

# ウレタン充填鋼・コンクリート合成構造の基本性状実験

## Experiment on Basic Properties of Steel/Concrete Composite Structures filled with Hard Urethane

太田 貞次\*      高橋 秀幸\*\*      吉川 薫\*\*\*  
Teiji OHTA      Hideyuki TAKAHASHI      Kaoru YOSHIKAWA

### Summary

A high molecular compound, hard urethane has characteristics such as the ability to absorb kinetic energy, excellent field workability, and good adhesion to steel, concrete and other materials. It is therefore expected to find applications in on-site repairs and where impact or vibration is a problem.

This report presents the results of various experiments conducted on composite girders made of steel, concrete, and hard urethane which were created in order to obtain the basic data prerequisite to using urethane in diverse structures.

### 1. まえがき

材料分野における最近の新素材・新材料開発の動向には目を見張るものがあり、工学の様々な分野で、これら新材料を用いた新技術の開発に力を傾注している。土木の分野でも、土・鋼・コンクリートといった既存の材料以外で土木構造物に効果的に使用し得る材料、あるいはそれを用いた構造物の開発に対する研究が進められているが、新材料をうまく適用しても付加価値を高めにくいとの土木構造物の性質上、高価な材料を多量に使うことが困難であり、他の分野と比較すると新材料を使いこなせていないのが実情である。

土木の分野で比較的使用されている材料の1つに発泡スチロールがあり、適度な強度を持ち軽量で衝撃吸収性の良好な材料として盛土材料、ロックシェッド等に使用されている。

著者等は発泡スチロール同様高分子材料であるウレタンに着目し、その土木構造物への適用を試みた。ウレタンは、比重・気泡状況により様々な堅さ・性状を示すがここでは比重0.03程度の独立気泡性硬質ウレタンを採用した。この硬質ウレタンの特徴は軽く、かつ施工性に優れているのみならず、ある程度の強度（2～3 kgf/cm<sup>2</sup>）を有し、鉄やコンクリートと密着するという性質をもち、土木材料として使用する際有効な新材料であると考えられる。

この様に有利な特徴をもつ硬質ウレタンではあるが、これまで土木構造物に用いた例は見られず、今後硬質ウレタンを使用するにあたり、この種の構造の静力学的挙動、破壊性状、耐久性、振動特性等を把握することが必要である。

ここでは、鋼・硬質ウレタン・コンクリートの三者一体となる梁試験体を用いて静的載荷実験、疲労実験、振動実験を行い、鋼・硬質ウレタン・コンクリート合成構造の基本的性能を調べた。

### 2. 硬質ウレタンの特性

本実験では、強度や伸び追随性など土木構造物に用いるに際し最も適当であると思われる比重0.03程度の独立気泡性硬質ウレタンを使用している。この硬質ウレタンは透水性がほとんどなく水や空気を浸透させない特徴をもち、また、軽量であるにも関わらずかなりの強度を有している。比重0.03の硬質ウレタンの特性値を表1に示す。

硬質ウレタンの施工にはスプレーを使用した吹き付けによる方法とビニールパイプを用いた注入による方法の2種類があり、現場施工には前者が便利であると思われるが、本実験では梁試験体の施工性や、鋼・硬質ウレタン・コンクリートの三者一体構造製作のため後者を採用した（3. 参照）。

\* 技術本部技術開発部技術開発課課長代理

\*\*\* 松本工場生産設計部生産設計課

\*\* 千葉工場製造部生産技術課

表-1 発泡性硬質ウレタン特性値 (比重 0.03)

項目	単位	測定方向	
		層方向	層直角方向
圧縮強度	kgf/cm <sup>2</sup>	2.2	1.0
引張強度	kgf/cm <sup>2</sup>	3.2	2.0
剪断強度	kgf/cm <sup>2</sup>	1.5	1.4
初期ヤング率	kgf/cm <sup>2</sup>	56.0	26.0
吸水率(1 day)	%	1.8	

硬質ウレタンは2種類の原液、すなわちT液(ポリメチレン・ポリフェニル・イソシアネート、変性剤)と、R液(ポリエーテル・ポリオール、触媒、界面活性剤、発泡剤)とを接触させることにより生成する。発泡時間は触媒により調整するが非常に短い時間で硬化が可能であり、このことから現場施工性に優れていることがわかる。

