

硬質ウレタンを充填した鋼・コンクリート合成 梁部材の衝撃応答特性に関する実験的研究

Experimental Study for the Impact Behavior of Steel and Concrete Composite Beams Filled with Rigid Urethane

太田 貞次* 高橋 秀幸** 石川 信隆*** 園田 佳巨****
Teiji OHTA Hideyuki TAKAHASHI Nobutaka ISHIKAWA Yoshimi SONODA

Summary

This paper presents an experimental approach for the dynamic response of composite beams filled with rigid urethane (so-called UC beam) under impact loading. At first, the static loading test has been performed for the two types of UC beams and RC beam in order to find the difference of static strength and deformability. Herein, it has been found that the UC beam is superior to RC beam on the deformability at the static ultimate limit level. Secondary, the impact loading test has been conducted for the same specimen used in the static test from the view point of energy absorption. It has been confirmed that the UC beam can absorb much more impact energy than the RC beam.

1. はじめに

山間部の道路では、雪溶け時期や大雨の後などに、道路上方から岩石等が落下する現象が時たま見られる。このような落下等による危険が予想される箇所には、予め落石防護施設を設け、人的損傷や物的損害を防止する努力が為されており、その1つに落石覆工（ロックシェッド）がある。落石覆工には、RCコンクリート製、PCコンクリート製、鋼製の3種類が多く採用されており、落石等による衝撃エネルギーを吸収緩和するために、本体構造物の上に土砂を敷く例が多く見られる。これら落石覆工では、落石等の衝突荷重をまずクッション材としての土砂で受け、衝突エネルギーを分散・吸収した後本体構造物が荷重を受けるシステムとなっており、想定される落石等の外力に対して安全となるように設計される。

しかし、予期せぬ大きな落石が発生した場合には、コンクリート製の落石覆工では裏面コンクリートの剝離や突然の崩壊により、また鋼製の落石覆工の場合には貫通や大変形により、通行中の人や車に損傷・損害を与える懸念が持たれる。このような大きな落石に対しても通行中の人や車に害を与える危険が少なく、通常の落石に対して安全で経済的となる落石覆工の開発が望まれる。

当社では、中小規模の橋梁を対象として、断面引張域のコンクリートを硬質ウレタンに置き換えた鋼・コンクリート合成橋梁の開発をすすめており、既に沖縄県にお

いて施工実績を有している^{1)~5)}ここで採用している構造システムでは、所要強度に対する部材重量を減じることができるとともに、硬質ウレタンが振動エネルギーを分散・吸収し振動減衰に効果を発揮するとの性状が見られる。このように軽量でエネルギー吸収性能に富む硬質ウレタンを充填した鋼・コンクリート合成部材（以下、UC部材と呼ぶ）は、高い靱性と耐衝撃性を有しており、山間地に建設される落石覆工に効果的に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^{6)~10)}を除いて殆ど見受けられない。

ここでは、参考文献¹⁰⁾に挙げたISIE（International Symposium on Impact Engineering）において発表した内容を中心に、UC梁部材の静的挙動ならびに衝撃応答特性について報告する。

2. 梁試験体の製作

実験に使用した試験体は、RC梁部材と腹板形状の異なる2種類のUC梁部材の3種類とし、各々静的曲げ耐力が等しくなるように断面形状を決定した。各試験体の寸法と形状を図-1に、また使用した材料の諸元を表-1に示す。UC梁部材については、硬質ウレタンの衝撃エネルギー吸収性能に期待してせん断耐力を下げたラチスウェブタイプと通常のフルウェブタイプを対象とした。

