

プレキャストコンクリート床版のせん断キー継手の耐荷力に関する実験的研究

A Experimental Study of the Strength for the Precast Slabs with Shear Key Joint

松井 繁之*、金 閔七**、志村 敦***、江頭 慶三****、宮川 治*****

Shigeyuki MATSUI, Yoonchil KIM, Atsushi SHIMURA, Keizo EGASHIRA, and Osamu MIYAGAWA

* 工博 大阪大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

** 工修 大阪大学大学院生 工学研究科博士後期課程 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

*** 阪神高速道路公団大阪建設局 (〒559-0034 大阪市住之江区南港北 1-14-16)

**** 春本鐵工 設計部 (〒551-0021 大阪市大正区南丘加島 6-20-34)

***** 大阪大学大学院研究生 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

Recently, rationalization of structural systems have been required in the design and construction of highway bridges in order to reduce construction costs and to create a simplified fabrication bridge system. For the composite girder bridges, the use precast panels for the slab and to give prestress in longitudinal direction seem to be rational method from the view of durability of the slab. Also, in that case, the joint between precast panels can be simplified using a shear key type. The authors have carried out experimental studies to confirm the prestressing method and the shear strength of the joints by changing the size of the shear key and its material and longitudinal prestressing level. The paper describes the test results such as static strengths, cracking pattern and failure modes of the joints. One of the joint types was adopted into an actual composite girder bridge.

Key words : precast concrete slabs, joint, shear strength, shear key

1. まえがき

近年、日本における道路橋は省力化とコストの低減を目的に合理化が進められつつあり、プレキャストコンクリート床版を採用する形式が増加している。また、様々なプレキャスト床版及び継手の構造も提案されつつある。しかしながら、プレキャスト床版の継手に関する基礎的な研究はほとんど見当たらない。プレキャスト床版は現場の連続的に打設する床版と異なり、接合部いわゆる継手部という基本的な弱点を有している。従って、このような弱点がどの程度か、そして、全体の強度にどのような影響を及ぼすのかを明確にすべきである。また、疲労研究において、RC 床版及びプレキャスト床版の疲労耐久性を確保するためにも、様々な研究が行われて来た。その方法として、乾燥収縮による橋軸直角方向のコンクリートの貫通ひびわれの発生を防ぐことが重要であると

の観点から橋軸方向にプレストレスを導入することが第一に考えられる。これができない場合は、橋軸直角方向の断面剛性を大きくするか、橋軸直角方向にプレストレスを導入することが挙げられる。本来プレキャスト床版の継手はせん断力を伝達する必要がある。筆者らはインナーケーブル、外ケーブル、あるいはジャッキアップ・ダウン等の方法により橋軸方向にプレストレスを与える床版について、充填モルタル型の床版継手のせん断耐荷機構を調べるため、主にせん断力が作用する試験装置を開発し、実験を行ってきた。せん断キーの形状、材質、プレストレス力の大きさをパラメータとし、静的載荷試験結果を報告する。

2. 実験概要

各供試体は表-1、図-1 に示したように 3 タイプ 4 種類の継手について着目し、各タイプごとに 6 体、総計 24 体を用意した。各タイプ毎にプレストレス量 0、10、20 及び 30kgf/cm² に変化させて実験した。鋼棒のひずみ

制御によって供試体にプレストレスを導入した。継手 A タイプは標準である。B タイプは A タイプに比べ、せん断キーの大きさが大きく、充填モルタル量が多い。C タイプは A タイプに比べ、充填高さを低くしたものである。A~C タイプでは充填材料としては無収縮モルタルを使用した。D タイプは A タイプと全く同様の形状で、充填材料にエポキシ樹脂モルタルを使用したものである。

また、せん断キー継手を有するはり供試体において疲労耐久性の試験も行っている。その前提として試験装置の静的再現性の確認のため、改めて継手 C タイプのみ静的試験を行った。

はり供試体の寸法は、実物に近いモデルとなるのが望ましいので厚さ及び幅 25cm 実物大のはり供試体を作成し、せん断キー継手の挙動を調べた。

表-1 供試体の種類

供試体の名称	接合部の構造	プレストレス量(kgf/cm ²)	充填材料	供試体数
A-0.1,2,3	Type-A	0.10,20,30	無収縮モルタル	6
B-0.1,2,3	Type-B	0.10,20,30	無収縮モルタル	6
C-0.1,2,3	Type-C	0.10,20,30	無収縮モルタル	6
NC-0.1,2	Type-C	0.10,20	無収縮モルタル	3
D-0.1,2,3	Type-A	0.10,20,30	樹脂モルタル	6

