

硬質ウレタンを充填した鋼・コンクリート合成梁部材の静的および衝撃応答特性に関する実験的考察

AN EXPERIMENTAL APPROACH FOR STATIC AND IMPACT RESPONSE OF STEEL AND CONCRETE COMPOSITE BEAM FILLED WITH RIGID URETHANE

山本恭嗣* 園田佳巨** 太田貞次*** 石川信隆**** 太田俊昭*****

By Kyoji YAMAMOTO, Yoshimi SONODA, Teiji OHTA, Nobutaka ISHIKAWA, Toshiaki OHTA

This paper presents an experimental approach for the static and impact behavior of steel and concrete composite beam filled with rigid urethane(so-called UC beam). At first, the static test has been performed for the 2 types of UC beams and RC beam in order to find the difference of static behavior. Herein, it has been found that the UC beam is superior to RC beam on the deformability at the static loading. It has been also found that the effect of filling the urethane foam prevents from reducing the strength by shear failure of concrete. Secondary, the impact loading test has been performed for the 3 types, and it is found that the UC beam can absorb much more impact energy than the RC beam by the deformability.

1. 緒言

近年、鋼・コンクリート合成橋の分野¹⁾において、死荷重の大幅な軽減や防錆効果を高めるために、部材の引張域断面をコンクリートから発泡性硬質ウレタンに置き換えた鋼・コンクリート合成梁部材（以下、UC梁部材という）の開発研究が進められており、既に実橋へも適用されている²⁾。このUC梁部材は、靱性に優れ、高い耐衝撃性を有することが期待されるため、落石覆工（ロックシェッド）やシェルター等のような衝撃荷重を受ける構造物にも利用できるのではないかと考えられる。しかしながら、この種の部材の衝撃応答特性については、著者らの共同研究グループの研究^{3)～7)}を除いて殆ど見受けられない。

そこで著者らは、UC梁部材の静的挙動特性および衝撃応答特性を把握するため、静的曲げ耐力の等しいRC梁部材（A）と鋼材配置の異なる2種類のUC梁部材（D、E）の3タイプの梁に対して、静的載荷実験および落錘式衝突実験を行った。さらに、UC梁部材の硬質ウレタンの充填効果を調べるため、Eタイプと

* 防衛大学校	理工学研究科学生	(〒239 神奈川県横須賀市走水1-10-20)
** 防衛大学校助手	土木工学科	(〒239 神奈川県横須賀市走水1-10-20)
*** 俣宮地鐵工所	技術開発課	(〒103 東京都中央区日本橋小伝馬町15番18号)
**** 工博 防衛大学校教授	土木工学科	(〒239 神奈川県横須賀市走水1-10-20)
***** 工博 九州大学教授	土木工学科	(〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)

同じ鋼材配置で引張域断面にコンクリートを充填した合成梁部材（Fタイプ）および引張域断面に何も充填しない中空の合成梁部材（Gタイプ）についても静的載荷実験を行い、E、F、Gの3タイプを比較検討した。また、衝撃載荷実験では、入力エネルギー量（重錘の運動エネルギー量）を徐々に大きくしたときの衝撃吸収エネルギー量を、梁部材全体の吸収エネルギー量と載荷点の局部吸収エネルギー量とに分けて、エネルギー的観点からもUC梁部材の衝撃応答特性について比較検討した。

2. UC梁部材の静的挙動特性

本研究では、UC梁部材の静的挙動を把握するために、次に示す2通りの実験を試みた。すなわち、①UC梁の静的挙動特性を把握することを目的としたRC梁との比較実験（A、D、Eタイプの比較）、②ウレタンの充填効果を調べることを目的としたコンクリート充填部材および中空部材との比較実験（E、F、Gタイプの比較）である。

2.1 RC梁との比較

(a)実験の概要

実験に用いた供試体は、静的曲げ耐力を同じにする（RC梁の圧縮・引張鉄筋とUC梁の上下フランジ鋼材断面積を同じとした）という条件のもとに梁断面（鋼材配置）を決定したものであり、図-1に示す3タイプである。AタイプはUC梁部材との比較のために用いたRC梁部材で、一方、Dタイプはトラス状のウェブ鋼板の隙間に硬質ウレタンを充填したもので、またEタイプはウェブ部分に通常の6mm鋼板を用い、その隙間に硬質ウレタンを充填したものである。各供試体の材料諸元は表-1に示すとおりであり、ウレタンは圧縮強度約2.2kgf/cm²（比重約0.03tf/m³）のものをを用いた。また、静的載荷実験は図-2に示すとおり、供試体をスパン200cmで単純支持し、200tfアムスラーを用いて梁上面中央部に線荷重として載荷を行い、その曲げ耐力および変形性能について検討した。計測項目は、荷重をロードセル、支間中央の下変位をひずみ式変位計、また支間中央およびL/4点における上・下各部のひずみを併せて計測した。