### 3. 梁試験体の製作

実験は鋼・硬質ウレタン・コンクリート合成梁試験体を用いて行った。梁試験体は、底部鋼板(以下底板と呼ぶ)・Tリブからなる鋼桁(SS400規格品)と、その圧縮領域にTリブ上フランジを囲むように設けたコンクリート断面(早強コンクリート、標準養生7日強度=323kgf/cm<sup>2</sup>、28日強度=370kgf/cm<sup>2</sup>)と、コンクリートと底板との間に充填された硬質ウレタンとで構成される(図-1、タイプ(I))。なお、比較のためにそれぞれ硬質ウレタン部分にコンクリートを打設したもの、空洞にしたもの計2タイプを製作した(図-1、タイプ(II)・(III))。

鋼とコンクリート間の合成はTリブの腹板部に150mmピッチで19φの孔をあけD16の異形鉄筋(SD30規格品)を通し、この異形鉄筋のせん断抵抗と鋼とコンクリートの接触面における付着抵抗とにより両者の一体化を計った。また、コンクリート打設後にウレタン充填を行うため、硬質ウレタンが鋼とコンクリートの双方に完全に密着し、鋼・硬質ウレタン・コンクリート三者一体の合成構造が形成される。

なお、試験体は各3体ずつ製作し、2体は静的に破壊し残りの1体は疲労実験後静的に破壊する。また、各1体に対し振動実験を行う。

### 4. 静的載荷実験

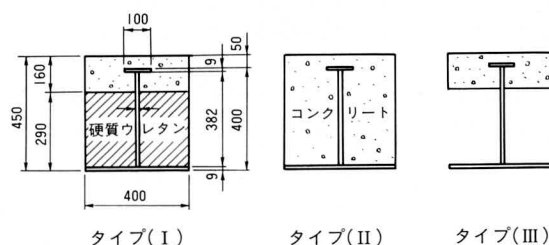


図-1 試験体形状図

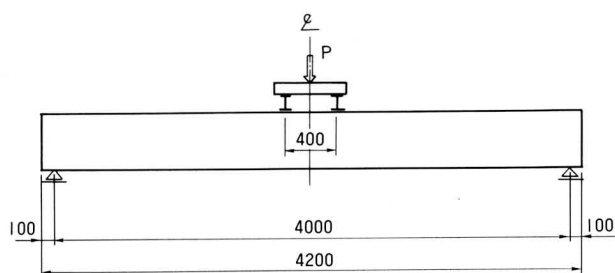


図-2 実験方法

#### (1) 実験方法

タイプ(I)~(III)の3種類について各2体ずつ、支点間隔4.0mでセットし中央2点載荷で終局状態まで荷重を加えた(図-2)。荷重の管理は、荷重載荷位置にセットしたロードセルで行った。測定項目は支間中央のたわみと支間中央および1/4点における断面内のひずみとし、たわみについては支間中央底板の左右両端にセットした変位計により測定する。ひずみに対しては、各断面位置毎に、コンクリート上面、Tリブ上フランジ上面、ウェブ1/3点計2ヶ所、底板下面(中央と両端計3ヶ所)の7ヶ所にひずみゲージを貼り計測している。

#### (2) 実験結果

3種類の試験体に対し、終局状態まで静的に載荷した結果について、硬質ウレタンの効果に着目して述べる。

##### 1) 荷重増加に伴うたわみ・断面内ひずみの比較

タイプ(I)~(III)の3種類の試験体に対し静的載荷実験をして得られた結果のうち、荷重増加に伴う支間中央のたわみ、コンクリート上面と底板下面のひずみを図-3に示す。

支間中央たわみのグラフから次のことがわかる。すなわち、たわみ曲線形状・終局荷重ともタイプ(I)とタイプ(III)はほとんど変わらず、硬質ウレタンが静的載荷に対しては断面の曲げ剛性に寄与しない。それに対し、

コンクリートを断面の引張域にも充填したタイプ（II）ではタイプ（I）と比較して初期曲げ剛性が大きく、終局荷重も1割程度大きい。しかし、タイプ（I）では塑性域までたわみ曲線がスムーズに移行するのに対し、タイプ（II）では引張域コンクリートにクラックが入る時点で曲線が折れてしまう。

硬質ウレタンの特徴はコンクリート上面ひずみのグラフに現われている。鋼やコンクリートと比較して極めて小さなヤング係数を持つ硬質ウレタンを充填したタイプ（I）のひずみが弾性域においてタイプ（II）に近い値となっており、タイプ（III）のひずみの6～7割程度を推移している。また、底板下面ひずみのグラフから、20

tf未満の荷重範囲では、タイプ（III）のひずみが他のタイプと比較して小さいことがわかる。これらのことから、タイプ（III）では必ずしも鋼とコンクリートが一体となって抵抗していないのに対し、硬質ウレタンを充填することにより鋼とコンクリート間の合成が強化されていることがわかる。

