

負モーメントをうける合成桁の疲労破壊に関する研究

大阪大学工学部 ○ 前田 幸雄
大阪大学大学院 梶川 靖治

1. まえがき

プレストレスしない連続合成桁の静的特性はこれまで種々の実験的研究¹⁾によってほぼ明らかにされつつあるが、繰返し動的疲労荷重のもとにおける挙動や破壊強度については研究発表²⁾が少なく、特に負モーメント領域に重点をおいた合成桁の研究は極めて少ない。本研究はすれ止めにスタッド・ジベル及びブロッツ・ジベルを用いた負モーメントをうける単純支持合成桁及びブスタッド・ジベルを用いた連続合成桁の疲労実験を行ったもので、その結果引張をうけるコンクリート床版のひびわれ、引張フランジの疲労破壊、すれ止めの疲労破壊などについて興味ある特性が明らかにされた。特に、単純桁の実験では、押し板き疲労試験において観察されるようなスタッドのせん断疲労破壊は見られず、スタッドが取り付けられた引張フランジに疲労亀裂が生ずることが見出された。かかる現象はこれまで報告されたことのない極めて特色あるものである。本論文では実験の内容、結果及び考察について特色のある点に主眼をおいて報告する。

2. 実験目的、試験体及び試験方法

2.1 単純桁及び連続桁の疲労試験

(1) 実験目的 本実験の主たる目的は、単純桁では合成桁が負モーメントを受ける場合、床版のひびわれ・桁の応力変形などがいかなる性状を示し、またそれらが繰返し載荷によりいかに変化するか、及び桁の疲労破壊をみることなどであり、連続桁では負モーメント域にスタッドを配置した場合としない場合とで桁の疲労性状にいかなる差が生ずるかを調べることなどである。

(2) 試験桁 試験桁は支持状態、載荷位置、軸方向鉄筋量、

表-1 試験桁の種類

Beam	Longitudinal Reinforcement Diameter	No.	Spacing of Shear Connectors (cm)	Type of Test Beam
E 1	D 13	6	40	Simple Beam
E2-1	D 16		30	
E2-2			60	
E2-3			10	
E 3	D 19		20	
H 1	D 16	30		
H 2		45		
G 1	D 13	4	20*	Continuous Beam
G 2			20**	

* Spacing of stud in negative moment region is at 32 cm.

** Stud is not spaced in negative moment region.

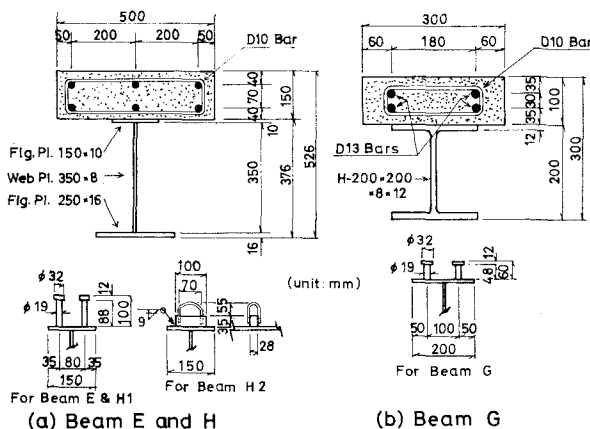


図-1 試験桁の断面形状

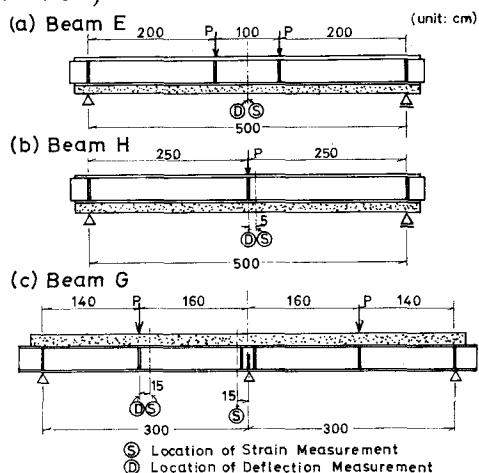


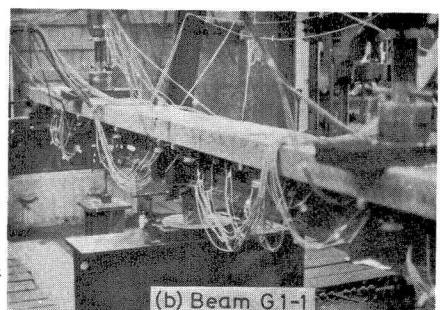
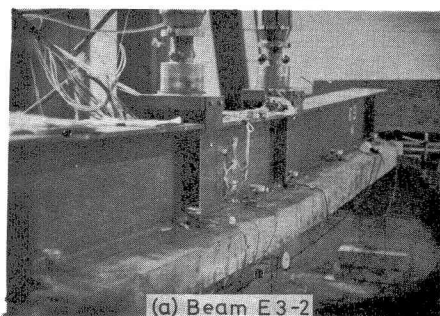
図-2 載荷位置

