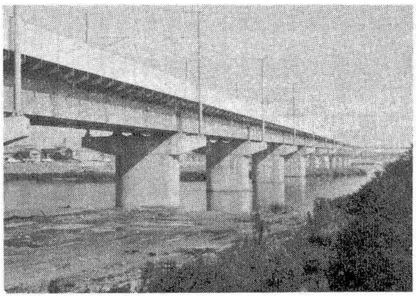
鉄道用合成桁ジベルの疲労耐力に関する実験的研究

国鉄　構造物設計事務所　○阿部英彦，中野昭郎
国鉄　鉄道技術研究所　　西郷勘次郎，江口保平

1．はしがき

新幹線をはじめとして国鉄においては多数の合成桁鉄道橋を採用して来た。鉄道用合成桁に要求される条件は道路用合成桁に対するものと基本的には余り変らないが，鉄道橋には一般に設計活荷重の大きさに近い車両が通り，しかもその頻度も高い事は大きな特徴である。そこで鉄道橋においては特に溶接構造を採用するようになってから，疲労の影響をその設計に仔細に考慮することにしている。



〔写真－1〕　山陽新幹線神崎川橋梁

鉄道用合成桁の鋼桁部分に対しては鋼鉄道橋用の設計標準（示方書）に従って疲労を考慮すればよい。鋼桁部とコンクリートスラブとの間のずれをとめるジベルに対しても当然，くり返し荷重が加わるのでこの部分についても疲労を考えなければならない。しかしこの部分の疲労はジベルと鋼桁との間やジベルとコンクリートとの間の両方におこる可能性があり，複雑であるので，実験によってこれを確めようとしたものである。なお，現行はジベルの設計は静的な強度計算に基いている。

試験には桁型式のものと押抜き型式の試験体を用いたが，その結果，現在用いている馬蹄型のジベルもプレキャストスラブ合成桁に用いているジベルもくり返し荷重に対して充分な安全率をもっていることがわかった。ただし馬蹄型ジベルについているスラブの浮上り防止用の輪型鉄筋はくり返し荷重に対して強くないので，浮上り防止にはボルトで綴じるなど工夫するのがよいと考えられる。

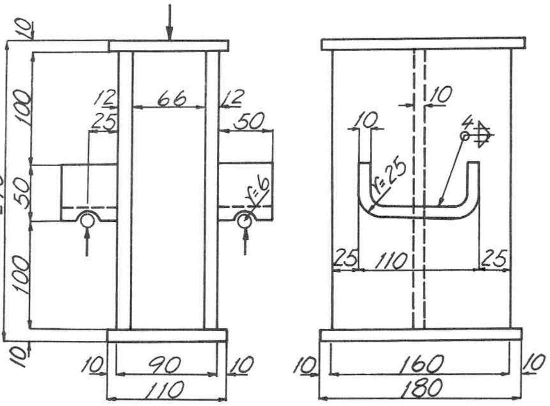
以下、今迄国鉄で行なった合成桁実験研究の中，ジベル部の疲労関係に焦点をおいて報告する。

2．試験体

試験体としてはジベルを鋼柱に溶接したままでコンクリートに埋込まない状態の押し抜き型（図－1），コンクリートブロックとジベルつき鋼柱を用いた押し抜き型（図－2および図－3），および長さ4mの桁型式（図－5）のものを用いた。