* 技術本部技術開発部技術開発課課長代理 *** 防衛大学校土木工学教室教授
** 千葉工場製造部生産設計課 **** 防衛大学校土木工学教室助手

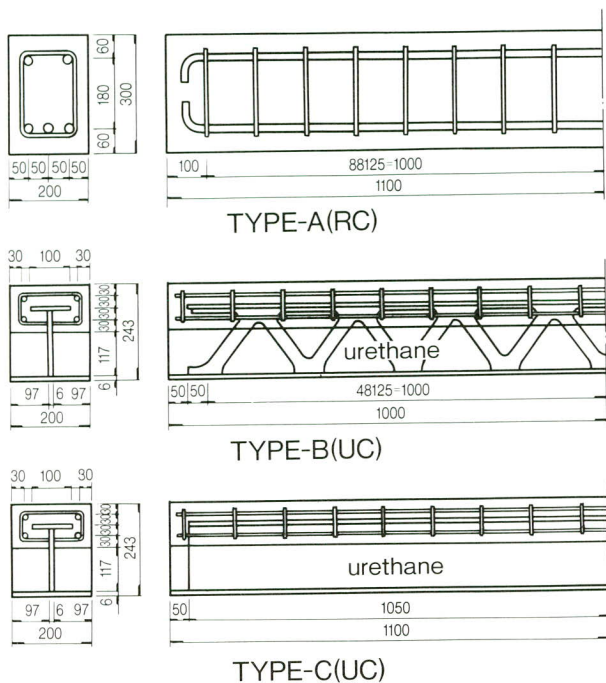


図-1 Size and type of each specimen (unit: mm)

UC梁部材は、底部鋼板とTリブで構成される鋼桁の圧縮領域にTリブ上フランジを囲むようにコンクリートを打設し、コンクリート硬化後硬質ウレタンを充填する順序で製作した。そのため、硬質ウレタンが鋼・コンクリートの双方に完全に密着し、三者が一体となった合成構造となっている。

3. 静的載荷実験

(1) 実験の概要

タイプA～Cの3種類の試験体を支点間隔2.0mでセットし、200tfアムスラーを用いて支間中央に線荷重載荷を行い、曲げ耐力および変形性能について検討した(図-2)。測定は、荷重をロードセル、支間中央のたわみを変位計で計測し、併わせて支間中央および1/4点のコンクリート上面、底部鋼板下面のひずみをひずみゲージにより求めた。

(2) 実験結果および考察

図-3に静的載荷実験から得られた、荷重-支間中央たわみ曲線を示す。これより、曲げ耐力は3タイプともほぼ等しいものの、結局変位量ではUC梁部材(タイプB、C)がRC梁部材(タイプA)よりも2倍程度と大きいことが認められた。また、各タイプの挙動特性では、タイプAは約8mmの変形量で最大荷重22tfを示した

表-1 Material properties

	Tensile reinforcement	Compressive reinforcement	The others
A	D22×3	D19×2	Intervals for stirrup (125mm)
B	Filled with hard urethane Trussed web steel (6mm)		Quantity of compressive reinforcement is half of tensile reinforcement
C	Filled with hard urethane Full web steel (6mm)		

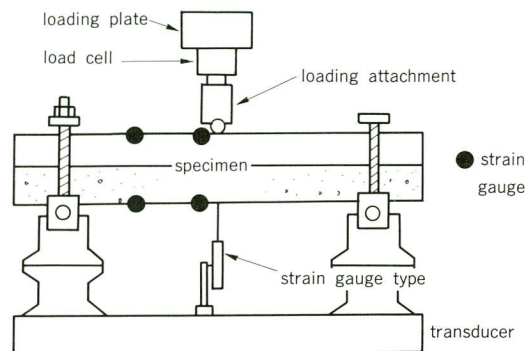


図-2 Static loading machine and Measurement item

後に梁中央部付近に曲げひび割れが顕著となり、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、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、両タイプともに耐力は徐々に低下していくことが認められた。すなわち、UC梁部材では、底部鋼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穏やかに荷重が減少したものと考えられる。

以上の実験結果から、同一の曲げ耐力を有するRC梁部材とUC梁部材との比較では、UC梁部材のほうが大きな変形性能を有すること、すなわちエネルギー吸収性に富むことがわかる。タイプB、Cの比較では、タイプBのせん断耐力が小さいために最大荷重を示した後の荷重低下が大きくなっている。これより、同じ鋼材量で同一曲げ耐力を有するように設計した場合、一般にUC梁部材のほうがRC梁部材よりも静的変形性能において優れているものと考えられる。