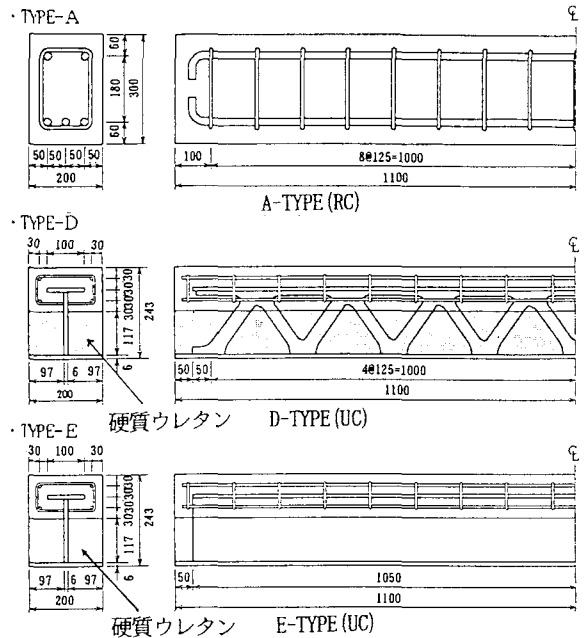


図-1 各供試体の寸法と形状 単位: mm

表-1 材料諸元

	引張鉄筋	圧縮鉄筋	その他
A	D 22 × 3	D 19 × 2	スチーリング間隔 125 mm スチーリング直径 6 mm 圧縮鉄筋量は引張鉄筋量の約1/2
D	硬質ウレタン充填 トラス状ウェブ鋼板 (6 mm)		コンクリート圧縮強度 30.0 kgf/cm ² 鋼材 SD 400 ウレタン圧縮強度 2.2 kgf/cm ² ウレタン比重 0.03 tf/m ³
E	硬質ウレタン充填 ウェブ鋼板 (6 mm)		

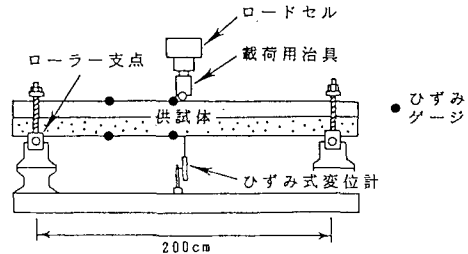


図-2 静的載荷実験装置と計測項目

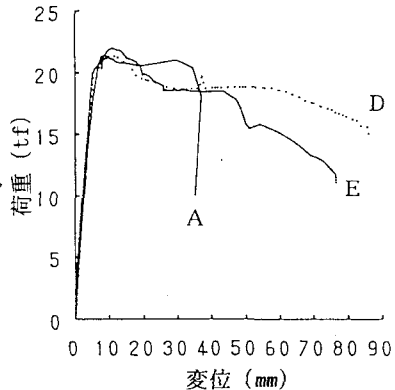


図-3 荷重～下変位関係

(b)実験結果および考察

図-3に静的載荷実験から得られたRC梁断面のAタイプおよびUC梁部材であるD、Eの3タイプの荷重～下変位関係を示す。これより、曲げ耐力は3タイプともほぼ等しいものの、終局変位量ではUC梁部材（D、Eタイプ）の方が、RC梁部材（Aタイプ）よりも約2倍大きいことが認められた。また、各タイプの挙動特性として、Aタイプは、約8mmの変形量で最大耐力22tfを示した後に、梁中央部付近に曲げひび割れが顕著になり、約35mmの変形量を示したときに、圧縮側コンクリートが圧壊し、耐力を失った。これは終局破壊に至るまで、圧縮域のコンクリート耐力が保持されており、断面内のつり合いが保たれていたためと考えられる。一方、UC梁部材はいずれも、7～11mmの変形量で最大耐力21～22tfを示した後に、D、Eタイプともに耐力は徐々に低下して行くことが認められた。つまり、UC梁部材は底板の降伏後、ウェブ鋼板の局所的な座屈が進展していったために緩やかに荷重が減少したものと考えられる。よって、限界変形量の定義が現時点では明確ではないが、仮に部材の耐力が最大耐力を示した後、降伏耐力（約15tf）の値まで低下した時とすれば、UC梁部材（Dタイプ）はRC梁部材の約2倍程度の静的限界吸収エネルギーを有することが確認される。よって、本実験の結果から、同じ鋼材量で、同じ曲げ耐力を有するように設計した場合、本実験で使用したUC梁部材（D、Eタイプ）の場合には、本実験で使用したRC梁部材よりも大きな変形性能を示すことが認められた。