(1)　コンクリートに埋込まない押抜試験体

コンクリート中に埋込まれたジベルでは亀裂がどこから発生し，どのように伝播するかがわからないので，コンクリートに埋込まないで裸のままのジベルに対してもくり返し試

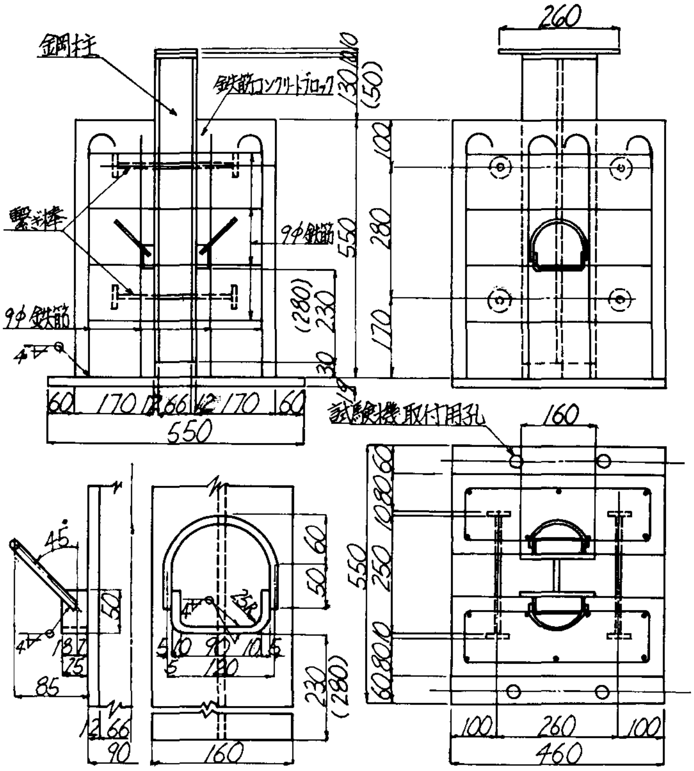


〔図－1〕　コンクリートに埋込まない押抜き試験体

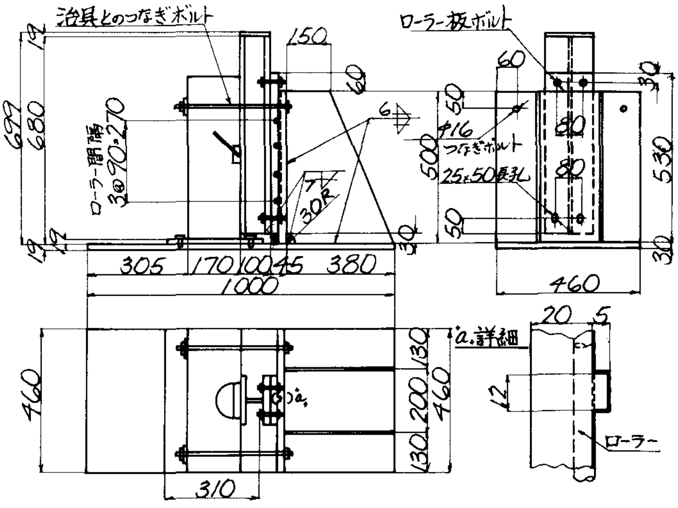
験を行なった。写真－2に示すような治具を用いて二つのジベル前面の中間高さのところに荷重が均等にかかるように工夫した。

(2)　コンクリートに埋込んだ押抜き試験体

押抜き試験体に関しては左右のブロックの間に繋ぎ棒を設けないもの〔A型〕，同じく繋ぎ棒を設けたもの［B型］，鋼柱の片側のみにジベルをつけてコンクリートブロックに埋込んだもの〔C型〕，B型と似ているが上の載荷点とジベルとの間の距離を小さくしたもの〔D型〕等，A型からD型と順次改善を企図して型式を変えた。B型では左右のコンクリートブロックを4ケ所で結合しているが，これは先にA型で繋ぎなしでくり返し荷重を加えたところ，両側のブロックが開く傾向があり，ジベルの耐力が低く出ることが認められたので設けたものである（図－9参照）。なお繋ぎはコンクリート打ちの時，両端が自然に埋込まれてアンカーされるので，無載荷の時は無応力である。B型の場合，2個のジベルに均等に荷重がかからないことがあり，各個撃破的に疲労破壊して耐力を正当に示さない可能性があるのでC型のジベル1個の試験体を試みた。この場合荷重が偏心載荷の傾向となるのをつい立てでおさえたが，充分押えることができず，コンクリートブロックと鋼柱とが離れる傾向が出て，結果的には不当に低い値を示した。そこでD型では再び2個ブ



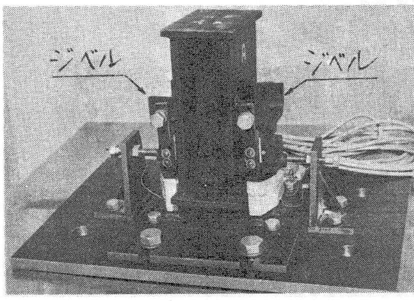
〔図－2〕 B型およびD型押抜き試験体



〔図－3〕 C型押抜き試験体

ロックの型式に戻したが，鋼柱の上端からジベル前面の距離を430 mmから300 mmに短めた。これにより偏心の影響は相当小さくなり具合がよくなった。

ジベルの型は図－2に示すようなものでこれは国鉄の合成桁の標準ジベルB型と呼ばれるものの1/2の大きさのものおよび図－4に示すようなプレキャストスラブ合成桁に用いたジベル（ジベルの個数を減らすためにプレート組立てで大きいもの）の1/2√2の大きさのものを撰んだ。

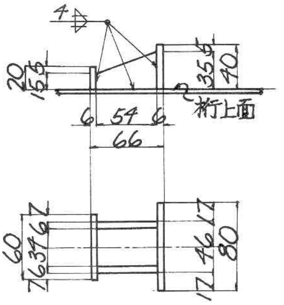


〔写真－2〕 コンクリートに埋込まない押抜試験の治具

コンクリートの種類としては試験結果の諸図の中で示すように普通コンクリートの高強度のもの，低強度のもの，人工軽量骨材（粗骨材，細骨材ともメサライト）のコンクリートなどを使用した。

コンクリートブロックの一方を上にして打設し，次の日に反転して他の側のコンクリートブロックを打ったもの，すなわち，ジベルが正規の向きになるようにおいて打設したものと，横に倒して打設したもの，すなわちジベルが横向きの状態で打ったものとある。いづれにしてもジベルの前面にすき間があいたり，弱い部分があたることがないように気をつけた。

ジベルをフランジと溶接する際，ジベルがフランジに密着するよう気をつけた。ジベル取付のすみ肉溶接の脚長は4 mmを目標としたが，実際には5 mmをこすものも多く出た。



