

## 鋼とコンクリート・プレファブ部材との結合に関する2, 3の実験

日本国有鉄道構造物設計事務所 田 島 二 郎

" 阿 部 英 彦

" 本 田 修 一

" 中 野 昭 郎

### 1. はじめに

コンクリート・鋼合成構造の代表である合成桁は国鉄でも、数多く採用されて来たが、鉄道橋としてシベルの疲労強度の確認が必要なので、一連の疲労実験を行なった。また、急速施工という面で、プレキャスト コンクリートスラブを鋼桁上に高力ボルトで取付けたもの、あるいは接着材を用いたものなどについても静荷重試験、および疲労試験を行なった。同様の目的で、鋼梁とコンクリート柱のラーメン構造も考えられ、その基礎として、鋼梁とコンクリート梁をP C鋼棒で接続したものの実験も試みた。その他、これに付随した実験と併せて、これらの概況を説明する。

### 2. 合成桁の実験

主として合成桁のコンクリート スラブと鋼桁を連結するせん断力伝達部の疲労程度を求めるために、一連の模型実験を行なった。試

験体は図-1に示すように支間4.0 m, 幅80 cmのコンクリート スラブで試験時のコンクリート強度は400~500  $\text{Kg}/\text{cm}^2$ であった。種類は表-1, および図-2に示すとおりである。荷重は中央近辺に1 mの間隔をおいて2点載荷とした。

静的な実験は荷重の増加とともに、各部のひずみ、スラブと鋼桁のずれ、桁のたわみ等の変化を計測し、破壊に至らしめた。

疲労実験では50 tのローゼンハ

ウゼン・ジャッキ型疲労試験機2個を用いて、250回/分で繰り返し荷重を与えた。各疲労試験に先立ち静的に荷重を一たん0にもどしながら段階的に増加し、予定の最高荷重まで載荷した。その間要所のずれ、ひずみ、たわみを測定し、繰り返し荷重をかけてからは一定回数ごとにこれらの測定を

