

## 断面組立方式によるプレキャストカルバートの模型実験について

加 藤 寛\* 村 上 義 彦†  
 柳 瀬 達 雄\*\* 倉 富 悦 郎††  
 市 山 正 一\*\*\* 花 田 久†††

### 1. ま え が き

高速道路などの横断構造物としての大型のボックスカルバートをプレキャスト化しようとする試みは、日本道路公団でも昭和42年頃から検討を行なっており<sup>1)</sup>、九州縦貫自動車道では、断面をボルトで結合する「組立て」方式でカルバートをプレキャスト化することについて、現在試験施工を行なっている。カルバートの規模は内空断面積 $5.0\text{ m} \times 4.0\text{ m}$ のもので、施工に先立って $1/2$ の規模（内空断面積 $2.5\text{ m} \times 2.0\text{ m}$ ）の模型を製作して載荷試験を行なうとともに、継手部の疲労試験も行ない「組立て」方式によるカルバートの安全性を十分確認した。

以下に断面組立て方式の検討の経緯と実験の結果を主要内容として述べることにする。

### 2. 断面組立て方式の検討

ボックスカルバートをプレキャスト化する試みは、わが国の場合、水路用の開きブロックから発展して昭和37年前後からいわゆる「輪切り」方式によるカルバートの工場製品化が進み、現在では最大内空断面約 $2.7\text{ m} \times 2.0\text{ m}$ 程度のもので実用化されている。これらのブロックの重量は、運搬、クレーン架設などの作業性から最大重量を約 $5\text{ t}$ に抑えている。他方、オーストリア、アメリカ、イギリスなどの諸外国でも同じような「輪切り」方式によるプレキャストカルバートの施工例が報告されている。これらの例ではブロックの重量は $10\sim 26\text{ t}$ 程度で、現場近くの工場で作製しトレーラーで運搬され順次クレーン架設により施工されたものである。

これら「輪切り」方式のプレキャストカルバートは、大きさと形状、重量などについて運搬時の交通規制から制限があり、内空断面が $3.0\text{ m} \times 3.0\text{ m}$ を越すものにつ

いては、この方式では無理と考えられる。したがって、これ以上のものをプレキャスト化する場合には、断面を「組立て」方式として検討するか、あるいはまったく別の構造を検討しなければならない。

諸外国の高速道路などで、本線がオーバーパスする場合の横断構造物のうちで、上述した別の構造としてプレキャスト化が検討された結果の実施例と見なされるものに、イギリスのモーターウェイにおける図-1に示すような変形門型ラーメンをプレキャストRC桁で築造した例があり、またスイスでは図-2に示すベボアーチと呼ぶプレキャストRC版をアーチ状に組立て、横断構造物を築造する工法を開発している。

図-1 モーターウェイにおけるプレキャスト交差構造物

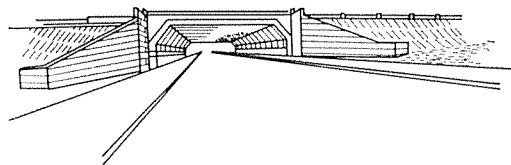
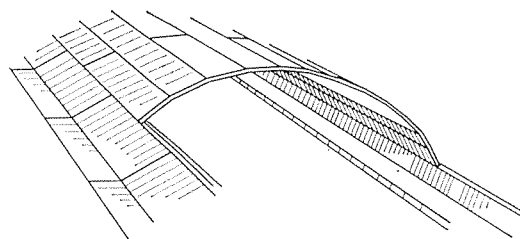


図-2 RCプレキャスト床版を連結するベボアーチ



わが国の場合、高速道路などの横断構造物にはボックスカルバートを使用するケースが非常に多い。表-1は名神高速道路の実施例600か所と東名高速道路900か所の調査をもとに、日本道路公団において使用頻度の高いものから100種類について設計図集として図面化したものの一覧表であるが、「輪切り」方式でのプレキャスト化が不可能な大断面のカルバートが相当広範囲に使用され

\* 日本道路公団福岡支社 特殊設計課長  
 \*\* " 瀬高工事事務所 工事長  
 \*\*\* " 技師  
 † 富士ピーエス株式会社 専務取締役  
 †† " 福岡支店 次長  
 ††† " 設計課長

表-1 ボックスカルバートの種類  
(日本道路公団設計図集)

| B×H \ D | D  |     |     |     |     |     |     |     |
|---------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|         | 0  | 0.5 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 3.0 | 5.0 | 8.0 |
| 1.5×1.5 | 1  |     | 2   |     |     |     | —   | —   |
| 2.0×2.0 | 3  |     | 4   |     |     |     | —   | —   |
| 2.5×2.5 | 5  | 6   |     | 7   |     | 8   | —   | —   |
| 2.5×3.0 | 9  | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | —   | —   |
| 3.0×3.0 |    | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | —   | —   |
| 3.5×3.0 | 20 | 21  | 22  | 23  | 24  | 25  | —   | —   |
| 3.5×3.5 | 26 | 27  | 28  | 29  | 30  | 31  | —   | —   |
| 4.0×3.5 | 32 | 33  | 34  | 35  | 36  | 37  | 38  | —   |
| 4.0×4.0 | 39 | 40  | 41  | 42  | 43  | 44  | 45  | —   |
| 4.5×4.5 | 46 | 47  | 48  | 49  | 50  | 51  | 52  | —   |
| 5.0×4.0 | 53 | 54  | 55  | 56  | 57  | 58  | 59  | 60  |
| 5.0×5.0 | 61 | 62  | 63  | 64  | 65  | 66  | 67  | 68  |
| 6.0×4.5 | 69 | 70  | 71  | 72  | 73  | 74  | 75  | 76  |
| 6.0×5.0 | 77 | 78  | 79  | 80  | 81  | 82  | 83  | 84  |
| 7.0×5.0 | 85 | 86  | 87  | 88  | 89  | 90  | 91  | 92  |
| 8.0×5.5 | 93 | 94  | 95  | 96  | 97  | 98  | 99  | 100 |

注：B；内空幅 (m) H；内空高 (m) D；土かぶり厚 (m)

る傾向にある。そこで表-1で示す内空断面 3.0 m×3.0 m から 8.0 m×5.5 m の範囲のカルバートをブロックの「組立て」方式によってプレキャスト化する検討が日本道路公団でも昭和 42 年頃から行なわれてきた。以下にこの「組立て」方式についての考え方をまとめて述べることにする。

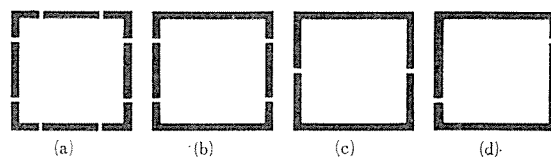
(1) ブロックの形状

「組立て」方式の場合のブロックの割り方には基本的に 図-3 に示す割り方が考えられる。

(a) は極端にブロックのマスプロ化を計るという考えからカルバートの隅角部などが、できるだけ多用できるように設計できる可能性があり、運搬上からも好ましい形状である。しかし現場における組立て作業では労力が多くかかり、継手箇所の施工段取りは場合によっては二重となることもある。