4. 衝撃応答実験

3.の結果より、UC梁部材が静的な荷重に対して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

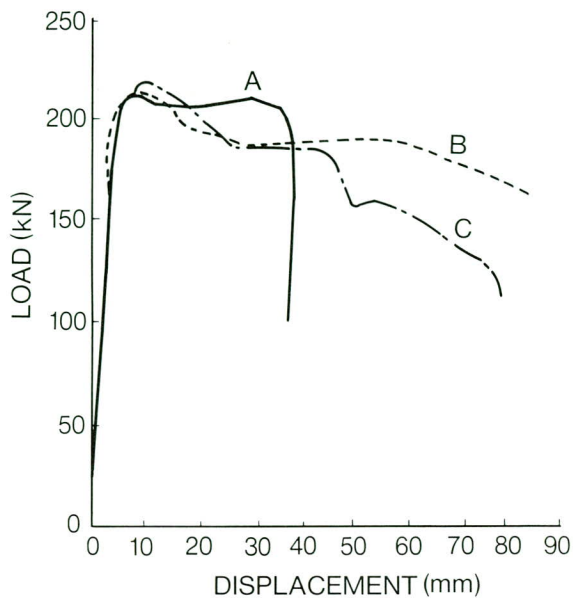


図-3 Static load-displacement relation

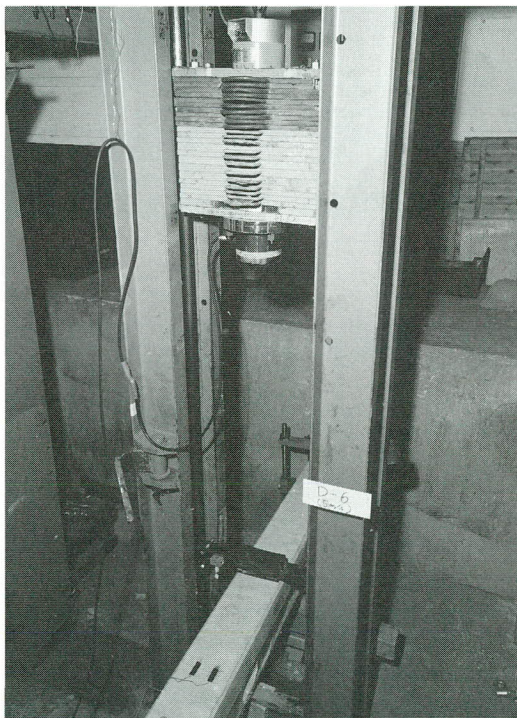


写真-1 Weight dropping type impact loading machine

においては優れていることがわかった。そこで、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。

(1) 実験の概要

RC梁部材とUC梁部材(タイプ-B、C)の3タイプの試験体を支間2.0mで単純支持し、落錘式衝撃実験装置により衝撃実験を行った。落錘式衝撃実験装置と計測システムを図-4に、また実験状況を写真-1に示す。

