

(47) 高速載荷を受ける鋼コンクリート合成構造はり・柱接合部の破壊挙動

FAILURE BEHAVIOR OF BEAM-COLUMN JOINT UNDER RAPID SPEED LOADING

黒木勇人\*, 太田貞次\*\*, 香月智\*\*\*, 石川信隆\*\*\*\*

Hayato KUROKI, Teiji OTA, Satoshi KATUKI, Nobutaka ISHIKAWA

\*防衛大学校 土木工学科 理工学研究科学生(〒239-0811 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

\*\*工修 宮地鐵工所 技術開発部 課長(〒103-0001 東京都中央区日本橋小伝馬町 15-18)

\*\*\*工博 防衛大学校助教授 土木工学科(〒239-0811 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

\*\*\*\*工博 防衛大学校教授 土木工学科(〒239-0811 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

キーワード: 鋼・コンクリート合成構造, ロックシェッド, はり・柱接合部, 高速載荷実験

(Steel-concrete composite structure, Rock-shed, Beam-column joint, Rapid speed loading test)

1. 緒言

近年, 急崖傾斜地での道路交通の安全性への要求が大きくなり, ロックシェッドの設計荷重は増加する傾向にある。従来, 落石への防護施設としてPC構造やRC構造のロックシェッドが多く建設されているが, 設計荷重の増大に伴い断面が大型化し建設が困難な場合も散見されるようになってきたため, 鋼・コンクリート合成構造によるロックシェッドが検討されている<sup>1)~3)</sup>。しかし, 構造全体の破壊形態に大きな影響を及ぼすと考えられる合成構造のはりと柱の接合部の耐力や変形性能, 特にその高速変形時の挙動に関する研究はほとんど行われていない<sup>4)</sup>。そこで本研究は, 鋼・コンクリート合成構造ロックシェッドのはり・柱接合部に対する静的および高速載荷実験を行い, その破壊挙動および耐力に及ぼす載荷速度の影響について検討を行ったものである。

2. 実験の概要

2.1 実験装置

(1) 静的実験

静的実験および高速載荷実験は, 図-1 に示す水平高速載荷装置を用いて行った。水平高速載荷装置はテストベッドの上方120cmにある載荷部が水平方向に高速に突き出される装置である。この載荷部は, サーボコントローラによってバランス側の油圧がコントロールされるため, 抵抗力100tonf未満の供試体を3.0m/sec以内の指定速度に維持して, 15cmまで載荷できる実験装置である。本実験は, 図-2 に

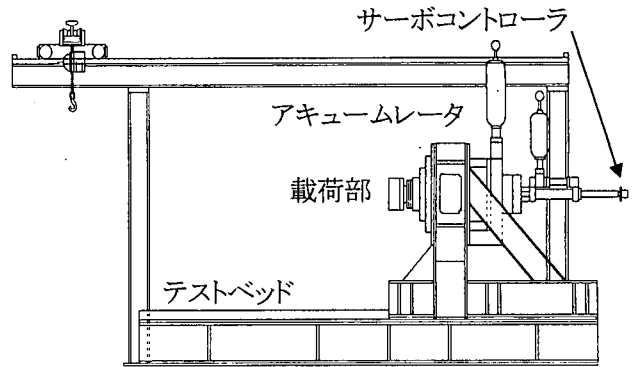


図-1 水平高速載荷装置

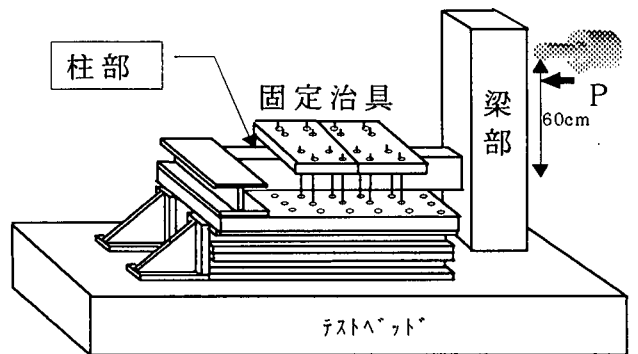


図-2 実験要領

示すように供試体を載荷台上に柱部が曲げ変形しないように固定支持し, 柱中心から60cm離れたはりの中央を水平高速載荷装置により点載荷した。測定項目は, 載荷点荷重, 変位および供試体各部のひずみであり, 荷重は載荷体に付属したロードセルで, 各変位はレーザー式変位計を用いて載荷板の変位(供試体載荷変位部変位)と載荷点反対側の変位お