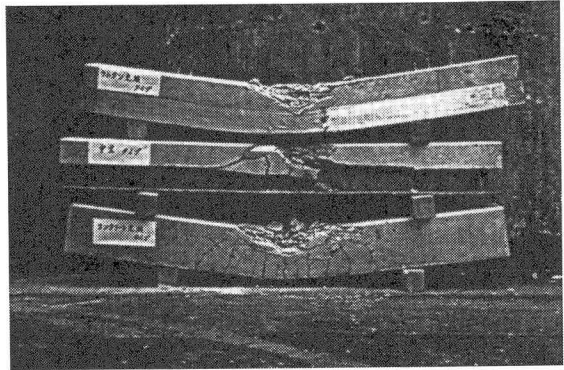


写真-1 静的載荷実験後の供試体（上からE、G、Fタイプ）

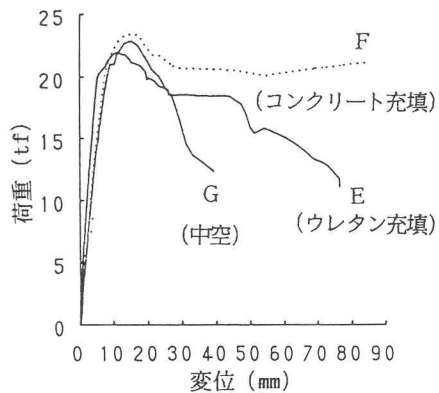


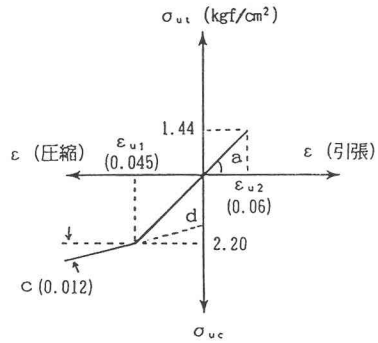
図-4 荷重～下変位関係
（ウレタンの充填効果）

2.2 ウレタンの充填効果に関する検討

ウレタン充填の効果について検討するため、EタイプおよびEタイプと同じ鋼材配置で引張域断面にコンクリートを充填した部材（Fタイプ）、何も充填しない中空の部材（Gタイプ）の3タイプ（図-6参照）を用いて、2.1と同様に静的載荷実験を行い、荷重～下変位関係と支間中央の断面内のひずみ分布について検討した。

(a)荷重～下変位関係

図-4は、本実験におけるE、F、Gの3タイプの荷重～変位関係を示したものである。これよりGタイプ（中空）は、約15mmの変形量で最大耐力23tfを示した後は、比較的小さい変形量で耐力が著しく低下した。これについては、写真-1に示すように圧縮側のコンクリートにせん断破壊が発生



ここに、 σ_{ut} 、 σ_{uc} ：ウレタンの引張応力、圧縮応力

ϵ_{u1} ：ウレタンの圧縮ひずみ変曲点

ϵ_{u2} ：ウレタンの引張時の破断ひずみ

a：引張側（ $|\epsilon| < \epsilon_{u1}$ ）のひずみ～応力一次式の係数

c、d：圧縮側（ $|\epsilon_{u1}| < |\epsilon|$ ）のひずみ～応力一次式の係数

図-5 硬質ウレタンの応力～ひずみ関係

（圧縮側データは著者らの実験により、また
引張側データはメーカーからの資料による）

したためと考えられる。一方、Eタイプ（引張域にウレタン）は、約15mmの変形量で最大耐力を示した後、曲げ変形が顕著になり、除々に耐力が低下していき、Fタイプ（引張域にコンクリート）よりも耐力の低下が大きくなることが確認された。しかしながら、Gタイプ（中空）と比較した場合、せん断に伴う耐力の急激な低下は防止されているものと考えられる。これは硬質ウレタンが、図-5に示すようにその初期ヤング係数が鋼材やコンクリートに比べ極めて小さいものの、硬質ウレタンを充填することによって、鋼板とコンクリートとをより密着して接合させる作用があり、一体となって外力荷重に抵抗するため、Gタイプ（中空）に比べEタイプ（UC梁部材）の方が耐力の減少が小さくなったものと考えられる。したがって、本実験の結果から、ウレタンの充填効果は、コンクリートの充填効果より、耐力低下に与える影響は小さいが、コンクリートのせん断破壊の防止には寄与していることが認められる。