すれ止めの種類及び間隔などの相違により表-1のごとく分類され、それぞれ同一の桁を2本ずつ合計18本作製した。試験桁の断面形状寸法、すれ止めの詳細を図-1及び図-2に示す。

- (3) 材料試験 試験桁の使用鋼材はすべてS5-41(鋼材), SD30(鉄筋)である。鋼材鋼材の引張試験片による試験結果は平均降伏点応力度が2850 kg/cm^2 (E, H桁), 2650 kg/cm^2 (G桁)であり、平均引張強さは4530 kg/cm^2 (E, H), 4350 kg/cm^2 (G)であった。また、鉄筋のそれらの値はそれぞれ3690 kg/cm^2 , 5290 kg/cm^2 であった。床版には普通骨材コンクリートを使用し、その標準供試体の圧縮強度、引張強度、ヤング係数の平均値は、それぞれ、300 kg/cm^2 , 27 kg/cm^2 , $2.67 \times 10^5 \text{ kg}/\text{cm}^2$ であった。

- (4) 試験方法 どの試験桁も、まず最初に、与える荷重の上限値まで静的に載荷し、その後繰返し載荷に移り、疲労試験の途中適宜繰返し載荷を止め、静的に上限値まで載荷して、試験桁のひずみ、たわみ、その他を測定した。荷重はローゼンハウゼン型疲労試験機の油圧ジャッキを用いて図-2に示す位置に与えた。載荷状況を写真-1に示す。

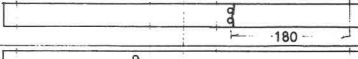
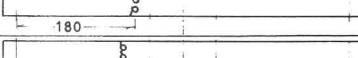
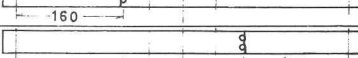
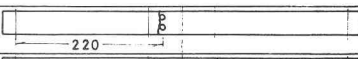
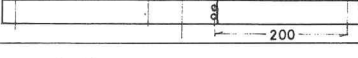
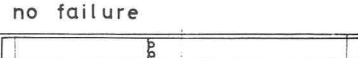
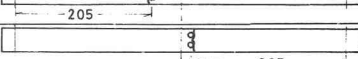
写真-1 載荷状況



2.2 スタッド溶接部の硬度測定試験

S541-200×200×10 mmの鋼板の中央に $\phi 19 \times 100^{\text{mm}}$

表-2 実験結果の概要(単純桁)

Test Beam	Repeated Load P (ton/jack)		Flexural Stress in Tension Flange (kg/cm^2)			Average Shear Stress (kg/cm^2)			Number of Cycles to Failure ($\times 10^4$)	Total Number of Cycles ($\times 10^4$)	Location of Fatigue Failure in Tension Flange
	max	min	max	min	range	max	min	range			
E 1-1	4.80	2.00	800	330	470	300	130	170	—	200	no failure
E 1-2	4.80	2.00	800	330	470	300	130	170	—	300	no failure
E 2-1-1	7.48	2.52	890	270	620	450	150	300	125	131.6	
E 2-1-2	6.54	2.52	770	270	500	390	150	240	222.6	222.6	
E 2-2-1	6.54	2.52	680	240	440	780	300	480	75	75	
E 2-2-2	5.60	2.34	580	220	360	670	280	390	196	203.8	
E 2-3-1	5.60	2.34	730	280	450	110	50	60	—	200	no failure
E 2-3-2	9.35	4.67	1250	600	650	190	90	100	133	133	
E 3-1	7.80	2.80	830	260	570	380	140	240	145.8	145.8	
E 3-2	6.70	2.80	700	260	440	320	140	180	—	222.7	no failure
H 1-1	9.07	2.00	588	93	495	272	60	212	280	289.5	
H 1-2	13.00	3.00	995	192	803	390	90	300	90	100	
H 2-1	11.34	2.00	828	106	722	110	19	91	—	293.2	no failure
H 2-2	23.00	4.00	1728	261	1467	224	39	185	22	26	

のスタッド・ジベルを溶接し(溶接条件 1500 A, 40 C/s), ビッカース硬度試験機(荷重 10 kg)を用いて溶接金属熱影響部, 母材の硬度を測定した。

3. 試験結果及び考察

3.1 単純桁(E及びH桁)

表-2に実験結果の概要を示す。試験桁の疲労破壊はいずれも引張フランジに生じたが, この疲労破壊の評価については 3.4 において述べる。

(1) 床版のひびわれ性状 床版のひびわれは, いずれの桁においても, 最初の静的載荷と繰返し載荷の初期(数千回程度)に1本の線となって床版全幅(橋軸と直角方向)にわたるものが数多く生じた。5~10万回位までは新しいひびわれの発生もかなり見られたが, それらは床版の表面または側面の一部にヘアフラック状に生じるものが多く, これ以後の繰返し数の増加に対してはその発生頻度がひじょうに少なくなり, 最終的には10~20 cm 間隔で桁の中央部3 m位の間に多く分布した。