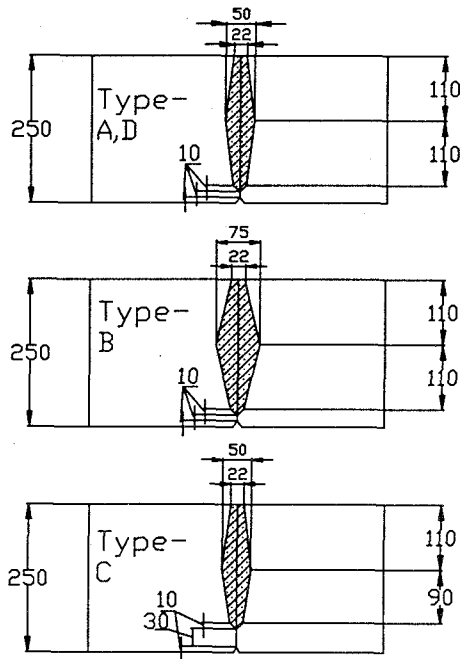


図-1 継手の構造

3. 実験方法

新しい試験装置は図-2(a)に示したように、片持部先端の回転を拘束することによってはり供試体の継手部でせん断破壊面が生じるように载荷位置及びせん断スパン比を決めた。本来、床版には 2 軸の曲げモーメ

ントのほか、交番するせん断力も作用し、さらにねじりモーメントがかかわり複雑な応力状態となる。しかも、床版の耐荷機構と継手部の破壊状況を考えると、継手部が破壊するのはせん断破壊によるものと推定できる。よって、純せん断状態を与える装置を開発し、純せん断（曲げ効果が少ない）下の挙動を調べることとした。図-2 に示した試験装置によって与えられる応力状態は図-3(a)に現わすことができる。また、このモデルをたわみ角法で表わすと次のような式になる。その時の曲げモーメント図及びせん断力図を図-3(b)に示す。従って、実橋床版に作用する正確な力の組み合わせどおりの断面力を継手に与えることもできる。

任意着目点の曲げモーメント

$$M_x = M_{ab} - (M_{ab} + M_{ba} + \frac{qa^2}{2}) \times \frac{x}{b}$$

$M = 0$ となる位置

$$x = b \times \frac{M_{ab}}{M_{ab} + M_{ba} + qa^2/2}$$

但し、 $M_{ab} = 2E_1k_1K_0(\theta_b - 3R_1) + C_{ab}$
 $M_{ba} = 2E_1k_1K_0(2\theta_b - 3R_1) + C_{ba}$

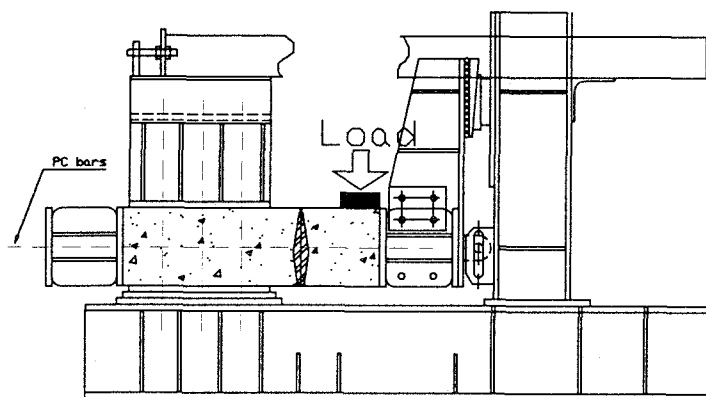


図-2(a) 静的試験装置

しかし、図-2(a)に示した片持部先端の回転を拘束する部材の剛性が結果的に弱かったのと板ローラーが滑りにくい構造だった。また、せん断力に着目すると車両が移動することにより継手部には交番するせん断力

が発生するため、これらを図-2(b)に示したように改良した。その結果、部材断面剛性も大きく、ローラーの構造も滑りやすくした。実験中、図-4に示したように接合部を挟んだブロック間の相対鉛直変位（段差）、開閉量、ひびわれ及び、せん断変形などを計測し、これらと載荷荷重との関係、ならびにせん断耐荷力を調べた。

