

# (127) サブストラクチャー・ハイブリッド実験による鋼製箱型橋脚の耐震性

京都大学工学部 山田 善一 家村 浩和  
 William Tanzo ○ 岡 重洋  
 鹿島建設(株) 安田 学

1. はじめに 本研究では、鋼製箱型橋脚の複合繰り返し応力下における極限耐力や変形性能を実験的に解明し、2層フレーム鋼製道路橋の複合応力下での弾塑性挙動を実験的に追求し、耐震性評価を行うことを目的とした。そのため、箱型断面を構成する供試体の材料特性や、補剛材の剛比( $\gamma/\gamma^*$ )を変えるととも部材端における軸力、モーメント、せん断力の組み合わせ応力下での繰り返し載荷実験、およびサブストラクチャー・ハイブリッド実験を行った。

## 2. 静的繰り返し載荷実験

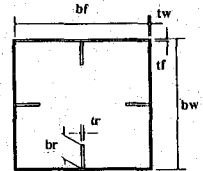
1) 実験概要と供試体 実験における載荷形式を図1に、供試体の断面図を図2に示す。供試体の使用鋼材は、フランジ、ウェブには板厚3.2mmで降伏応力が $3200 \text{ kg/cm}^2$ のもの(A、Bタイプ)と $2000 \text{ kg/cm}^2$ のもの(Cタイプ)を用い、補剛材は板厚4.5mmで降伏応力が $2000 \text{ kg/cm}^2$ のものを用いた。ケース1では、軸力による応力が降伏応力の16%に相当する一定軸力をかけ、部材軸直角方向に繰り返し載荷した。ケース2では、一定軸力に加え、材端に全塑性モーメントの35%に相当する一定モーメント( $M_c$ )をかけた状態で、水平方向に繰り返し載荷した。各ケースでの載荷状況および極大、極小振幅時のM図を図3に示す。また、補剛材は縦補剛材の必要剛比を変化させた。これらを表1にまとめて示す。

## 3. 実験結果

1) 耐荷力 図4に水平反力の各サイクルごとの反力の包絡線を示す。これよりAタイプとBタイプを比較した場合、同じ材料特性では補剛材の剛比 $\gamma/\gamma^*$ の値の大きいもののほうが強度の低下の割合は小さい。また、図5にA、Cタイプの供試体上端より $10 \text{ cm}$ における断面での曲率-モーメント図を示す。これより、正側の変位領域において同一のモーメント( $500 \text{ ton-cm}$ )がかかった時の曲率の塑性

Specimen	縦補剛材	横補剛材	$\gamma/\gamma^*$	$\sigma_s$	一定軸力 $P_v(\text{tonf})$	一定モーメント $(\text{tonf} \times \text{cm})$
A1	1	2	1	3000	1.7	0
A2	1	2	1	3000	1.7	300
B1	1	2	3	3000	1.8	0
B2	1	2	3	3000	1.8	300
C1	1	2	1	2000	1.1	0
C2	1	2	1	2000	1.1	300

表1



Specimen	Region	Size (mm)
All	Length	1680
	Flange Size bf × tf	230 × 3.2
	Web Size bw × tw	230 × 3.2
A and C	Rib Size br × tr	27 × 4.5
B	Rib Size br × tr	41 × 4.5

図2 供試体の断面図

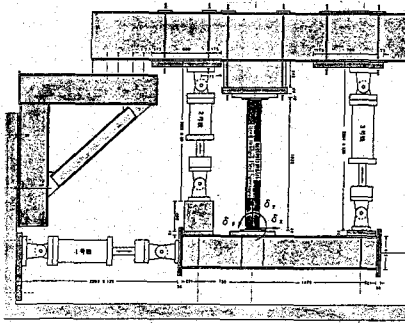


図1 3自由度載荷装置

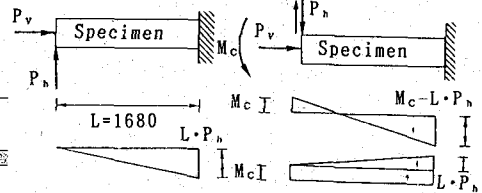


図3 載荷形式とM図

化がA1は非常に大きいことから、非常に大きな変形を起こし耐荷力を急激に低下させているものと考えられる。これに対し、C1は、曲率の値の伸びが小さく耐荷力の低下の割合は小さいと考えられ、このため最大強度を示した以後の塑性域サイクルでA1とC1の包絡線が逆転しており、Cタイプのほうが強度は低いがいん性が大きいといえる。