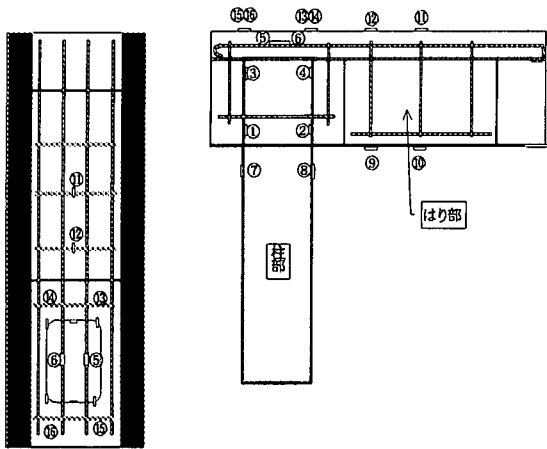


図-3 ひずみ計測位置

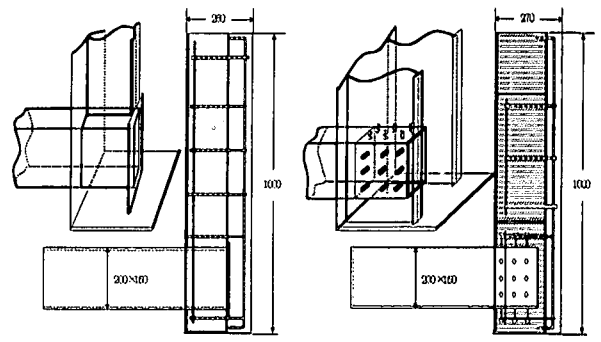
よび柱部の変位を計測し、ひずみについては図-2に示す位置にひずみゲージを貼布して測定した。

(2) 高速載荷実験

静的実験と同様に柱中心から 60cm 離れたはりの中央を載荷速度 3.0m/sec で高速載荷実験を行った。測定項目は、載荷点荷重、変位、加速度および供試体各部のひずみであり、荷重は載荷体に付属したロードセルで、各変位は静的実験と同様にレーザー式変位計を用いて載荷板の変位（供試体載荷部の変位）と載荷点反対側の変位および柱部の変位を計測し、加速度については供試体に貼付した加速度計をにより、ひずみについては図-3 に示す位置にひずみゲージを貼布して測定した。これらのデータをシグナル・コンデショナー、高速の A/D コンバーターを経てパーソナルコンピューターへデジタルデータとして保存した。

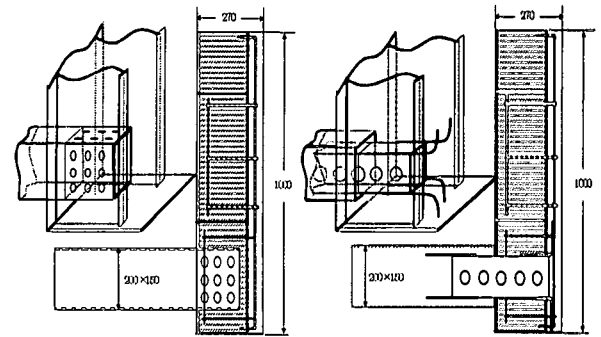
2.2 実験供試体

実験に使用した供試体は図-4 に示す(a)鋼剛接タイプ(Aタイプ)、(b)SRC剛結スタッドタイプ(Bタイプ)、(c)SRC剛結孔明きタイプ(Cタイプ)、(d)差込キータイプ(Dタイプ)の合計4種類の供試体を用いた。表-1 に供試体作成に用いた材料諸元を示す。柱は各供試体共通であり、コンクリート充填鋼管（鋼管径：150mm×200mm、肉厚：6mm 鋼管長：700mm）の中に静的 28 日強度 36.3N/mm<sup>2</sup>のコンクリートを充填したものである。鋼剛接タイプ(Aタイプ)は、図-5(a)に示すようにはり中央にH型钢（H-130×6×700）を通したうえで、この側面と鋼管柱を接合部内部において溶接接合したものである。この構造は、はり主部の鋼と柱が直接接合されているため剛であるが、施工面では柱上へのはり部の建て込み時に支保工等を必要とし、溶接作業も必