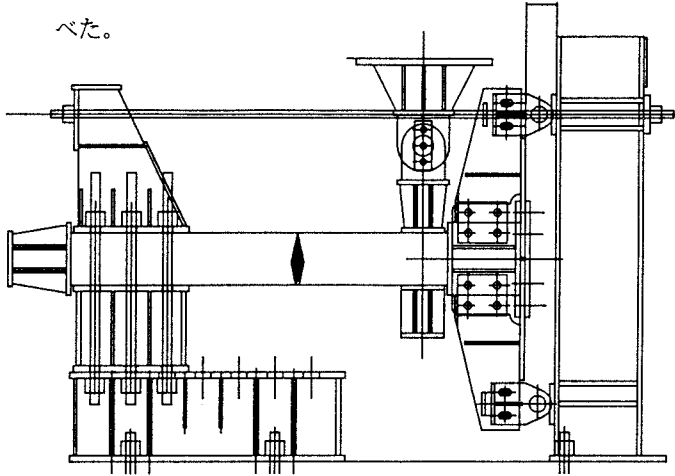


図-2(b) 動的試験装置

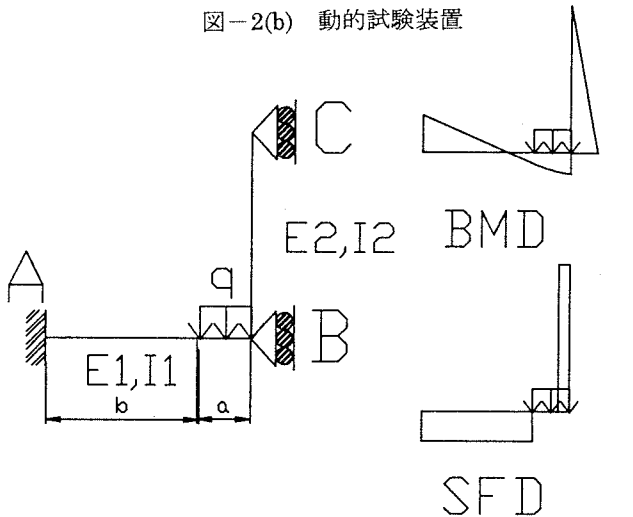


図-3(a) モデル図 図-3(b) 曲げ、せん断力分布図

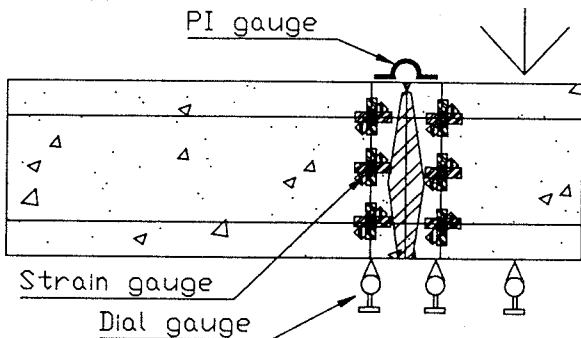


図-4 ゲージの位置

4. 実験結果

4.1 耐荷力の比較

表-2 はすべての供試体の実験結果概要をまとめたも

のである。各タイプ毎のプレストレス力 0kgf/cm^2 の各種限界状態の耐荷力は D タイプを除いて全ての供試体はほぼ同様の低い耐荷力を示した。自由端の回転拘束装置の若干誤差もあるが、継手の位置は図-3に示したよう、曲げモーメントよりせん断力が卓越するため、初期ひびわれはせん断力によって、充填部の上側でかつ固定側の母体の境界面で中央部の最も太くなった点まで発生した。その後、荷重が増加すると、充填部の左側下部において充填部から固定端を鉛直に押し下げる力が働き、中央部から押し抜き状のコンクリート破壊が起こり、耐荷力を喪失した。各供試体ともプレストレス 0 の場合、破壊は約 5tf であった。しかし、D タイプは接合部の付着力が大きいことから初期ひびわれ発生荷重及び最終破壊荷重が大きかった。次に、プレストレス力を導入した場合、初期ひびわれ発生パターンは 0kgf/cm^2 の供試体と同様であったが、その後、荷重が増加すると床版厚の中央部から荷重の左側縁と下側固定端を結ぶ方向でせん断ひびわれが独立して発生し、このひびわれ面でせん断破壊した。せん断破壊が発生する荷重は、タイプ D で明らかのようにせん断キーの充填材強度に影響されることが判明し、母体コンクリート強度より大きいのが望ましいといえる。