次に, 表-3に床版両側面(床版表面より2 cmの位置)でコンファトゲージ(精度 1/1000 mm)により測定した最大ひびわれ幅の値を示す。

表中の値は最初の静的載荷時と疲労試験途中

において測定した値の中で最も大きなものである。一般に鉄筋コンクリート床版の最大ひびわれ幅は鉄筋比の増大とともに小さくなるといわれているが, 今回の実験では表-3に示したように最初の静的載荷時の値をみれば確かにそのような傾向もみられるが, 疲労試験に移ればこの傾向は幾分薄れるようである。また, ひびわれ分布についてもそうであったが, すれ止めの種類・間隔などの相違が最大ひびわれ幅に及ぼす影響は明瞭に現われなかった。

さらに, 最大ひびわれ幅は図-3に見るごとく, いずれの桁においても疲労試験の初期に大きな変動があるが, 10万回以後はほぼ一定の値をとり, 繰返し数の増加とともに著しく増大していくようなことはなかった。

(2) 桁の応力・変形状

桁のひずみ分布及びたわみの測定結果の一例を図-4及び図-5に示す。

表-3 最大ひびわれ幅

Beam	Maximum Stress in Reinforcement (kg/cm ²)	Maximum Crack Width (mm)		Ratio of Reinforcement (%)	Spacing of Shear Connectors (cm)
		Initial Loading	During Fatigue Test		
E1-1	1200	0.223	0.261	1.02	40
E1-2	1200	0.255	0.197		
E2-1-1	1600	0.202	0.188	1.58	30
E2-1-2	1400	0.284	0.237		
E2-2-1	1400	0.205	0.187		60
E2-2-2	1200	0.221	0.196		
E2-3-1	1200	0.192	0.219	2.28	10
E2-3-2	2000	0.318	0.336		
E3-1	1400	0.187	0.214	2.28	20
E3-2	1200	0.164	0.168		
H1-1	1200	0.122	0.152	1.58	30
H1-2	1700	0.274	0.284		
H2-1	1500	0.129	0.175		45
H2-2	3000	0.308	0.303		
G1-1	1200	0.236	0.236	1.69	32
G1-2	1700	0.161	0.137		
G2-1	1050	0.355	0.352		No Spacing
G2-2	1400	0.242	0.208		

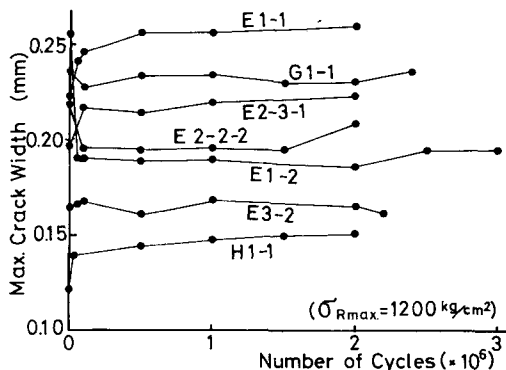


図-3 最大ひびわれ幅と繰返し数

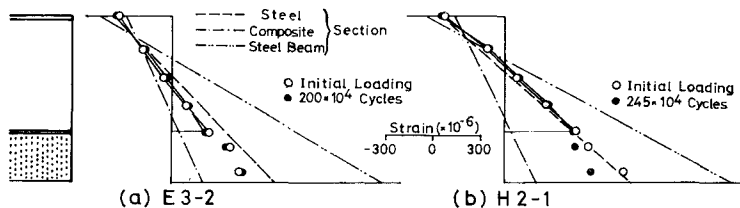


図-4 ひずみ分布の一例

図中、破線は鋼断面(鋼桁断面に床版中の軸方向鉄筋を算入した断面)、一点鎖線は合成断面($\eta=7$)、二点鎖線は鋼桁断面のみとして、それぞれ計算した値である。図-4において、鋼桁のひずみ分布はいずれも鋼断面としての計算値に最も近く、また、鉄筋のひずみも繰返し数の増加により多少変動があるがほぼ計算値に近い値となっている。次に、図-5に示した荷重-たわみ曲線において、繰返し載荷初期に大きな残留たわみを生ずるが、たわみの変化率は鋼断面としての計算値に最も良く一致している。また、繰返し数の増加によってもこの傾向は変わらず、軸方向鉄筋は鋼材に良く協力していることがわかる。

以上述べたようなことから、プレストレスしない連続合成桁の負モーメント域におけるひずみ変形状は、桁自身またはその一部に疲労破壊を生じるまで、鋼断面としての性状を示すものと考えられる。

(3) 破壊状況 表-2中の図に示したごとく、疲労破壊した試験桁はいずれも引張フランジのスタッド溶接部またはブロックジョイント溶接部に疲労亀裂を生じ、すれ止め自身のせん断疲労破壊は見られなかった。この疲労亀裂の様子は写真-2に見るごとくである。

3.2 連続桁(G桁)