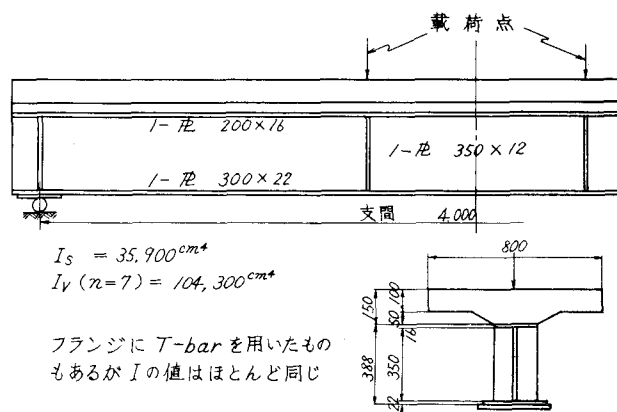


図-1 合成桁実験用模型

表-1 合成桁実験種類および個数

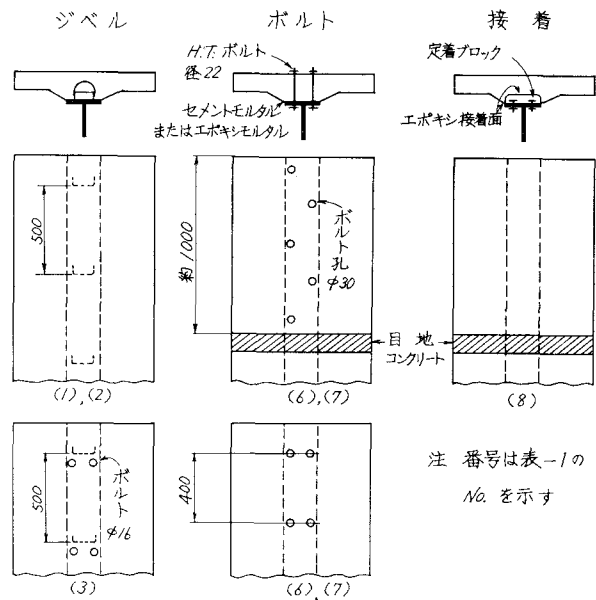
| No. | 試験体の種類                                                      | 試験体個数 |        |
|-----|-------------------------------------------------------------|-------|--------|
|     |                                                             | 静的荷重  | 繰り返し荷重 |
| 1   | 標準ジベルの $1/2$ サイズ                                            | 1     | 2      |
| 2   | 同上、ただしフープ鉄筋のないもの                                            | 2     | 1      |
| 3   | 同上、ただしボルトを使用したもの                                            | 0     | 1      |
| 4   | 標準ジベルの $1/2\sqrt{2}$ サイズ ただし数は2倍                            | 0     | 2      |
| 5   | スタッド (2本並列、間隔25mm)                                          | 1     | 2      |
| 6   | プレキャスト コンクリートスラブを高力ボルトでセメントモルタルをはさんで鋼桁に締め付けたもの              | 4     | 6      |
| 7   | 同上、ただしセメントモルタルをはさむ代りにエポキシ モルタルをはさんだもの                       | 1     | 3      |
| 8   | 鋼桁の上に小さいコンクリートブロックをエポキシ モルタルと普通ボルトで取り付け、それにプレキャストスラブを接着したもの | 1     | 2      |

行ない、回数の増加とともにどのように変化していくかを調べ、原則として桁端におけるスラブと鋼桁のずれが一定値をこえた時、あるいは鋼桁の上下フランジの応力比がある値に達した時に合成効果が劣化したと判断して試験を中止した。

ジベル類でスラブと鋼桁を接合したものと、高力ボルトで取り付けたものとは性状が異なるので、これらを分けて説明する。

## 2・1 ジベル型合成桁

国鉄の合成桁の設計で標準的に用いているものの中で許容耐力20.8tのものを $1/2$ の大きさにして実験したのであるが、ジベルの割合に桁を丈夫にして、疲労実験ではジベルが壊れ



ることを想定した。この実験の場合各ジベルにせん断力が等分されるとすれば、ジベル1つあたりには丁度ほぼ1載荷点の荷重に等しい力が働いた事になる。

#### 静荷重試験

図-3のように桁端部のずれがたわみやフランジのひずみよりも顕著に荷重に対する非線型の関係を表わしているが、荷重を各段階で0にもどしつつ増加した場合のずれの残留値から判断すると荷重50～60t(1ジベル当り25～30t)あたりで降伏しはじめている。破壊はスラブの桁端近くの裏面でジベルのあるあたりに亀裂が入り、それが荷重とともに大きくなり、最後は載荷点付近のスラブに横断方向にわれが入って荷重が上らなくなった。しかし、それでも測定している範囲ではコンクリートスラブと鋼桁の重ね梁としての計算値に対しては未だ相当余裕があった。

ジベルはフープ鉄筋の切れたものはあるがジベルそのものはほとんど変形もなく、コンクリートが1:2～3位の傾斜でジベル前面でわれている。コンクリートが特に弱い場合にはジベル前面でクラッシュしたものもある。

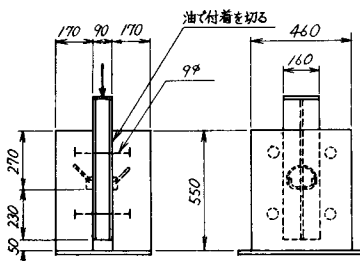


図-4 ジベル押抜き型供試体

#### 疲労試験

何が疲労による変状を最も早く知らせるかが問題であるが、たわみはすべてのジベルの変化の平均的なものを示すので余り適当でなく、上フランジと下フランジのひずみの比はわりあいによく示すが、最も顕著なのはスラブと鋼桁のずれである。図-5にその1例を示す。

