

硬質ウレタンを充填した合成ロックシェットの開発研究

Research and Development of Composite Rock-Shed Filled with Rigid Urethane

太田 貞次*
Teiji OHTA

Summary

Steel-concrete composite structures have both excellent ductility and the capacity to absorb energy. Energy absorption capacity increases when a steel-concrete composite structure is filled with rigid urethane. Taking advantage of this, a steel-concrete composite Rock-Shed with good impact resistance has been developed.

This paper reports on the results of various impact tests conducted for the purpose of developing the Rock-Shed.

1. まえがき

山間部で自動車等を落石から防護するために設けられるロックシェットでは落石荷重の設定が困難であり、また平成元年7月に福井県の越前町で発生した岩盤崩落に起因するロックシェットの破壊事故のように設計時に想定した荷重を著しく上回る規模の落石が生じる可能性を持っている。このような構造物においては、通常想定される荷重を大きく上回る落石を受けても破壊しないような大きな靱性（エネルギー吸収性能）を有することが必要となる。

当社では、橋長30m程度までの中小スパンの橋梁を対象として“硬質ウレタンを充填した合成型枠橋”を開発し、施工実績も有している¹⁾。この橋梁は、コンクリート床版と底部鋼板の間に硬質ウレタンを充填しており、ウレタンの振動エネルギー吸収性能により、減衰が大きく振動しにくいという特徴をもっている。このエネルギー吸収性能に着目して、硬質ウレタンを充填した鋼コンクリート合成版を屋根部分に用いたロックシェットを開発したので、報告するものである。

2. ロックシェットの概要

硬質ウレタンを充填した合成ロックシェットの断面のイメージを図-1に示す。本体はコンクリート、硬質ウレタン、鋼桁の3層からなるサンドイッチ構造であり、

Tリブで補剛された底部鋼板のTリブ間に硬質ウレタンを充填し、この部分を下側の型枠として鉄筋コンクリート版を施工する。鋼とコンクリートとはTリブ上フランジに溶着したスタッドにより合成させている。

本ロックシェットの特徴を以下に示す。

- ① 鋼製型枠を工場製作し、現場搬送・架設後上面だけでコンクリート版施工ができるため、安全・急速施工が可能である。
- ② 全てをコンクリート製とする場合と比較して屋根材を軽量化できるため、基礎構造への負担が少なくなるとともに、道路幅員方向に大規模なロックシェットにも容易に対応できる。

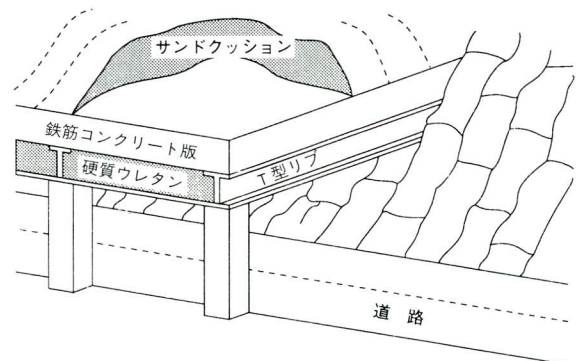


図-1 硬質ウレタンを充填した合成ロックシェットイメージ図

*技術本部 技術開発部課長

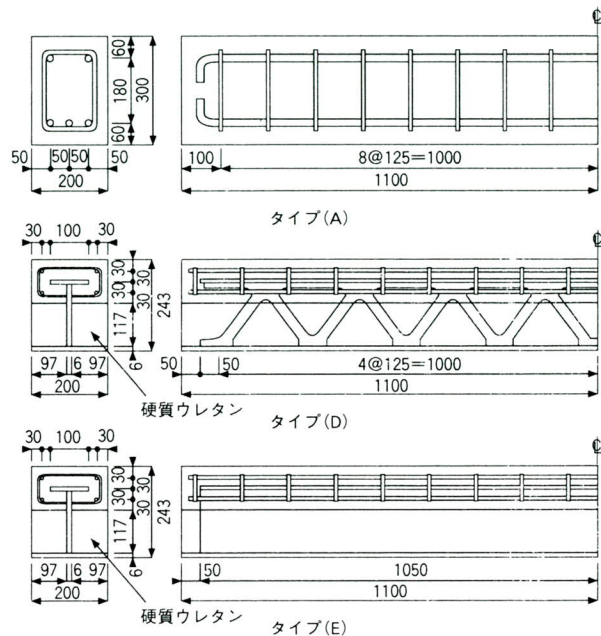


図-2 梁実験供試体

- ③ 硬質ウレタンを充填した合成版が大きなエネルギー吸収性能を有するため、破壊に対する安全性が大きい。
- ④ 下側を鋼板が覆うため、コンクリートの裏面剝離現象を防止できる。
- ⑤ 柱材と屋根材を一体化した構造を採用する事により、設計の自由度の大きい、スッキリとした外観を提供できる。