表-4に示した一定繰返し荷重のもとでの疲労試験の結果、各桁は不完全合成桁の性状を示し、疲労破壊した桁ではいずれも変曲点付近のスタッドの疲労破壊がみられ、先の単純桁の実験においてみられたような負モーメント域における引張フランジの疲労破壊はみられなかった。これについての詳細は(3)において述べる。

(1) 負モーメント域における床版のひびわれ性状

最大ひびわれ幅は表-3に示したように、単純桁の結果と比べれば、G1-2桁を除きいずれも多少大きくなっている。これは両者のひびわ

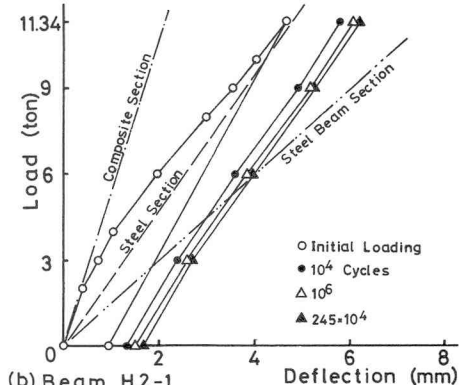
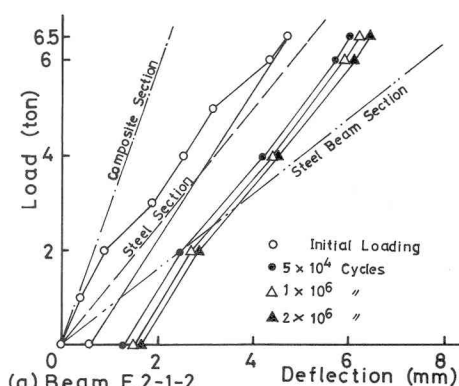


図-5 荷重-たわみ曲線
写真-2 破壊状況

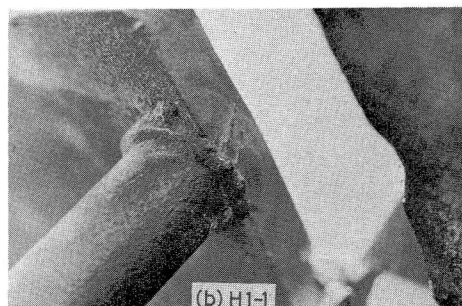
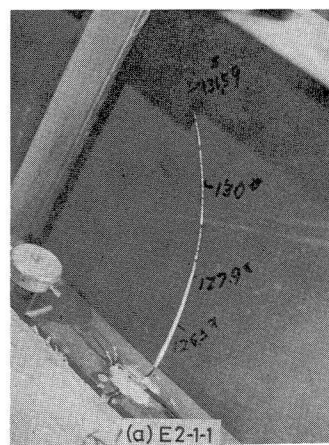


表-4 G桁繰返し荷重

Beam	Load $P^{(ton)}_{\{ack\}}$
G 1-1	max. 10.71
G 2-2	min. 4.46
G 1-2	max. 15.0
G 2-1	min. 6.0

れの分布状態の違いに大きな原因があったものと思われる。すなわち、G桁では、不完全合成の影響もあって、床版を1本の線となって横切るひびわれの数が少なく、また、その間隔も30~40cmと広く、ひびわれ幅が分散する割合が少なかったためと考えられる。また、最大ひびわれ幅の繰返し数に対する変化は単純桁の場合と同様繰返し数とともに増大していくことはなく、ほぼ一定の値を保つことがわかった。しかし、負モーメント域のスタッドの有無によりひびわれ性状に現われる影響は、桁によるばらつきが大きく、今回の実験では明確に観察されなかった。

(2) 桁の応力性状 荷重点及び中間支点付近の桁断面のひずみ分布の一例を図-6に、橋軸方向の鋼桁各点におけるひずみ測定値から求めた床版に働く軸力分布を図-7に示す。正モーメント域のひずみ分布(図-6(a))はいずれも不完全合成桁の性状を示しているが、負モーメント域のスタッドの有無による差は顕著ではない。また、負モーメント域のひずみ分布(図-6(b))において、鉄筋のひずみは両者とも鋼けたのひずみ分布上についていないが、G1-1に比べればG2-2の方がかなり小さく、負モーメント域のスタッドの有無による差が明瞭に現われている。

次に、図-7の軸力図において、正モーメント域(端部支点とE点間)では、G1-2、G2-1とも鋼桁とコンクリートとの付着力の低下、スタッドの疲労などにより、繰返し数の増加とともに徐々に減少する傾向がみられる。しかし、変曲点付近(E-F間)及び負モーメント域(F-F間)では、両者の間にかなりの差が見受けられる。すなわち、負モーメント域にスタッドを配置したG1-2桁では変曲点付近の軸力はほぼ0近くとなっており、負モーメント域における軸力の繰返し数に対する変動も少ないが、G2-1桁では負モー