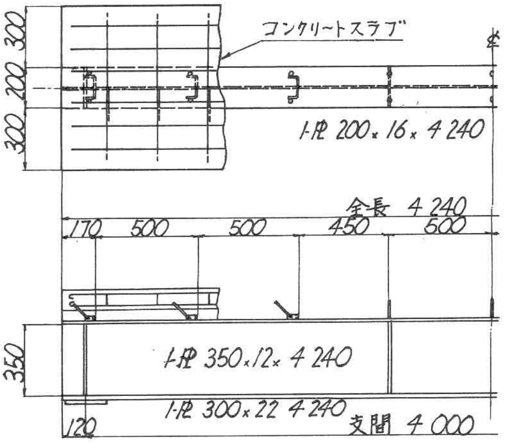
〔図－4〕 プレキャストスラブ用ジベル

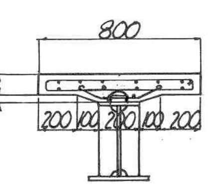
(3) 桁型式試験体

桁型式の試験体に関してはフランジにT型鋼を用いたものと溶接でI型に組立てたものとあるが，合成桁の性状の上からはほとんど差はない。なおジベル部の疲労耐力試験を主目的としたので，実橋よりもジベルの間隔比をひろげ，負担が大きくなるようにした。

コンクリートは実際の合成桁と同様上面を上にして打設し，バイブレーターをかけ，一週間ばかり養生してから脱型した。

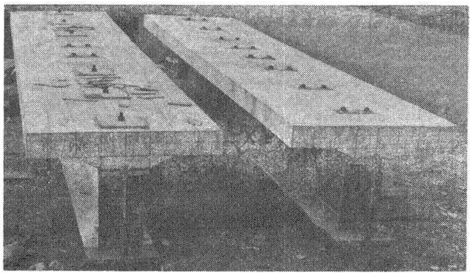
ジベルの溶接などは押抜き試験体の場合と同様である。プレキャストスラブ式の試験体のジベルではスラブが浮上るのを防ぐために高力ボルトで鋼桁上フランジと綴じた。高力ボルトの径は16 mmで10 kg·mのトルクで締めたが，これによりスラブと鋼桁上フランジとの間に生じる摩擦力は余り大きくないと思われる（写真－3）。



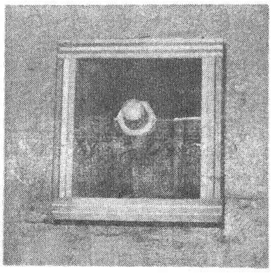


〔図－5〕 馬蹄型ジベルを用いた桁型式試験体

なお試みとしてジベルの中にボルトを立てたものも製作した（写真－4）。



〔写真－3〕プレキャスト桁型式試験体



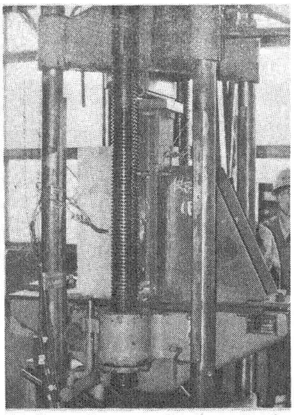
〔写真－4〕ボルトをジベルの中に溶植したもの

3. 試験方法

押抜き型式，桁型式とも静試験と疲労試験を行なった。

押抜き試験の場合，両側のジベル近辺，各々左右でコンクリートブロックと鋼柱とのずれを測定した。最初試験機にセットする時，偏心ができるだけ小さくなるよう調整したが，最後に行なったD型のものが最も調子よかった。

試験機は試験のシリーズにより種々のものを用いたが，結果には余り差を生じていないと思われる。C型の例を写真－5に示す。



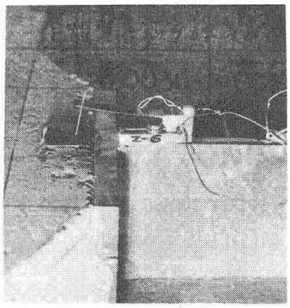
〔写真－5〕C型押抜疲労試験

桁型式の場合の荷重は写真－7のように中央部に2点，1.0mの間隔をおいて同時載荷した。

静試験の場合，荷重は一定量増す毎に0点にもどすというサイクルを画かせ，残留ひずみも観察し，ひずみが相当進んだ後はそのまま荷重を増して破壊に至らせた。測定は各部のひずみ，鋼とコンクリートとの間の相対ずれ，たわみなどについて行なった。

疲労試験では写真－7のように静的2×75t，動的2×50tの容量のローゼンハウゼン型構造物疲労試験機を用い，2点の荷重の周期は同調させ，くり返し速度は250回/分程度を標準とした。

桁試験の場合，桁の強度－くり返し数の関係を得る程の多数を試験することができず，またある回数くり返しても変化がない場合，荷重を順次あげる方法もとった。これに対し，押抜き型式の場合は原則として最初に設定した荷重のまま破壊までくり返した。