2) 荷重増加に伴う断面内ひずみの進展と終局耐力

タイプ（I）～（III）の各試験体について、載荷荷重の増加に伴う支間中央断面ひずみの進展状況を図-4に示す。ひずみ測定点はコンクリート上面、Tリブ上フランジ上面、ウェブ $\frac{1}{3}$ 点2ヶ所、底板下面であり、荷重増加10tf毎に示した。以下において、各タイプ別に説明する。

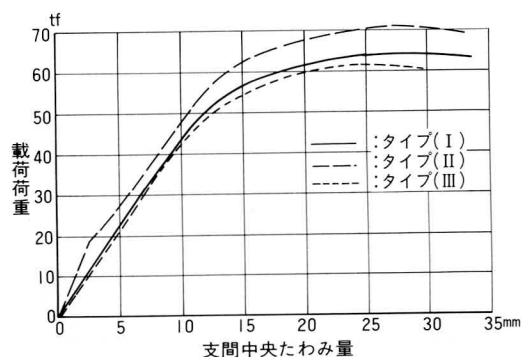


図-3 荷重増加に伴う変形・ひずみの比較

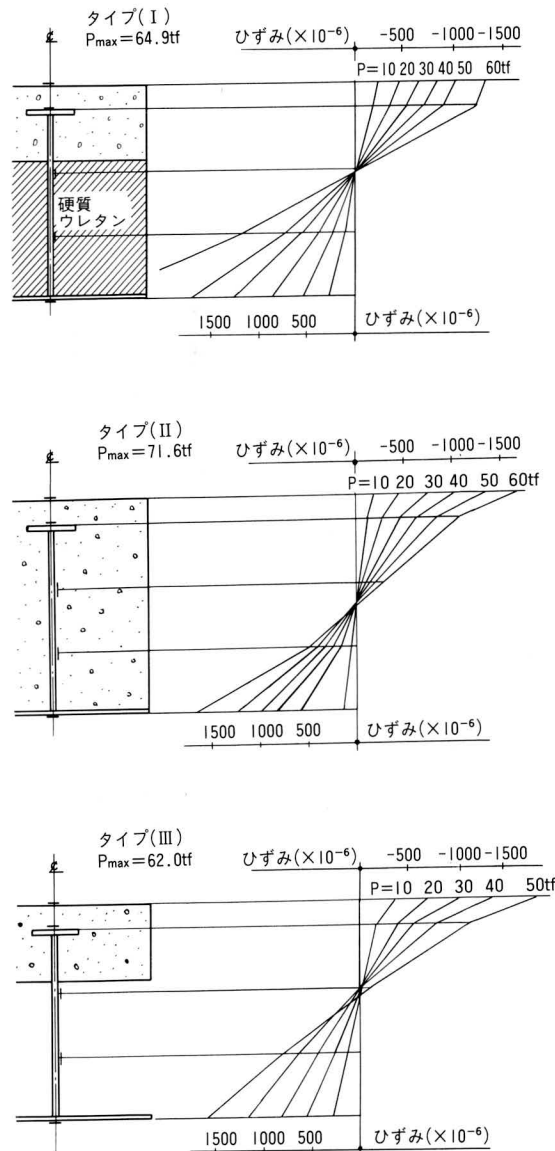


図-4 支間中央断面ひずみ分布

硬質ウレタンを充填したタイプ(I)では30tf前後までは断面が平面を保持するひずみ状態を保つが、37tfで底板が降伏応力に達すると、鋼桁部分のひずみがコンクリート部分のひずみに先行して大きく増大するようになる。更に荷重が増すと、硬質ウレタンが鋼桁の伸びに追従できず内部に亀裂を発生し、最大荷重64.9tfでコンクリート上面から内面にかけて激しく圧壊し、支持力を喪失する。なお、コンクリートと鋼桁との付着は終局状態まで切れず、一体となって荷重に抵抗している。終局状態を写真-1に示す。

コンクリートを完全に充填したタイプ(II)では、18tfまでは断面が平面を保持するひずみ状態であるが18tfのときに荷重載荷点付近に底板位置から鉛直上方にクラックが発生する。20tfまで荷重を上げると、このクラックが上方に進展するとともに他に3ヶ所でクラックが発生し、それに伴い下フランジのひずみが急激に増加する。この段階で断面は平面を保たず、更に荷重を増加すると鉛直クラックが断面の圧縮域まで進展し、コンクリート上面底板下面のひずみが特に大きく増加する中で、最大荷重71.6tfでコンクリート上面が圧壊する。タイプ(II)の終局状態を写真-2に示す。