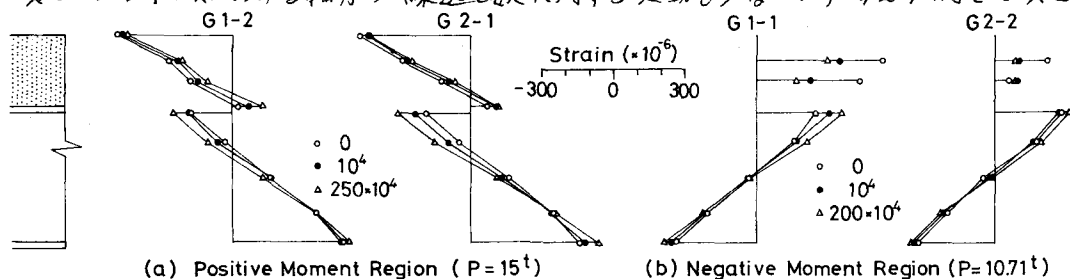


図-6 ひずみ分布

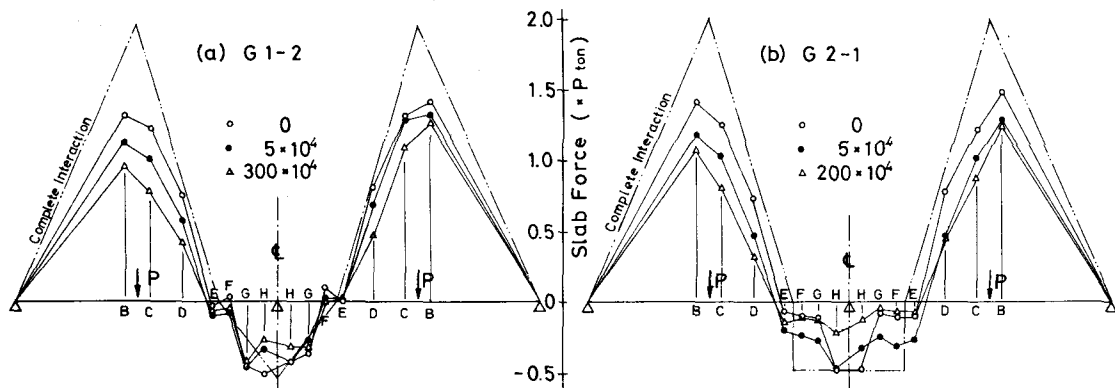


図-7 軸力図

ント域にスタッドが無いため、変曲点付近のスタッドの疲労破壊により、繰返し数に対する軸力の変動が大きく現われ、また、この領域の鉄筋に生ずる引張力が変曲点付近の床版にも作用しているのがみられる。

(3) 破壊状況 疲労試験中におけるスタッドの疲労破壊の時期は図-8に示す位置に貼付したストレンゲージにより、スタッド根元のフランジに生ずる局部ひずみを測定し、この値の繰返し数に対する変化状況をもとにして推測した。その測定結果の一例を示したのが図-9である。この図において、ある繰返し数を経過すると局部ひずみの値が減少し始め、さらに疲労試験を続けると、ほぼ一定の値となるものが現われる。このような変化を示すスタッドでは、減少し始める時点でスタッドの根元に疲労亀裂が生じ、ほぼ一定となる時点でずれ止めとしての機能を失ったものと考えることができる。このような考え方に基き連続桁の各モーメント領域におけるスタッドの疲労破壊の時期を推測し、まとめたのが表-5である。また、この測定結果から、スタッドの疲労破壊はまず変曲点付近のスタッドにおいて生じ、繰返し数の増加につれて徐々に荷重点のスタッドへと進んでいくこと、さらに負モーメント域にスタッドを配置することにより、配置しない場合に比べて、変曲点付近のスタッドの疲労破壊の時期を若干遅らせることができるということなどが判明した。

次に、表-5に示した実験結果を縦軸にせん断応力振幅をとったS-N線図上に描けば、図-10のようになる。図中、実線はリーハイ大学で行なわれた押し抜き疲労試験結果であり、一点鎖線はテキサス大学で行なわれた桁試験による結果である。⁴⁾ 本実験結果は他の実験結果に比べ多少低い範囲にばらついているが、これは実験方法・破壊時期の判定方法などの相違、及び本試験桁の不完全合成性などの影響によるものではないかと考えられる。