(c) はこの現場作業の手順を極力少なくするために考えられる割り方である。この場合にはチャンネルの形状をしたブロッ

図-3 ブロックの割り方



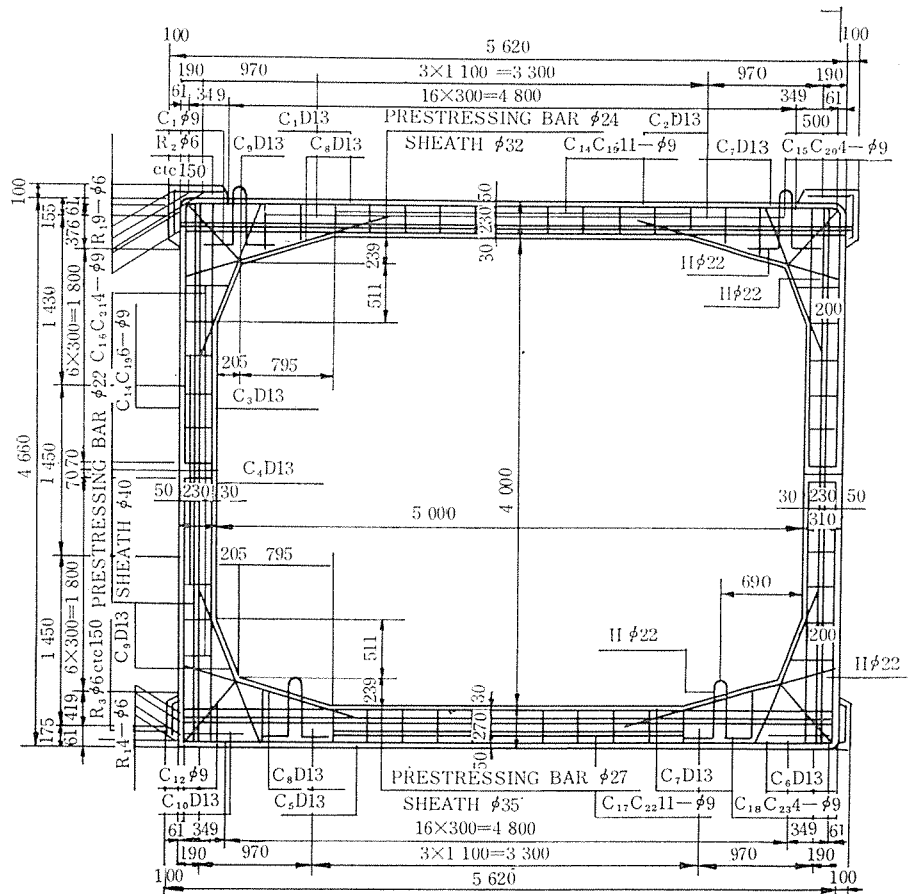
クの大きさが (a) に比べて非常に大きくなるため、ブロック運搬時の仮支点の位置、ブロック吊上げ吊下げ時の部材の強さなどについて、設計上の配慮が必要となる。(d) は (c) の変形で継手の弱点をこれを交互にセットすることによって補なうという考えである。

(b) は (a) と (c) の中間をねらったものであるが、実際の作業性はむしろ (c) の場合に近いと考えられる。なお、これらのブロック相互の結合条件は常に「剛結」であることは論を待たない。

(2) ブロックの結合方法

断面を組立てる場合のブロックの結合方法には、P C 鋼棒を使用してブロック相互にプレストレスを与えて結合する方法と、ボルト類を使用して結合する方法に大別される。前者はP C構造となるために、これを継手部だけの考え方にとどめる場合と、運搬重量の規制からできるだけ版厚を薄くしようと考えブロック全体をP C構造

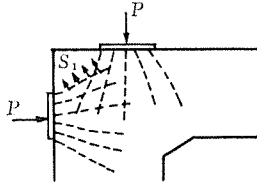
図-4 P C 構造による断面組立て方式 (案)



で検討しようとする考え方とに分れる。

図-4 に示すプレキャストカルバートの試案は、ブロック全体をP C構造で検討した場合であるが、カルバートの側壁部にそう入するP C鋼棒のアンカーの方法と、断面にプレストレスを導入する場合のP C鋼棒定着部である隅角部に生ずる局部応力の補強などについて問題点が指摘される。

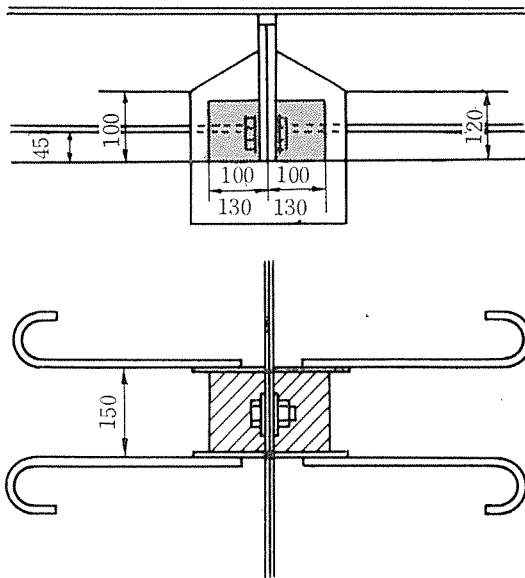
図-5 隅角部の局部応力



継手部を所定の強度をもつ構造として設計することは比較的容易であるが、変形、ひびわれに対しては難点が多い。図-4 のP Cプレキャスト

ブロックの継手は接着剤を併用したプレストレスによる結合方法であるが、この設計条件は、「昭和36年10月建設省道路局長通達」による「継目において次に示す荷重状態で引張縁コンクリートになお圧縮応力が残るようにしなければならない」という規定にしたがって1.1(静荷重)+1.2(動荷重)の荷重状態について満足させるものとしている。これに対してボルト類を使用する場合の結合継手では、継手部をできるだけ、最小モーメントの位置に求め、継手部に働く断面力は引張りに対してはボルト類の断面でとることで検討できる。この場合も接着剤は有効な補助手段とし併用する。

図-6 ボルト結合(案)



(3) 縦方向の継手について

日本道路公団ではカルバートの縦方向の設計に対して「基礎の条件のいかんにかかわらず、15m程度に伸縮継手を設けることとし、このように伸縮継手の間隔を決めた場合にはカルバートの縦方向の計算は行なわなくてもよい」と考えているが、ブロックを結合して築造する

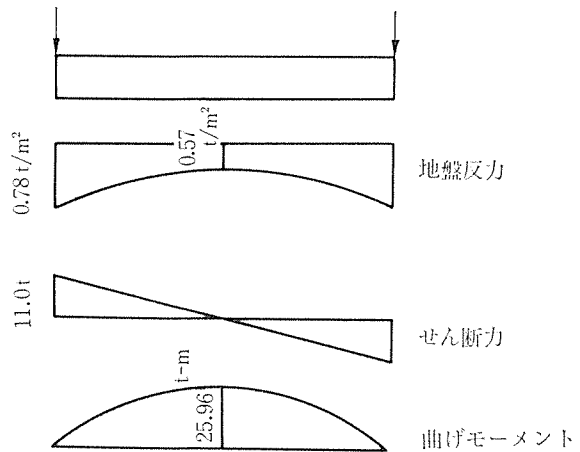
場合には、

1) 結合したブロックが縦方向に一体となって働くとして、設計に必要な破壊安全度から、継手構造を設計する。

2) 各ブロックはそれぞれ単独で縦方向に働くとして単にせん断力のみを伝えるという設計条件から継手構造を設計する。

という二つの考え方に分れる。1)の考え方による一つの試算結果を 図-7 に示すが、内空断面積 3.0m×3.0m, 設計長さ 10.0m, 土かぶり 0m の場合について弾性床上に置いたはりとして検討してみると、地盤反力係数  $k=10 \text{ kg/cm}^2$  の場合最大曲げモーメント 25.96 t-m,

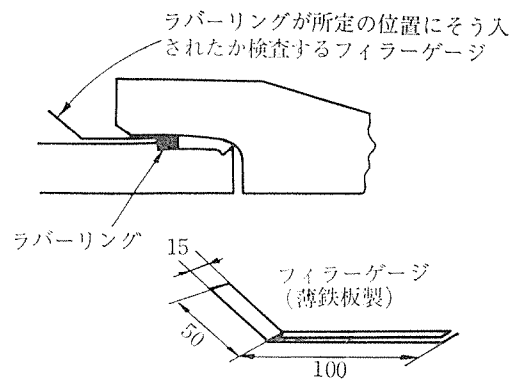
図-7 縦方向に働く M.S の試算例  
(内空断面 3×3m, 土かぶり 0m, 長さ 10m)



せん断力 11.0t となる。ブロックにプレストレスを導入して結合する場合には、断面には  $2\sim 3 \text{ kg/cm}^2$  の有効プレストレス量が必要となる。表-1 に示す範囲では種々試算の結果、縦方向の有効プレストレス量は  $5 \text{ kg/cm}^2$  がほぼ目安と考えられる。

次に 2) に示すものは極端にいえば縦方向にはただならべるといふ考え方である。この場合には不等沈下の影響も考慮したせん断力を伝える継手構造を検討する必要がある。具体的にはカラー構造とするか、ボルト類で連

図-8 ロックラーパイプの継手構造



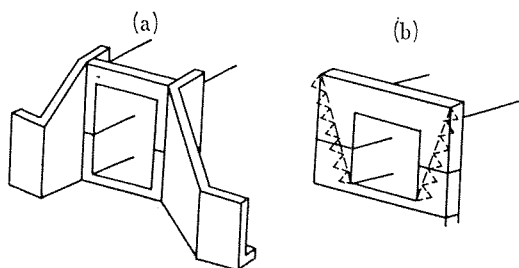
結する方法が考えられる。ただこの場合には防水構造としての機能を検討しておかなければならない。図-8はカラー構造としてのロックラーパイプの連結部の例を示したものである。