断面引張域を空洞としたタイプ(III)では、載荷荷重10tfで既にコンクリート上面のひずみ増加の割合が鋼桁部分より大きくなり、断面は平面を保たない。その後、載荷荷重53tf前後で底板が急激に伸びはじめ、全体のたわみ量も急激に増大する。更に荷重を増すと降伏域の拡大に伴って底板が面外に大きく変形しつつ、コンクリート上面が圧壊する。終局状態を写真-3に示す。

### (3) 実験結果に対する考察

硬質ウレタンは初期ヤング係数が $26\text{kgf}/\text{cm}^2$ 程度と鋼やコンクリートに比較して極めて小さい材料である。そのため、硬質ウレタンが充填されていても空洞であっても、梁の曲げ剛性や終局荷重は変わらない。しかし、断面内のひずみ分布を見ると、空洞部を持つ試験体ではコンクリート部分と鋼桁部分が必ずしも一体となって抵抗しているとは言えないのに対して、硬質ウレタンを充填することにより両者結合が強まり、一体となって荷重に抵抗するようになる。

コンクリートを完全に充填した試験体では、初期曲げ剛性・終局荷重とも他の試験体より大きいのが、荷重載荷の早い段階でクラックが発生し、それに伴い梁の剛性が急に低下する弱点を有しており、何らかの原因で設計条

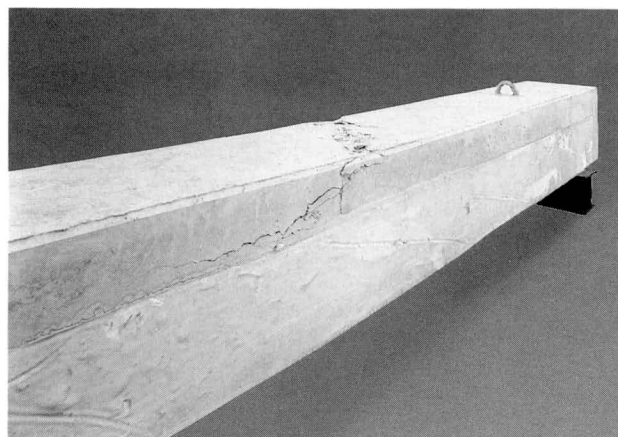


写真-1 終局状態(タイプ(I))

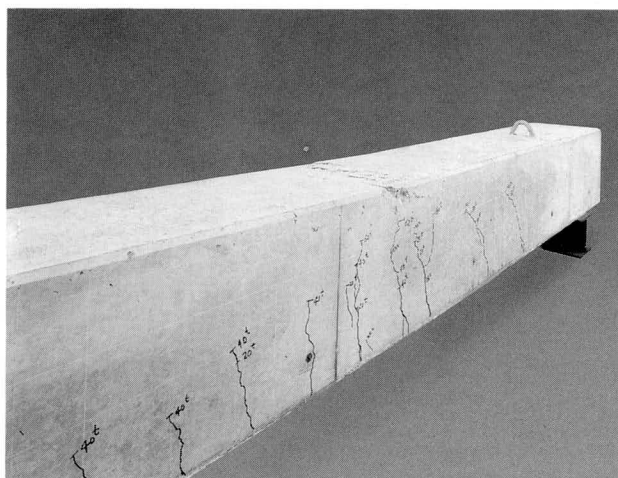


写真-2 終局状態(タイプ(II))

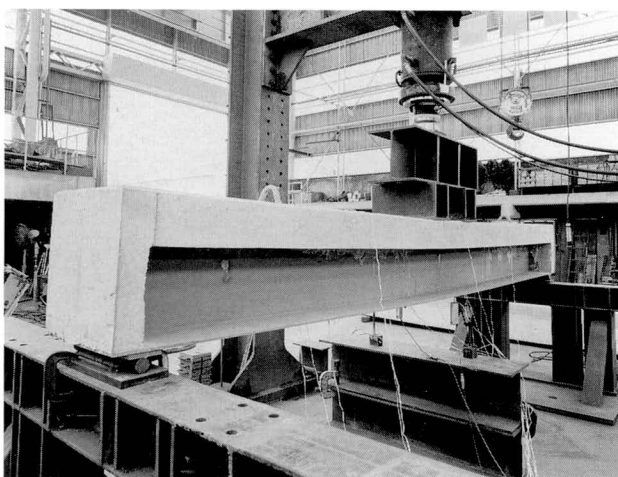


写真-3 終局状態(タイプ(III))