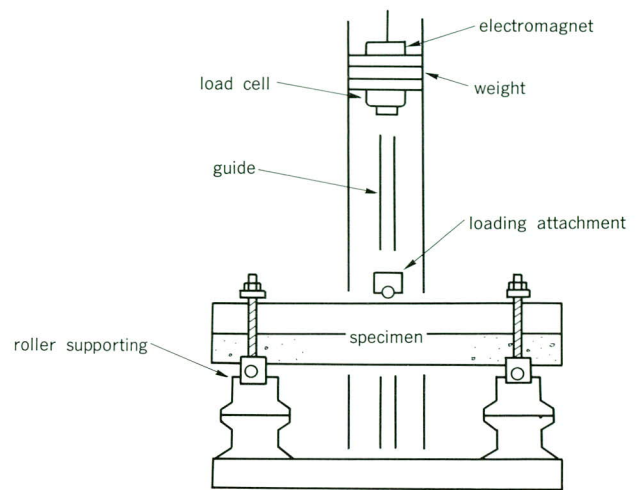


図-4 Weight dropping type impact loading machine

表-2 Weight dropping type impact loading test/Test case

Response level	Type	Input energy			Output	
		W	V	E	Load (KN)	Upper displacement (mm)
Elastic range	A	1470 N	2	30.4 kN·cm	157-206	2-3
	B				118-127	3-5
	C				127-147	2-4
Plastic range(1)	A	1470 N	4	119.6 kN·cm	343-382	5-7
	B				265-304	8-10
	C				314-333	6-8
Plastic range(2)	A	1470 N	6	270.5 kN·cm	441-588	10-12
	B				294-392	18-25
	C				441-539	10-20
Plastic range(3)	A	3920 N	6	720.3 kN·cm	686-931
	B				343-441
	C				490-588
Plastic range(4)	A	3920 N	8	1279.9 kN·cm	686-980	35-45
	B				392-588
	C				490-687	50-60

W:weight, V:velocity, E:kinetic energy

実験は、ロードセルと一体化させた重錘を試験体上面中央部に設置した載荷治具上に自由落下させ、試験体には線荷重として載荷する形で行った。測定項目は、荷重をロードセル、支間中央の上変位(衝突点変位)を光学式変位形、支間中央の下変位を非接触式変位計で計測した。また、支間中央および1/4点におけるコンクリート上面ならびに底部鋼板下面のひずみを併わせて計測した。

実験は、重錘重量と衝突速度を変えることにより入力

エネルギー（重錘の運動エネルギー）を変化させ、試験体に生じる応力度が弾性範囲で1ケース、塑性範囲で4ケースの計5ケースについて行い、それぞれの応答特性について検討した(表-2)。

(2) 実験結果および考察

1) 弾性域

弾性域における荷重-衝突点変位関係を図-5に示す。発生最大荷重の比較では、 $A > C > B$ となっているが、これは衝突位置付近の断面の剛性の相違によるものと考えられる。また、UC梁部材の変形量はRC梁部材と比

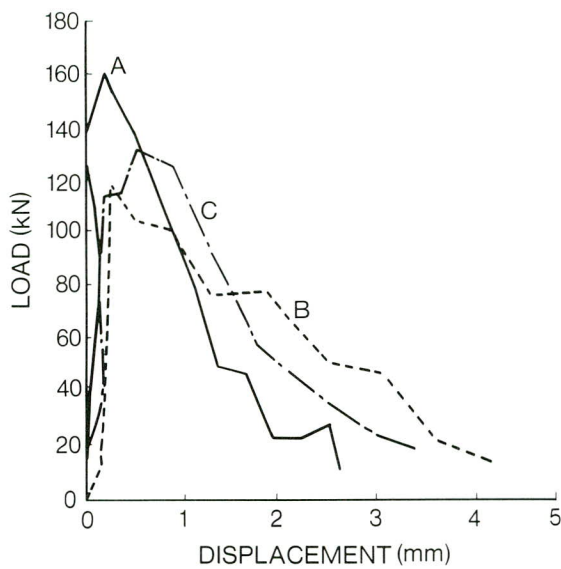


図-5 Load-displacement relation in the elastic range (W=1470N, V=2m/s)

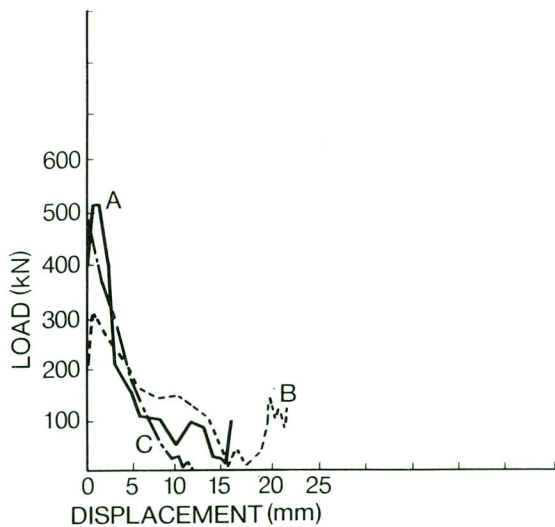


図-7 Load-displacement relation in the plastic range (2) (W=1470N, V=6m/s)