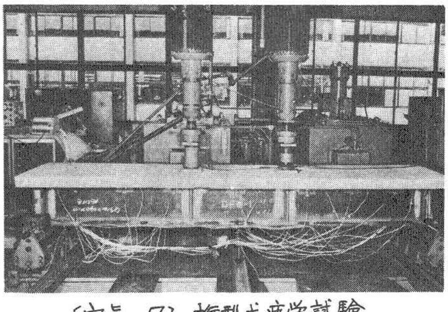
〔写真－6〕燐青銅を用いたゲージ

ずれ量を荷重のくり返し中にも測定できるよう特に写真－6の様に燐青銅板の両面にストレインゲージをはり，この板のたわみ量によりずれを測定した。

4. 試験結果と考察

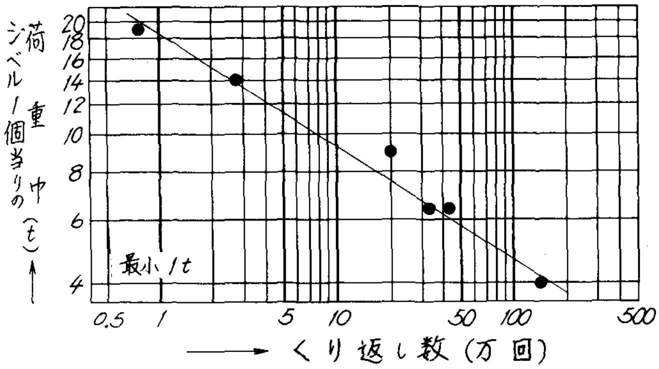
(1) コンクリートに埋込まない押抜試験体

図－6はコンクリート中にジベルを埋め込まないで，裸のまま荷重をかけた場合の荷重－くり返し数の関係図である。この場合，疲労の現象はジベルを柱のフラ



〔写真－7〕桁型式疲労試験

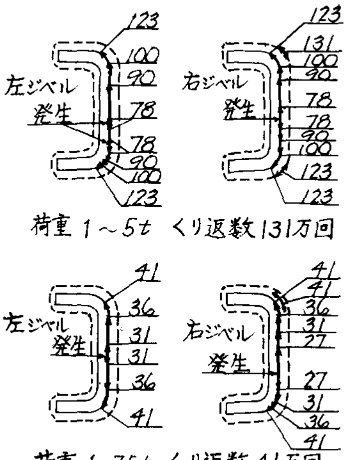
ンジにとりつけるすみ肉溶接のみにあらわれる。**図－7**にくり返し回数と亀裂の進行状況を2例あげる。一般に亀裂の発生時を的確に知ることはむつかしいが，定期的にレッドチェックを行うことなどによって観察した。この試験体の1つは左右のジベルに30万回近くで相次いで亀裂が認められ41万回では破断近くになった。また他の試験体では80万回近くで左右のジベルに相次いで亀裂が発生し123万回でいずれも破断近くになった。



〔図－6〕S－N図（コンクリートに埋込まない押抜き試験）

図－6は両対数で示しているため，どの程度の亀裂進展をもって終りとするかは余り影響せず，6個の試験体の結果は割合によく一直線の上にのっている。又傾斜が割合に急である（$k≒0.3$）。

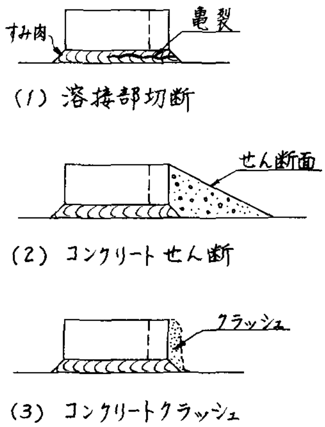
実測は困難なので計算上すみ肉溶接にどの程度の応力が作用するかを調べると，すみ肉ののど厚面に関しては，荷重が1ジベルあたり10tの場合，$\tau = P/A = 10000/10.7 = 935\ kg/cm^2$，$\sigma_t = M \cdot y/I = 10000 \times 2.5 \times 2.0/33.8 = 1480\ kg/cm^2$，合成応力として$\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$で評価すると$\sigma = \sqrt{1480^2 + 3 \times 935^2} = 2210\ kg/cm^2$，図－6から200万回で約4tすなわち約$880\ kg/cm^2$となる。T型にプレートをすみ肉溶接でつけて引張った場合にこの程度の値の記録がある。（鋼鉄道橋設計標準解説，土木学会，付属資料315ページ 参照）



〔図－7〕亀裂の状況（単位万回）

(2) コンクリートに埋込んだ押抜き試験体

ジベル部の疲労試験の結果を見ると大きくわけて3型式あるいはこれらの組合わせである。すなわち**図－8** (1)のようにジベルをとりつけるすみ肉溶接が疲労破断する場合，**図－8** (2)のようにジベル前面のコンクリートが斜にせん断でずれる場合，および**図－8** (3)のようにジベル前面のコンクリートが接触面でクラッシュして粉状になる場合である。一般的に云ってコンクリートの強度が高い場合には(1)の型式で，強度が中程度の場合には(2)の型式で，そして強度が低い場合には(3)の型式で疲労破壊する。