繰り返し荷重によるジベル部の変化は一たんはじまると急激に進むようである。最後の方では、桁

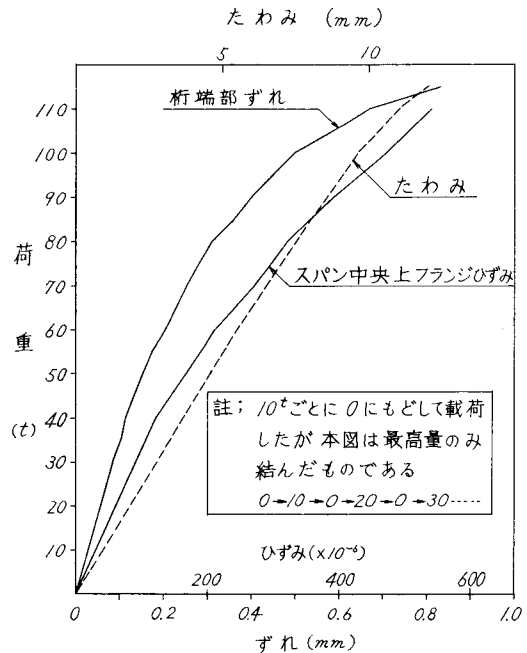


図-3 ジベル合成桁静試験

なお、ジベルそのものの性質を知るために図-4のようなジベルの押抜き試験も併せて行なったが、ジベルの形状は合成桁実験に用いたものと全く同じでコンクリート強度は $\sigma_{28} = 330 \text{ Kg/cm}^2$ 程度である。この実験も疲労実験の基礎データとしてとったのであるが、荷重を10t増すごとに0にもどした時の残留変位を見ると、50t(1ジベル当り25t)に達すると変位の増す率が大きくなるようである。最高荷重は4ケの試験体で92～106tにわたっている。

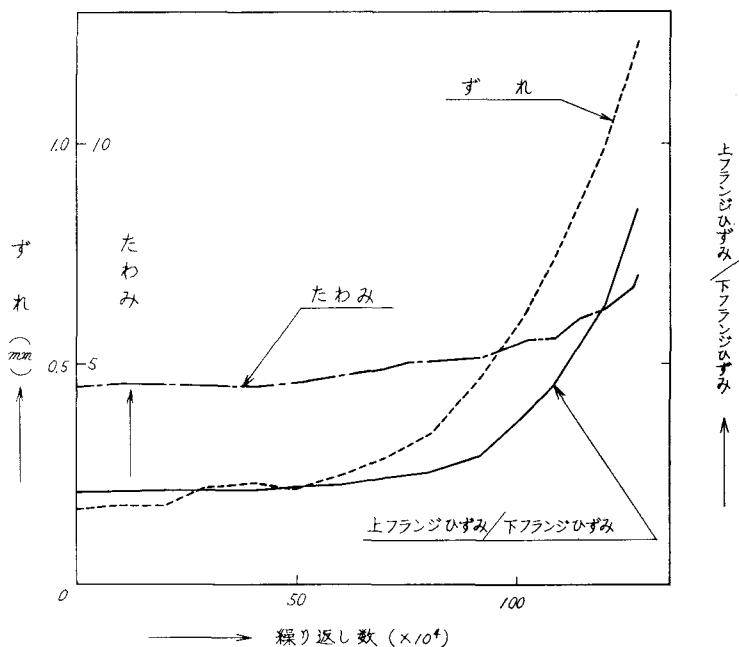


図-5 ジベル合成桁疲労試験

端でコンクリートと鋼桁が水平にズレるだけでなく、それと同じかそれ以上に口を開いたり、閉じたりする。これは中央付近に集中荷重をかけることにもよるらしいが、このような方向の力は、ジベルの疲労強度をさらに下げる効果をもつと思われる。

ジベル部の破壊状況は次の3種が認められた。即ち、高強度のコンクリートの場合には図-6 (a)のようにジベルの溶接ビード、あるいはジベル自身に疲労亀裂が入る。また、図-6 (b)のようにジベル