3. 合成梁部材に対する静的及び衝撃的応答実験

(1) 実験供試体

本実験ではそれぞれ硬質ウレタンを充填した合成梁部材とRC梁部材について、静的及び衝撃的応答特性を比較検討した。実験供試体は図-2に示す3タイプとし、各曲げ耐力が等しくなるように鋼材を配置した。タイプ(A)はRC供試体であり、タイプ(D)、(E)はそれぞれTリブの腹板をラチス状にしたものとフルウェブとした硬質ウレタン充填合成梁供試体である。実験供試体に用いた材料の特性を表-1に示す。

(2) 静的載荷実験

実験では、図-3に示すように支点間隔2.0mで単純支持した供試体に対して支間中央断面に線荷重を載荷し

表-1 使用材料

	引張鉄筋	圧縮鉄筋	その他
A	D22×3	D19×2	スターラップ間隔 125mm スターラップ直径 6mm
D	硬質ウレタン充填 トラス状ウェブ銅板(6mm)		圧縮鉄筋量は引張鉄筋量の約1/2 コンクリート圧縮強度300kg/cm ²
E	硬質ウレタン充填 ウェブ銅板(6mm)		鋼材 SS400 ウレタン圧縮強度 2.2kg/cm ² ウレタン比量 0.03tf/m ²

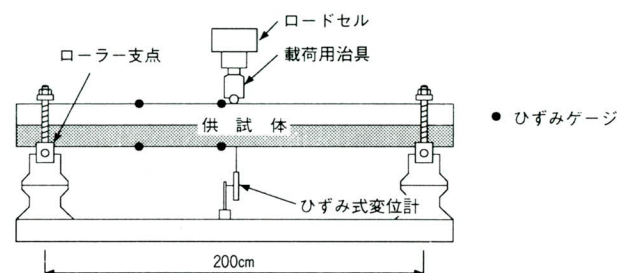


図-3 実験方法及び計測方法

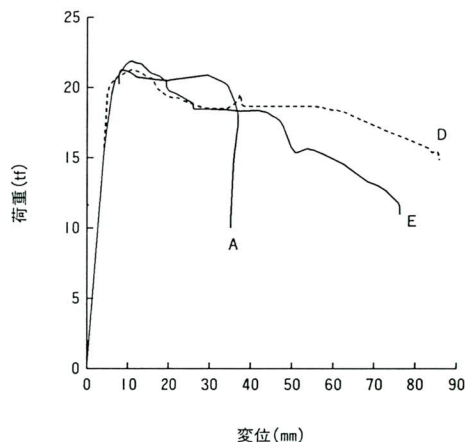


図-4 荷重-変位関係(支間中央断面)

た。実験結果の一例として、支間中央断面における荷重-変位曲線を図-4に示す。最大荷重に達するまでは3タイプとも同一挙動を示すが、その後の破壊への道筋においてRC梁とウレタン充填合成梁とでは大きな違いが生じた。RC梁供試体では約8mmの変形量で最大荷重22tonfを示した後支間中央部付近の曲げひびわれが顕著となり、変位量35mm付近で圧縮側コンクリートが破壊し突然耐力を失った。それに対し、ウレタン充填合成梁供試体では、ともに7~11mmの変形量で最大荷重21~22tonfを示した後底部鋼板の降伏、腹板の座屈に伴って徐々に耐力が減少するが、実験した範囲では突然破壊するような現象は見られなかった。図-4より、静的な載