2) 材端モーメント下での実験の包絡線 正側の変位領域ではケース2よりもケース1のほうが大きい。これは、加える水平力によって生じるモーメントが、あらかじめ載荷してある一定モーメントと同じ向きであるため極めて大きい曲げ応力が圧縮側フランジに生じてこの方向の水平力に対する耐荷力を下げていると考えられる。負側の変位領域では、ケース2の方が大きい。これは、この方向の水平力の載荷によって、M<sub>0</sub>を解放するため、仮に正側の変位領域で座屈したとしても、その変形を回復するためと考えられる。

3) 等価粘性減衰定数 履歴復元力特性の1サイクルごとの等価粘性減衰定数を図6に示す。A1、B1はともに供試体の最大強度となるサイクルまでは等価粘性減衰定数の増加の割合は小さいが、最大強度以後のサイクルでは増加の割合は急激に大きくなる。また、材料強度が高く、従って最大強度の大きいもののほうが等価粘性減衰定数の値が小さいという結果が得られた。

4) 剛性比 各サイクルの等価剛性を第1サイクルの等価剛性で無次元化したものを図7に示す。図より、Aタイプ、Bタイプは最大強度が生じる前のサイクルまでは剛性を保っているが、最大強度が生じた以後のサイクルにおいて急激に低下していることが分かる。また、C1は、第2サイクル以後低下をしているが、これは第2サイクルにおいて既に塑性域に達しているためである。

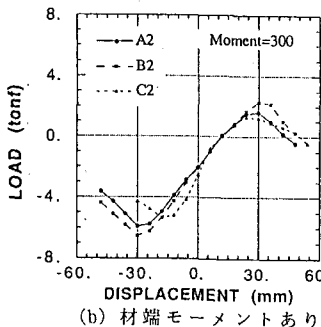
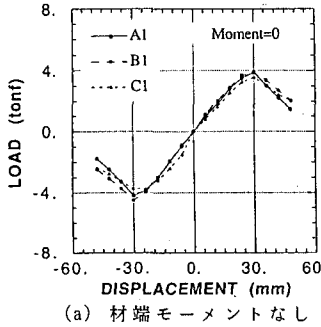


図4 包絡線

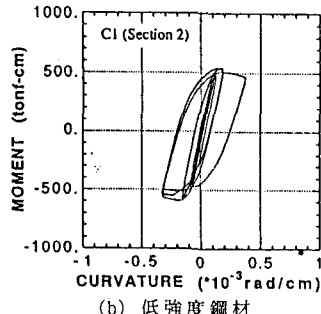
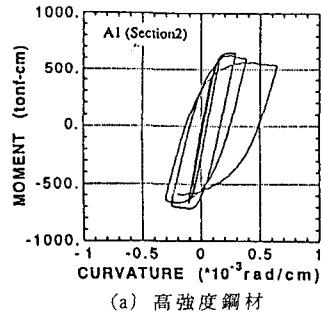


図5 曲率～モーメント

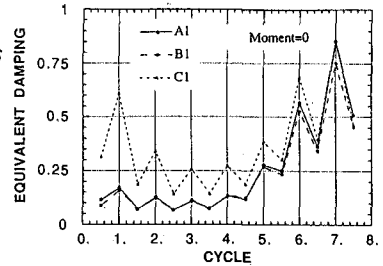


図6 等価粘性減衰定数

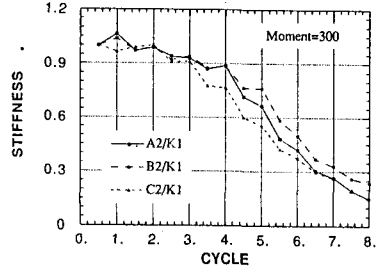
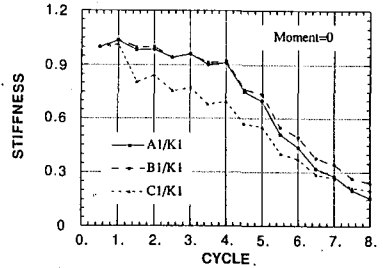


図7 等価剛性比

### 3. サブストラクチャー・ハイブリッド実験

1) 実験概要と供試体 実験における載荷形式を図1に示す。供試体は、静的繰り返し載荷実験において用いたものと同様の薄肉鋼製箱型供試体を用いた。サブストラクチャーモデルとして、図8に示すような、2