(4) ウイング壁との取合いについて

場所打ち施工のカルバートのウイングの形状は、普通1割2分の盛土勾配で盛土を巻込む形状であるため相当に大きい。

カルバートをプレキャストブロックで築造する場合には、このような形状のウイングは施工しにくい。したがって、でき上りの形状がこれに近い形として図-9の(a)に示す擁壁構造との組合せを考えるか、(b)による簡易ウイングに沿う石積み構造とするなどの取合いが考えられる。

図-9 ウイング壁の構造(案)



(5) ブロック据付け時のレベリング

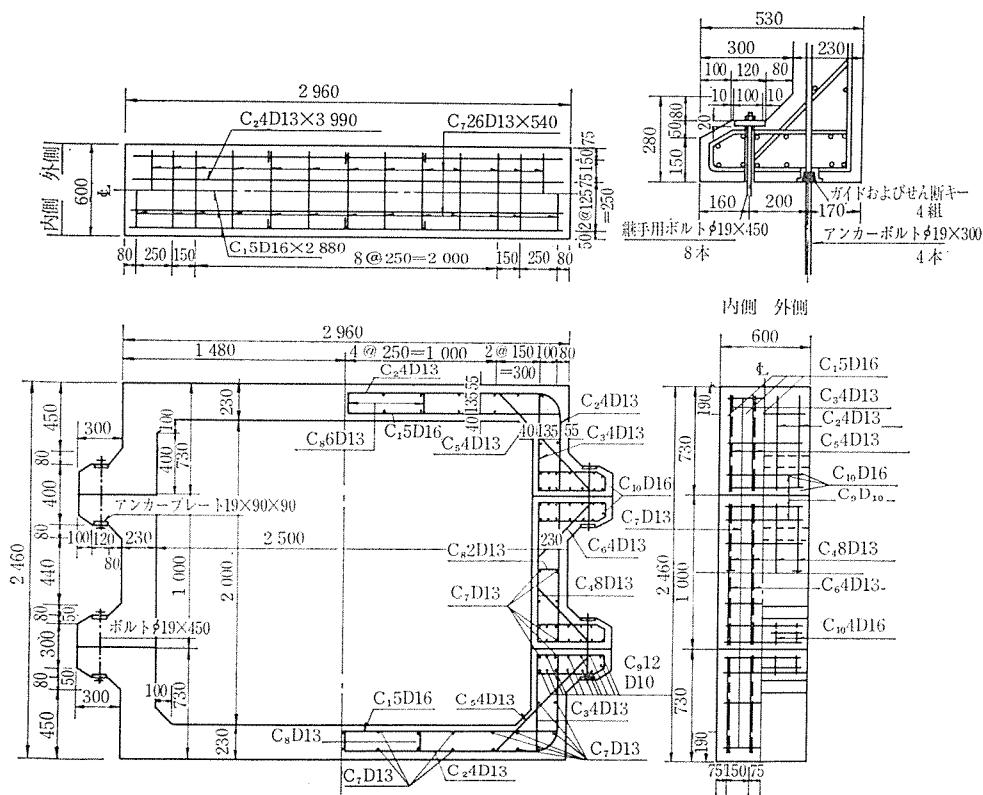
プレキャストブロックを設置箇所に据える場合、一番問題になるのは据付面のレベリングである。このため

にベースとなるならしコンクリートの平坦性は、相当きびしい条件を要求されることになる。しかし実際問題としてならしコンクリート上面の不陸は施工上避けられない。したがってレベリングの精度を上げるためにならしコンクリート層にレールを敷いて据付けるとか、薄鉄板をたくさん用意して不陸の箇所敷くなどの方法と、ならしコンクリートの平坦性は得られる範囲で受認し、ブロック底面との密実な接面を砂またはモルタルの敷設によって得ようとする方法がある。後者の方法は現場的な手段であるが一般に「輪切り方式」のプレキャストブロックの据付けは、この方法が多い。砂またはモルタル(W/Cの極端に少ないもの)の敷厚は3~5cmが考えられる。

3. ボルト結合による継手形状の検討

断面を組立てる結合方法として前節2.(2)で述べたような種々の考え方を、現場での運搬と施工性、断面の構造上の問題点、経済性などの面から検討した結果、ボルトを使用する結合方法が現場の施工性からは非常に好ましいこと、ブロック自身はRC構造とした方が経済的であり構造上の問題点も難点となるようなものはないという考え方に整理された。しかしこの場合、構造の条件によってはボルトの結合方法は剛結ではなくピン構造となる危険性がある。そこで継手断面についてブロック製作時の施工性も考慮したうえで種々検討の結果、図-10

図-10 ボルト結合カルバートの設計図



に示すような継手部の断面を増厚して曲げに対して抵抗できるような形状を考え、締付けるボルトの位置は断面に引張りが作用しない断面の限界核の範囲内で決めることとした。これにもとづいて、後述する実験設備の規模その他から内空断面積  $2.5\text{m} \times 2.0\text{m}$  のプレキャストカルバートを断面組立て方式として試設計を行ない、上述したボルト結合による継手の位置と形状および継手断面についての応力状態などの検討を以下に行なった。

(1) 継手の位置と断面計算

カルバートの骨組節点は図-11のように配置し、試算を行なう荷重の組合せは表-2に示すカルバートの通常の試算ケースのほかに、後述する実験時の水平耐力に対する予備データの意味も加えてプレキャストカルバートの肩口に水平力を作用させた場合と、断面組立て作業時の躯体自重の影響を検討する場合の9ケースについて検討を行なった。解析の手順はブロック本体の断面計算を始め、継手部の位置と断面形状、ボルト径などを合理的に決めるため図-12のような計算手順をとった。

なお、図-10から明らかなように、この継手は曲げモーメントに対して単鉄筋の計算法によるボルトの引張力と、コンクリート接合面の圧縮力で抵抗すると考えるため、この構造方向に合う正曲げモーメントと、接合面をはく離させようとする逆曲げモーメントの両方に対して

図-11 骨組節点図

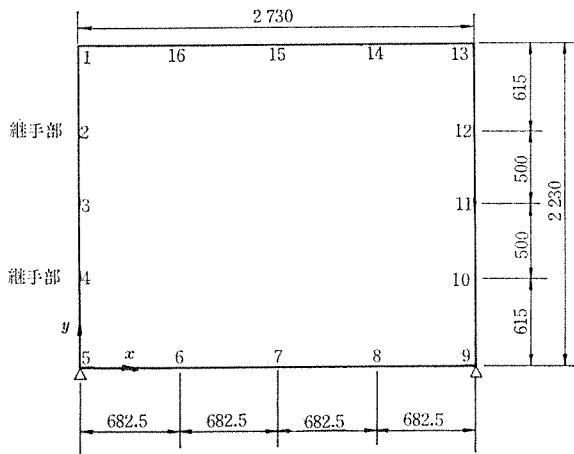
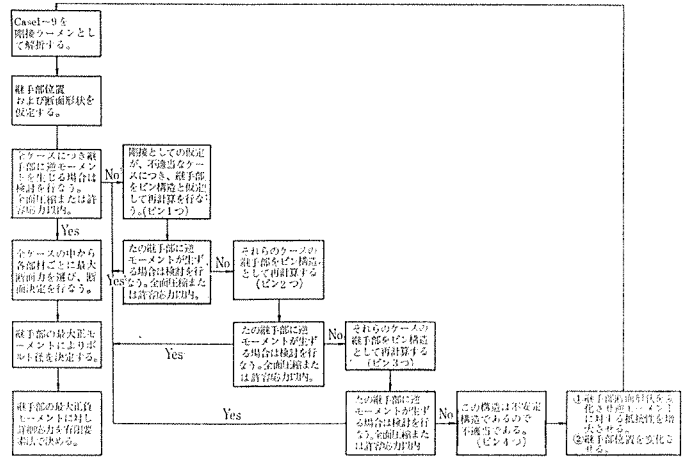


表-2 荷重の組合せ

| 計算ケース | 荷重の組合せ          |
|-------|-----------------|
| ①     | 死荷重 + 活荷重 + 土圧  |
| ②     | 死荷重 + 過載荷重 + 土圧 |
| ③     | 温度変化            |
| ④⑤    | ① ± ③           |
| ⑥⑦    | ② ± ③           |
| ⑧     | 水平荷重 (集中荷重)     |
| ⑨     | 架設時自重の影響        |

検討しなければならない。この逆曲げモーメントは継手をピン構造とする可能性を持っており、特殊な水平荷重に対しては、断面斜め対称方向に2個のピンを生ぜしめることが考えられる。断面計算のためのフローチャート