件を上回る荷重が作用する場合には余剰耐力の小さい構造である。

## 5. 疲労実験

### (1) 実験方法

タイプ（Ⅰ）～（Ⅲ）の試験体各1体に対して中央2点荷重で毎分250回の繰り返し荷重を加えて疲労性状を求めるとともに、疲労実験後静的荷重実験を行い疲労実験前後の梁の強度・性状の変化を調べた。繰り返し回数ならびに最大・最小荷重強度、そのときの支間中央コンクリート上面と底板の応力度の最大・最小値を表-2に示す。なお、タイプ（Ⅰ）では通常の2倍の繰り返し回数とし、厳しい条件下で疲労性状を調べた。

最大・最小荷重の設定については、タイプ（Ⅰ）に対して底板の最大応力度 $\sigma_{max}=1400\text{kgf/cm}^2$ 、最小応力度 $\sigma_{min}=400\text{kgf/cm}^2$ とした。しかし、タイプ（Ⅱ）・タイプ（Ⅲ）については同条件を適用できず、タイプ（Ⅰ）とコンクリート上面の応力度を揃える形で決定した。

### (2) 実験結果および考察

#### 1) 疲労実験時の外観変化

タイプ（Ⅰ）では疲労実験で目安としている200万回に対し、2倍の400万回の荷重載荷を行ったが、載荷前後で外観的には全く変化が見られなかった。それに対してタイプ（Ⅱ）では荷重載荷直後に荷重載荷点付近の底板位置4ヶ所で鉛直上方にクラックが発生し、回数の増加に伴って圧縮域まで進展した。また、タイプ（Ⅲ）ではコンクリート部分は合成断面中立軸より上にあるにも係わらず3ヶ所でコンクリート下面より鉛直方向にクラックが発生した。

#### 2) 疲労実験後梁試験体に対する静的荷重実験

疲労実験に使用した梁試験体に対して、静的荷重実験した結果を図-5に示す。荷重一支間中央のたわみ曲線より、コンクリート充填タイプ（Ⅱ）とウレタン充填タ

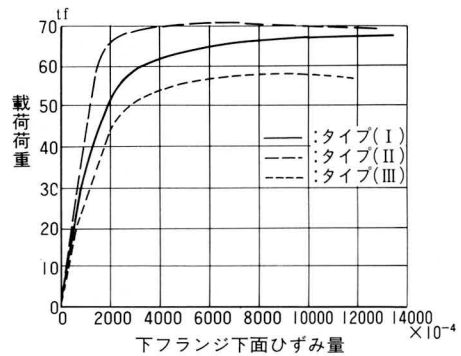
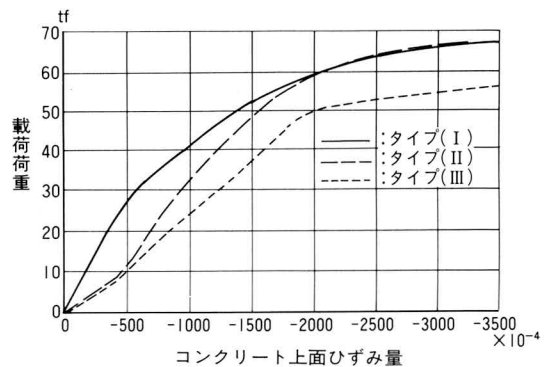
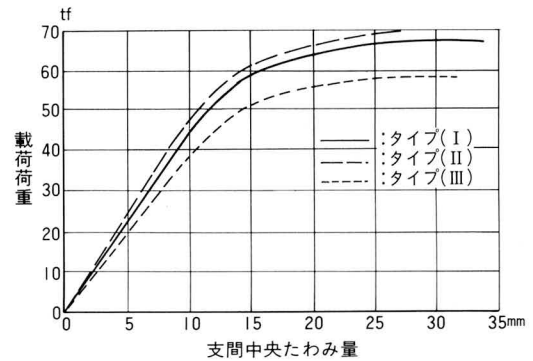


図-5 荷重増加に伴う変形・ひずみの比較  
(疲労実験後)

表-2 疲労実験実施要領

試験体種類	繰り返し回数 (万回)	載 荷 荷 重 (tonf)		コンクリート上面応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		底板下面応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	
		最 大	最 小	最 大	最 小	最 大	最 小
タイプ(Ⅰ)	400	23.2	6.2	110	33	1 400	400
タイプ(Ⅱ)	200	20.4	5.0	110	40	1 000	330
タイプ(Ⅲ)	200	17.5	5.7	110	40	910	200