較してやや大きく、UC梁部材の場合には変形性能により入力エネルギーを吸収する傾向がRC梁部材より大きいことが認められる。

2) 塑性域

塑性域(1)~(4)における荷重-衝突点変位関係をそれぞれ図-6~9に示す。これらの実験結果より、入力エネルギーが大きくなるにつれて、RC、UC梁部材間の応答の差異が顕著となり、UC梁部材がその靱性により衝撃エネルギーを吸収する様子が認められる。塑性域(3)まで入力エネルギーを大きくすると、UC梁部材タイプ-

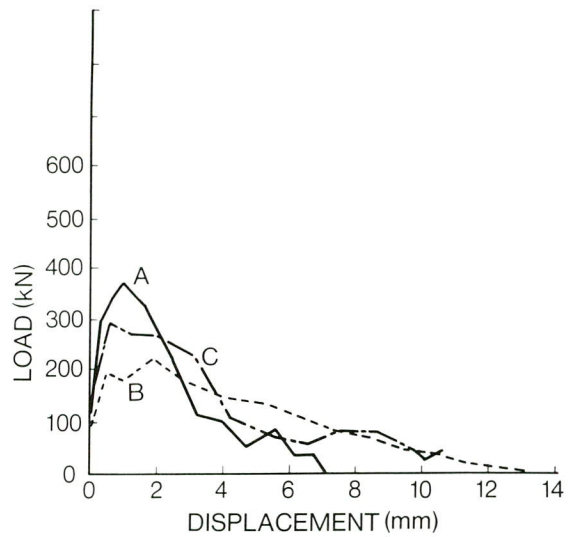


図-6 Load-displacement relation in the plastic range (1) (W=1470N, V=4m/s)

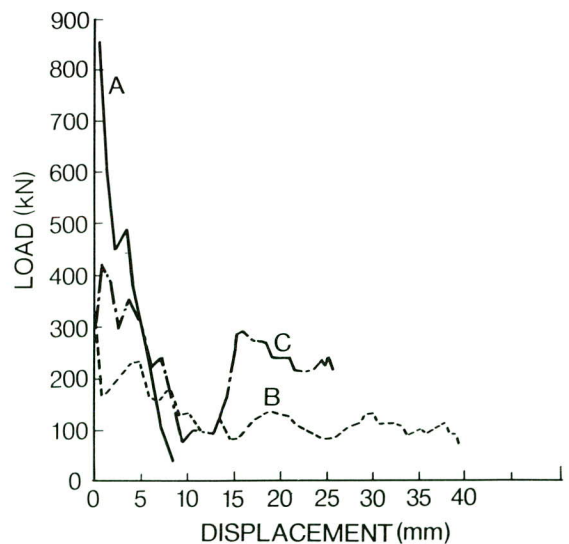


図-8 Load-displacement relation in the plastic range (3) (W=3920N, V=6m/s)

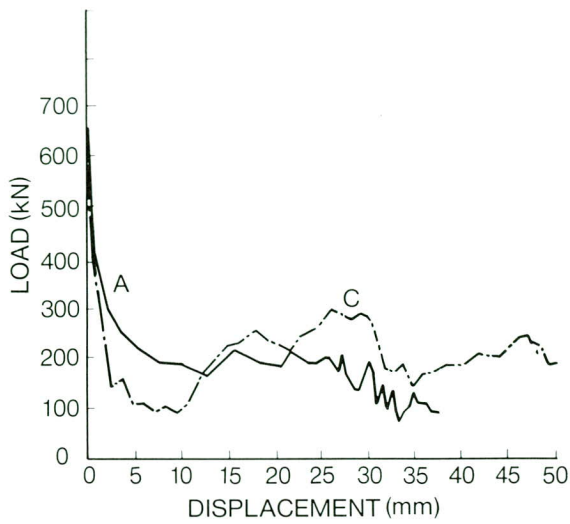


図-9 Load-displacement relation in the plastic range (4)
(W = 3920N, V = 8m/s)