表-2 各供試体の耐荷力の比較

供試体名	プレストレス	初期ひびわれ	45° ひびわれ	載荷最大荷重
A0	0	2.4tf	-	5.3
A1-1	10	5.6	-	
A1-2	10	7.4	-	
A2-1	20	8	-	
A2-2	20	8.6	22.8	22.8
A3-1	30	11.4	-	
A3-2	30	9.2	-	
B0	0	2.8	-	5
B1-1	10	11.8	-	
B1-2	10	5.6	-	
B2-1	20	9	20	20
B2-2	20	10.8	17.5	17.5
B3-1	30	8.4	25	25
C0	0	3	-	4.6
C1-1	10	6.2	-	
C1-2	10	6	20	20
C2-1	20	8	-	
C2-2	20	9.4	-	
C3-1	30	7	17.2	17.2
D0	0	5.6	16.3	16.3
D1	10	5.5(母体)	-	
D2	20	14(母体)	-	
D3	30	19.5(母体)	-	
NC0	0	12	12	14
NC10	10	15	15	20
NC20	20	17	17	25

初期ひびわれの荷重とプレストレスの関係を図-6に示した。プレストレス 20kgf/cm^2 まではプレストレスの増加とともに耐荷力は増加するが、プレストレス 30

kgf/cm²になるとB,Cタイプでは上がらなかった。

また、改良装置の確認実験では図-5(b)に示したように全ての供試体に純せん断ひびわれが入った。各々プレストレスによる初期ひびわれと荷重による関係を NC として図-6 に示した。改良した試験装置においてプレストレスによる NC 供試体はせん断力によるひびわれが脆性的に発生したので先端部の回転を拘束する部材及びローラーを改良することによって供試体の継手部でも実橋床版に近い破壊機構が得られたと考えられる。

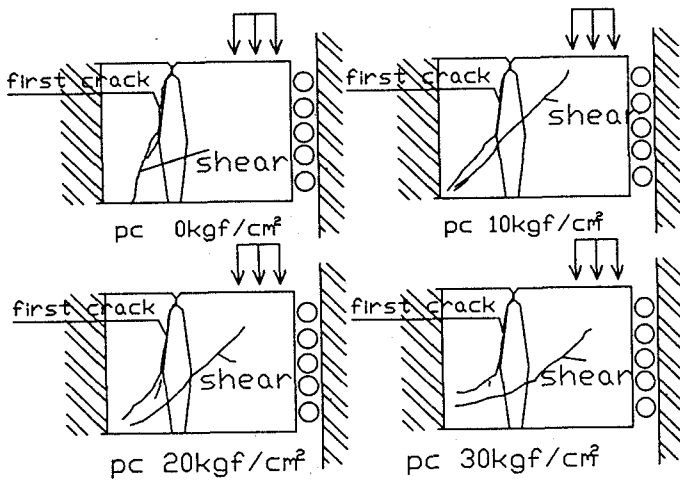


図-5(a) 最終破壊状況

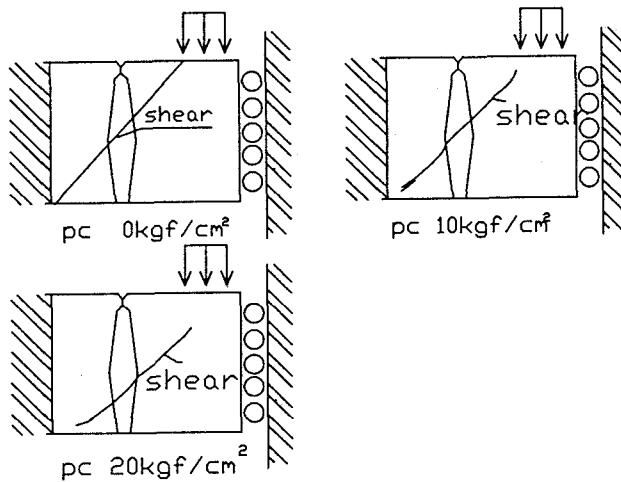


図-5(b) 疲労試験機による最終破壊状況 (静的)