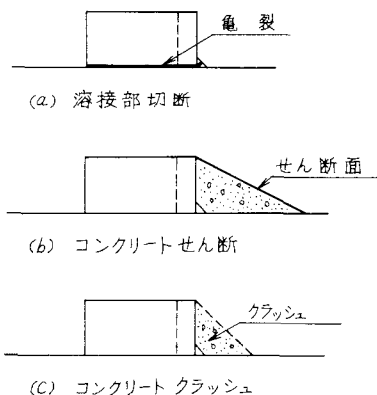


図-6 ジベル部の疲労破壊の種類

前面のコンクリートが斜めに切れる。コンクリート強度が低い場合には図-6 (c)のようにジベル前面のコンクリートがクラッシュする(粉になる)。ジベルについているフープ鉄筋はいづれも早目に切れているらしく、疲労に対しては余り抵抗力がないようである。そこで、フープのないものおよび、フープのないジベルとボルトを併用したものも試みた。後者のボルトは普通スパナで軽く締め、上下にはなれるのを防ぐ程度で摩擦には効かないことを予想した。また、ジベルの大きさの効果もあると思われるので、ジベル前面積が半分のを2倍の個数とつけたものも行なった。それぞれの結果は図-7に

ジベル1つ当たり（実験点5、6はジベル2つあたり）の疲労強度として同じS-Nグラフの上にプロットした。

押抜き試験の結果も図-7に示したが、押抜き試験が2通りあるのは、はじめ2体について試験したところ左右のコンクリートブロックが外側に倒れる傾向があったので、あとの6体はコンクリートを打つ時に左右の上部を2本の鉄筋で連結した。鋼フランジと摩擦

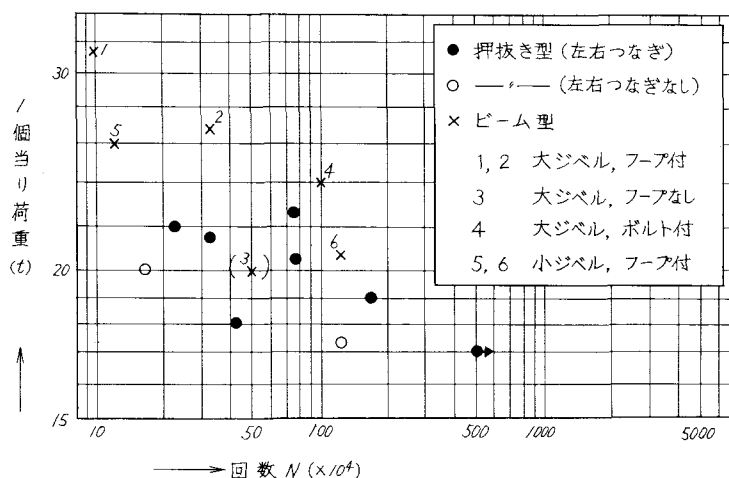


図-7 ジベルのS-N図

が生じる程の事はないと考えられるが、左右を結んだものの方が一般に強い傾向を示すようである。図-7で実験点4のフープなしのジベルとボルトを併用したものはやはり強くなっている。試験結果ではボルトも大部分切れてしまっているが、スラブの浮上りを防ぐことはある程度の摩擦とともに効果があるようである。実験点3のフープなしはフープのないことが強度の低い原因のひとつかもしれないが、たまたま、コンクリートが悪く強度が所要の半分位で、ジベルは全く変状がなかった特別なものである。

押抜き試験の結果と比較するとそれぞれバラツキはあるが、まず、ビーム試験の方が押し抜き試験より高い値を示す傾向があり、S-N線の傾斜は大体同じである。この結果によれば、ビーム試験は左右をつないだ押抜き試験の結果で近くてしかも安全側の値を得ることができるといえる。

国鉄の現行の計算法によれば、ジベルの許容耐力は20.8tであるが、今度の実験の結果では、静的な耐力は $25t \times 4 = 100t$ （実物は面積が4倍）、200万回の疲労に対する耐力は $17.5 \times 4 = 70t$ と判断されるので、現行のものは相当強い事になる。しかし安全率に関しては他と関連して決める問題である。