タイプ（Ⅰ）とは初期曲げ剛性と終局荷重のどちらに対しても有意差がないが、空洞部を持つタイプ（Ⅲ）は前2者と比較して荷重増加に伴うたわみの増加が大きく、終局荷重も1～2割程度小さくなるのがわかる。これはタイプ（Ⅱ）・（Ⅲ）では繰り返し回数の増加に伴い鋼とコンクリート間の付着が切れ、疲労実験前と比較して梁の曲げ剛性が低下するのに対し、タイプ（Ⅰ）では付着が切れず、疲労荷重載荷により梁の性状に変化を生じなかったためと思われる。

次に、荷重の増加に伴うコンクリート上面のひずみの変化を見ると、初期の荷重増に対するタイプ（Ⅱ）のひずみが大きくなっている。これは、疲労実験中に断面の引張域のコンクリートと鋼桁との付着が切れ、空洞部を持つタイプ（Ⅲ）と同様な抵抗のメカニズムとなることによるものと考えられる。

荷重-底板下面ひずみ曲線において、タイプ（Ⅱ）の荷重増加に伴うひずみの増大が他の2タイプと比較して小さいのは、支間中央ひずみゲージ位置でクラックの発生や底板・腹板とコンクリートとの付着切れが起こらなかったためであり、クラックが発生した断面付近では底板下面のひずみ増加はより大きなものとなろう。

支間中央断面のひずみ分布を図-6に示す。特にタイプ（Ⅲ）において疲労実験の影響が顕著であり、コンクリート上面・底板下面のひずみとも他の2タイプと比べて荷重増加に伴うひずみが大きくなっている様子が見られる。これは、荷重載荷以前に鋼とコンクリート間の付着が切れて、コンクリート部分と鋼桁部分が独立して荷重に抵抗するメカニズムに移行しているためと思われる。そのため、コンクリート部分に鉛直クラックの発生が見られる。それに対し、タイプ（Ⅰ）では疲労実験後の静的載荷実験においても終局状態までクラックは発生せず、鋼とコンクリート間の付着が保たれることがわかる。タイプ（Ⅱ）で疲労実験後も断面ひずみ増加量が変わらないように見えるのは、タイプ（Ⅱ）試験体が疲労実験前後でその性状に変化が生じないというよりは、むしろこの断面前後に弱い部分があり、そこで鋼とコンクリート間の付着切れが起こり、この断面では変化を生じなかったと言うべきであろう。