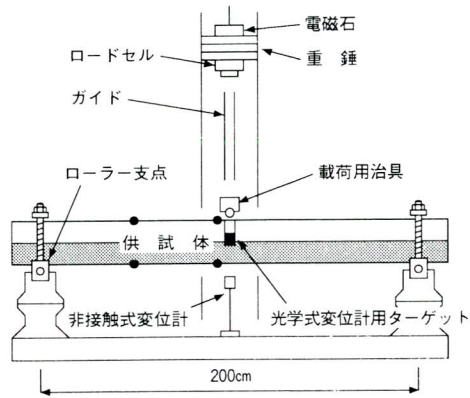


図-5 落錘式衝撃実験装置

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)

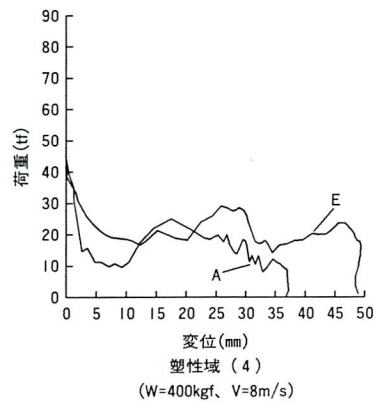
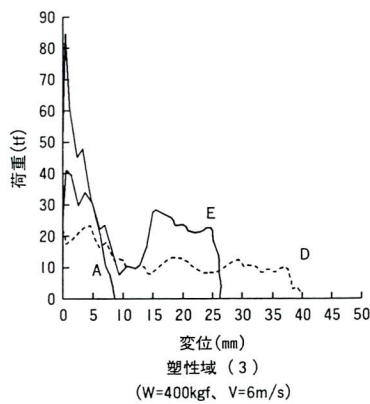
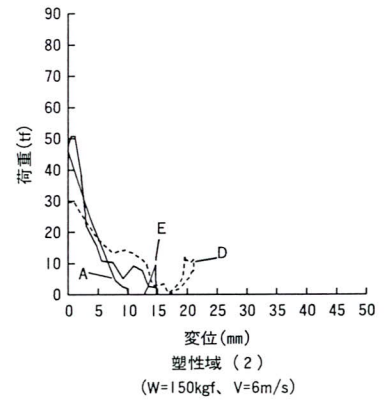
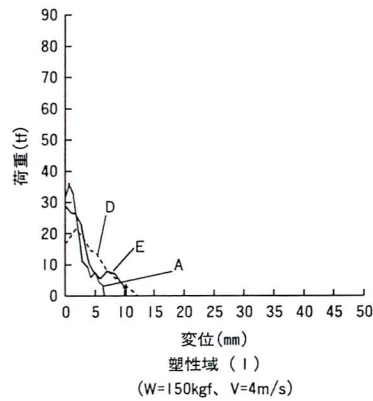
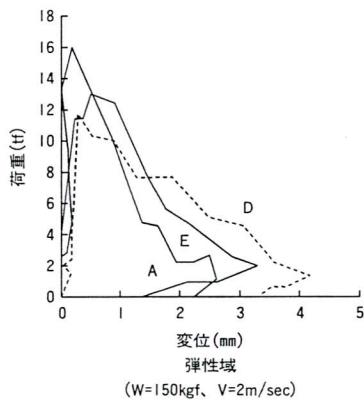
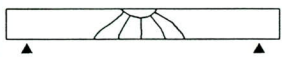

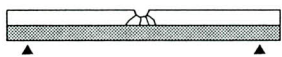


図-6 荷重—上変位曲線 (梁供試体)

表-3 破壊モードの模式図 (W=400kgf、V8=8.0m/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ウェブ開板の座屈なし ③局部めり込み小 ④剛に近い軽構造



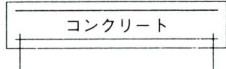
荷に対するエネルギー吸収性能（靱性）はウレタン充填合成梁が RC 梁の 2 倍以上の性能を有していることが分かる。

(3) 落錘式衝撃実験

落錘式衝撃実験装置及び計測項目を図-5に、また実験ケースを表-2に示す。実験は落錘による入力エネルギー量を変化させて行っており、応答レベルで弾性域とあるのは底部鋼鉄に生ずるひずみが弾性範囲内に収まる載荷状態を意味している。