## 2.2 スタッド型合成桁

国鉄では鉄道橋としての合成桁にはスタッドをまだ用いていないが、昭和38年の合成桁に関する示方書案に基いて、 $\phi 19 \times 100$ のスタッドの許容耐力を計算すると $\sigma_{28} = 300 \text{ Kg/cm}^2$ として、1本当たり1.65tとなる。ゆえにジベル型合成桁の1つのジベルに匹敵する本数は3.2本となるが、切上げて4本とした。

### 静的試験

ジベルの時に較べて静的な試験では、たわみ、フランジ応力、桁端のずれのいずれから見てもわづ

か剛度が下がっていた。荷重の増加による種々の測定値の変化を見ると、明瞭に降伏点を示すものは少ないが、スラブと鋼桁との残留すべりが50 tをすぎて明らかに現われはじめている。

140 t 近くまで荷重を増しても、まだ重ね梁には至らず、スラブの載荷点の裏辺りに横断方向に、また、スラブ上面の中央に1本縦にわれが入った。桁端のスタッド1本が切断された他は、スタッドは5~10 mm程度曲っただけであった。

### 疲労試験

シベル試験の時と同様に、ある繰り返し数をこえると急にスラブと鋼桁とのずれが増してくる。桁端でスラブと鋼桁との間で口が開閉することもシベルの場合と似ている。スタッドは鋼桁母材の熱影響部で掘られるようにとれている。また、桁端の方が先に破壊したようである。

図-8は今回の実験および赤尾教授(大阪工業大学)の行なった押抜き型・スタッド疲労試験の結果を併記したものである。赤尾教授の実験中、白丸は低い値であるが、冷間加工のもので、黒丸の方が標準であると見てよい。ビーム型の実験値は全スタッドが均等にせん断力を負担すると仮定したのであるが、押抜き型の値に較べて、高い値を示している。しかし、傾斜を考慮すると200

万回の近辺では押抜き型の値に対して余り余裕がない。200万回の程度を1本あたり4 tとし、静荷重時の許容耐力を1.65 tとすれば、シベルの時に較べて安全率が低い。

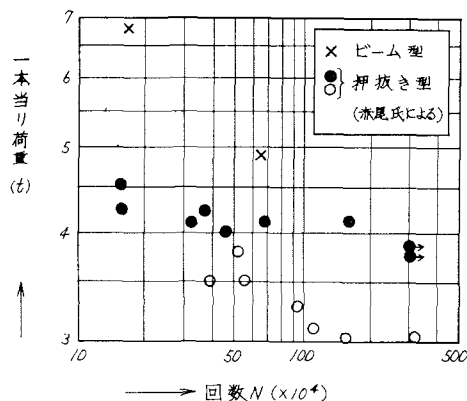


図-8 スタッドの S-N 図

### 2・3 プレキャスト版高力ボルト締め合成桁

約1 mの長さのコンクリート ブロックに分けて各々を4~5本の高力ボルトで締め付け、目地に高強度のコンクリートを用いた。条件および概略図は表-1および図-2に示す通りである。高力ボルトの孔はラセン状のワイヤーで補強し、上面には100×6×100の鋼板の座金をおいた。ブロックと鋼桁の間にモルタルをはさんで軽くボルトでセットし、モルタルの硬化後、所定の軸力(約16 tおよび約7 t)に締めたが、最初のシリーズは2本づつならべてボルトを配置したので、スラブにひびが入ったが、後は千鳥に配置することによってこれを防ぐことができた。

#### 静荷重試験

この種の合成桁の特徴はある荷重まではほとんどずれがなく、それから急にずれが現れることである。接着材を填充したものはこの傾向が一層顕著である。ボルト軸力の小さいものは当然、高いものより、低い荷重でずれ始める。なお強度そのものは、本実験のシベルやスタッドの桁と直接比較はできない。コンクリートスラブに多くのひびは入ったが、概してシベルより壊れ方がひどくないようである。