### (3) 各タイプ別の疲労性状の比較

本実験では、鋼・コンクリート間の合成は腹板に孔をあけて貫通させた鉄筋のせん断抵抗と、両者間の付着抵抗とで保っている。この結合状態の変化がポイントとな

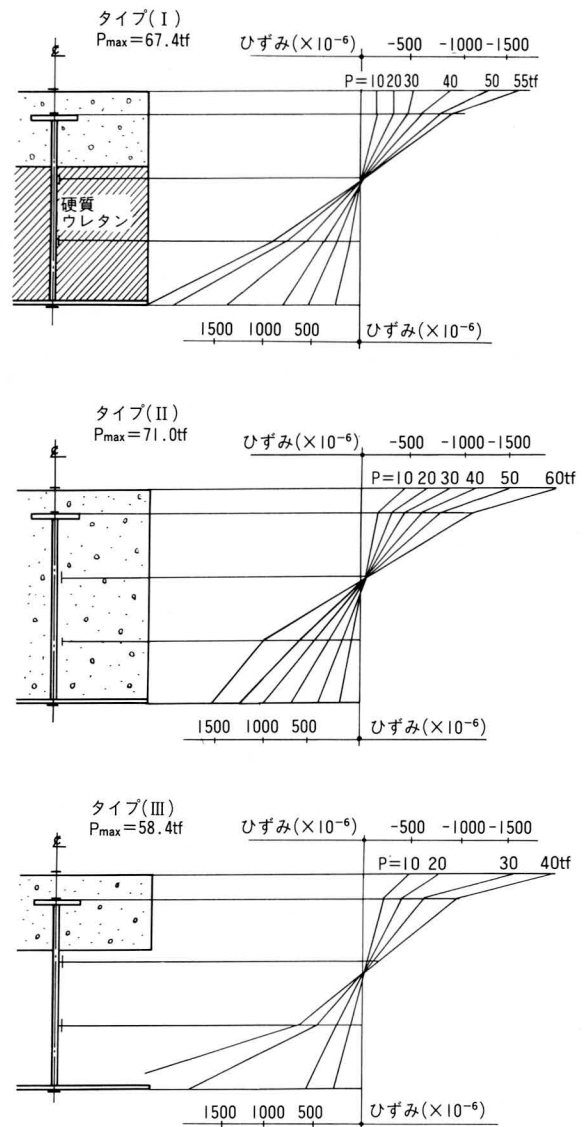


図-6 支間中央断面ひずみ分布（疲労実験後）

るが、硬質ウレタンを充填したタイプ（Ⅰ）試験体ではコンクリート上面の応力差77kgf/cm<sup>2</sup>、底板下面の応力差1000kgf/cm<sup>2</sup>と厳しい荷重条件で400万回載荷したにも係わらず合成が保たれた。それに対し、断面の引張域にコンクリートを充填したタイプ（Ⅱ）における一部付着切れは予想されたが、引張域を空洞にしたタイプ（Ⅲ）で付着が切れたことは、硬質ウレタンの効果をはっきりと示すものである。

## 6. 振動実験

### (1) 実験方法

タイプ(I)～(III)の3種類の試験体から各1体ずつ選び、支点間隔4.0mでセットした後、インパルスハンマーで支間中央を打撃して自由振動を生じさせる。データは支間中央、 $\frac{1}{3}$ 点、 $\frac{1}{6}$ 点の底板下面3ヶ所に取り付けた小型加速度計(圧電型)、振動計を通して振動加速度の形でデータレコーダに収録した後、FFTアナライザーにより周波数分析を行った。

## (2) 実験結果

各試験体毎にデータレコーダ収録データをFFT解析し、卓越固有振動数( $n$ )および対数減衰率( $\lambda$ )が表-3のように得られた。また、フィルターを通して得られる卓越周波数成分の支間中央における振動加速波形を図-7に示す。

固有振動数の比較では、タイプ(I)・(III)がほとんど同じ値であるのに対し、タイプ(II)では少し小さな値となっている。このことから、硬質ウレタンを充填したタイプ(I)と空洞部を持つタイプ(III)の曲げ剛性がほぼ等しく、硬質ウレタンが梁の剛性には寄与していないと言える。それに対し、対数減衰率の比較ではコンクリートを充填したタイプ(II)が空洞を持つタイプ(III)より少し減衰が大きくなる程度なのに対し、硬質ウレタンを充填したタイプ(I)では2倍以上の値になっている。

硬質ウレタンの充填が振動性状に及ぼす効果は、振動加速度波形を描いた図-7に鮮明に現れる。タイプ(II)・(III)試験体がともに乱れのない波形で減衰するのに対し、鋼やコンクリートと比較すると非常に小さいヤング係数である硬質ウレタンを充填したタイプ(I)では波形が乱れながら急速に減衰している。これは固い材料にはさまれたウレタンが両者の振動を干渉するような働きをしていることによるためと思われる。

## (3) 実験結果に対する考察

硬質ウレタンを鋼とコンクリート間に充填することにより、コンクリートを充填するあるいは空洞とする試験体に対し2倍以上の対数減衰率となる。また、振動加速度の減衰波形から、硬質ウレタンを使用しない試験体では規則的に減衰するのに対して、これを充填した試験体では乱れを生じながら減衰している。このように大きな減衰効果が得られたのは、①硬質ウレタンを堅い材料間に充填していること、②硬質ウレタンにある程度の硬さと強さがあること、③硬質ウレタンが鋼とコンクリート

表-3 振動実験結果

試験体種類	固有振動数 (Hz)	対数減衰率
タイプ(I)	35.5	0.101
タイプ(II)	32.0	0.049
タイプ(III)	35.0	0.044

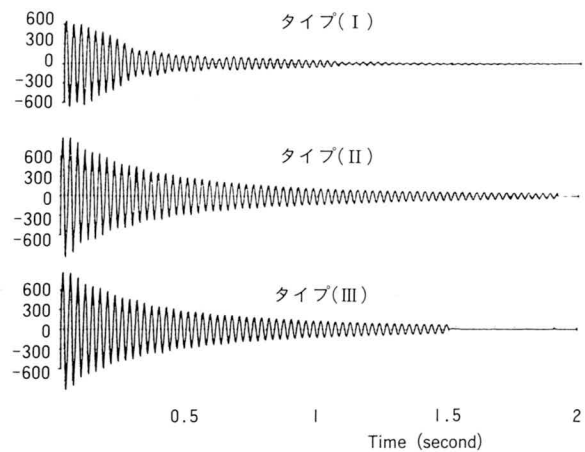


図-7 支間中央振動加速度波形

の双方共に接合されていること、の3つの理由によるものと思われる。

## 7. まとめ

高分子化合物の一種であるウレタンは原材料の密度により多様な性状を示すが、比重0.03程度の独立気泡性硬質ウレタンは土木構造物の一部に使用するのに効果的な以下の性質を持っている。