(a)鋼剛接タイプ(A)

(b)SRC 剛結スタッドタイプ(B)



(c) SRC 剛結孔明きタイプ(C)

(d)差込キータイプ(D)

図-4 実験供試体

表-1 材料諸元

コンクリート	鉄筋	鋼材
最大寸法 スランプ 28日強度	10 mm 12 cm 36.3 N/mm <sup>2</sup>	主筋 SD295 φ13 スターアップ SD295 φ10
		柱部(鋼管) STER400 150×200 はり部 SS400

表-2 実験ケースおよび供試体数

供試体(タイプ)	静的載荷	高速載荷
鋼剛結タイプ(Aタイプ)	2体	2体
SRC 剛結スタッドタイプ(Bタイプ)	2体	2体
SRC 剛結孔明きタイプ(Cタイプ)	2体	2体
差込キータイプ(Dタイプ)	2体	2体

要とするため利便性にかける。SRC剛結スタッドタイプ(Bタイプ)は、柱部にスタッドを溶着しコンクリートとの間のズレ止めせん断抵抗を期待するものである。この場合にも、はり底版の柱差し込み穴が通過できないためにスタッドを現場で溶着する必要があり、あまり便利な構造ではない。SRC剛結孔明きタイプ(Cタイプ)は、Bタイプの施工上の難点を克服するためにスタッドを除き、代わりにせん断抵抗力を柱の鋼管に開けた孔によって伝達することを期待したものである。差込キータイプ(Dタイプ)は、さらに施工性を向上させるために、はり柱をはりの底鋼板で溶接接合したうえで、差込キ

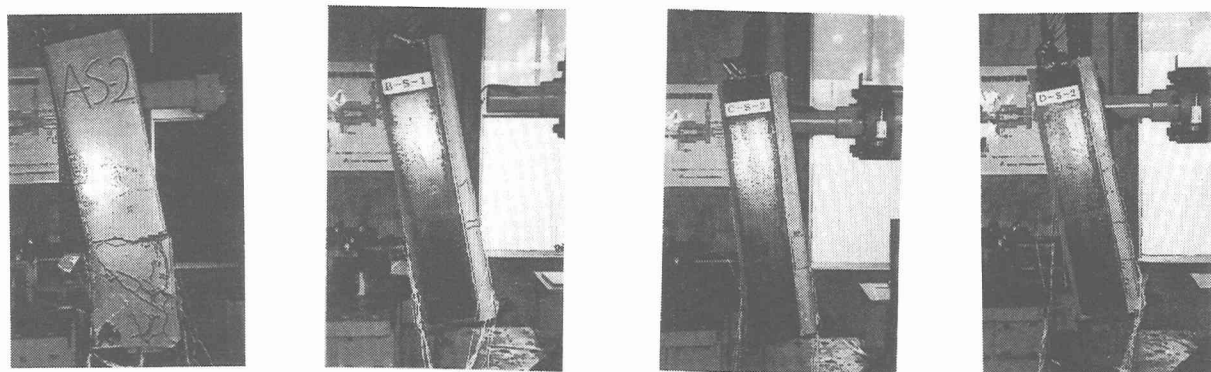
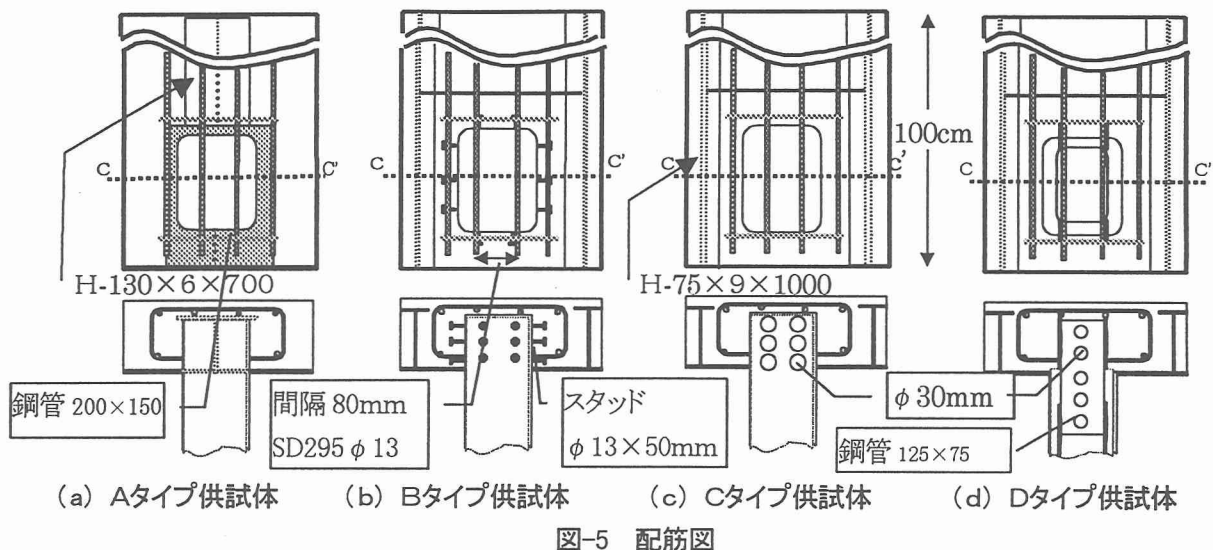