## 疲労試験

疲労試験に対する性状がシベル型の桁と非常に異っている。即ち、荷重の繰り返しによる変化が非常に小さい。そこで実験では50万回ごとに荷重を5t程度増したが、その度に静的にずれ量は変わったが、繰り返し中の増加はほとんど認められなかった。図-10には一応疲労の効果として、荷重を上フランジのひずみの関係を調べて見たが、繰り返し荷重を与えつつ荷重を増加したものは静的なものより傾斜がゆるくなっている。

高力ボルト締めのは、せん断力の伝達に応力集中部分が少ないので疲労に対して強い抵抗力をもつと考えられ、急速施工性ととともに、鉄道用として有望であるが、締め付けられたコンクリート版のクリープや施工、ボルトの配置など研究すべき問題がある。

### 2・4 その他

以上の合成桁の他、エポキシモルタルでスラブと鋼桁とを接着した合成桁も実験した。これに高力ボルトを併用したものはもちろんセメントモルタルを間にはさんだものよりも性状は向上したが、施工に問題があり、接着のみに頼ったものは、剛性は高いが、接着が切れると全く荷重が上らなくなる。

また、鋼とコンクリートとを接着した場合のせん断強度を調べるために図-11のような試験片で実験したが、パイプを用いた図-(B)の方がブロックをボルトで締めた図-(A)よりも安定した結果が得られた。今回の合成桁に用いた接着材を図-(B)の試験体で接着層の厚さをいろいろ変えて実験したが強度は余り変わらず、 $120 \text{ Kg/cm}^2 \sim 140 \text{ Kg/cm}^2$ であった。