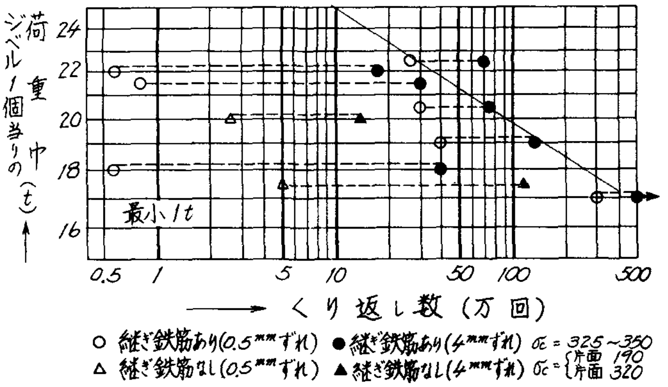
〔図－8〕ジベル部の疲労破壊型式

ジベルについているフープ鉄筋は主としてスラブの浮上りを防止するためで，ずれ止めの役割りもいくらかもつが，くり返

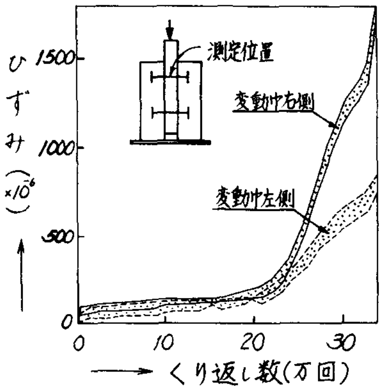
し荷重の下では可成り初期に切れるらしい。

図－9の中には2体左右のブロックを繋がないものも含まれているが，低い値となっている。500万回をこすもの以外はみなジベルに亀裂が入り，フープは破断していた。500万回をこすものもフープは切れていた。押抜き試験は桁におけるジベルの性質をなるべく忠実に再現し，ばらつきの少ないものがよいので，このあとの試験では全部左右のブロックを鉄筋で結ぶことにした。この鉄筋にどの程度応力が来るか，逆に云えばブロックをどの程度拘束しているかを見ると1例として図－10のように変化する。これはスタッドの試験に用いた例であるが，回数と共に増し，荷重が0に近くなっても，繋ぎ鉄筋の応力は余り下らなくなる。馬蹄型ジベルの場合，更に効果が大きいと思われる。

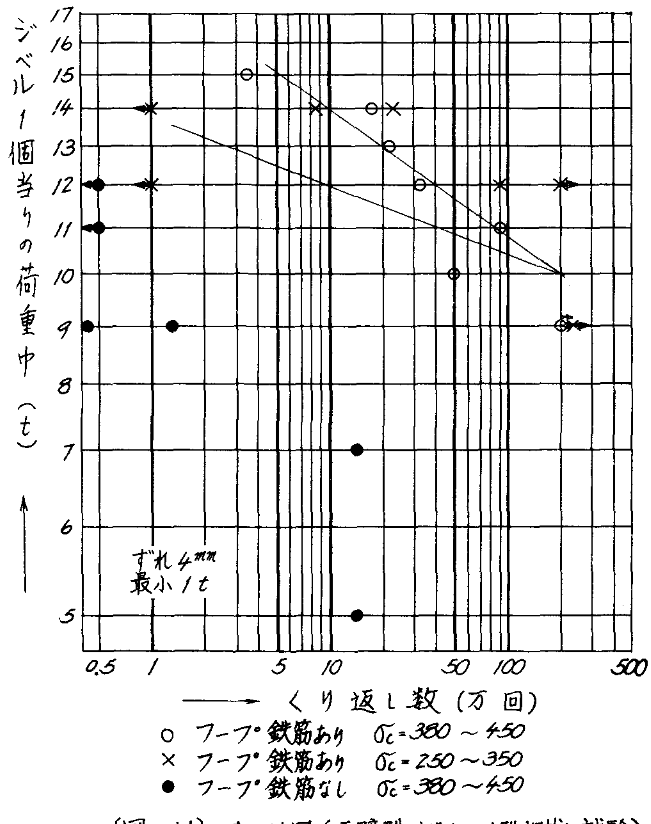
図－11はジベル一つのみで試験した方が正確であると考え試みたものである。荷重が偏載荷にならないようにブロックの反対側に寄りかかりを立て，かつ両者をボルトである程度の締め付力で締結した。しかしやはり離れようとする傾向は強いらしく，ほとんど全部コンクリートがえぐられるように破壊し，相当低い耐力を示し，かつコンクリートの強度の差も影響ないような結果となった。



〔図－9〕 S－N図（馬蹄型ジベルのA型およびB型押抜試験）

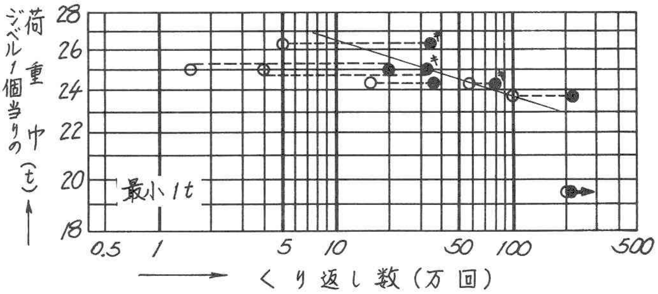


〔図－10〕 繋ぎ棒の応力－くり返数



〔図－11〕 S－N図（馬蹄型ジベルのC型押抜き試験）

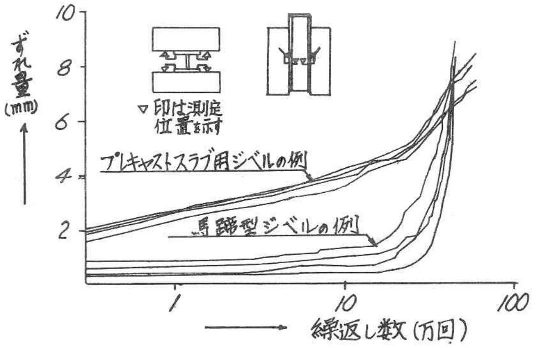
結局，この結果はジベルについてフープ鉄筋の疲労耐力を表すものと考えられる。すなわち9t程度であれば200万回のくり返しにフープ鉄筋はもつことになる。フープ鉄筋のつかないもので行なった試験は更にずっと低い値を示したが，いかに浮上り防止が必要であるかが推測される。