写真1 静的破壊形態

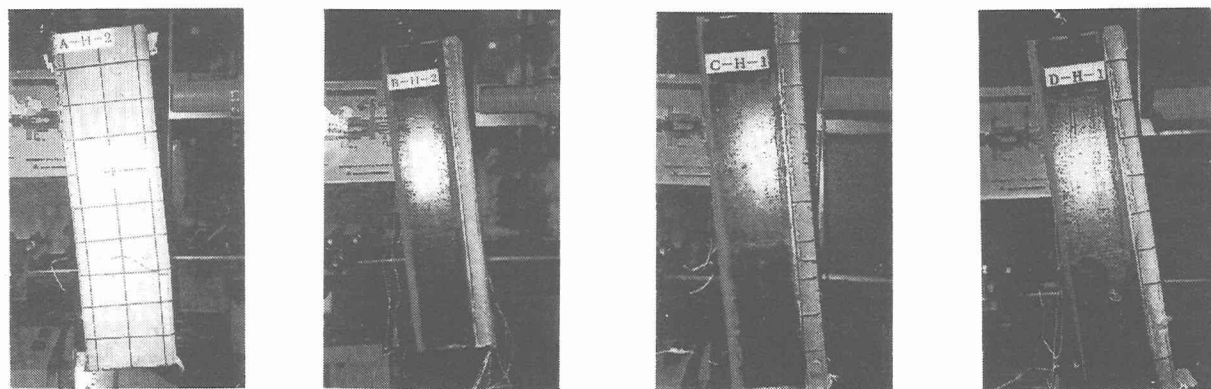


写真2 高速破壊形態

一と呼ぶ柱鋼管より一回り小さい孔明き鋼管を差し込んでコンクリートによる一体化を図ったものである。以上の供試体に対する実験ケースと実験体数を表-2に示す。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 破壊形態

##### (1) 静的実験

写真-1 に静的実験終了後の各供試体の破壊形態を示す。破壊形態には大別して図-6 に示すようなはり破壊型、柱破壊型、接合部破壊型の3種類の破壊形態が現れた。まず、鋼剛接タイプ(Aタイプ)は、はり部分に曲げモーメントによるコンクリート部の破壊が先行して起こり、その後はりと柱の溶接接合部が破壊した。SRC剛結スタッドタイプ(Bタイ