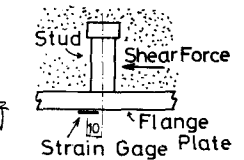


図-8 局部ひずみ測定位置

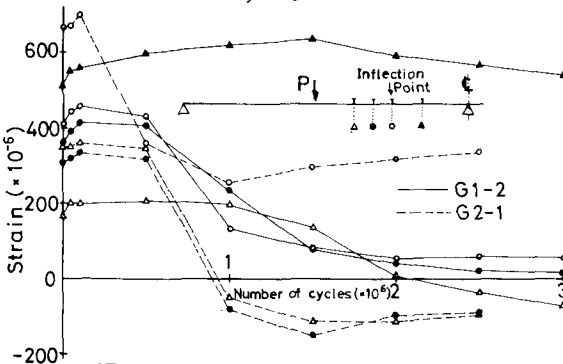


図-9 フランジのスタッド溶接部における局部ひずみ

表-5 G桁実験結果

Location	G1-1		G1-2		G2-1		G2-2	
	Stress Range kg/cm ²	Cycle Life x 10 ⁶	Stress Range kg/cm ²	Cycle Life x 10 ⁶	Stress Range kg/cm ²	Cycle Life x 10 ⁶	Stress Range kg/cm ²	Cycle Life x 10 ⁶
Exterior Positive Moment Region	300	2.38 +	440	3.00 +	460	3.24 +	320	3.40 +
Interior Positive Moment Region	480	2.38 2.38 +	680	1.00 2.00	860	1.00	610	3.40
Negative Moment Region	260	2.38 +	380	3.00 +	—	—	—	—

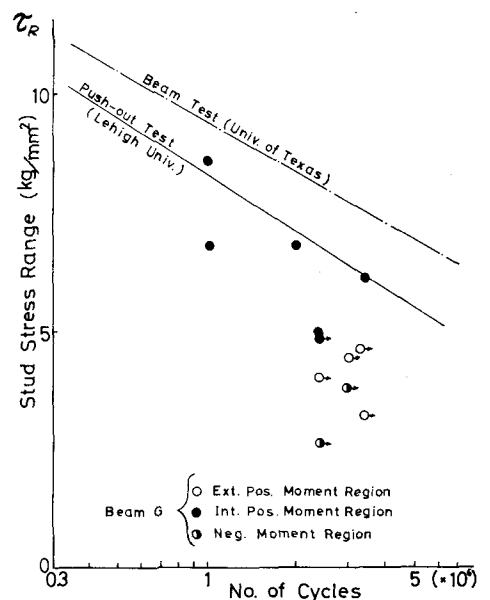


図-10 せん断応力によるS-N線図

さらに、表-4に示した一定繰返し荷重のもとでの実験では、負モーメント域において単純桁の場合のような引張フランジの疲労破壊は見られなかったが、G1-2桁において300万回以後10万回毎に段階的に上限荷重を上げて試験を続けたところ、図-11に示すように、中間支点に最も近いスタッド溶接部引張フランジに、単純桁の場合と同様の疲労亀裂が生じた。図-11は疲労試験終了後床版コンクリートを取り除いてスタッドの状態を観察した結果を示したものであり、写真-3は破壊状況の一例を示したものである。

3.3 スタッド溶接部の硬度

試験片のマクロ写真を写真-4に、硬度測定結果の一例を図-12に示す。図-12に見るごとく、硬度の最高値が230前後であって、特にスタッドまたは母材への疲労核の進展に硬度が影響したとは思われなかった。このため、E桁の引張フランジの疲労破壊の原因は次に述べるようにスタッドにかかるせん断力の影響が大きいのではないかと考えられる。

3.4 疲労亀裂発生の評価

表-2に示した結果を引張フランジ上縁の応力振幅(最大応力と最小応力の差)によってS-N線図上に描けば、図-13に示すごとく、実験値のばらつきがひどいことがわかる。

そこで、筆者らはスタッドを用いた桁について、図-14に示すようなスタッド根元部の応力状態に注目し、主応力理論

写真-3 G桁破壊状況

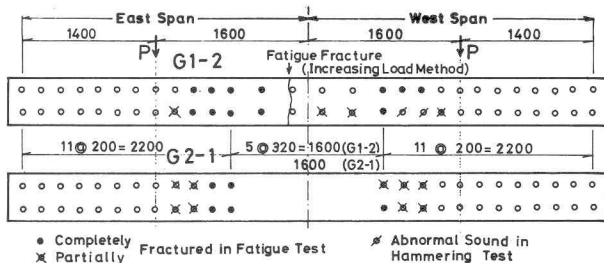
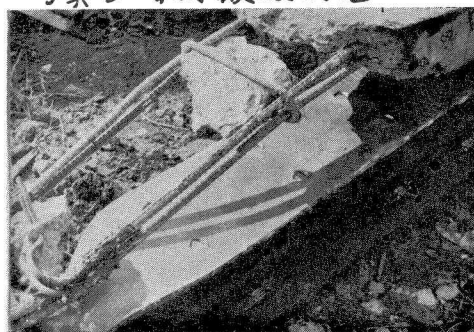