○ 0.5mmずれ　● 4mmずれ　$\sigma_c = 430 \sim 470$
キ ジベル亀裂発生

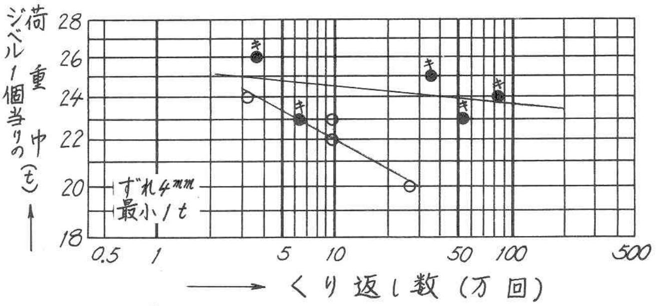
〔図−12〕S−N図（馬蹄型ジベルのB型押抜き試験）

図−12は高強度のコンクリートの場合で，図の中に0.5mmのずれの時の回数と4mmのそれと両方示してあるが，疲労耐力線は相当平で，両者の差は余りないことがわかる。図中㊖を入れたものはジベルに亀裂の入ったもので他はフープの切れたものはあるが，ジベルに亀裂は入らず，コンクリートのみが破壊したものである。



〔図−13〕くり返数−ずれ量の例

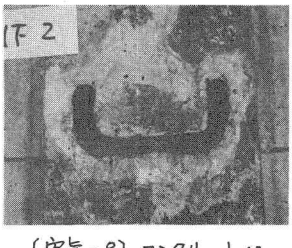
くり返し数と変位との関係の例を示すと図−13のようになる。馬蹄型ジベルの場合，末期に比較的急に立ち上るが，コンクリート強度が低い場合，立ち上りが早く始まる傾向がある。はじめの頃のずれはコンクリートの支圧によるもの（図−8 (3)）と思われ，おわりの頃はコンクリートのせん断破壊（図−8 (2)）あるいはジベルの破断（図−8 (1)）によるものと思われる。



● 普通コンクリート $\sigma_c = 300$　○ 軽量コンクリート $\sigma_c = 230$

〔図−14〕S−N図（馬蹄型ジベルのD型押抜き試験）

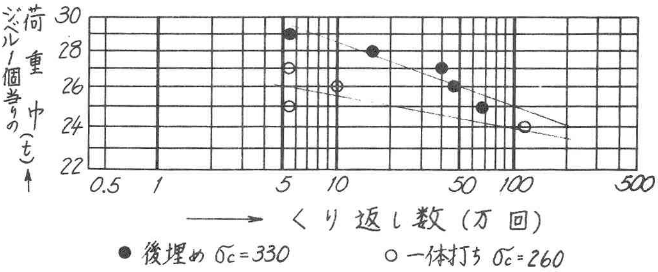
図−14は普通コンクリートと軽量コンクリートの場合を比較したものである。疲労強度は回数の少ない時よりも，多い時に特に差のあることがわかる。破壊の状態は両者明らかに異なり，普通コンクリートの場合，全試験体ともジベルに亀裂が入り，勿論フープ鉄筋も切れたがコンクリートは余り害をうけない（写真−8）のに対し，軽量コンクリートの場合，



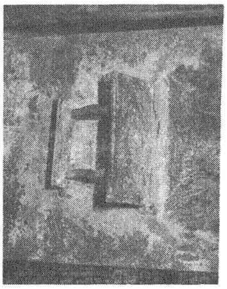
〔写真−8〕コンクリートが壊れていない例

〔写真−9〕コンクリートが壊れた例

全部ジベルは亀裂なしで，コンクリートで破壊している（写真－9，ただしフープは切れている）。疲労強度の絶対値の違いはコンクリート強度によるとしても，破壊型式の違いが疲労低減の傾向に差を与えている理由ではなかろうか。すなわち普通コンクリートの方はジベルの疲労強度を表わしており，軽量コンクリートの方はコンクリートの疲労強度を表わすことになる。



〔図－15〕 S－N図（プレキャスト用ジベルのD型押抜き試験）



〔写真－10〕 プレキャスト用ジベルの破壊

〔写真－11〕 馬蹄型ジベルの破壊

図－15はプレキャスト用ジベルに対する押抜試験の結果である。コンクリートブロック打設の際，ジベル部分を残してあとからコンクリートを埋めて実状に近い構造にしたものと，その様にせずはじめから一体にコンクリート打ちしたものと試験したが，後埋めの方がむしろ高い疲労耐力を示した。これはコンクリート強度の差によるものと思われる。これによりコンクリート後埋めは悪影響を生じないと推測されるだけでなく，むしろ後埋めコンクリートの性質によって耐力を向上させることも可能であることを示している。

一体をのぞきいずれの試験体のジベルにも亀裂が入っていた（**写真－10**）が，コンクリートの方はジベル接触面ですりへったようなもの，斜めにせん断されたものなどいろいろある。