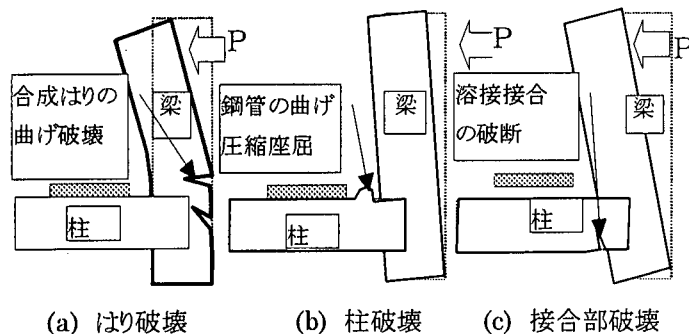


図-6 破壊形態の種類

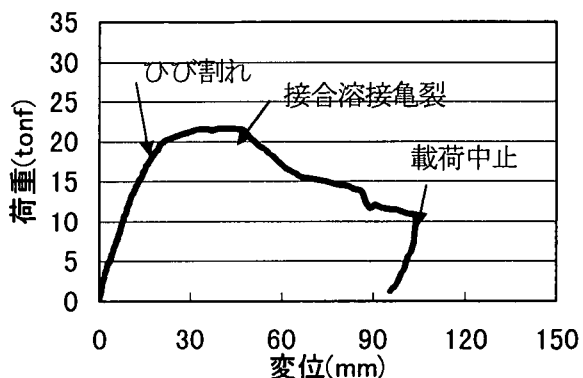
表-3 破壊形態の分類

供試体 (タイプ)	静的載荷	高速載荷
鋼剛結タイプ (Aタイプ)	はり部 破壊型	はり部 破壊型
SRC剛接スタッドタイプ (Bタイプ)	柱部 破壊型	柱部 破壊型
SRC剛接孔明きタイプ (Cタイプ)	接合部 破壊型	接合部 破壊型
差込キータイプ (Dタイプ)	接合部 破壊型	接合部 破壊型

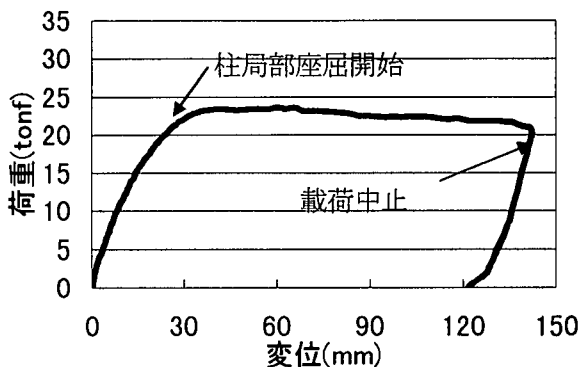
ブ)は、はりには顕著な破壊は観察されず、柱部が接合部近くで曲げ圧縮による局所的な座屈破壊を示す盛り上がり観察された。SRC剛結孔明きタイプ(Cタイプ)および差込キータイプ(Dタイプ)は、はりや柱には著しい破壊は観察されないが、柱接合部の引張変形側のはり鋼板と柱鋼板の溶接接合が切断し、あたかも柱が抜け出すような変形によって破壊に至る、いわゆる接合部の破壊となっている。

## (2) 高速載荷実験

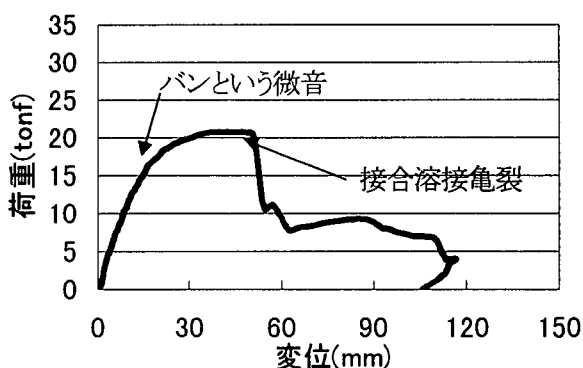
写真-2 に各供試体の破壊形態を示す。各供試体ごとの破壊形態の分類は表-3 に示すようにいずれの供試体においても静的実験と同じ傾向を示した。高速載荷実験では計測装置の制約のため、最大変位を80mmとしたため、鋼剛接タイプでは静的載荷(最大100mm載荷)のようにかぶりコンクリートの剥離現象までは至らなかったが、はり表面のコンクリート一面に接合部を囲むように微細なひび割れが多数生じた。SRC剛結スタッドタイプは、高速載荷実験でも静的と同様にはりには顕著な破壊は観察されず、柱部が接合部近くで曲げ圧縮による局所的な座屈破壊を示す盛り上がり観察された。また、はり表面のコンクリートに、柱を中心とした明瞭な十字線状のひび割れが確認できた。SRC剛結孔明きタイプについては、柱部圧縮側の上面のはり部に横断



