の変形作用によって埋設ジョイントの舗装体に生じる応力と摩擦力の関係、単純化して模式的に表すと次のとおりである。

図-15 に示すように埋設ジョイントが床版上に舗装されており、いま微小要素のつり合いについて考える。左方向の強制変位によって、ある位置  $x$  における微小要素にひずみ  $\varepsilon$  の変形が生じ、このときに左側の面に発生する応力を  $\sigma_1$  とする。そして、この要素には底面に摩擦力  $f$  が作用しているものとする。要素の右側の

面に発生する応力を  $\sigma_2$  で表し、舗装体を応力緩和の大きい粘弾性体と考えると、変形時における力のつり合い関係は、履歴積分の考え方<sup>13)</sup>を導入して次式のように表される。

$$\sigma_2(x, t) = \sigma_1(x, t) - f \quad (5)$$

$$= \left[ \varepsilon(x, 0) E_r(t) + \int_0^t E_r(t - \tau) \frac{\partial \varepsilon(x, \tau)}{\partial \tau} d\tau \right] - f$$

ここに、 $E_r(t)$  は緩和弾性率、 $t$  は経過時間、 $\tau$  はひずみの変化に関する経過時間 ( $t$  は強制変位を与えたときから計り始める時間で、 $\tau$  は  $t$  とは独立に微小要素の変形履歴を表す時間である) を示す。

微小要素と床版の境界面にすべりが発生して  $\sigma_2$  が生じるためには、 $\sigma_1$  が  $f$  の最大値よりも大きい必要がある。 $\sigma_1$  が  $f$  よりも小さければ、それより右側には力が伝わらないで何も変形しないことになる。そして、 $\sigma_1$  は主に緩和弾性率  $E_r(t)$  とひずみ履歴  $\varepsilon(x, \tau)$  によって決まることから、すべりが生じて要素の右側に応力が伝達されるかどうかは、緩和弾性率の大きさが直接的に関係することになる。そしてこの場合、緩和弾性率は材料によって決まる時間のみの関数である。実際の問題では、 $f$  は  $\sigma_1$  に依存しており、さらに  $\varepsilon$  は  $t$  とは無関係な時間  $\tau$  の関数で具体的に決めることができないため、式(5)を計算することは不可能である。解析には使えないが、式(5)から緩和弾性率の物理的な意味合いを読み取ることができよう。

以上のようなモデルの考察から、本型式の埋設ジョイントにおいては、緩和弾性率は舗装体内部に応力を伝達する能力の程度を示すものであることが理解できる。そして、応力緩和はこのような伝達性能が徐々に低下してしまうことを意味する。すなわち、格子パネルによる補強効果とは舗装体内部における応力の伝達性能を高める効果ととらえることができる。格子パネルを埋め込むことによって、応力の伝達性能が大きくなって舗装体の変形する範囲が広くなり、結果的に生じるひずみが小さくなるのである。そして、格子パネルは、温度やひずみ速度の変化に対する応力伝達性能の変動を緩和する効用も有している。

## 5. まとめ

本研究では、格子パネルによる埋設ジョイント舗装体の補強効果を定量的に評価するために、条件を広範囲に変化させた定ひずみ速度の直接引張試験を行い、換算変数法に基づいて緩和弾性率のマスターカーブを求めた。格子パネルを埋め込んだ場合とそうでない場合について、マスターカーブから実際のひずみ速度域に対応する緩和弾性率を推定し、これらを比較することによって補強効果を定量的に評価した。