図-11 スタッド破壊状況

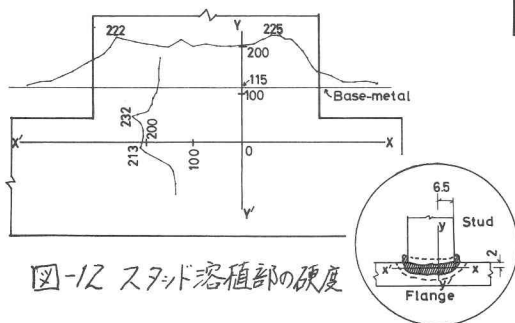


図-12 スタッド溶接部の硬度

写真-4 マクロ写真

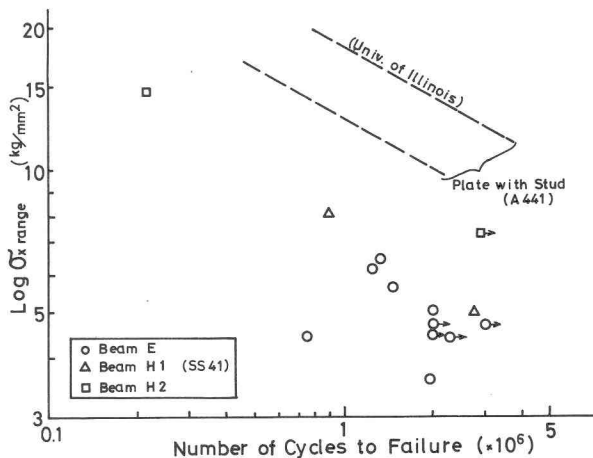
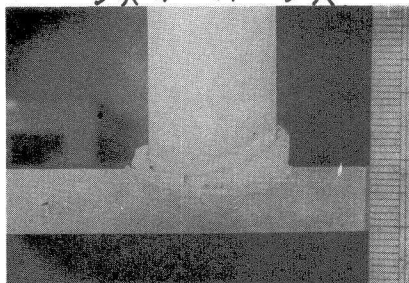


図-13 フランジ応力によるS-N線図

によって実験結果を評価することを試みた。ただし、

図中のスタッドに生ずる曲げ応力

σ_y については、そ

の算定方法が未だ十分でないので、一応ここでは考慮に入れず、フランジ応力 σ_x とせん断応力 τ_{xy} のみを組み合わせた主応力を考えた。しかし、 σ_y は疲労亀裂の発生に重大な影響を及ぼすものと考えられるので、現在その適当な解析方法を検討中である。

このような主応力の応力振幅により、実験結果をS-N線図上に描いたのが図-15である。この図に見ると、実験結果のばらつきはじょうに少なくなり、これから引張フランジの疲れ限度はおおよそ $500 \sim 550 \text{ kg/cm}^2$ 位であることがわかる。図中、破線で示したS-N曲線はイリノイ大学で行なわれた、スタッドを溶接した鋼板の引張試験片による疲労試験結果のばらつき範囲を示したものである。本実験結果

をこれと比較すると、両者の実験方法・使用鋼材などの相違を考慮に入れても、その時間強さにはかなり大きな差があるのがみられるが、本実験結果において σ_y をも含めた主応力を考えれば、その差はもう少し小さくなるのではないかと思われる。

また、ブロックジベルを使用したH2桁についても同様な考え方により、結果を整理して図-15上にプロットした。試験数が少ないので明確なことは言えないが、スタッド・ジベルの場合よりも多少疲労強度が大きくなるのではないかと予想される。

次に、引張フランジの疲労破壊は主応力振幅の大きさだけでなく、その作用面方向も重要な要因になると考えられるので、主応力振幅とその作用方向（フランジ上面からの角度： φ ）を図示したのが図-16である。この図から判断すれば、スタッド根元に生じた疲労亀裂がフランジ母材の熱影響面に沿って進展しスタッドのせん断疲労破壊を引き起こすか、あるいはフランジ面にほぼ直角に進展し引張フランジの疲労破壊を引き起こすか、という両者の限界角は $\varphi = 35^\circ \sim 45^\circ$ の間にあるものと思われる。

また、今回の連続桁の一足繰返し荷重のもとでの実験では負モーメント域の引張フランジに疲労亀裂の発生を見なかったが、これは試験体の合成作用の不完全性にその原因があったものと考えられる。すなわち完全合成として単純桁のときと同様に主応力振幅