図-12 断面計算のためのフローチャート



(図-12)は、この考えにもとづいた繰返し試算の手順である。

(2) 有限要素法による継手部の応力の照査

前項で述べた慣用計算法で求めた継手部について継手内の二次元応力流れを有限要素法により平面ひずみ問題として検討する。この計算によって局部的な応力集中の傾向、ハンチの大きさ、配筋筋の有用性などが検討できる。継手部の断面計算に使用した表-2に示す計算ケース4の場合と、継手部の応力度が許容応力度を越えるような(この場合ボルトの引張応力度)カルバートの肩口に水平力  $H=2.77\text{t}$  が作用する場合について計算を行なった結果を図-13, 14に示す。

これらの結果では設計荷重に対しては十分安全側にあることがわかる。とくにコンクリートの発生応力度が大きくないので継手部の増厚部の形状はなお小さくできる可能性があるが、ボルト締めの作業性から、この大きさでよいものとした。継手部の発生応力度を単鉄筋として計算した計算結果と比較したのが表-3である。継手部の最大せん断力は継手部がくびれるハンチ部分に生じ、有限要素法による計算の結果は、設計荷重に対する最大値  $6.59\text{kg/cm}^2$  を与えた。したがって、この傾向を重視してハンチ部分の配筋筋は相当量そう入しておかなければならない。

表-3 計算結果比較表

|          | ボルト 応力                 | コンクリート 応力             |
|----------|------------------------|-----------------------|
| 単鉄筋計算    | 583.5 $\text{kg/cm}^2$ | 15.8 $\text{kg/cm}^2$ |
| FEM 線形解  | 205.5 "                | 9.9 "                 |
| FEM 非線形解 | 565.3 "                | 10.5 "                |

図-13 正モーメントに対する継手部の応力  
(圧縮応力度 -, 引張応力度 +) (単位 kg/cm<sup>2</sup>)

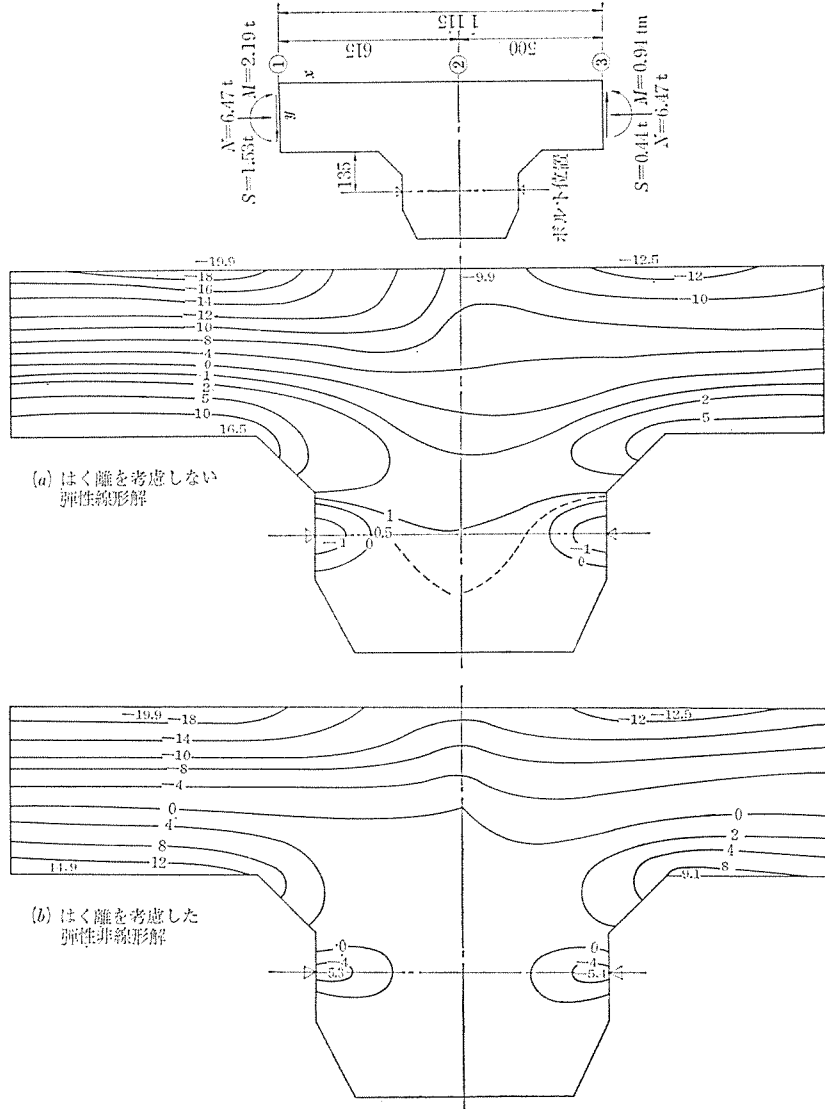
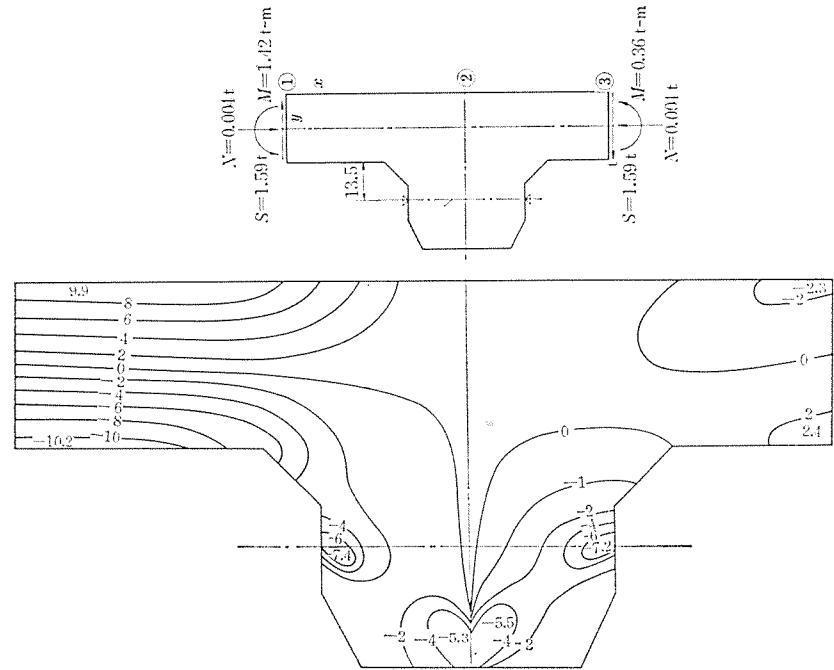


図-14 逆モーメントに対する継手部の応力  
(圧縮応力度 -, 引張応力度 +, 単位 kg/cm<sup>2</sup>)  
\* はく離を考慮した弾性非線形形解

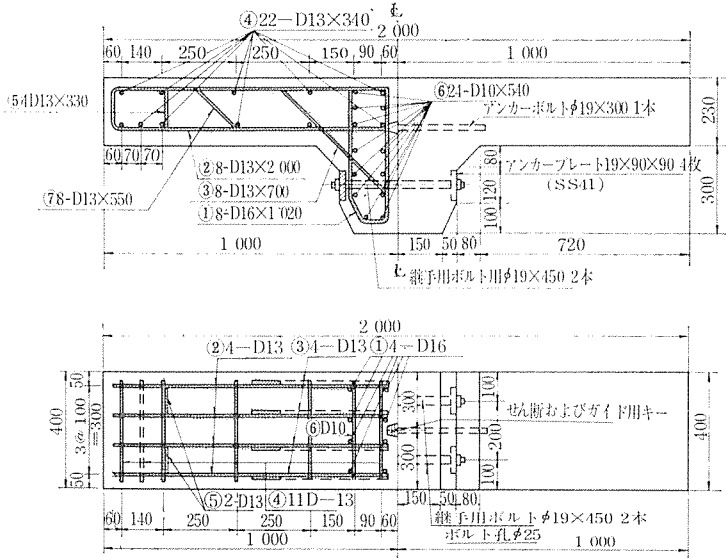


4. 継手部の疲労耐力実験

(1) 供試体の形状寸法と試験方法

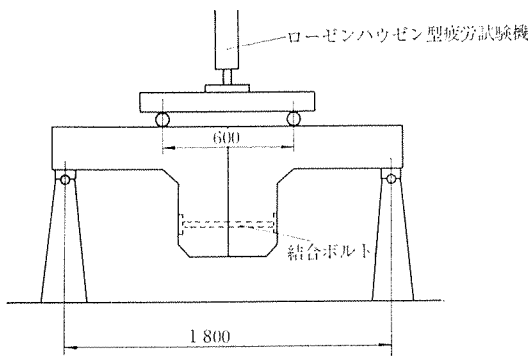
3. (1), (2) で述べた計算の結果と、九州大学における疲労試験装置の規模から、供試体の形状寸法は図-15に示すように決めた。ここで比較のために製作した一体打ち供試体(U)と結合供試体(J)との違いは、配筋状態はまったく同じであるが一体にコンクリートを打ったものと、縁を切って打ち、あとでエポキシ樹脂(シ