(b) 支間中央における鋼材のひずみ分布

図-6は、弾性域内の荷重増加に伴うE、F、Gの3タイプの支間中央断面内のひずみの進展状況を示したものである。測定点は、コンクリート上面、トリブ上フランジ上面、ウェブ1/3点・2/3点、および底板上面であり、ここでは荷重増加5tf毎に表示した。この図より、わずかではあるが、F、E、Gの順にコンクリート上面の圧縮ひずみが大きくなっていることが認められる。また、各タイプとも概ね平面保持が保たれ、弾性域内ではひずみ分布はほぼ等しいものと考えられる。

以上の(a)、(b)における検討より、力学的にはFタイプが最も優れているが、Eタイプの軽量な点に着目すれば、その使用目的によっては、Fタイプよりも有利になる場合もあるものと考えられる。

3. UC梁部材の衝撃応答特性

2.の結果より、本実験で使用したUC梁部材は、静的荷重に対してRC梁部材に劣らない耐荷力特性を示すとともに変形性能に優れていることが認められた。またウレタンを充填することにより、コンクリートのせん

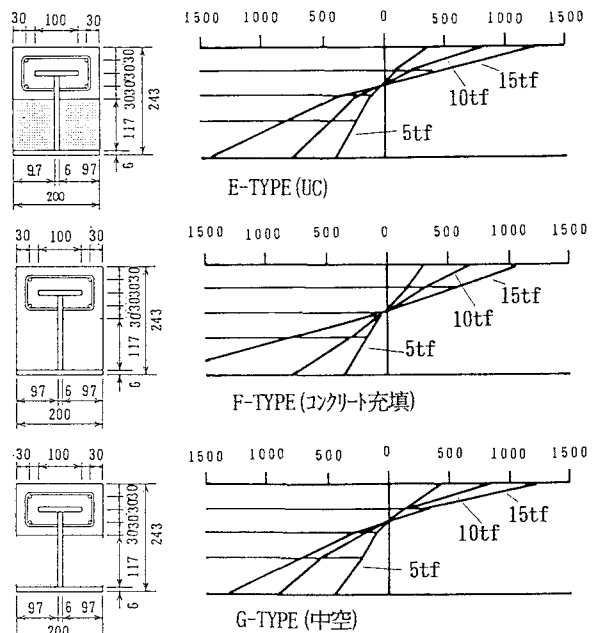


図-6 支間中央断面内のひずみ進展状況

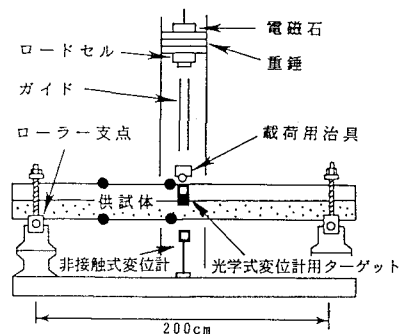


図-7 落錘式衝撃実験装置と計測項目

表-2 落錘式衝撃実験・実験ケース

応答レベル	タイプ	入力エネルギー			出力データ	
		W	V	E	荷重 tf	上変位 mm
弾性域	A	150	2	3.1	16~21	2~3
	D				12~13	3~5
	E				13~15	2~4
塑性域(1)	A	150	4	12.2	35~39	5~7
	D				27~31	8~10
	E				32~34	6~8
塑性域(2)	A	150	6	27.6	45~60	10~12
	D				30~40	18~25
	E				45~55	10~20
塑性域(3)	A	400	6	73.5	70~95	-----
	D				35~45	-----
	E				50~60	-----
塑性域(4)	A	400	8	130.6	70~100	35~45
	D				40~60	-----
	E				50~70	50~60

W: 重錘重量(kgf) V: 衝突速度(m/s) E: 重錘エネルギー(tf・cm)