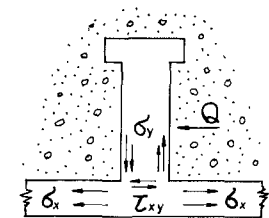


図-14 スタッド根元部の応力状態

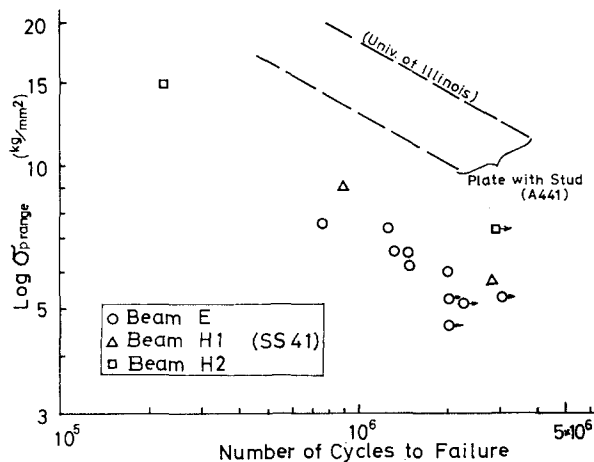


図-15 主応力によるS-N線図

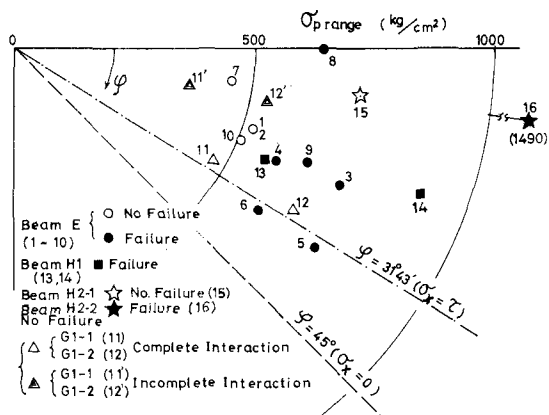


図-16 主応力振幅とその作用方向

及びその角度を求めると、図-16中の番号11,12となるが、測定ずれをもとにして不完全合成として計算すれば、それぞれ番号11',12'となり、共に限界主応力振幅内にあることがわかった。

4. 結 論

- (1) 負モーメントを受ける合成桁の最大ひびわれ幅は ひびわれの分布状態、鉄筋比、鉄筋の作用応力、その他種々の要因と密接な関係があるものと思われるが、今回の単純桁の結果から判断すると、例えば、最大鉄筋応力が 1200 kg/cm^2 程度のときは鉄筋比で2%位の軸方向鉄筋が床版内に配置されていれば、繰返し荷重に対しても最大ひびわれ幅を 0.2 mm 程度に収めることができるものと思われる。
- (2) 合成桁が負の繰返しモーメントを受ける場合、すれ止め またはそれが取り付けられたフランジが疲労破壊を起こさない限り、200万回以上の繰返し載荷に対しても軸方向鉄筋は鋼桁に十分協力し、鋼断面としての応力・変形性状を示す。
- (3) すれ止めとしてスタッド・ジベルを用いた合成桁が負の繰返しモーメントを受ける場合、その引張フランジの疲れ限度は主応力振幅で おおよそ $500 \sim 550 \text{ kg/cm}^2$ 、またその作用方向ではフランジ表面から大体 $30^\circ \sim 45^\circ$ の間に限界があるものと考えられる。
- (4) すれ止めとしてブロック・ジベルを用いた場合、床版のひびわれ性状及び桁の応力・変形性状はスタッドの場合とほとんど変わらないが、引張フランジの疲労強度はスタッドを用いるのに比べ若干高くなるようである。
- (5) スタッド・ジベル溶植時の熱影響による硬度の上昇が、引張フランジの疲労破壊に大きく影響したとは考えられない。
- (6) プレストレスしない連続合成桁では負モーメント域における鋼桁と軸方向鉄筋との協力程度の向上、変曲点付近のすれ止めにかかるせん断力の軽減などの効果から考えれば、負モーメント域にもすれ止めを配置する必要がある。
- (7) 連続桁の実験では主に変曲点付近のスタッド・ジベルのせん断疲労破壊がみられたが、G1-2桁の結果をみると、やはり負モーメント域の引張フランジの疲労破壊の可能性のあるものと思われる。

5. あとがき

負モーメントを受ける合成桁及びプレストレスしない連続合成桁の負モーメント領域における床版のひびわれ性状、鋼断面としての応力・変形性状、引張フランジの疲労破壊とスタッド溶植部の硬度との関係、引張フランジ疲労破壊の主応力による疲れ限度と作用角度の評価などが明らかにされたが、今後の問題としてスタッド自身に生ずる曲げ応力がフランジの疲労破壊に及ぼす影響、すれ止めの種類・寸法・配置 従って合成作用の度合と疲労亀裂発生との関係などに研究を進めたい。

参考文献

- 1) J.H. Daniels and J.W. Fisher, "Static Behavior of Continuous Composite Beams", Fritz Eng. Lab. Rept. No. 324.2, No. 324.3, March 1967
新大正橋模型実験報告書(部分合成桁の静的実験), 大阪市大橋梁工学研究室, 1967
鋼道路橋のプレストレスしない連続合成桁設計施工要綱(案), 関西道路研究会, 道路橋調査研究委員会, 昭和 43.6
- 2) J.H. Daniels and J.W. Fisher, "Fatigue Behavior of Continuous Composite Beams", Fritz Eng. Lab. Rept. No. 324.1, Dec. 1966
- 3) A.A. Toprac, "Fatigue Strength of $\frac{3}{4}$ -inch Stud Shear Connectors", Highway Research Record No. 103, Highway Research Board, 1965
- 4) R.G. Slutter and J.W. Fisher, "Fatigue Strength of Shear Connectors", Highway Research Record No. 147, Highway Research Board, 1966
- 5) K.A. Selby, J.E. Stallmeyer and W.H. Munse, "Fatigue Tests of Plates and Beams with Stud Shear Connectors", Structural Research Series No. 270, Illinois, July 1963