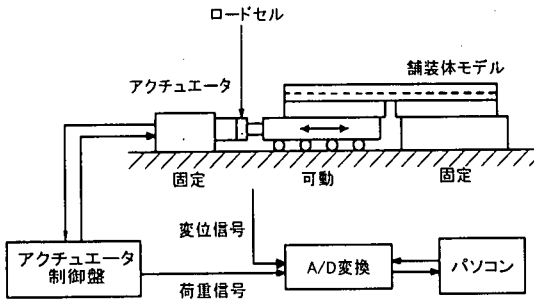


図-16 伸縮試験の概要

本研究で得られた主要な知見をまとめると、以下のとおりである。

- (a) 格子パネルを用いた埋設ジョイントにおいて、実際の現場での桁伸縮によるひずみ速度は、 $10^2 \times 10^{-6}/\text{hr}$  のオーダーを上限としたそれ以下の非常に緩慢としたものである。
- (b) 本型式の埋設ジョイントで使用されている特殊配合の基層用混合物、およびこれに格子パネルを埋め込んだ複合体は、レオロジーの分野で経験的に用いられている時間温度換算則を適用することが可能である。そして、これに基づいて直接引張に対する緩和弾性率のマスターカーブを得た。
- (c) 基層用混合物に格子パネルを埋め込んで複合体を構成することによって応力が緩和し難くなり、結果的に低スティフネス状態での引張に対する緩和弾性率の低下が改善される。格子パネルによって低スティフネス状態の緩和弾性率は約5倍ほど大きくなって、基層の緩和弾性率はおおむね  $30\text{kgf}/\text{cm}^2$  程度である。
- (d) 格子パネルによる補強効果は、ひずみ分散の観点からすると、舗装体内部における応力の伝達性能を高める効果ととらえることができる。

ここでの検討では、主に舗装体の力学特性に着目して定量的評価を重視した。今後の課題としては、本研究の成果を活用して構造面の特性を検討する必要がある。4章の最後で記したように、格子パネルを用いた型式の埋設ジョイントでは構造特性が複雑であり、このような検討には材料の物性をも考慮して力と変形の関係について考えなければならない。そして、複雑な応力-ひずみの関係と摩擦を考慮するには、媒質（舗装体）を離散化した近似解析法等を使って、舗装体全体としての変形挙動を評価する必要がある。

**謝辞:** 本研究の現場測定については、建設省長岡国道工事事務所の方々にお世話になった。また、アスファルト混合物の直接引張試験は苫小牧工業高等専門学校の吉

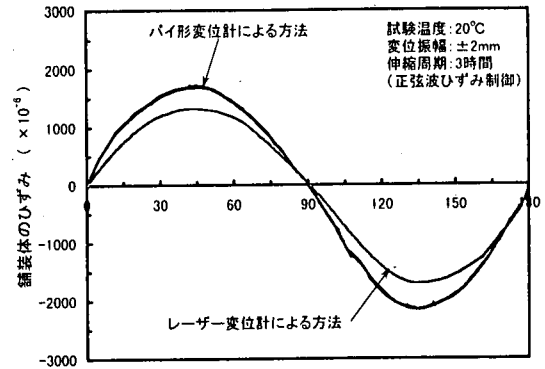


図-17 変形測定方法の比較

田隆輝教授が考案した方法で、吉田教授からはこの方法を本研究で実施することを承諾していただいた。さらに、一連の引張試験については、供試体の作製から試験の実施に至るまで、福田道路(株)技術研究所が所有する設備を使用させていただいた。関係各位に深甚なる感謝の意を表する次第である。

## 付録 パイ形変位計による舗装体変形の測定

本文2章で記した埋設ジョイントの変形挙動についての検討では、図-2 に示したようにパイ形変位計を舗装体に埋め込んだ格子パネルに固定して、舗装体の変形を測定した。この方法では、パイ形変位計を固定する部分のセル内部にはアスファルト混合物が存在していないことから、変形が他の部分よりもいくらか大きく現れることが懸念された。そこで予備実験として、 $1500 \times 700 \times 75(\text{mm})$  の舗装体モデルを低速度で伸縮させ、その際に測定される舗装体変形のデータを評価してみた。実験は図-16 に示すような試験装置を用いて行い、この測定方法によるデータと既往における比較的信頼性の高い測定方法によるデータを比較して評価した。舗装体はせん断層<sup>1)</sup>を配置した本型式の埋設ジョイントと全く同じ構造のモデルである。既往の測定方法は、非接触レーザー変位計を舗装体の側面に固定し、伸縮作用に対する基準間隔の変化を測定する方法である(原理的にはパイ形変位計を用いる方法と同じ)。パイ形変位計は舗装体の中央部に埋め込み、レーザー変位計は同じ中央部の両側面に固定した。モデル供試体、試験方法、レーザー変位計を用いた測定方法の詳細については、著者らの既報告<sup>4)</sup>を参照されたい。