断破壊を防ぐ効果があることもわかった。そこで、本研究では次に落錘式衝突実験を行い、UC梁部材の衝撃応答特性をRC梁部材と比較することとした。

3.1 衝撃実験の概要

RC梁部材 (A) とUC梁部材 (D、E) の3タイプの供試体をスパン200cmで単純支持し、図-7に示すような落錘式衝撃実験装置を用いてロードセルと一体化させた重錘を供試体上面中央部に設置した载荷治具上に自由落下させ、供試体には線荷重として载荷した。計測項目は、荷重をロードセル、支間中央の上変位 (衝突点変位) を光学式変位計、支間中央の下変位を非接触式変位計、また支間中央およびL/4点における上・下各部のひずみを併せて計測した。実験ケースについては表-2に示すとおりとし、弾性域、塑性域 (1) ~ (4) と入力エネルギー (重錘の運動エネルギー) を徐々に増した際の応答特性について検討した。

3.2 実験結果および考察

(1) 弾性域

図-8は、弾性域における荷重～衝突点変位関係を示したものである。発生最大荷重を比較した場合、 $A > E > D$ となっているが、これは引張側の断面内にコンクリートを充填した場合とウレタンを充填した場合とで、荷重の伝播状況が異なり、またUC梁部材の使用鋼材 (Dタイプのトラス型鋼材とEタイプのI型鋼材) によっても影響を受けたと考えられる。次にUC梁部材 (D、E) は、RC梁部材 (A) に比べ最大変位がやや大きくなっていることが認められる。

(2) 塑性域

図-9 (a) ~ (d) は、塑性域 (1) ~ (4) における荷重～衝突点変位関係を示したものである。これらから、入力エネルギーが大きくなるにしたがって、各タイプ

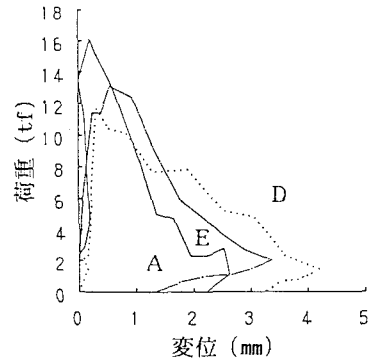
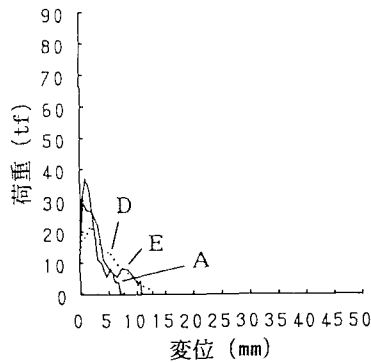
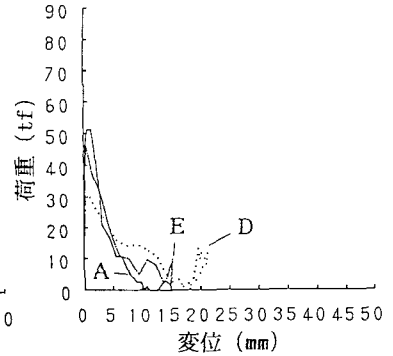


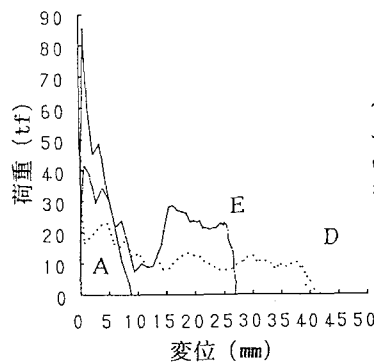
図-8 荷重～上変位関係 (弾性域)
($W=150\text{kgf}$, $V=2\text{m/sec}$)



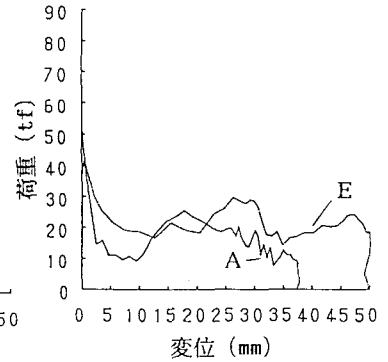
(a) 塑性域 (1)
($W=150\text{kgf}$, $V=4\text{m/s}$)



(b) 塑性域 (2)
($W=150\text{kgf}$, $V=6\text{m/s}$)



(c) 塑性域 (3)
($W=400\text{kgf}$, $V=6\text{m/s}$)



(d) 塑性域 (4)
($W=400\text{kgf}$, $V=8\text{m/s}$)

図-9 荷重～上変位関係 (塑性域)