層フレーム鋼製箱型道路橋をモデル化し、軸力一定下で1層柱部分を実験し、2層部分は数値計算を行い、全体系をオペレータ・スプリッティング法による数値解析を行うことによりサブストラクチャー・ハイブリッド実験を行った。また、図8に示すように供試体下部から50mm、100mmの断面をSection A、Bとし、供試体上部から100mm、50mmの断面をSection C、Dとした。ただし、実験供試体は上下逆の型で載荷している。図9に本実験のフロー・チャートを示す。数値解析部の復元力特性は、柱部材は弾性として、桁部材はパイリニアモデルとして数値計算を行った。また2層部分の柱部材の剛性は、実験供試体と等しくし、桁部分の剛性は、桁部分の剛性の変化による影響を見るために、柱部材の剛性と等しい場合（ケース3）と、柱部材の剛性の2倍の場合（ケース4）の2ケースを実験した。質量は、実際の構造物との相似性を考慮し、モデルの1次モードの固有周期が約0.7秒になるように設定した。入力地震動は、El Centro地震（1940）のNS成分を用い、最大加速度を一定倍することで200galとし、30秒間の地震応答を調べた。また積分時間間隔は $\Delta t = 0.02$ 秒とし、数値解を行なった。

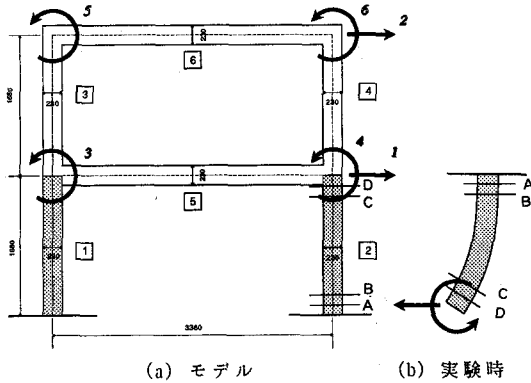


図8 2層フレーム鋼製箱型道路橋モデル

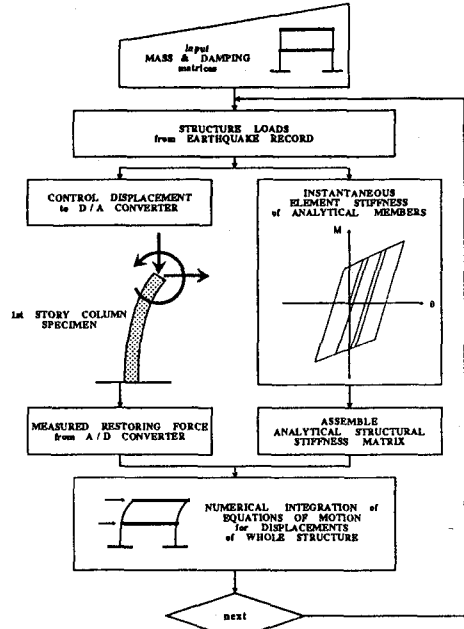


図9 フロー・チャート

2) 実験結果と考察 図10にケース3とケース4の1層と2層の相対変位の時刻歴、また1層柱部材すなわち実験部の部材端における回転角および、曲げモーメントの時刻歴を示す。ケース3では、ケース4に比べて桁部材の剛性が小さいために、拘束効果が少なく1層と2層の相対変位の差が大きい。またケース4では、桁の剛性により、柱の回転角が拘束されるために、回転角はケース3に比べて小さくなっているが、モーメントは逆に大きくなっている。図11に供試体の正負両方向の最大変位時における曲率分布を示した。桁部の剛性の差により、ケース3では供試体下部部のみ大きな変形が生じているのに対し、ケース4では供試体の下部および上部でも大きな曲率の増大がおこなっている。図12および図13には供試体の各断面で測定した、ケース3とケース4のモーメントー曲率関係の図をそれぞれ示した。ケース3では供試体下部部（Section A、B）でのみ大きな変形が起こっているのに対し、ケース4では供試体下部部および供試体上部部（Section C、D）の両端で、大きな変形が起こっている。ケース3、ケース4ともに供試体下部部では最大モーメントに至る弾性域までは、ほとんど直線的に挙動し、最大モーメント以後急激に曲率は増大し、座屈している。しかしそれ以後はまた曲率0に近い状態にまで戻っている。しかしケース4の供試体上部部では最大モーメントまでは同様に直線的に推移しているが、最大耐力以後急激に座屈し、それ以後、塑性変形が戻らなくなっている。

#### 4. 結論

(1) 供試体の最大強度、および塑性域での耐荷力の低下の割合には補剛材の剛比 $\gamma/\gamma^*$ がかかわってお

り、 $\gamma/\gamma^*$  の値を大きくすると最大強度、およびじん性を増加させることができ、より耐震性のある部材となる。

(2) 3自由度実験では一定モーメントを載荷している方向と同方向に、水平力を加えた場合、一定載荷モーメントと同じ向きであるため極めて大きい曲げ応力が生じ耐荷力は低下し、逆方向に水平力を加えると一定載荷モーメントを解放するため耐荷力は増加する。