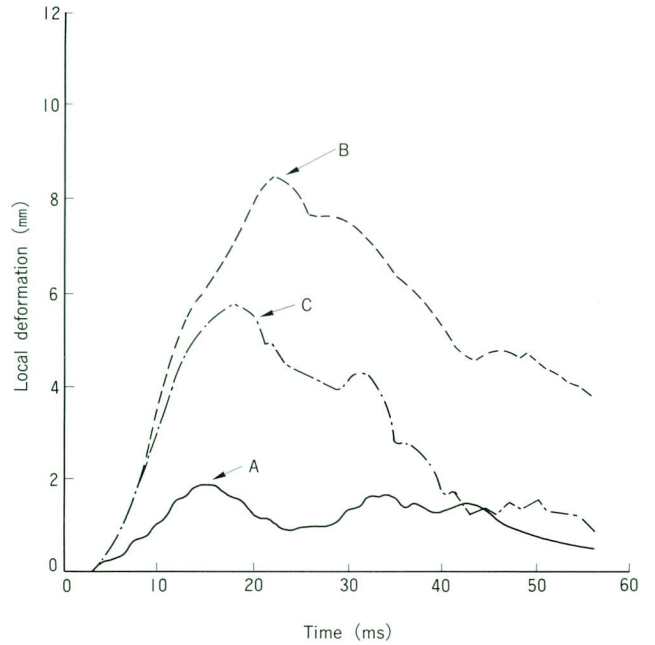


図-10 Local displacement-time relation
(plastic range (1))

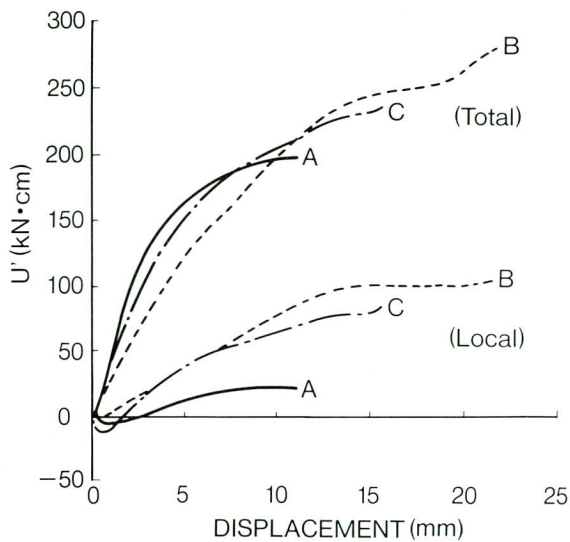


図-11 Impact absorption energy-displacement relation
(W = 1470N(150kgf), V = 6m/s)

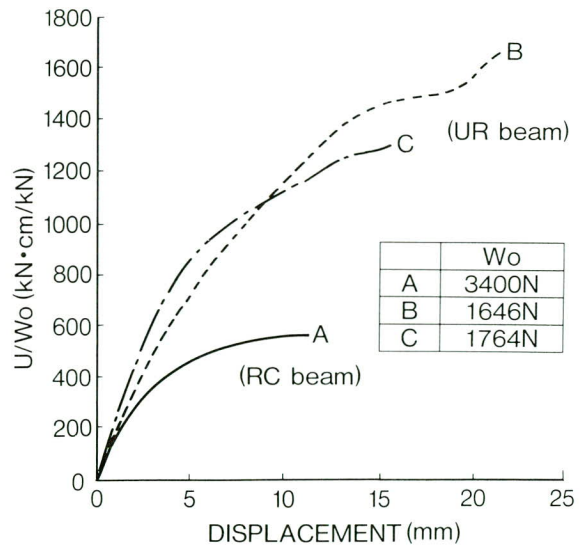


図-12 Impact absorption energy per unit weight of each specimen
(W = 1470N(150kgf), V = 6m/s)