の応答に顕著な差が生じ、弾性域における実験結果と同様、UC梁部材がその靱性によって衝撃エネルギーを吸収して行く様子が確認される。特に、塑性域(3)では、UC梁部材のうちEタイプの方が耐力が再上昇しており、入力エネルギーが大きくなるにしたがい、DタイプよりもEタイプの方が有利になる傾向が見られた。さらに、塑性域(4)つまり $W=400\text{kgf}$ 、 $V=8\text{m/s}$ と载荷条件を厳しくすると、Dタイプは後の写真-2、3に見られるように、完全に破壊してしまった。それに比べEタイプは耐力が失われず、しかも変形が大きく生じた。これは、Eタイプがウェブ鋼板によって曲げおよびせん断耐力ともに十分高かったのに対し、Dタイプではトラス材のせん断補強が不足したためと考えられる。すなわち、この塑性域(4)の重錘条件下では、静的には優れていたDタイプは完全に破壊し、EタイプはAタイプとほぼ同等な耐力を有するとともに、より大きな変形量を生ずることが認められた。すなわち、UC梁部材(Eタイプ)は、終局変位までの吸収エネルギーが大きく、限界吸収エネルギーの点ではRC梁部材よりもやや大きいものと思われる。以上より、RC梁部材はどちらかといえば剛に近い重構造であるため、重錘を跳ね返して衝撃エネルギーを少ししか吸収しないのに対し、DタイプのUC梁部材は、どちらかといえば柔に近い軽構造であるため、より多くの衝撃エネルギーを吸収して破壊してしまう欠点もある。この点を補ったEタイプのUC梁部材は剛に近い軽構造であるため、RC梁部材とほぼ同等な耐力を有し、かつ損傷が小さい(写真-4参照)ことにより、耐衝撃性に優れていると判断される。

(3) 全体変形と局部めり込みの割合

図-10は、塑性域(1)の実験結果を用いて衝突部のめり込み(衝突点変位と下変位との差)～時間関係と全体変形(衝突点変位)～時間関係を併記したもので、UC梁部材(D、E)の全体変形に占める局部めり込みの割合が大きいことがわかる。また、表-3には、各タイプの全体変位に対する局部めり込みの比を示している。これより、UC梁部材の衝撃応答特性として、局部変形によってかなりの衝撃エネルギーを吸収する傾向にあることがわかった。

(4) エネルギー的考察

a. 衝撃吸収エネルギー量の比較

図-11は、塑性域(2)の実験から得られた荷重～衝突点変位関係を最大変位発生時まで逐次積分して求めた衝撃吸収エネルギー～衝突点変位関係である。この図は、各タイプの衝撃吸収エネルギー量を全体吸収エネルギー量と衝突点における局部変形による吸収エネルギー量とに分けて併記したものである。これより、全体吸収エネルギー量については、変位量が小さい範囲(10mm以内の弾性域)ではAタイプとEタイプがほ

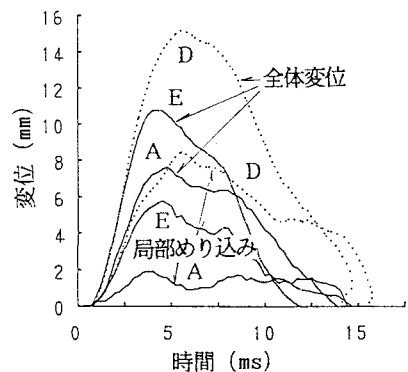


図-10 局部めり込み～時間関係
($W=150\text{kgf}$ 、 $V=4\text{m/s}$)

表-3 各タイプの全体変位に対する局部めり込みの比

	A : 全体変位量	B : 局部めり込み量	B/A
A	7.63	1.90	0.25
D	15.17	8.45	0.56
E	10.77	5.80	0.54

単位: mm

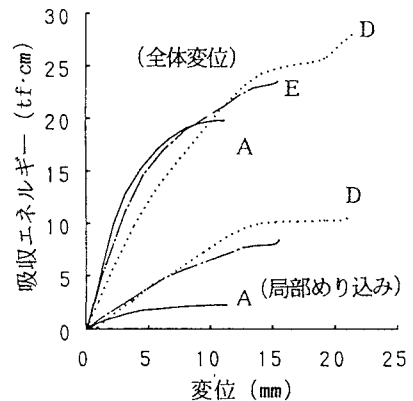


図-11 衝撃吸収エネルギー～変位関係
($W=150\text{kgf}$ 、 $V=6\text{m/s}$)