温度が  $20^\circ\text{C}$  で与える伸縮変位が  $\pm 2\text{mm}$  (周期3時間の正弦波) の場合における、各方法での舗装体変形の測定結果を図-17 に示す。全体的にパイ形変位計を用いた方法によるひずみ値のほうが、レーザー変位計を用いた方法のものよりも大きく測定されている。引張

りと圧縮の際のそれぞれのピーク値を比較してみると、引張りでは29%、圧縮では27%パイ形変位計を用いたほうが大きい結果となっている。この他にも、温度と与える伸縮変位をいくつか変化させて試験を実施したところ、多少のばらつきが見られるものの、おおむね30%前後の違いであった。以上の結果に基づいて、本研究では、パイ形変位計を用いた方法で測定したひずみ値を30%割引いて考えた。

#### 参考文献

- 1) (財) 道路保全技術センター：既設橋梁のノージョイント工法の設計施工手引き(案)，第1編 埋設ジョイントの設計施工手引き(案)，pp.1-46, 1995.
- 2) (社) 日本道路協会：道路橋伸縮装置便覧，pp.41-61, 1970.
- 3) 高橋 修，丸山暉彦，鈴木一隆，稲葉武男：格子パネルを用いた埋設ジョイントの変形特性に関する実験的一考察，長岡技術科学大学 研究報告 第16号，pp.11-19, 1994.
- 4) 高橋 修，丸山暉彦，稲葉武男：格子パネルを用いた埋設ジョイントのひずみ分散機能に関する基礎的検討，土木学会論文集，No.532/V-30，pp.77-87, 1996.

- 5) 高橋 修，北見英一，稲葉武男：格子パネル型埋設ジョイントのひずみ分散機能-中沢高架橋での追跡調査-，第6回北陸道路舗装会議技術報告集，pp.31-36, 1994.
- 6) (社) 日本道路協会：アスファルト舗装要綱，pp.90-94, 1992.
- 7) (社) 日本道路協会：舗装試験法便覧，pp.562-573, 1988.
- 8) 吉田隆輝，高橋正一：アスファルト混合物の直接引張試験について，土木学会第49回年次学術講演会講演概要集，第5部，pp.66-67, 1994.
- 9) Monismith, C.L., Alexander, R.L. and Secor, K.E. : Rheological behavior of asphalt concrete, *Proc. AAPT*, Vol. 35, pp.400-450, 1968.
- 10) 菅原照雄，中島昭雄，笠原 篤：アスファルト混合物の力学的性状の測定法(上)，舗装，8-11，pp.19-26, 1973.
- 11) 小野木重治：レオロジー要論，棋書店，pp.155-159, 1970.
- 12) 間山正一，菅原照雄：エポキシアスファルト混合物の応力緩和性状について，土木学会論文報告集，第275号，pp.113-121, 1978.
- 13) W. フリュエグ(堀 幸夫訳)：粘弾性学，培風館，pp.24-58, 1973.

(1997. 10. 9 受付)

## REINFORCEMENT EVALUATION OF HONEYCOMB GRID PANEL ON BURIED JOINT ASPHALT LAYER

Osamu TAKAHASHI, Teruhiko MARUYAMA and Takeo INABA

The most important failure form in buried joint is transverse cracking. Long term serviceability deeply depends on the cracking resistance of joint layer. To decrease effects of bridge deck movement, the grid panel type has not only debonding part between asphalt layer and concrete slab but also honeycomb grid panel in the binder course. The layer reinforcement is indispensable in this kind of buried joint, since stress is easy to relax in a low stiffness state of asphalt mixture. In this paper, it was quantitatively evaluated that layer stiffness increases by embedding the grid panel into asphalt layer. Based on the field measurement, actual rate of strain induced in the buried joint was investigated. Direct tensile tests were carried out to plain mixture specimens and mixture-grid panel composite specimens. From the test results, relaxation modulus of low stiffness condition was estimated by applying the time-temperature superposition principle, and reinforcement effect of grid panel was evaluated.