実験結果の一例として、各応答レベル毎の荷重-上側変位曲線を図-6に示す。入力エネルギーが小さい範囲ではタイプ(E)でそのせん断抵抗が小さいため他の2タイプと比較して多少発生荷重が小さく変形が大きくなる傾向を示すが、その差は少ない。それに対し、入力エネルギーが大きくなり塑性域(3)の段階になると、RC梁供試体では最大荷重がウレタン合成梁と比較して2倍程度となり、また変形量では1/3以下で収斂し、最も良好な耐衝撃性能を示す。次に入力エネルギーが最大となる塑性域(4)の段階でタイプ(A)と(E)とを比較すると、タイプ(E)はタイプ(A)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、ウレタン充填合成梁部材(タイプ(E))ではRC梁部材よりも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ではRC部材よりも大きいものと思われる。なお、ラチス状の腹板を持つタイプ(D)ではせん断耐力が小さいため完全に破壊されたことと認められる変形状態となった。

これまでは、荷重-上変位の関係に対して考察してきたが、RC梁供試体では塑性域(3)の段階でコンクリート

タイプ	試験体断面構造
A	
B	
C	

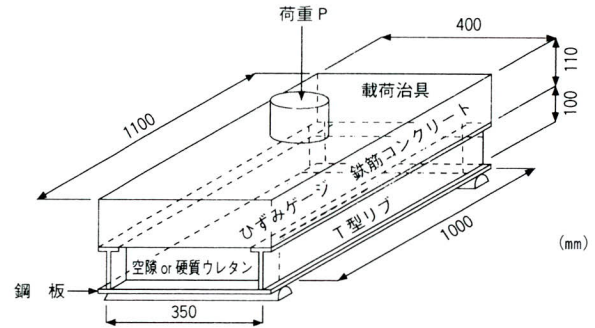


図-7 版実験供試体

下面においてコンクリートが裏面剥離する現象が発生した。それに対し、ウレタン充填合成梁供試体ではウレタンと底部鋼鉄の存在により、変形が進行する以外の問題は特に生じなかった。塑性域(4)のときの破壊モードの模式図を表-3に示す。

4. 硬質ウレタンを充填した合成版の高速載荷押し抜きせん断実験

(1) 実験供試体及び実験方法

落石が図-1に示すTリブ間に衝突する場合を想定し、コンクリート版の押し抜きせん断耐力に及ぼす硬質ウレタンの影響を調べることを目的として、図-7に示す3種類の供試体を用いて実験を行った。タイプ(A)、(B)はコンクリート版の下側に硬質ウレタンを充填したものであり、タイプ(A)では荷重を広範囲のウレタンに分散させることを目的としてコンクリートとウレタ

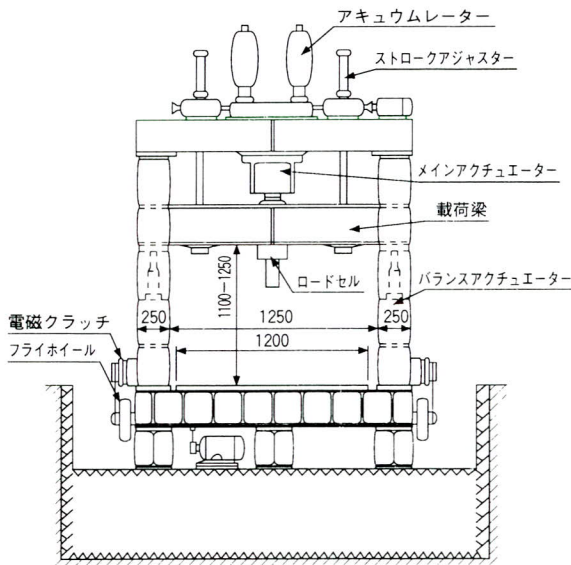


図-8 高速変形負荷装置

ンとの間に仕切り鋼板を置いている。また、タイプ(C)はウレタン部分を空洞としたものである。実験供試体を使用した鋼とコンクリートの材料特性を表-4に示す。なお、硬質ウレタンについては3. で使用したのと同じ材料を使用している。

実験では、試験体中央に置いた直径10cmの円盤の載荷治具を用いて静的載荷及び高速載荷し、載荷面が押し抜きせん断破壊するまでの荷重～変位関係ならびに底部鋼板のひずみについて計測した。静的実験はアムスラー試験装置を用いて行い、また高速実験は図-8に示す高速変形負荷装置を用いて載荷速度400cm/secで行った。この高速変形負荷装置では、変形の開始から終了までの間載荷速度が一定に保持される。