ば等しく、Dタイプがやや小さい。しかし、全体変位量が大きくなるにつれて、Dタイプの局部吸収エネルギー量の増加が著しく、A、Eタイプより大きくなる。これは、Dタイプの局部吸収エネルギー量が、全体変位が大きくなるにつれてかなり増加するためと考えられる。したがって、全体吸収エネルギー量に占める局部吸収エネルギー量の比は、Aタイプで約10%、DタイプとEタイプは約40%であるが、変位量が大きくなるにつれてDタイプがEタイプより大きくなることが確認された。

b. 単位重量当たりの衝撃吸収エネルギー量

図-12は、全体変位に対する吸収エネルギー量を各供試体の重量 W_o で除した結果を示したもので、この図より、UC梁部材(D、Eタイプ)はRC梁部材に比し、梁自体の重量が約1/2少ないため、単位重量当たりの衝撃吸収エネルギー量は約2倍～3倍大きくになっている。したがって、UC梁部材を落石覆工等に適用するとすれば、構造本体の死荷重軽減を期待できることから、①幅員が大きく、大規模な構造となる場合、②大きな落石が想定され、より厚い緩衝材を敷く必要があるような場合に有効であると考えられる。

(5) 破壊モード

写真-2、3、4は、塑性域(4)におけるA、D、Eの3タイプの破壊状況を比較したものであり、写真-2はAとD、写真-3はDタイプの破壊状況を示している。これより、Dタイプがコンクリートの圧壊とウェブの座屈によって完全に破壊していることがわかる。

一方、写真-4よりEタイプは同じ载荷条件にもかかわらず、完全な破壊に至らないことが確認される。この原因として、EタイプはDタイプのようなウェブ鋼板の座屈がなく、Dタイプほど局部めり込みも大きくないためと考えられる。これらのA、D、Eタイプの破壊モードを模式的に示すと表-4のようになる。

4. 結論

本研究の成果を要約すると以下のようになる。

(1) 静的载荷実験から、UC梁部材は、同一の

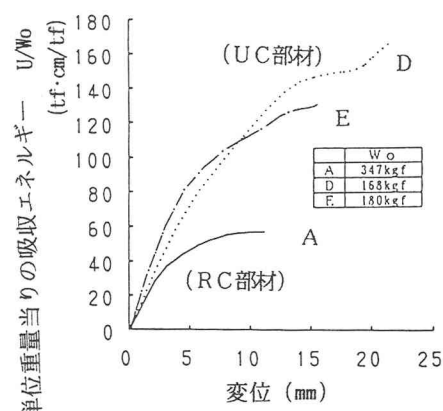


図-12 単位重量当たりの衝撃吸収エネルギー ($W=150\text{kgf}$ 、 $V=6\text{m/s}$)

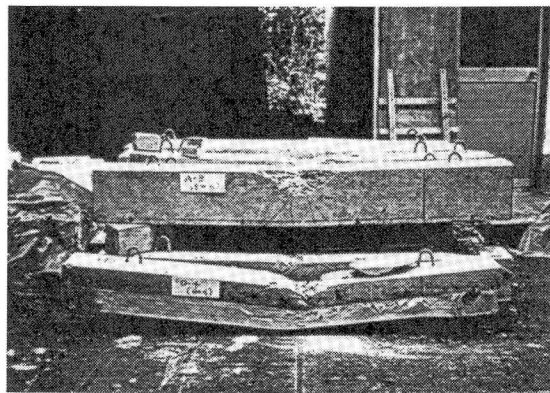


写真-2 衝撃実験 ($W=400\text{kgf}$ 、 $V=8\text{m/s}$) 後の破壊状況
(上: Aタイプ、下: Dタイプ)

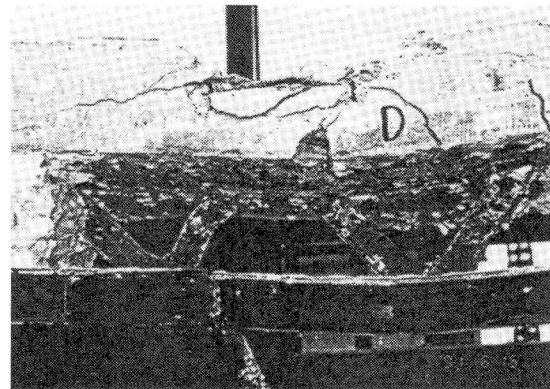


写真-3 衝撃実験 ($W=400\text{kgf}$ 、 $V=8\text{m/s}$) 後のDタイプの破壊状況
(ウレタン除去後に撮影)