- ① 軽量であるにも関わらず、比較的大きな強度( $\sigma = 2 \sim 3 \text{ kgf/cm}^2$ )を有する。
- ② 独立気泡性のため透水性がほとんどなく、また、鋼やコンクリートと密着するため、鋼の防錆効果が期待できる。
- ③ 二成分を接触させることにより容易に発泡させることができるため、現場での施工性に優れている。
- ④ エネルギー吸収性に富むため、衝撃や振動が問題となる場合に効果的となる。

これらの特徴を持つ硬質ウレタンを土木構造物に適用するための基礎資料として、鋼・コンクリート・ウレタンを合成させた梁試験体を用いて、静的載荷実験、疲労実験、振動実験を行い、以下の結果が得られた。

- ① 断面引張域のコンクリートをヤング係数の小さい硬質ウレタンに置き換えても静的耐荷力は1割程度の減少にとどまる。また、断面の引張域にコンクリートを使用しないため、クラック発生に伴う急激な剛性低下が起こらず、荷重-変位関係は破壊に到るまでスムーズな曲線を描く。
- ② 硬質ウレタンを用いた試験体では疲労試験前後で外観・強度とも変状は見られないが、他の試験体では外観的にはコンクリートにクラックが発生し、また静的耐荷力は低下する。
- ③ 固有振動数は試験体の種類により差異を示さないが、硬質ウレタンが梁の振動減衰に大きく寄与するため、他の試験体に対して2倍以上の対数減衰率が得られた。以上の実験結果から、ヤング係数の小さい硬質ウレタンを静的耐荷力が問題となる構造物に使用してもあまり有効とはならないが、振動あるいは衝撃が問題となる場合には効果を発揮することが予想される。更に、現場施工の容易さや鋼・コンクリートに対する密着性を併わせ

考えると、非常に有効な土木材料となろう。振動や衝撃が問題となる構造物への硬質ウレタンの適用は、今後の課題である。

本開発研究に際して、山梨大学深沢教授に終始指導いただきました。また、九州大学日野助教授には開発の効用、実験の進め方等多くの助言をいただきました。ウレタンに関する知識の伝授、試験体の製作において、旭ケミテック株式会社山田専務、柏部長ならびに日清紡西新井化成工場化成部品技術課の小川課長には多大の御協力をいただきました。ここに御礼申し上げます。

#### 〈参考文献〉

- 1) 太田、宮坂、岩崎：軽量充てん材を使用した合成型枠橋の開発、宮地技報No.7、1991
- 2) 太田、宮坂、山田、具志：軽量充てん材を使用した合成型枠橋の開発、土木学会第45回年次学術講演会、平成2年9月

1991.12.10受付

### グラビア写真説明

#### 鶴見航路橋

鶴見航路橋は、首都高速道路公団湾岸線四期中で、超大型工事の一つであり、一面吊り斜張橋梁として、今後おそらく世界最長スパン橋梁に長い間ランクされ続けるだろう。弊社は塔、主桁共製作し、塔はその半分担当している。特に塔横梁部の地組立を弊社工場内で施工。高さ17m、巾47m総重量約2,300tは弊社岸壁で地組立した最大の構造物である。

鶴見航路橋は平成4年1月に横梁架設、側径間大ブロックを4月～5月、塔中部を6月に架設する予定であり、この半年間で、鶴見航路の景観を一変する事になる。最近の景観を重視する設計も、鶴見航路橋設計に反映され、特に塔断面を台形にする事により、細く見える様に配慮した。(若松)

#### 新万代橋

万代橋は、一般国道349号の水戸市内那珂川にかかり、県都の南北横断道としての北玄関口に位置します。那珂川の河川改修工事と併せ、交通混雑緩和とともに、沿道地域の新たな都市整備を目的に現橋の架け替えとなりました。

新万代橋は、現橋の上流約150mに位置し、茨城県初の斜張橋となり、又バルコニーを設置し、景観面での配慮が施されています。これにより地域環境の向上・治性化に役立つ橋となります。(永田)