(2) 静的載荷実験

静的載荷実験によって得られた荷重と載荷位置における変位の関係を図-9に、また載荷位置直下の鋼板の支間方向ひずみと載荷位置の変位の関係を図-10に示す。ここに、載荷位置の変位とは上面の載荷治具位置の変位量を意味している。

図-9よりすべての供試体とも弾性→最大荷重→軟化領域→終局耐力(荷重が一定)の3段階からなる弾塑性挙動を示している。弾性領域では3タイプとも弾性梁として求めた直線に一致するが、最大荷重ではタイプ(B)がタイプ(C)より2割程度大きくなる。コンクリートとウレタンとの間に仕切り板を設けたタイプ(A)では、

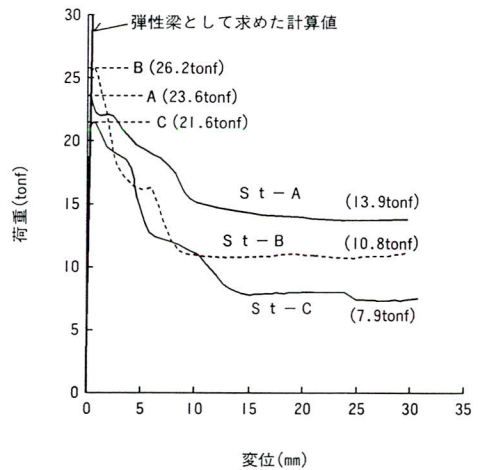


図-9 荷重～変位関係(静的載荷)

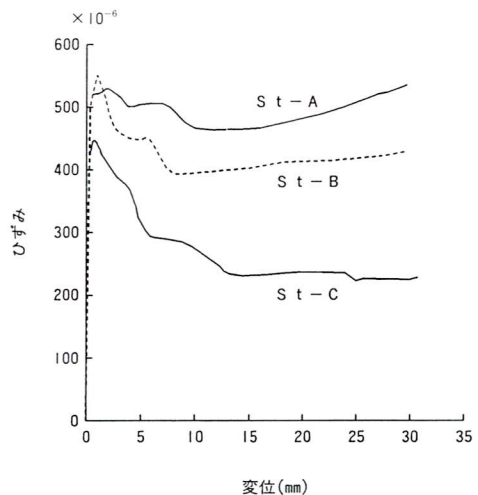


図-10 鋼板ひずみ～変位関係(静的載荷)

仕切り板がくさび状に変形し悪影響を及ぼすため最大荷重はタイプ(B)より小さいが、その後の荷重の低下の割合は少なく終局耐力が最も大きくなり、エネルギー吸収性能が大きいことが分かる。

次に、底部鋼板のひずみと変位の関係を見ると、下側が空洞のタイプ(C)では鋼板のひずみが450 μ 付近でコンクリートが押し抜きせん断破壊され、その後急激に底部鋼板のひずみが減少するが、ウレタンを充填したタイプ(A)、(B)では鋼板のひずみが550 μ 程度まで押し抜きせん断破壊現象は生じず、その後も硬質ウレタンを介して底部鋼板に力が伝達されている。すなわち、ウレタンを充填した供試体では、コンクリートが押し抜きせん断破壊された後においても底部鋼板に力が伝達され、合成梁として挙動することが分かる。この傾向は、仕切り鋼板を設けた供試体において更に顕著に現れる。

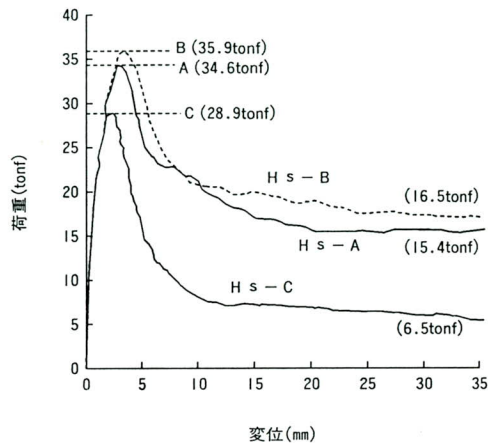


図-11 荷重～変位関係（高速載荷）

(3) 高速載荷実験

高速載荷実験によって得られた荷重－変位関係を図-11に、底部鋼板のひずみ－変位関係を図-12に示す。

図-11より、硬質ウレタンを充填した影響は静的に載荷したときより顕著となっており、最大荷重で20%以上上昇している。また、コンクリート版が押し抜きせん断破壊された後の耐荷力の変動についても、下側が空洞の場合には最大荷重の25%程度の耐荷力に下がるのに対し、ウレタンを充填した供試体の場合には45%程度の耐荷力を保持しており、終局変位量のときのエネルギー吸収性能を比較すると、ウレタンを充填した合成版供試体では空洞とした供試体より150%程度吸収エネルギー量が増大している。