［表－1］ 押抜き試験体の疲労耐力（ずれ4mm）と安全率

ジベル	試験方式	許容耐力(t) ①	10万回耐力(t) ②	②/①	200万回耐力(t) ③	③/①	試験時 σ_c(kg/cm²)(平均)	主要破壊箇所 *	備考
馬蹄型ジベル	B型	5.92	25.0	4.2	18.5	3.1	340	C.D	図－9 ●
	C型	5.37	12.0	2.2	10.0	1.9	300	C	図－11 ×
		6.75	14.0	2.1	10.0	1.5	400	C.H	図－11 ○
	B型	7.44	26.5	3.6	23.0	3.1	450	C.H.一部D	図－12 ●
	D型	5.37	24.5	4.6	23.5	4.4	300	C.H.D	図－14 ●
	D型	4.41	22.5	5.1	—	—	(軽量) 230	C.H	図－14 ○
プレキャスト用	一体打ち D型	4.16	25.5	6.1	23.5	5.6	260	C.D	図－15 ○
	後埋め D型	5.30	28.5	5.4	24.0	4.5	330	C.D	図－15 ●

* C；コンクリート　H；フープ　D；ジベル溶接

表－1は以上の押抜き試験による結果と，現行の設計示方書による静的な許容耐力との比である。なお現行の示方書の許容耐力式は次のようなものである。$Da=(0.25+0.05\,A/A_1)\,\sigma_{ck}\,A_1+0.7\,\sigma_{sa}\,A_2$ ただし A/A_1 は5をこえない。（建造物設計基準規程，昭和45年2月参照）

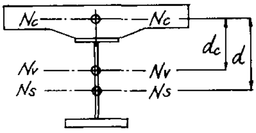
セットの誤差や読みとり誤差でずれの小さい時を標準にするとばらつきが大きくなるので，4mmのずれを参考に算出したが，実際には勿論この様な大きなずれは許されない。しかし実際の桁ではある程度ずれがあるとジベルに加わる力が減ること，ジベル部のずれは割合おわりの方で急激に増す傾向があるので，余り大きな違いはないと考えられる。一般に合成桁の死荷重／活荷重の比が高いことも考えると現行の静的計算でジベルを設計する限り200万回程度のくり返し荷重に対しては充分な安

全性があり，他との安全率とも勘案して現行よりもジベルの数を減らすことも可能であろう。

なおずれの大きさの限界についてはジベル部に特に異状が生じた場合は勿論それは限界の基準の一つとなるが，合成効果の劣化という点からは桁の断面特性も関係し，一概にきめられない。

(3) 桁型式試験体

ジベルの剛性が小さかったり，強度が低くてすべり始めれば充分な合成効果が得られない。図－16は本実験に用いた鋼桁およびコンクリートスラブに対し，両者の結合の剛度を種々に変えた場合どの様にスラブの応力分布(N)および単位長さあたりのせん断応力(T)が変化するかを計算して示したものである。

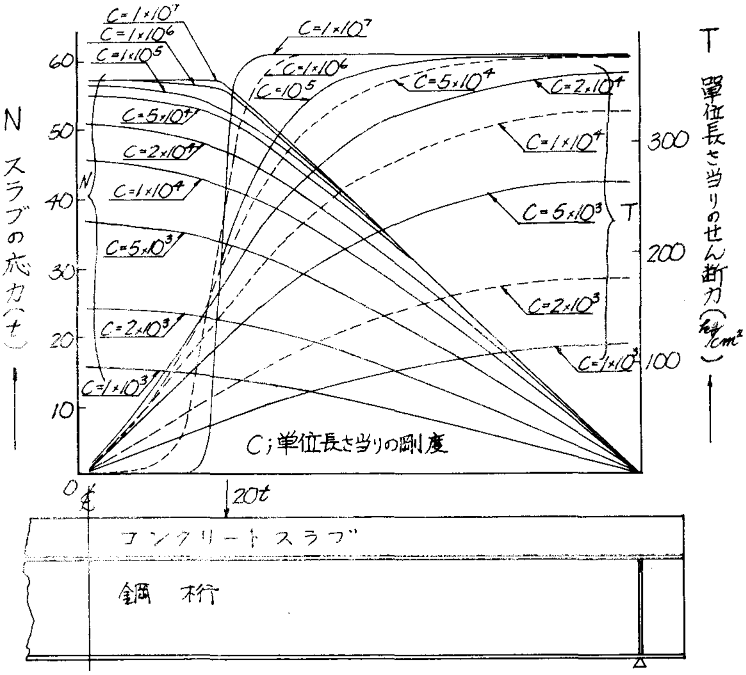


値は次に基いて計算して求めた。

$$\frac{d^2N}{dx^2}-N\left\{\frac{d\cdot nI_s\cdot C}{d_c\,E_c\,A_c\,(I_c+nI_s)}\right\}=\frac{d\,C}{E_c\,(I_c+nI_s)}$$

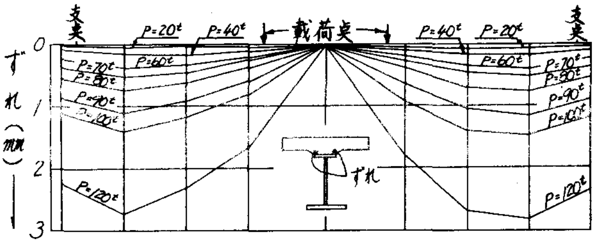
ここにCは単位長あたりの剛度(kg/cm/cm)である。

静的な実験でジベル一つあたり例えば50t/0.5mm程度が得られている(50cm間隔の場合，C=20000 kg/cm²となる)。ずれの分布はN/Cで求められるが，実測と割合に合うようである。この程度の剛度で桁中央でコンクリートの負担力は理論上，10％程度低下し，鋼桁の方の負担が増す。