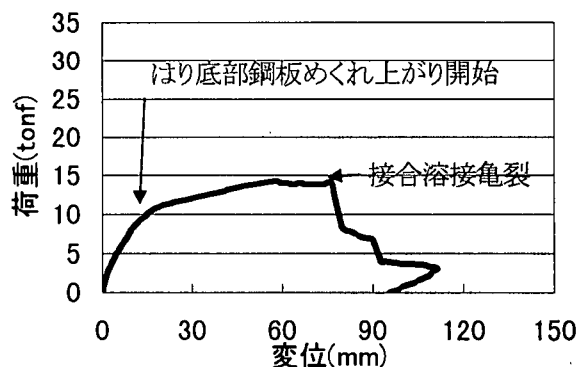
(a) 鋼剛接タイプ(Aタイプ)



(b) SRC剛接スタッドタイプ(Bタイプ)



(c) SRC剛接孔明きタイプ(Cタイプ)



(d) 差込キータイプ(Dタイプ)

図-7 静的実験の荷重～変位関係と破壊進展過程する線が2線確認された。差込キータイプは、静的載荷と同様に柱下部の引張力を受ける部分が抜け出すような挙動を示した。

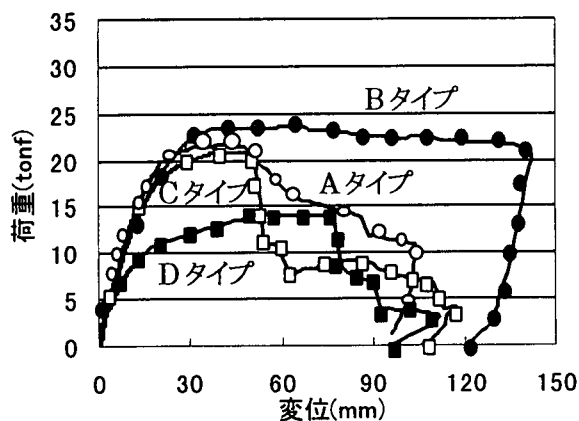
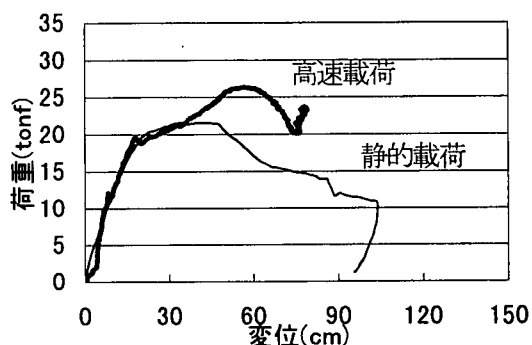