次に、底部鋼板のひずみと変位の関係を見ると、衝撃的荷重に対するウレタンの効果がより鮮明に示される。すなわち、下側が空洞であるタイプ（C）供試体では底部鋼板の最大ひずみ量が約 500μ とウレタン充填合成版供試体の7割程度のときにコンクリート版は押し抜きせん断破壊され、その後は底部鋼板のひずみが急激に減少して、変位量10mm以降では約 150μ まで下がる。それに対し、ウレタン充填合成版供試体では、底部鋼板のひずみが 700μ となるまでコンクリートの押し抜きせん断破壊は発生せず、押し抜きせん断破壊が発生した後においても底部鋼板のひずみが増大しており、終局状態まで鋼とコンクリートとが合成版として抵抗していることが分かる。なお、高速載荷の場合には図-7に示す仕切り鋼板の影響はほとんど見られなかった。

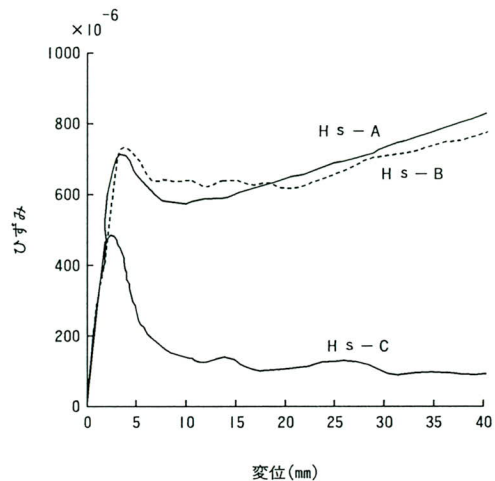


図-12 鋼板ひずみ～変位関係（高速載荷）

5. スタッドの高速せん断破壊実験

(1) 実験供試体及び実験方法

実験供試体の形状は土木学会標準押し抜き供試体と同一形状としたが、実験装置の能力状の制約から、片側半分のみを使用して実験を行った。その際スタッドに曲げモーメントが作用しないよう、図-13に示す実験治具を用いた。実験は径 16ϕ のスタッドを使用し、スタッド高さ、コンクリート強度、載荷速度を変化させてパラメトリックに行った。実験ケースを表-4に示す。なお、静的実験ではアムスラー型載荷装置を用いて $0.01\text{cm}/\text{sec}$ の等速度で、中・高速実験では高速変形負荷装置によって $400\text{cm}/\text{sec}$ の等速度で荷重載荷した。

(2) 実験結果及び考察

せん断破壊の形態には、コンクリートスラブが破壊するものとスタッドがせん断破壊するものの2種類が生じた。図-14に破壊形態と載荷速度の関係を示す。静的実験ではスタッド高さ、コンクリート強度に係わらず全ての供試体でコンクリート破壊型であるが、中・高速の載荷速度が速い場合には、スタッド高さ90mm、70mmでは全てスタッド破壊型となった。ただし、スタッド高さ50mmの短いスタッドの場合には、中・高速載荷の場合でもコンクリート破壊型となった。道路橋示方書では静的載荷時にスタッド破壊型の限界式を