図-15 継手部供試体構造図



ポンド PBA) を塗布してボルトで結合したものと違いである。材料は後述するカルバートの試験体と同じである。またボルトの緊張力は人力締め程度である。

図-16 動的載荷(疲労)実験装置



載荷装置はローゼンハウゼン型疲労試験機(10t)を使用した。載荷方法は図-16に示すように結合ボルトに引張応力が生じるように載荷した。

慣用計算によれば結合ボルトに生じる応力度は600kg/cm<sup>2</sup>となるので、図-16に示すスパンでこの応力度となる荷重3tを載荷荷重の上限荷重とし、1tを下限荷重とした。この荷重による200万回繰返し載荷を一体

表-4 200万回繰返し載荷後静的破壊の結果

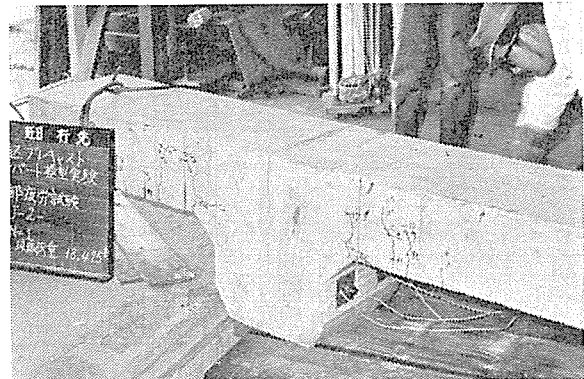
| 記号     | 破壊形状 | 破壊荷重         | 備考 |
|--------|------|--------------|----|
| II-U-1 |      | $P_u=16.01t$ |    |
| II-J-2 |      | $P_u=14.81t$ |    |

表-5 超越荷重による動的載荷試験の結果

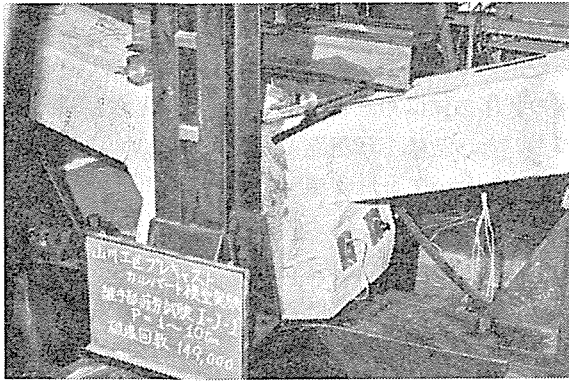
| 記号     | 破壊記号 | 載荷荷重(t)      | 破壊までの繰返し回数 | 備考           |
|--------|------|--------------|------------|--------------|
| I-J-2  |      | $P_u=18.475$ | $N=1$      | 接着部より破壊      |
| I-J-1  |      | $P=10\sim 1$ | $N=149000$ | 接着部ボルト下ねじ部破断 |
| II-J-1 |      | $P=8\sim 1$  | $N=420000$ | ハンチ部のクラック増大  |
| I-J-3  |      | $P=7\sim 1$  | $N=458000$ | ハンチ部横のクラック増大 |

打ち供試体と、結合供試体のそれぞれ1個について行ない、残り4個の結合供試体のうち3個については上限荷重を10t, 8t, 7tにそれぞれ変えて繰返し載荷による破壊を行ない、残り1回は静的に破壊した。これらを表-4, 5に示す。測定方法はダイヤルゲージによるたわみ測定、ワイヤーストレインゲージによる結合ボルトおよび鉄筋のひずみとコンクリート表面のひずみ測定を行なった。上限荷重3tの一体打ち供試体と結合供試体については繰返し載荷中の1, 2, 10, 100, 1000, 1万,

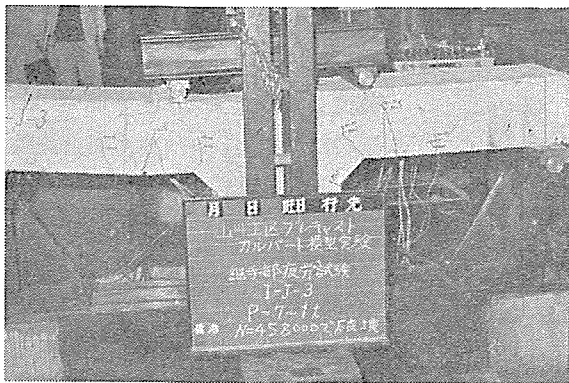
写真-1 結合供試体の静的破壊状況



写真—2 結合供試体の超越荷重 (10 t) による疲労破壊



写真—3 結合供試体の超越荷重 (7 t) による疲労破壊



10 万, 20 万回ごとに試験機を止めて 3 t までの静的載荷をしてそれぞれそれぞれについて測定をし, ひびわれ発生状況などを観察した。

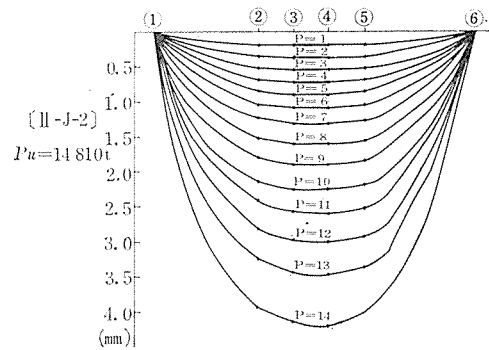
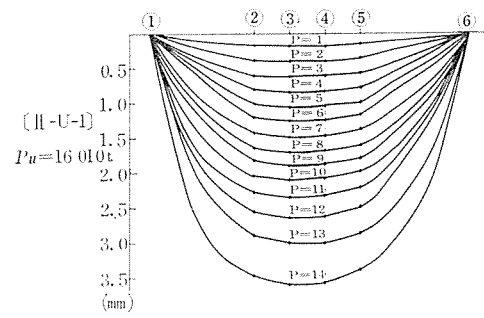
(2) 測定結果

上限荷重 3 t, 下限荷重 1 t として 200 万回繰返し載荷した一体打ち供試体 (II-U-1) と結合供試体 (II-J-2) の静的破壊荷重の結果は表—4 のとおりであるが, 図—17 は 200 万回繰返し載荷後, 静的に破壊させた場合のたわみの進行を示したものである。また  $S-N$  曲線 (疲労強度曲線) を描くために超越荷重で行なった疲労破壊試験の結果から 図—18 が得られた。

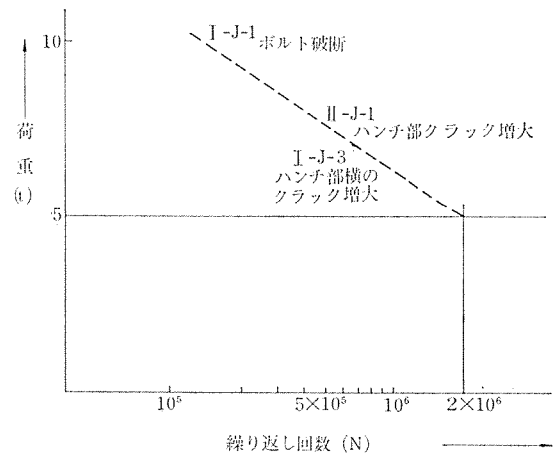
これらの実験から静的に破壊させた結合供試体の破壊荷重に対して, ほぼ設計荷重にひびてくる 3 t の 200 万回繰返し載荷試験後の破壊荷重は前者の約 80% の値が得られており, この設計条件に対しては十分安全であるという結果が得られた。

また, 一体打ち供試体との比較でも, 継手部をボルトで結合した結合供試体の構造はほとんどそんじょくない。図—17 はたわみがわずかに大きい結果を与えているが, この特異な形状のハンチ部に集中的に発生するひびわれの大きさなどによってもたわみ量が影響されるため, これだけで優劣は評価できない。表—5 に示す結合供試体の破壊の形状は, 結合ボルトの疲労破壊から, 上に述べたハンチ部に生じるひびわれ幅の増大によって破