B、C間においても応答の違いが顕著となり、タイプ-Bでは衝突後梁部材の耐力の上昇を示さずに変形が進むのに対し、タイプ-Cでは再び耐力が増加している。

更に、塑性域(4)すなわちW=400kgf、V=8m/secと载荷条件を厳しくすると、タイプ-Bでは完全に破壊してしまうのに対し、タイプ-Cでは変形は大きくなるものの耐力を喪失することはない。これは、タイプ-Bの腹材のせん断耐力が充分でなく、硬質ウレタン部分においてもその力を分担できなかったためと思われる。次に、

RC梁部材の場合には、UC梁部材と比較して小さい変形量となるが、タイプ-Cと比較して小さい支持力となっている。

3) 局所変形に伴う吸収エネルギー量の比較

図-10に塑性域(1)における重錘衝突位置の局所変形量-時間曲線を示す。これより、UC梁部材の衝撃応答特性として、衝突時の局所変形量がRC梁部材と比較して大きく、局所変形によってかなりの衝撃エネルギーを吸収することがわかる。なお、時間の経過とともにUC梁部

材の局部変形が減少するのに対し R C 梁部材の場合には残留することが認められる。

4) 衝撃吸収エネルギー量の比較

図-11は、塑性域(2)を対象に荷重-衝突点変位曲線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量と衝突点変位の関係を全体変形、局部変形に分けて示したものである。図より、全体吸収エネルギー量については、変位量が小さい範囲ではタイプ-A、Cがほぼ等しくタイプ-Bがやや小さい。しかし、変位量が大きくなるにつれてタイプ-Bの局部変形による吸収エネルギー量の増加が著しく、全体吸収エネルギーについても他の2タイプより大きくなる。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、タイプ-Aで約10%、U C 梁部材であるタイプ-B、Cでは約40%となっている。

図-12は全体変形による吸収エネルギー量を各試験体重量で除して単位重量当りの衝撃吸収エネルギー量を求めたものである。U C 梁部材が R C 梁部材と比較して単位重量当り2～3倍の衝撃エネルギー吸収性能を有していることがわかる。これより、道路幅員が大きく大規模

な落石覆工が必要となる場合や基礎地盤が脆弱で重量構造物が建設しにくい場合等に効果を発揮できるものと思われる。

5) 破壊モード

塑性域(4)の衝突応答実験後の各試験体の破壊状況を写真-2に、また模式図ならびに特徴を表-3にそれぞれ示す。これより、タイプ-Aでは上面コンクリートの圧壊と下面コンクリートの剝離により、またタイプ-Bでは腹材の座屈を伴う大変形により崩壊状態となるのに対し、タイプ-Cでは上面コンクリートは圧壊するものの鋼材の塑性変形により大変形に追従できており、ひどい破壊状態とならないことがわかる。

5. あとがき

硬質ウレタンの衝撃エネルギー吸収性能に着目し、設計上部材強度に貢献しない断面引張域のコンクリートを硬質ウレタンと置き換えた「硬質ウレタンを充填した鋼・コンクリート合成構造」を開発し、その耐衝撃性能の



写真-2 Comparison of failure mode from upper side to lower side Type-A, C, B (W=3920N, V=8m/sec)

表-3 Illustration of Failure Mode (W=400kgf, V=8.0m/sec)

Type	Failure mode	Characteristics
A		Collapsed at the compressive concrete.
B		① Shear failure at the compressive concrete. ② Local sinking into concrete with web plate buckling.
C		① Collapsed at the compressive concrete. ② Small sinking into concrete. ③ No web plate buckling.