図-8 静的載荷実験の荷重～変位関係の比較

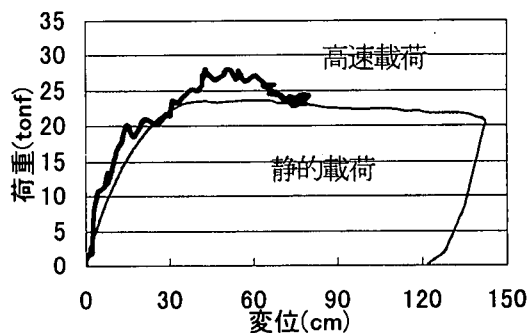
### 3.2 荷重～変位関係

#### (1) 静的実験

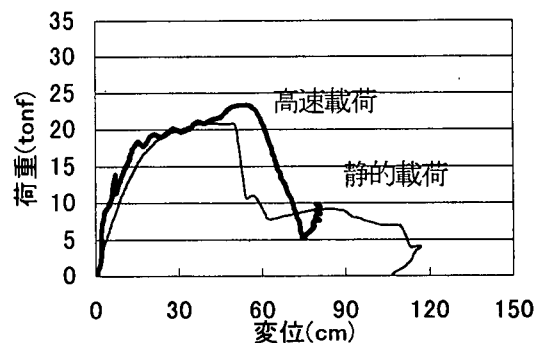
図-7に、各供試体ごとの荷重～変位関係と観察された破壊の進展を示す。図-7(a)の鋼剛接タイプでは、弾性限界の19tonfにおいて顕著なはりのひび割れが観察され、はり内部に損傷が生じたものと思われる。よって、一旦硬化型の挙動を示し、その後、はりと柱の溶接接合が完全に破断に至ると耐力は急激に失われる。図-7(b)のSRC剛結スタッドタイプでは22tonfの弾性限界において柱の首の部分に座屈による明瞭な膨らみが観察される。この膨らみは変形の進展にともない成長するが、構造全体の耐力は、23tonfを保ち、変位140mmにおいても21tonfの耐力を有する。なお、変位140mmにおいて載荷を中止したが、この耐力はさらに持続するものと思われる。図-7(c)のSRC剛結孔明けタイプでは、弾性限界の17tonfにおいて内部の柱鋼材と周辺コンクリートの付着が離反したと思われる微音が発生し、その後耐力の増加が減少する。最後に、バンという明瞭な音が発生し、はりと柱の溶接接合部の亀裂が発生し急激に耐力が失われている。図-7(d)の差込キータイプでは、弾性限界の13tonfからはり鋼板の張り出し部が捲れるように膨らみ始め、Cタイプと同様にはりと柱の溶接接合部の亀裂が生起すると急激に耐力が失われている。図-8に静的実験における全ての供試体の荷重～変位関係を比較図示する。SRC剛結スタッドタイプの耐力は他の全てのものに対して大きく、またその変形性能も安定していることがわかる。一方、SRC剛結孔明けタイプの耐力は、鋼剛接タイプとほぼ等しく、また、そのじん性もほぼ等しいことがわかる。しかし、差込キー剛結タイプ耐力において鋼剛接タイプの約半分となっている。



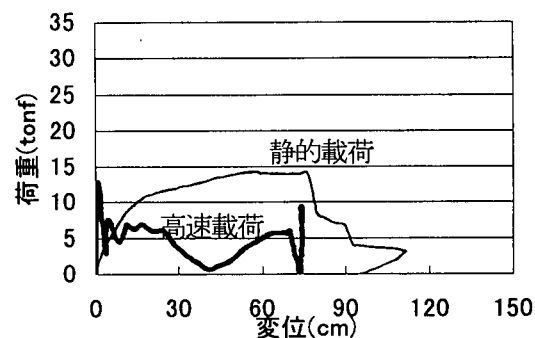
(a) 鋼剛接タイプ(Aタイプ)



(b) SRC剛結スタッドタイプ(Bタイプ)



(c) SRC剛結孔明けタイプ(Cタイプ)



(d) 差込キータイプ(Dタイプ)

図-9 静的と高速載荷実験の荷重～変位関係の比較

#### (2) 高速載荷実験

図-9に各供試体の高速載荷実験によって得られた荷重～変位関係を静的実験と比較して示す。図-9(a)の鋼剛接タイプでは、静的実験同様の剛性で弾性限界に達し、弾性応答終了時の耐力のピーク値は