図—17 200 万回繰返し後の静的破壊試験時のたわみ



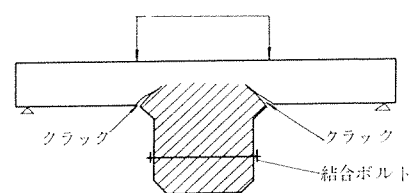
図—18  $S-N$  曲線



壊と認める場合まで種々の破壊の状態を示している。

また 図—18 に示す  $S-N$  曲線からは 200 万回で破壊する疲労破壊荷重は 5 t が得られた。これは静的破壊荷重に対して 27% の値であり, 普通考えられる鉄筋コンクリートばりの場合より小さな値となっている。しかしこの供試体を普通考えられる鉄筋コンクリートばりとして扱おうことには結合部の形状が大きすぎ, ハンチ部に

図—19 最初のクラック発生位置





早い時期に発生するひびわれの影響などから考えて適当ではない。

5. 組立て方式によるカルバートの載荷試験

(1) 供試体の形状寸法と試験方法

前述のように内空断面寸法は実物の1/2スケールとしたが、版厚、鉄筋量については日本道路公団の設計要領で示す設計荷重、計算方法などにより計算上必要な断面

図-20 一体打ちカルバート供試体製作図

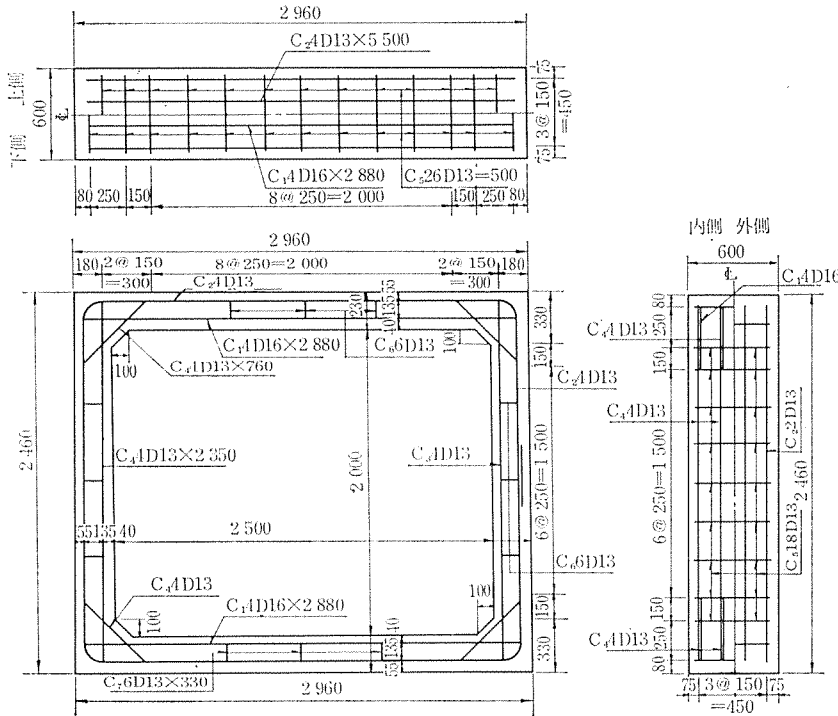


表-6 実験に用いたコンクリートの示方配合

| 粗骨材<br>最大寸<br>法<br>(mm) | スラン<br>プの<br>幅<br>(cm) | 単<br>水<br>量<br>(kg) | 位<br>置<br>量<br>(kg) | セ<br>メント<br>(kg) | 水セ<br>メント<br>比<br>W/C<br>(%) | 絶対<br>細骨材<br>率<br>s/a<br>(%) | 骨材重量 (kg)   |          |          | 単位混和<br>割合<br>(ポゾリス<br>No. 5 L)<br>(kg) |
|-------------------------|------------------------|---------------------|---------------------|------------------|------------------------------|------------------------------|-------------|----------|----------|---|
|                         |                        |                     |                     |                  |                              |                              | 全<br>量<br>A | 細骨材<br>S | 粗骨材<br>G |   |
| 20                      | 5~10                   | 166                 | 300                 | 55.3             | 43                           | 1774                         | 746         | 1028     | 0.75     |   |

表-7 実験に使用したコンクリートの圧縮強度など

|    | 材令 28 日                       |                               | 弾性係数                                     |  |      |
|----|-------------------------------|-------------------------------|--|--|------|
|    | 圧縮強度<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | 引張強度<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | ①<br>×10 <sup>5</sup> kg/cm <sup>2</sup> | ②<br>×10 <sup>6</sup> kg/cm <sup>2</sup> |      |
| I  | 各<br>個                        | 362                           | 24                                       | 1.99                                     | 2.04 |
|    |                               | 357                           | 22                                       | 1.99                                     | 2.21 |
|    |                               | 361                           | 25                                       | 1.98                                     | 2.12 |
|    |                               | 351                           | —  | —  | —    |
|    | 平均                            | 358                           | 24                                       | 1.99                                     | 2.12 |
| II | 各<br>個                        | 390                           | 31                                       | 1.95                                     | 2.09 |
|    |                               | 383                           | 31                                       | 1.92                                     | 2.10 |
|    |                               | 388                           | 29                                       | 2.02                                     | 2.15 |
|    |                               | 384                           | —  | —  | —    |
|    | 平均                            | 386                           | 30                                       | 1.96                                     | 2.11 |

として決めた。すでに示した 図-10 が組立て方式の供試体の製作図で、実験上耐力などを比較するための一体打ちの供試体の製作図は 図-20 に示すものである。供試体の製作個数は鉛直載荷試験用のものと水平載荷試験用のものを、それぞれ組立て(以下結合という)と一体打ちの両方について合計4個製作した。

供試体のコンクリートの設計基準強度は 240 kg/cm<sup>2</sup> であるが、実験期間に制約があったため  $\sigma_{28} \approx 300 \text{ kg/cm}^2$  を目標に早強セメントを使用して製作した。コンクリートの示方配合、圧縮強度、弾性係数などを表-6, 7 に示す。なお解析に使用するコンクリートの弾性係数は  $2.0 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$  とした。

載荷装置は九州大学工学部の 500 t 構造物試験機と、50 t 水平載荷試験機を使用した。載荷装置の略図を鉛直載荷、水平載荷のそれぞれについて 図-21, 22 に示す。なお水平載荷試験方法については、カルバート上端に水平荷重を載荷すると供試体が回転するので、この回転を押えるために水平荷重と同量の鉛直荷重を同時に載荷する方法をとった。

鉛直載荷、水平載荷のそれぞれの載荷荷重の方法を表-8, 9 に示す。この実験では試験機の能力に比べて使用する荷重が小さいため、ロードセルをそう入して荷重をチェックすることとした。

測定の内容は、ダイヤルゲージによる変位量の測定、

図-21 鉛直載荷方法

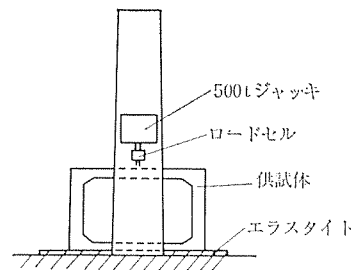


図-22 水平載荷方法

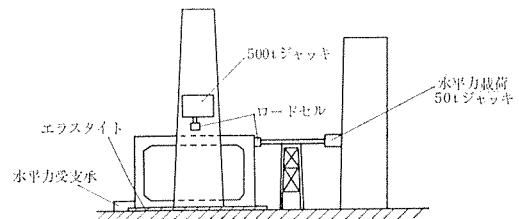


表-8 鉛直載荷荷重

| サイクル | 荷 重 (t)                          | 備 考         |
|------|----------------------------------|-------------|
| 1    | 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 4, 2, 0.5 | 設計荷重まで      |
| 2    | 0.5, 2, 4, 6, 8, 9, 6, 3, 0.5    | 設計荷重の150%まで |
| 3    | 0.5, 3, 6, 9, 12, 15, 18 .....   | 破壊まで        |

表-9 水平載荷荷重

| サイクル | 荷 重 ton          | 備 考  |
|------|------------------|------|
| 1    | 鉛直 0.5 1 2 1 0.5 |      |
|      | 水平 0.5 1 2 1 0.5 |      |
| 2    | 鉛直 0.5 2 4 6 --- | 破壊まで |
|      | 水平 0.5 2 4 6 --- |      |

ストレインゲージによるコンクリートと鉄筋、結合ボルトのひずみ測定および、ひびわれ発生状況の観察である。変位とひずみの測定位置を結合供試体の場合について、図-23, 24 に示す。

図-23 結合供試体ひずみ測定位置 (鉛直載荷分)