曲げ耐力すなわち同一の鋼材量であればRC梁部材に比べ終局変形量が大きく、韌性に優れた部材であることが確認された。

(2)ウレタンの充填効果として、コンクリートのせん断破壊に伴う耐力の急激な低下の防止に寄与することが認められた。

(3)衝突載荷実験から、UC梁部材は、局部めり込みによる衝撃吸収エネルギーの分担割合が約40～50%であることが認められた。

(4)UC梁部材は、RC梁部材に比べ、単位重量当たり約2倍～3倍程度多く衝撃エネルギーを吸収し得る部材であることが確認された。

(5)本研究では、A、D、Eの3タイプの衝撃応答特性を比較検討したが、弾性応答の範囲内では、各タイプにあまり差がないが、重錘条件が大きくなると、Dタイプ（柔に近い軽構造）は、ウェブの座屈による脆性的な破壊を示すが、Eタイプ（剛に近い軽構造）はAタイプ（剛に近い重構造）とほぼ同等の耐力と大きな変形性能を有し、かつ損傷も小さく、優れた耐衝撃性を示すことが認められた。

以上のことから、軽量でかつ大きな耐力と変形性能を有するUC梁部材（Eタイプ）は、①山岳地で資材の運搬が厳しい場所に、落石防護工等を建造せざるを得ないような場合 ②道路幅員が大きく大規模な落石覆工を建造するような場合などに構造部材として適用しうるものと考えられる。

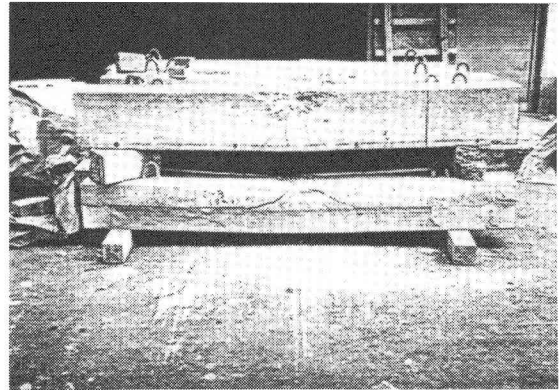


写真-4 衝撃実験 ($W=400\text{kgf}$, $V=8\text{m/s}$) 後のAタイプとEタイプの破壊状況 (上: Aタイプ, 下: Eタイプ)

表-4 破壊モードの模式図 ($W=400\text{kgf}$, $V=8.0\text{m/s}$)

タイプ	破壊モード	特徴
A		① 圧縮側コンクリートの圧壊 ② 剛に近い重構造
D		① 圧縮側コンクリートのせん断破壊 ② ウェブ鋼板の座屈による局部めり込み大 ③ 柔に近い軽構造
E		① 圧縮側コンクリートの圧壊 ② ウェブ鋼板の座屈なし ③ 局部めり込み小 ④ 剛に近い軽構造

参考文献

- 1) 鋼コンクリートサンドイッチ構造設計指針（案）：土木学会 コンクリートライブラリー73、1992.7
- 2) 太田貞次、山田信一、具志保武、宮坂睦夫：軽量充填材を使用した合成型枠橋の開発、土木学会第45回年次学術講演会概要集、I-246、pp.522～523、1990.9
- 3) 長濱貴志、園田佳巨、太田貞次、石川信隆：硬質ウレタンを充填した鋼・コンクリート合成梁の静的曲げ耐力について、土木学会第19回関東支部技術研究発表会講演概要集、I-21、pp.42～43、1992.3
- 4) 片淵文隆、太田俊昭、石川信隆、千々岩浩巳：軽量充填材を充填した合成構造部材の耐衝撃性に関する研究、土木学会西部支部技術研究発表会講演概要集、pp.92～93、1992.3
- 5) 山本恭嗣、園田佳巨、石川信隆、清水 功：硬質ウレタンを充填した鋼・コンクリート合成梁の衝撃実験に関する一考察、土木学会第19回関東支部技術研究発表会講演概要集、I-15、pp.30～31、1992.3
- 6) 山本恭嗣、園田佳巨、石川信隆、太田俊昭、太田貞次：硬質ウレタンを充填した鋼・コンクリート合成梁の衝撃吸収エネルギーについて、土木学会第47回年次学術講演会概要集、I-479、pp.1132～1133、1992.9
- 7) T.Ohta, Y.Sonoda, K.Yamamoto, N.Ishikawa: On the Impact Behavior of Composite Beam Filled with Hard Urethane, Proc. of International Symposium on Impact Engineering, Vol. II, pp.634～639、1992.11

(1992年9月21日受付)