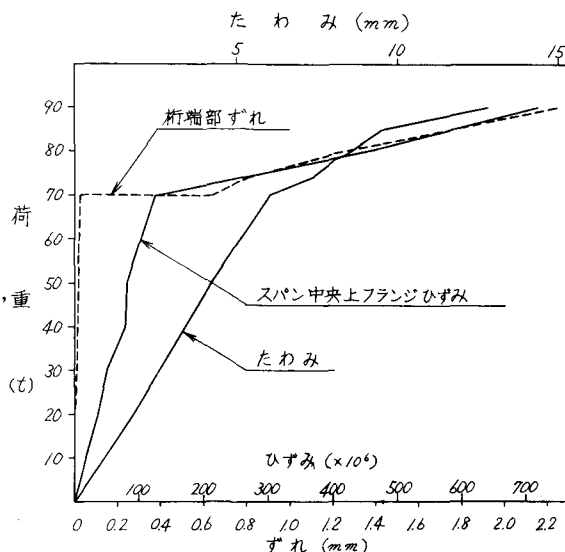


図-9 プレキャスト版(エポキシ)合成桁静試験

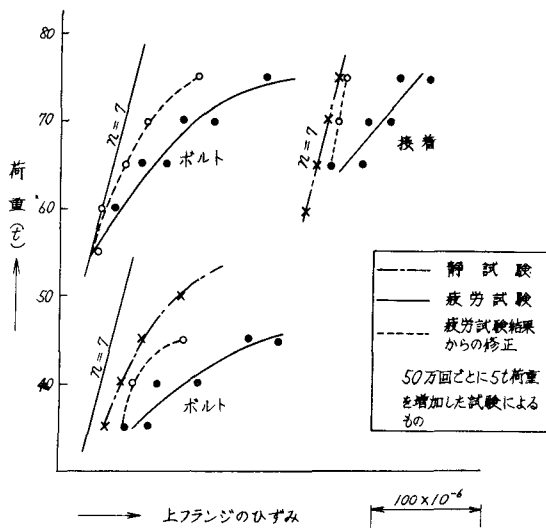


図-10 プレキャスト版合成桁に対する疲労の影響

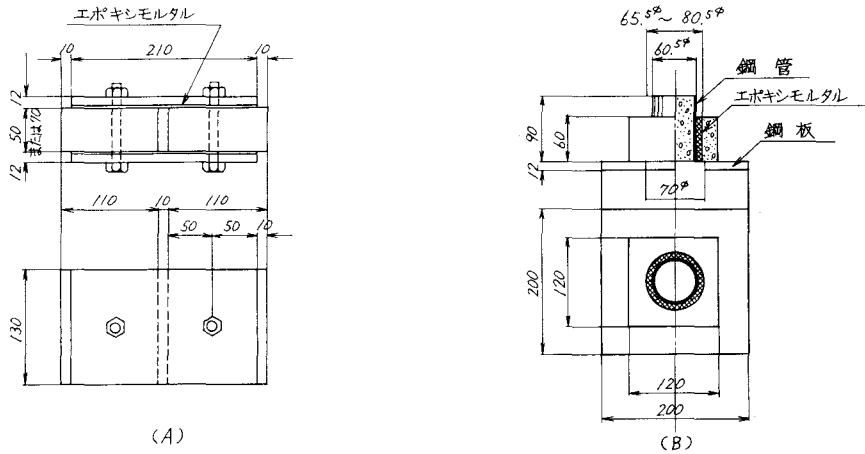


図-11 接着材強度試験体

### 3. 鋼-コンクリート梁の実験

P C 鋼棒で締め付けた鋼とコンクリート部材との接合部の性状を調べるために、図-12 に示す供試体を表-2 に示す 3 種類の接合法により製作し、静的試験を行なった。

接合部のはなれをコンタクトゲージで測定したがその結果の 1 例を図-13 に示す。

はりのたわみをダイヤルゲージで測定したが、その結果の 1 例を図-14 に示す。荷重 18 t の場合に比べて荷重 46 t の場合は、接合部のはなれの影響でやや中央がとがっており、図-13 の鋼桁とコンクリート梁のはなれと相関している。

破壊荷重の実験値と計算値とを表-2 に示した。計算値は次式によった (図-15 参照)。

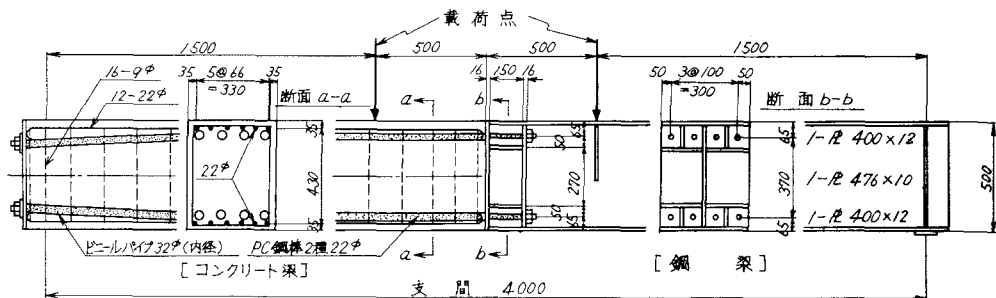


図-12 鋼・コンクリート接合梁供試体

表-2 鋼・コンクリート接合梁

| 記号           | A O                      | A E                      | A C                      |
|--------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 接合法          | P C 鋼 棒                  | P C 鋼 棒<br>エポキシ          | P C 鋼 棒<br>エポキシ モルタル     |
| プレストレス       | 2 5 t × 8                | 2 5 t × 8                | 2 5 t × 8                |
| 試験日のコンクリート強度 | 4 9 8 Kg/cm <sup>2</sup> | 5 4 1 Kg/cm <sup>2</sup> | 5 6 0 Kg/cm <sup>2</sup> |
| 破壊荷重         | 7 2.8 t                  | 7 3.5 t                  | 7 8.0 t                  |
| 計算値          | 7 1.6 t                  | 7 2.2 t                  | 7 2.4 t                  |

$$X = \frac{A P \sigma_p}{b \sigma_c}$$

$$P = \frac{2 A P \cdot \sigma_p}{\ell} \left( d - \frac{x}{2} \right)$$

ここに  $b$  : コンクリート梁の幅  
 $d$  : P C 鋼棒中心からコンクリートの圧縮縁までの距離

$X$  : 中立軸からコンクリートの圧縮縁までの距離

$A_p$  : P C 鋼棒の断面積

$\sigma_p$  : P C 鋼棒の引張強度  
 ( 0.2 % 耐力を用いた )