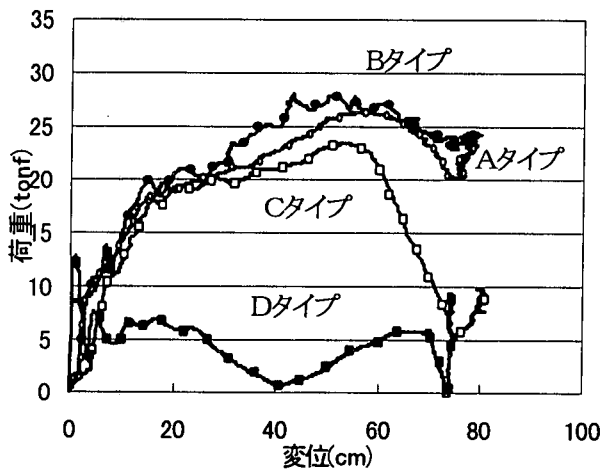


図-10 高速載荷実験の荷重～変位関係の比較

静的載荷時よりも約5%程度大きい、さほど顕著な増加は見られない。変位が40mmを過ぎたところで静的実験においては徐々に抵抗力が低下するのに対して、高速載荷では逆に再度抵抗力が増している。これは、内部でのH鋼と柱鋼管の接合の破壊が高速載荷時には遅れる傾向があるためではないかと考えられる。図-9(b), (c)のSRC剛接スタッドタイプとSRC剛接孔明きタイプでは、その荷重～変位関係では、静的載荷時とほぼ一致しており、高速な載荷(変形)を受けてもその抵抗力にはあまり影響を受けないことがわかる。しかし、図-9(d)に示す差込キー剛接タイプでは顕著にその耐力が静的載荷時よりも小さく、静的載荷時のようなねばりもないことがわかる。写真-1, 2で示したように外見上の破壊形態からは高速載荷時と静的載荷時に顕著な違いが見られないことから、差込キーと柱との接合が高速載荷時には脆くなる傾向があるものと考えられる。図-10に高速載荷実験による各供試体の荷重～変位関係を比較して示す。図より鋼剛接タイプ、SRC剛接スタッドタイプの荷重～変位関係は変位60mmまでほぼ等しく、続いてSRC剛接孔明きタイプもこの2つのタイプと若干早く耐力を失うが、ほぼ等しい耐力を有していることがわかる。参考までにロックシェッドのはり長さを10m程度とし、その中央点が50cmまで変形した場合のはり柱の接合部の回転角は概ね $\theta = 0.1$ となることから、この実験の $\theta = 0.1$ に相当する60mmを要求回転能とすると、A, Bタイプはそれぞれ要求回転能まで硬化型の耐力を維持し、Cタイプでは、60mmの直前で耐力を失うが、概ね硬化型の弾塑性挙動によって要求変位まで耐力を保つことがわかる。

しかし、差込キータイプでは変位5mmで耐力を失い、また、その耐力も他のタイプに比して小さいため、耐力およびじん性の両面からあまり望ましい接合方法ではないと考えられる。

#### 4. 結言

本研究は、鋼・コンクリート合成構造ロックシェッドのはり・柱接合部に対する静的および高速載荷実験を行い、その破壊挙動および耐力に及ぼす載荷速度の影響について検討を行った。本研究の成果を要約すると以下ようになる。

- (1) 静的載荷では、SRC剛接スタッドタイプはその耐力およびじん性のいずれも柱とはり端部の鋼材を直接溶接接合する鋼剛接タイプよりも大きく優れている
- (2) 静的載荷では、SRC剛接孔明きタイプの耐力およびじん性は鋼剛接タイプとほぼ同等であり、その破壊性状も相似したものである。
- (3) 高速載荷においてもSRC剛接タイプ(B, C)の破壊性状は静的と変わらず、その抵抗力～変形関係は静的とほぼ等しい。また、その耐力およびじん性は鋼剛接タイプと同等である。
- (4) 差込キータイプは、静的載荷状態において他の供試体に比して耐力が50%程度に低下するが、そのじん性は回転角 $\theta = 0.1$ までは硬化型の弾性挙動によって維持される。しかし、高速載荷においては、そのじん性は極端に低下し、脆性的な破壊挙動を示した。

#### 参考文献

- 1) 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鋼・コンクリート合成はり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論文集, 1993年6月。
- 2) 土木学会構造工学委員会, 鋼・コンクリート合成構造の設計ガイドライン, 1988. 3.
- 3) 土木工学構造工学委員会, 構造物の衝撃挙動と設計法(落石覆工の設計法)資料集, 1995. 7.
- 4) 中井博, 北田俊行, 中西克佳, 杉山功, 河野康史, 地震荷重を受けた後の合成柱(充填形式)の耐力および変形性能に関する実験的研究, 構造工学論文集 Vol. 40A, 1994. 3.