(3) 最大強度の大きいもののほうが等価粘性減衰定数の値が小さいという結果より、部材の塑性域での耐震性を考える場合、耐荷力だけでなく塑性変形によるエネルギーの消費をも考慮に入れなければならない。

(4) 2層フレーム道路橋モデルの桁部材の剛性を大きくすると、2層部分での水平変位量は剛性が小さい場合よりも少ない。また桁部分でも塑性変形は小さいために、1層橋脚部分でのみエネルギー吸収が大きくなり、変形は増大する。

(5) 2層フレーム道路橋モデルの桁部分の剛性を大きくすると、桁部材が回転変位を拘束するために、供試体上端部でのモーメントは大きくなる。従って供試体の上端部および下端部の両端で逆対称のモーメント分布となり、供試体の両端での曲率が大きくなる。

(6) 2層フレーム道路橋モデルの桁部材の剛性が小さい場合には、水平変位は大きくなり、部材端の曲げモーメントは小さくなる。従って1層柱部材基部には水平力によるモーメントが大きくなるために、供試体上端部においてのみ曲率が大きくなる。

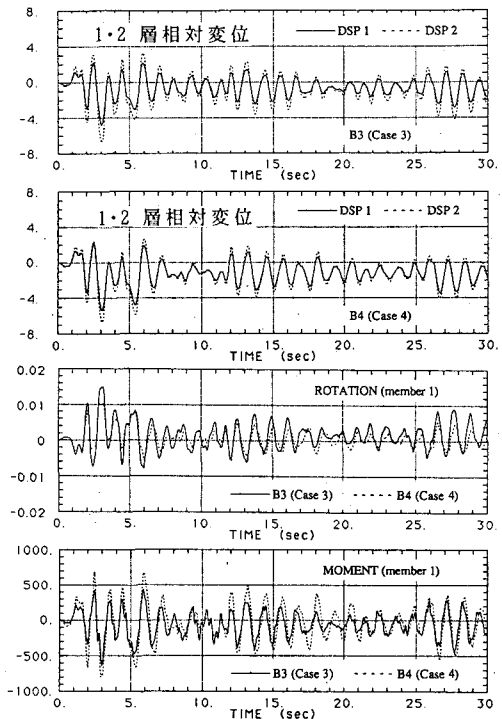


図10 時刻歴

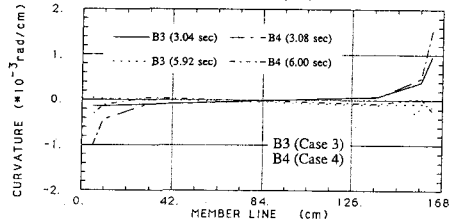


図11 最大変位時における曲率分布

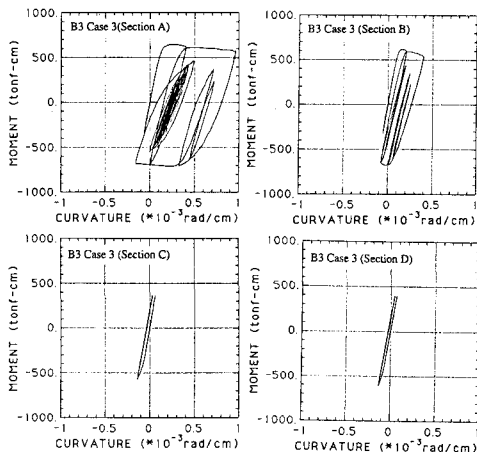


図12 モーメントー曲率 (ケース3)

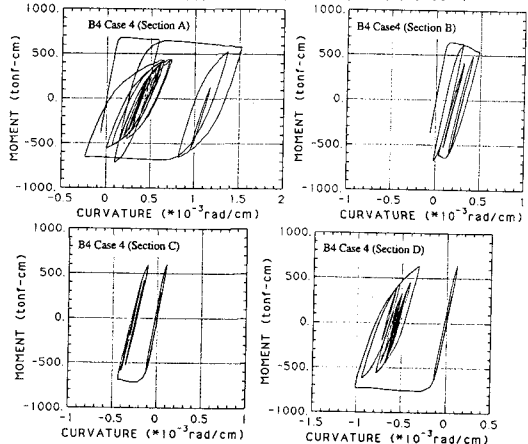


図13 モーメントー曲率 (ケース4)