$\sigma_c$  : コンクリートの圧縮強度  
 ( 試験日強度を用いた )

$\ell$  : 支点から載荷点までの距離

この計算式は、一体の P C 梁の場合に用いられる式であるが、このような構造の破壊荷重にも適用できると思われる。

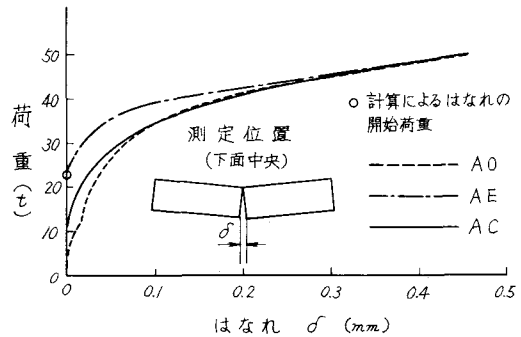


図-13 鋼・コンクリート接合梁のはなれ

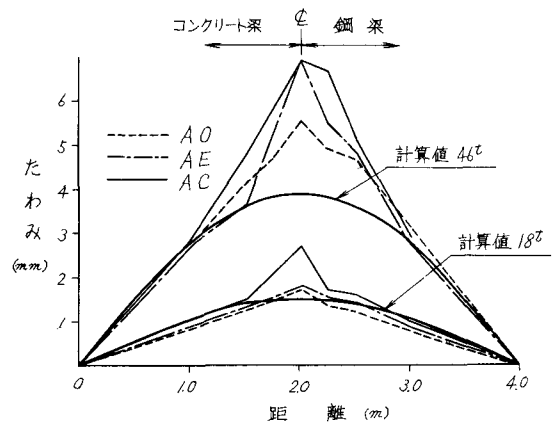


図-14 鋼・コンクリート接合梁のたわみ

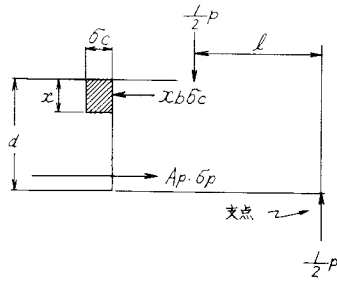


図-15 破壊時の計算仮定

#### 4. あとがき

以上の試験の中には未だパイロット テスト的な性格のものも多いが，結果から一応，次のような事が考えられる。

- 現行のシベルおよびスタッドの許容耐力値として静的強度と疲労強度とのバランスのとれたより適切な値を定める。
- プレキャスト版を高力ボルトで締めるものは急速施工や疲労に対して有利と思われるので，さらに研究を進めて実用化のための基準を作る。
- コンクリートと鋼の接続梁の実験からさらに進んでコンクリート柱と鋼梁のラーメン構造の静的試験および疲労試験を行なって実用化する。
- 一般に合成構造としての設計の計算式を導く。
- コンクリートと鋼との間の接着材の強度を調べるために適切な標準試験体を見出す。

なお，他に高力ボルトで締め付けたコンクリート版のクリープなど基礎的な事柄を検討する必要がある。

プレキャストコンクリート版を高力ボルトで鋼桁に締め付けた合成桁の例として，支間  $3.7 \text{ m}$  におよぶ国電・阿佐ヶ谷駅ホーム桁がある。これに対し，載荷試験を行なったが詳細は国鉄技研速報第66-68号（昭和41年4月）に報告されている。また，コンクリート柱と鋼梁を結合したラーメン構造が，目下，現在線の直上高架構造として，計画されている。

終りにこれらの実験に御指導，御協力下さった国鉄技術研究所構造物研究室の元室長，多田美朝氏，主任研究員，立花一郎氏，国鉄本社および東京工務局の関係者，日本鋼管KK，石川島播磨重工KK，および日本橋梁KKの研究所の方々に心からの謝意を表する。