$$H/d \geq 5.5 \quad (H: \text{スタッド高さ} \quad d: \text{スタッド径})$$

で与えているが、 $1.0\text{cm}/\text{sec}$ 以上の載荷速度の場合には

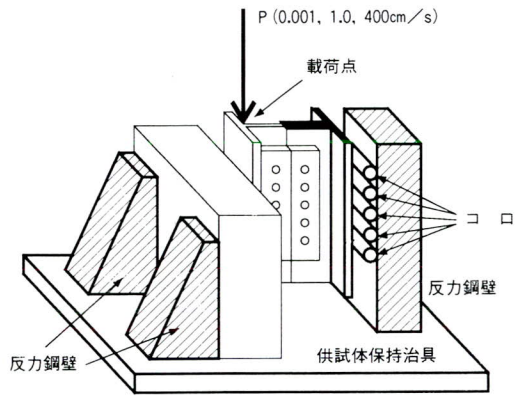


図-13 実験要領

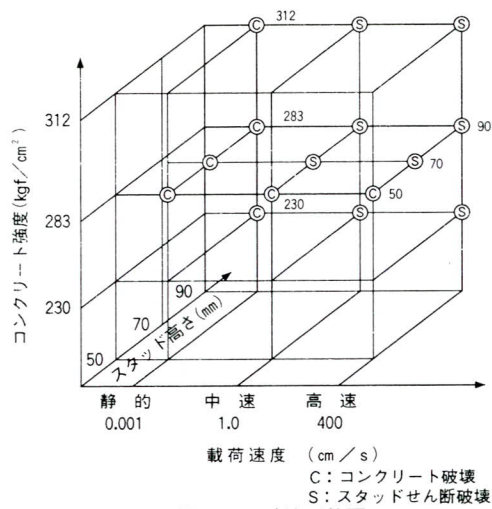


図-14 破壊形態図

表-4 スタッド実験ケース

スタッド径	スタッド高さ	呼び強度	コンクリート強度 (実験時)	載荷速度	
16mm	50mm	300kgf/cm ²	283kgf/cm ²	静的	0.001 cm/s
				中速	1 cm/s
				高速	400 cm/s
	50mm	300kgf/cm ²	283kgf/cm ²	静的	0.001 cm/s
				中速	1 cm/s
				高速	400 cm/s
90mm	250kgf/cm ²	230kgf/cm ²	静的	0.001 cm/s	
			中速	1 cm/s	
			高速	400 cm/s	
	300kgf/cm ²	283kgf/cm ²	静的	0.001 cm/s	
			中速	1 cm/s	
			高速	400 cm/s	
350kgf/cm ²	312kgf/cm ²	静的	0.001 cm/s		
		中速	1 cm/s		
		高速	400 cm/s		

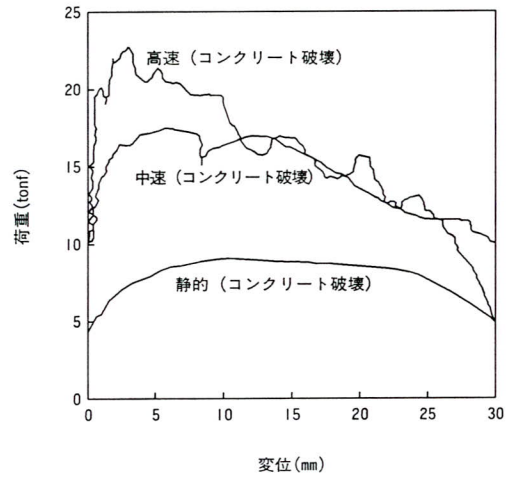


図-15 荷重～変位関係

(スタッド高さ50mm、コンクリート強度283kgf/cm²)

$$H/d \geq 4.4$$

と限界値を小さくする方が適当と思われる、

図-15にスタッド高さ50mm、コンクリート強度283 kgf/cm²のときの、また図-16にスタッド高さ90mm、コンクリート強度230kgf/cm²のときの静的、中・高速載荷における荷重～変位関係をそれぞれ示す。前者では、いずれの載荷速度においてもコンクリート破壊型であるが、載荷速度の増加にともなって最大荷重が大きくなるのが分かる。次に、後者においては、静的載荷ではコンクリート破壊型、中・高速載荷ではスタッド破壊型となる。図より、載荷速度が速くなるにつれて最大荷重は増加するが、スタッド破壊型の場合には小さな変位で急に耐力が低下している。

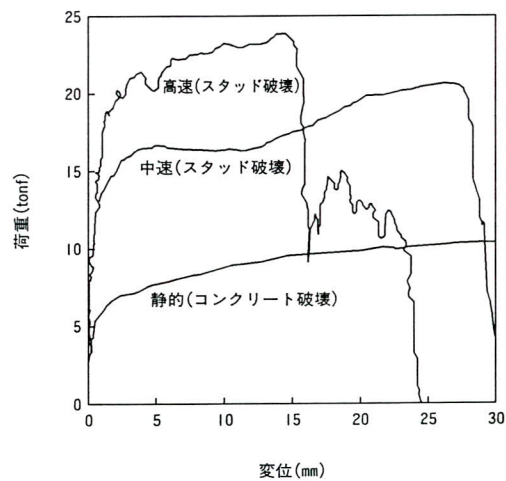


図-16 荷重～変位関係

(スタッド高さ90mm、コンクリート強度230kgf/cm²)