〔図－16〕スラブの応力およびせん断応力度の理論値

図－17は鋼桁上フランジとコンクリートとのずれの分布の例を示す（スタッド合成桁の例）が，ずれは一般にこの様に端より少し中央よりに最高値が出る。計算値では桁端のずれが最大となるが，桁端でスラブの有効巾が小さくなることが，図－17の様な分布に変る原因と考えられる。事実，スラブを取り除いてジベルを観察すると，端から2番目のジベルの方が端のものより変状の著しいものがある。ずれ分布の傾向はある程度



〔図－17〕スラブと鋼桁のずれ分布の例(静試験)

疲労が進んでも相似である。

図-18は馬蹄型ジベルのものとプレキャストスラブのもののずれとくり返し数との関係の例を示したものである。荷重を増加した点でずれが増すのは当然であるが，同一荷重のくり返しの中にも徐々にずれが進行する。

ジベルの劣化による合成効果の低下は鋼桁上フランジの応力負担に敏感に影響する。図-19はその1例で理論的には上フランジと下フランジの応力比は0.56程度であるのが，最後は1.20となっている。

桁数が少ないので押抜き試験のようにずれ-くり返数の図を求めるに至らず，また荷重も途中で段階的にあげているので，定量的な評価は困難であるが表-2に結果の概略を示す。押抜試験と直接比較はできないが，一般に押抜試験の結果の方が低い値を示すようである。なお計算上，表中の荷重のほゞ1/2が各ジベルに加わる力となる。

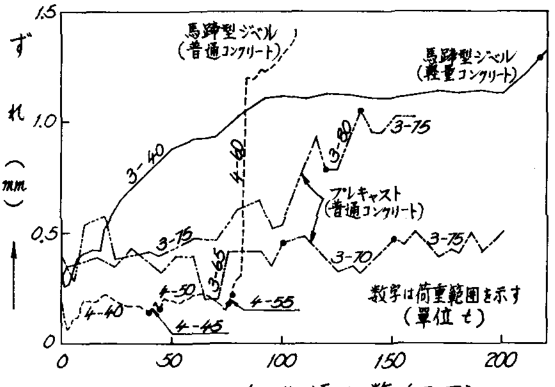
5. あとがき

目下、鉄道用合成桁の設計標準の改訂準備中であるが，以上の検討を更に進め，合成桁のジベル部以外の問題も解析したいと考えている。

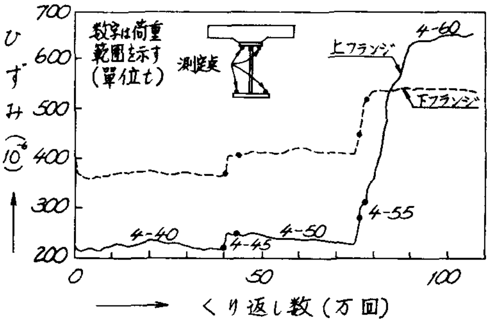
本実験において鉄道技術研究所，國鉄東京第一工事局の各位，日本鋼管KK，日本橋梁KK，石川島播磨重工KK，三菱重工KKの関係者の御協力のあったこと，および本報告書の作成にあたり國鉄構造物設計事務所の各位の御協力のあったことを記し，深く感謝の意を表する。

参考文献：

1. 43年度技術課題 C-3271 報告書その1, II (國鉄)
2. 44年度技術課題 C-3321 報告書 (國鉄)
3. 45年度技術課題 C-3321 報告書 (國鉄)
4. 第26回年次学術講演会 I-79
5. 第21回年次学術講演会 I-113
6. 第26回年次学術講演会 I-223
7. 第13回橋梁・構造工学研究発表会テキスト



[図-18] ずれ-くり返し数の例



[図-19] ひずみ-くり返し数の例

[表-2] 桁型式試験体の疲労試験結果一覧

記号	構造	試験時 σc (kg/cm²)	荷重(t) (最小3t)	くり返し数(万回)*	主要破壊箇所
A-2	標準ジベル	530	70	7	ジベル
A-3	標準ジベル	530	60	22	ジベル
DL-D	ジベルにフープ鉄筋なし	160	40	75	コンクリート
DLB-D	同上のジベルとボルト併用	160	45	110	コンクリート
DS-D1	小型ジベル	470	45	70	ジベル
DS-D2	小型ジベル	470	55	7	ジベル
DFH-1	標準ジベル	390	50	75	—
DFH-2	標準ジベル	380	55	10	—
DFL-1	標準ジベル	210	40	10	コンクリート
DFL-2	標準ジベル	200	40	5以下	コンクリート
DNF	標準ジベル	260	60	5以下	—
DLF	標準ジベル	240†	75	5以下	—
PNSF	プレキャスト用ジベル ジベル内にボルト	325	65	5以下	ジベル
PNBF-1	プレキャスト用ジベル ボルト併用	325	75	200	コンクリート
PNBF-2	プレキャスト用ジベル ボルト併用	325	75	120	コンクリート

* ずれ，上フランジ応力の変化の目立ちはじめた時の回数
† 軽量コンクリート