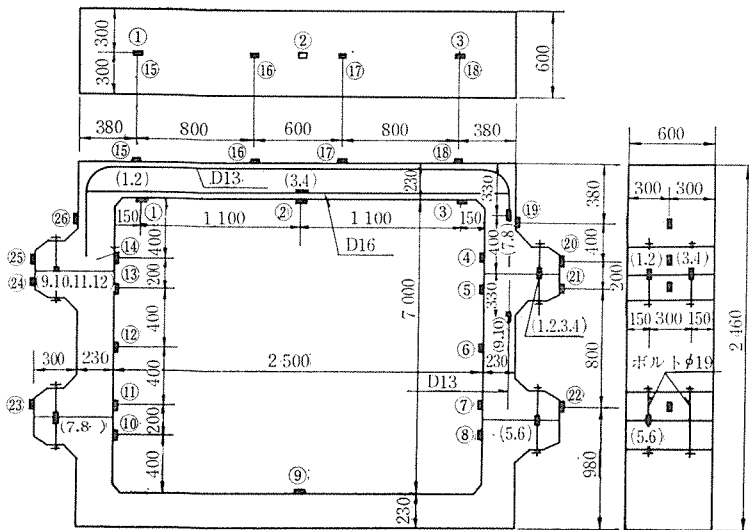
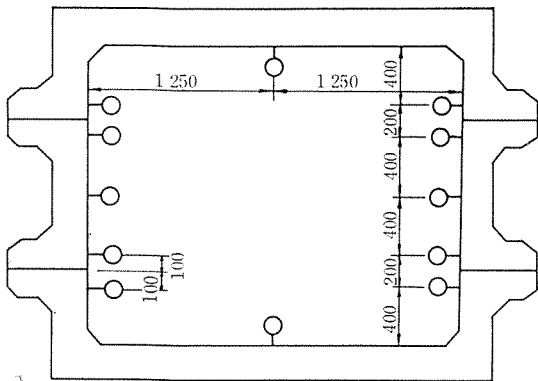


図-24 結合供試体変位測定位置



(2) 鉛直載荷試験の結果

鉛直載荷試験の結果を一体打ち供試体と比較して表-10 に示す。ひびわれの発生は一体打ち供試体 (I-U),

表-10 鉛直載荷破壊荷重

| 記号  | 破壊形状 | 破壊荷重    | 破壊型式       |
|-----|------|---------|------------|
| I-U |      | V=19.4t | 載荷点直下の曲げ破壊 |
| I-J |      | V=17.4t | せん断破壊      |

結合供試体 (I-J) とともに設計鉛直荷重を越えた 6t 前後で載荷点直下に現われたが、結合供試体では結合部が版厚と比べて極端に大きな断面となっているため上床版は固定度の高い両端固定版の現象に近く、端部付近の負の曲げモーメントによるひびわれが大きく現われた。

載荷点直下の変位の実測値と計算値を一体打ち供試体と比較して表-11 に示す。また断面のそれ

表-11 鉛直載荷時載荷点直下の変位量

| 荷 重 (t) | 計算値 $\times 10^{-2}$ (mm) | 実 測 値                         |                               |
|---------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|         |                           | 一 体 (I-U) $\times 10^{-2}$ mm | 結 合 (I-J) $\times 10^{-2}$ mm |
| 0.5     | 0                         | 0                             | 0                             |
| 1       | 8.9                       | 7.7                           | 6.3                           |
| 2       | 26.7                      | 28.0                          | 20.1                          |
| 3       | 44.5                      | 48.1                          | 45.9                          |
| 4       | 62.3                      | 72.0                          | 79.9                          |
| 5       | 80.1                      | 105.4                         | 118.8                         |

ぞれの位置におけるコンクリートのひずみと鉄筋のひずみについて同様に表-12, 13 に示す。これらの表からみると、結合供試体と一体打ち供試体は断面が著しく異なっている結合部付近を除いて、ほとんど同じような挙

表-12 鉛直載荷の場合コンクリートひずみ

(単位:  $10^{-6}$ )

| 測 点 | サイクル I 5t |           |           | サイクル II 9t |           |           | サイクル III 15t |           |           |
|-----|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|--------------|-----------|-----------|
|     | 計算値       | 実 測 値     |           | 計算値        | 実 測 値     |           | 計算値          | 実 測 値     |           |
|     |           | 一 体 (I-U) | 結 合 (I-J) |            | 一 体 (I-U) | 結 合 (I-J) |              | 一 体 (I-U) | 結 合 (I-J) |
| 1   | -59       | -56       | -58       | -110       | -106      | -186      | -189         | -421      | -332      |
| 2   | 771       | 415       | 415       | 1530       | 53        | 76        | 2610         | -         | -80       |
| 3   | -59       | -56       | -58       | -110       | -111      | -81       | -189         | -255      | -268      |
| 4   | 180       | 41        | 58        | 357        | 106       | 703       | 609          | -         | 161       |
| 5   | -217      | -         | -121      | -408       | -         | -256      | -696         | -         | -407      |
| 6   | -217      | -108      | -156      | -408       | -265      | -285      | -696         | -613      | -670      |
| 7   | 180       | 41        | 35        | 357        | 37        | 58        | 609          | -16       | 38        |
| 8   | 502       | 77        | 0         | 994        | -37       | -35       | 1697         | -21       | -5        |
| 9   | 502       | 77        | 6         | 994        | 1272      | 6         | 1697         | -         | -11       |

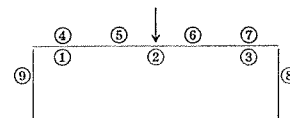
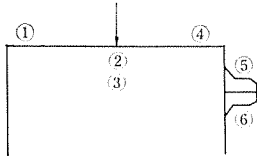


表-13 鉛直載荷の場合の鉄筋ひずみ  
(単位:  $10^{-6}$ )

| 測点 | サイクルⅠ 5t |             |             | サイクルⅡ 9t |             |             | サイクルⅢ 15t |             |             |
|----|----------|-------------|-------------|----------|-------------|-------------|-----------|-------------|-------------|
|    | 計算値      | 実測値         |             | 計算値      | 実測値         |             | 計算値       | 実測値         |             |
|    |          | 一体<br>(Ⅰ-U) | 結合<br>(Ⅰ-J) |          | 一体<br>(Ⅰ-U) | 結合<br>(Ⅰ-J) |           | 一体<br>(Ⅰ-U) | 結合<br>(Ⅰ-J) |
| 1  | 265      | 26          | 38          | 500      | 83          | 270         | 853       | 1091        | 841         |
| 2  | 809      | 308         | 242         | 1528     | 922         | 738         | 2607      | —           | 1854        |
| 3  | 809      | 400         | —           | 1528     | 945         | —           | 2607      | —           | —           |
| 4  | 265      | 24          | 35          | 500      | 69          | 81          | 853       | 1211        | 806         |
| 5  | 373      | —           | 115         | 704      | —           | 459         | 1201      | —           | 1395        |
| 6  | 289      | —           | 40          | 546      | —           | 114         | 931       | —           | 308         |



動を示している。コンクリートのひずみの中で、⑧、⑨の実測値が小さいのは上述したように結合部の断面の影響が現われているものと考えられ、これはひびわれの進行現象ともよく合う。なお結合部のボルトのひずみは非常に小さな値を示し、載荷中の応力の増加は、ほとんど測定されなかった。

(3) 水平載荷試験の結果

水平載荷試験の結果を 表-14 に示す。ただし、ここ

写真-4 結合供試体の鉛直載荷試験結果

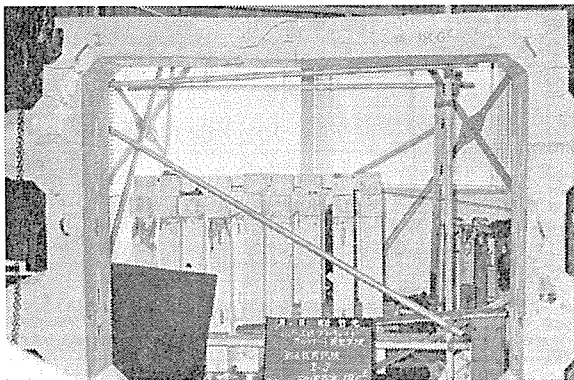


写真-5 結合供試体上床版のクラックの状況

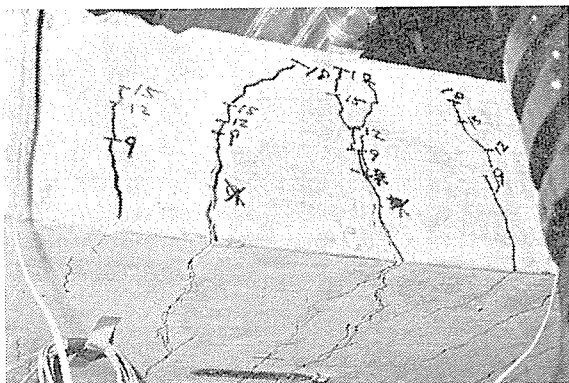
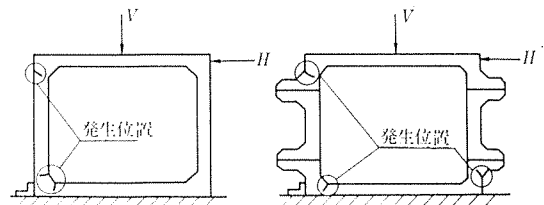