以上の実験結果から、載荷速度が大きくなると最大荷重（スタッド1本当りの抵抗荷重）も大きくなることが分かった。本実験結果から、載荷速度の影響を考慮したスタッド1本当りの破壊荷重が次式のように得られた。

コンクリート破壊の場合

$$P=33dH\sqrt{\sigma} (0.10\ln V+1.71)$$

スタッドせん断破壊の場合

$$P=180d^2\sqrt{\sigma} (0.03\ln V+1.23)$$

ここに P：スタッドの破壊荷重 (kgf/1本)

d：スタッド径 (cm)、H：スタッド高さ (cm)

σ ：コンクリート強度 (kgf/cm²)

V：載荷速度

6. まとめ

硬質ウレタンを充填した鋼コンクリート合成構造の耐衝撃性能（衝撃エネルギー吸収性能）に着目し、このような3層構造部材をロックシェッドの屋根材として利用することを目的として、それぞれ梁供試体、版供試体を用いた耐衝撃実験、そして合成手段として広く用いられているスタッドの耐衝撃性に関する実験を行い以下の結果が得られた。

- ① ウレタン充填合成梁は同じ曲げ耐力を有するRC梁より大きな衝撃エネルギー吸収性能を有するとともにコンクリートに特有な裏面剝離現象を防止できる。
- ② ウレタンを充填することにより、同厚のRCコンクリート版の押し抜きせん断耐力を2割程度増加できるとともに、合成版としての耐衝撃性能をみるとコンクリート版が押し抜きせん断破壊された後も合成版として荷重を支持し、充填しない場合と比較して150%も大きな衝撃エネルギー吸収性能を示す。
- ③ 荷重載荷速度の影響を考慮したスタッドの破壊荷重計算式を提案し、衝撃荷重を受ける合成構造物の設計に必要なスタッド本数決定の根拠を与えた。
- ④ ①～③を通じて、硬質ウレタンを充填した鋼コンクリート合成部材が耐衝撃性に優れており、合理的な設計法のもとでロックシェッドとして活用できることが分かった。

本開発研究は防衛大学校土木工学教室石川信隆教授の

指導を受け、防衛大学校と宮地鐵工所の共同研究として平成3年から継続してきた成果をまとめたものであり、防衛大学校が保有する落錘式衝撃実験装置、高速変形負荷装置を使用して実験を行ってきた。香月 智助教授、園田佳巨助手には実験計画の段階から結果の取りまとめに至るまで有意義なアドバイスを頂いた。また、元防衛大学校研究科学生山本恭嗣氏、元防衛大学校学生阪田洋氏、現研究科学生加瀬典文さんにはこの成果を得るために非常に頑張りを発揮して頂いた。ここに、謝意を表するとともに、早急に本形式のロックシェッドを建設出来るよう進めることを誓って本報告の結語とします。

＜参考文献＞

- 1) 太田貞次、深沢泰晴、檜貝勇：構造工学論文集 Vol.39A、pp.1279-1288、1993年3月。
- 2) 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
- 3) 山本恭嗣、園田佳巨、太田貞次、石川信隆、太田俊昭：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、構造工学論文集 Vol.39A、pp.1645-1652、1993年3月。
- 4) 太田貞次、山本恭嗣、園田佳巨、石川信隆：剛体ばねモデルによる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解析、第2回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム概要集、1993年6月。
- 5) 加瀬典文、太田貞次、香月 智、石川信隆：硬質ウレタンを充填した鋼・コンクリート合成板の高速載荷押し抜きせん断実験、構造工学論文集 Vol.41A、pp.1229-1238、1995年3月。
- 6) 加瀬典文、太田貞次、香月 智、石川信隆、伊藤一雄：スタッドの高速せん断破壊実験、土木学会第50回年次学術講演会概要集（第I部門）、平成7年9月。

1995.10.11受付