検証を目的として静的載荷実験、衝撃応答実験を行った。実験では、硬質ウレタンのエネルギー吸収性能を活用する目的で腹材が座屈しやすいせん断力の小さなタイプと、RC梁試験体を比較のために使用した。

実験結果をまとめると、以下のようになる。

- (1) 静的載荷実験から、UC梁部材は、同一の曲げ耐力すなわち同一の鋼材量であればRC梁部材と比較して終局変形量が大きく、靱性の優れた部材である。
- (2) 衝突載荷実験から、UC梁部材は落錘衝突位置の局部変形による衝撃吸収エネルギー量が全体の衝撃吸収エネルギー量の約40~50%となり、硬質ウレタン部分における衝撃エネルギー吸収効果が認められる。
- (3) UC梁部材は、RC梁部材と比較して単位重量当り約2~3倍の衝撃エネルギー吸収性能を有する。
- (4) せん断耐力の小さなUC梁部材の場合には、硬質ウレタンの衝撃エネルギー吸収性能を十分に活用できるが、硬質ウレタン強度が小さいため変形が大きくなる。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(タイプC)は、

- ① 山岳地で資材等の運搬が困難な場所、
- ② 基礎地盤が弱く重量構造物を建設しにくい場所、
- ③ 道路幅員が大きく大規模な落石覆工が必要な場所、等に落石覆工を建設する場合に有効であると考えられる。

本研究は、予備検討の段階から防衛大学校土木工学教室の石川信隆教授、園田佳巨助手の指導を受け、防衛大学の落錘式衝撃実験装置を用いて実験しております。また、実験、検討に際して、防衛大学校修士課程2年山本恭嗣氏に多くの力添えをいただきました。九州大学太田俊昭教授には多くの便宜を得た助言をいただきました。ここに御礼申し上げます。

＜参考文献＞

- 1) 太田、宮坂、山田、具志；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、平成2年9月
- 2) 太田、宮坂、岩崎；軽量充填材を使用した合成型枠橋の開発、宮地技報No.7、1991
- 3) 高橋、太田、吉川、深沢；硬質ウレタンを充填した鋼・コンクリート合成構造の基本性状実験、土木学会第47回年次学術講演会概要集、平成4年9月
- 4) 太田、高橋、吉川；ウレタン充填鋼・コンクリート合成構造の基本性状実験、宮地技報No.8、1992
- 5) 太田、深沢、檜貝；硬質ウレタンを充填した合成型枠橋の開発研究、構造工学論文集Vol.39A、1993年3月
- 6) 長濱、園田、太田、石川；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、第19回関東支部技術研究発表会講演概要集、1992.3
- 7) 片淵、太田、石川、千々岩；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、西部支部技術研究発表会講演概要集、1992.3
- 8) 山本、園田、石川、清水；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、第19回関東支部技術研究発表会講演概要集、1992.3
- 9) 山本、園田、石川、太田、太田；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、第47回年次学術講演会概要集、1992.9
- 10) T. Ohta, Y. Sonoda, K. Yamamoto, N. Ishikawa; On the Impact Behavior of Composite Beam Filled with Hard Urethane, International Symposium on Impact Engineering, 1992.11

グラビア写真説明

饒波川橋

「饒波川橋(仮称)」は、一般国道329号那覇東バイパスの国場川と饒波川の合流地点に架かり、那覇市の外郭環状道路を構成し、広域的な交通対策の骨幹をなす役割を担うものとして整備されたものです。又沖縄では初の斜張橋として市民より愛され、干潟への水鳥の飛来、飛去に対する空間の確保、さらに地域のシンボルとして親しまれるよう主塔は逆Y型とするなど、風格を備えた、シャープでシンボリックなデザインとされています。

ところで、この「饒波川橋(仮称)」は、その後一般応募によって「とよみ大橋」と命名され、「とよみ」とは古語で「響く」の意味で、おもろ(沖縄の万葉集)では鳴響(とよみ)と使われており、名高い橋、有名な橋の意味になります。また写真でもわかるよう、形状はハープに似ており、いかにも美しい音島の響きがイメージできる橋となったわけです。

とよみ大橋の供用は平成5年に予定されており、国道329号バイパス及び漫湖局改は現道の交通混雑解消を余儀なくされている今、この橋の供用が広域的な交通対策の骨幹をなす事はもとより、地域の産業、観光の発展にも促進される事でしょう。(三橋)