表-14 水平載荷最終荷重

| 記号  | 破壊形状 | 最大荷重             | 備考                                |
|-----|------|------------------|-----------------------------------|
| Ⅱ-U |      | V=7.9t<br>H=7.4t | 供試体が回転しはじめたため、危険だと判断し破壊まで載荷しなかった。 |
| Ⅱ-J |      | V=8.5t<br>H=7.1t | 〃                                 |

で示す最大荷重は供試体が回転(転倒)する直前の荷重で破壊荷重ではない。ひびわれの発生は一体打ち供試体(Ⅱ-U)、結合供試体(Ⅱ-J)ともに水平荷重 4t(鉛直荷重 4t も同時に載荷)を載荷したときに生じた。ひびわれの発生した位置は 図-25 に示すとおりである。

図-25 水平載荷時の最初のクラック発生位置  
(V=4t, H=4t)



次にコンクリートのひずみを 表-15 に、鉄筋のひずみを 表-16 に示す。これらを見ると鉛直載荷の場合と同様に(Ⅱ-U)と(Ⅱ-J)のひずみの分布はよく似ている。

表-15 水平載荷の場合のコンクリートひずみ  
(単位:  $10^{-6}$ )

| 測点 | 鉛直荷重, 水平荷重 2t |             |             | 鉛直荷重, 水平荷重 4t |             |             |
|----|---------------|-------------|-------------|---------------|-------------|-------------|
|    | 計算値           | 実測値         |             | 計算値           | 実測値         |             |
|    |               | 一体<br>(Ⅱ-U) | 結合<br>(Ⅱ-J) |               | 一体<br>(Ⅱ-U) | 結合<br>(Ⅱ-J) |
| 1  | -143          | -72         | -78         | -333          | -157        | -122        |
| 2  | 270           | 30          | 41          | 630           | 142         | 125         |
| 3  | 334           | 31          | 34          | 779           | 64          | 79          |
| 4  | 461           | 56          | 67          | 1076          | 65          | 127         |
| 5  | -49           | -15         | -18         | -114          | -53         | -81         |
| 6  | -98           | -50         | -48         | -228          | -178        | -151        |
| 7  | -105          | -36         | -46         | -245          | -91         | -117        |
| 8  | -60           | -26         | -37         | -140          | -63         | -68         |
| 9  | 551           | 66          | 64          | 1286          | 0           | 11          |

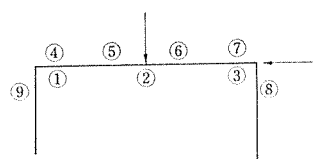


表-16 水平載荷の場合の鉄筋ひずみ (単位:  $10^{-6}$ )

| 測<br>点 | 鉛直, 水平 2t |               |               | 鉛直, 水平 4t |               |               |
|--------|-----------|---------------|---------------|-----------|---------------|---------------|
|        | 計算値       | 実 測 値         |               | 計算値       | 実 測 値         |               |
|        |           | 一 体<br>(II-U) | 結 合<br>(II-J) |           | 一 体<br>(II-U) | 結 合<br>(II-J) |
| 1      | -105      | -24           | -26           | -245      | -48           | -79           |
| 2      | 257       | 15            | 23            | 600       | 76            | 86            |
| 3      | 257       | 15            | —             | 600       | 64            | —             |
| 4      | 438       | 24            | 3             | 1 022     | 86            | 47            |
| 5      | 551       | —             | 38            | 1 286     | —             | -239          |
| 6      | 130       | —             | 9             | 303       | —             | 16            |

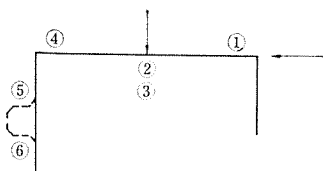
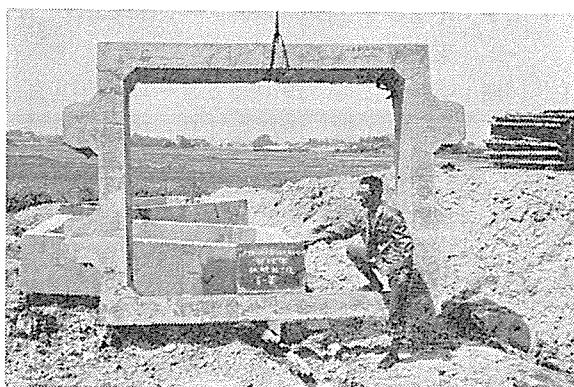


写真-6 結合供試体の水平載荷試験結果



## 6. 結 言

本実験の目的は最初に述べたように、断面組立て方式によるカルバートのボルト結合による継手構造が十分安全であるかどうか。次にこの継手構造によって組立てたカルバートの荷重載荷時の挙動が、通常の工法である、いわゆる一体打ちカルバートと比べて特異な挙動を示すかどうか、またこの場合に耐荷力の比較はどうかなどを検討、確認することであった。実験の結果から次のことが明らかになった。

1) ボルト結合による継手部の強さと疲労に対する安全性は、実験に使用した断面形状について満足すべき結果が得られた。

2) しかし 図-19 に示すように断面が急変する部分に集中的にひびわれが発生して耐荷力を弱める傾向が明らかなので、この部分の形状と鉄筋の配置については、なお検討すべき余地を残している。

3) 組立て方式のカルバートと、一体打ちのものの鉛直および水平載荷試験の結果は、変位量、ひずみ、最終耐荷力ともに両者にはほとんど差がない。

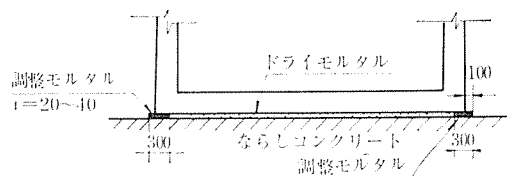
4) しかし鉛直載荷試験では、組立て方式のカルバートの上床版の挙動は、継手部の固定度が大きい影響を受

ける傾向が見えた。

したがって、この継手構造でボルト結合された組立て方式のカルバートは十分実用化できることが確認され、断面の設計も、原則的に一体打ちカルバートの一体ラーメン解法を利用してさしつかえないといえる。また結合ボルトの緊張力も人力締め範囲で十分目的を達すると思われる。

試験施工を行なうボックスカルバート本体の寸法は、冒頭のまえがきに述べたように内空断面  $5.0\text{ m} \times 4.0\text{ m}$ 、延長  $26.0\text{ m}$  の規模のもので、1ブロックの長さ  $1.2\text{ m}$  として計画し、上述した詳細部の二、三の問題についてさらに検討を加えたいので現在施工中である。ブロック据付け時のレベリングの問題については 2.(5) でも考え方を種々述べたが、ここでは 図-26 に示すように調整モルタルでレベリングを完全にとり、ブロック据付け直前にドライモルタルをならしコンクリート表面に敷設して空けきができないようにした。試験施工の詳細はあらためて報告したい。

図-26 据付け時のレベリングモルタルの施工



大型のボックスカルバートを組立て方式によってプレキャスト化する検討は、この模型実験によって構造的に実用化できるめどがみついた。今後の課題としては、構造的になお詳細部をつめていくとともに、経済性についてはこの種のプレキャスト化の利用範囲と量産の可能性などの角度から検討を深める必要がある。

終りに、この一連の検討は日本道路公団比留間理事のご提言をいただき、その後多くの方々のご教示から積上げてきた。またこの実験にご指導頂いた佐賀大学石川達夫助教授を始め、九州大学工学部土木工学科土木実験室の方々のご協力をいただいた。深甚の謝意を表するとともに、本文がこの種の構造物のプレキャスト化の一助にともなれば幸いである。

## 参 考 文 献

- 1) 高速道路調査会：コンクリートプレキャスト構造に関する調査研究報告書(昭和42年度)
- 2) 加藤 寛：カルバートのプレキャスト化について(日本道路公団コンクリート構造物施工検討会報文集)
- 3) プレストレストコンクリート技術協会：プレキャストブロック工法施工マニュアル
- 4) 上野 教・川口雅美：東北高速道路におけるプレキャストボックスカルバートの設計と施工(日本道路公団第13回業務研究発表会)

1972.10.28・受付