プレストレスによる各供試体の初期ひびわれ

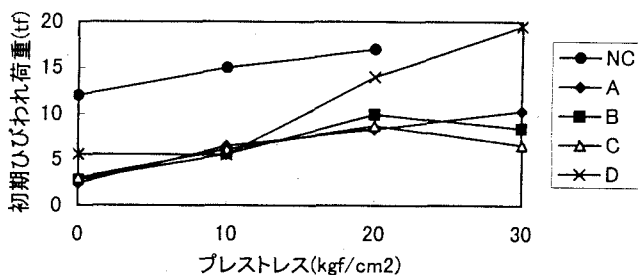


図-6 プレストレスによる各供試体の初期ひびわれ関係

4.2 各供試体の荷重によるせん断応力及び開きの比較

図-4 に示したコンクリート表面に貼ったひずみゲージの実測値からコンクリートのせん断応力を計算し、これとプレストレス量の間を見たとのが図-7(a)である。この図は A タイプの左側下点のみの結果であるが、同じ荷重でプレストレス量が増す毎にせん断応力は小さくなるのが分かる。これは圧縮応力の影響のため、初期ひびわれがあっても、ひびわれ面でせん断力伝達が残存するためと考えられる。プレストレス 0 及び 10kgf/cm² は初期ひびわれが発生すればせん断に伝達はなくなるので、グラフの傾きが急になる。しかし、プレストレス 20 及び 30kgf/cm² の場合はひびわれでもプレストレス力によってせん断の伝達はあると考えられる。図-7(b)には NC 供試体のせん断応力を示した。NC 供試体でも同様な結果が得られた。また、図-4 の継手部から荷重-開きの関係も A タイプについて図-8(a)に示す。荷重-開きの結果からも分かるように初期ひびわれが発生する前まではほとんど開きがみられず、ひびわってからほぼ直線的に増加する結果が得られた。この開量もプレストレスの増加に逆比例して小さくなっている。また、NC 供試体の荷重-開きも図-8(b)に示したようにせん断ひびわれが発生する前までは全く開かず、ひびわれが発生した時点で終局を迎えた。

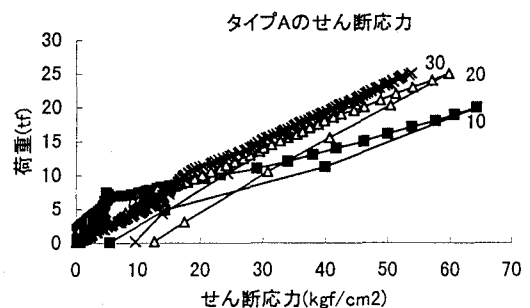


図-7(a) タイプ A の荷重-せん断応力の関係

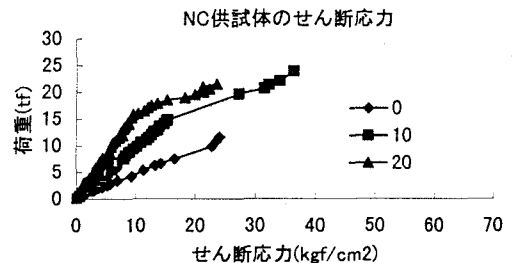


図-7(b) NC 供試体の荷重-せん断応力の関係

実橋床版に作用する曲げモーメント及びせん断力と等価なはり供試体の載荷荷重を求めるため、支間 3m の単純支持の実橋床版を用い、設計活荷重を載荷し、FEM 解析を行った。図-9(a)は解析のモデルであり、図-9(b)は橋軸方向のせん断力の分布及び曲げモーメントの分布である。また、図-9(c)はせん断力が最大になる場所を着目断面とし、橋軸直角方向のせん断力の分布及び曲げモーメント分布である。その結果、最大断面発生位置での幅 25cm の間に作用するせん断力は 1.95tf(衝撃含む)、曲げモーメントは 0.786tf・m(衝撃含む)となる。このせん断力の大きさで実測結果を判断するとプレストレスが 10kgf/cm² もあれば開きはほぼ 0 となると推測できる。

但し、乾燥収縮によるプレストレスの損失を考えると 20~30kgf/cm² の初期導入プレストレスは必要といえる。

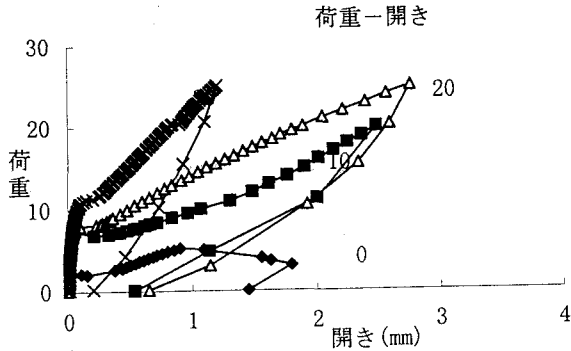


図-8(a) タイプ A の荷重-開きの関係
NC供試体の荷重-開きの関係

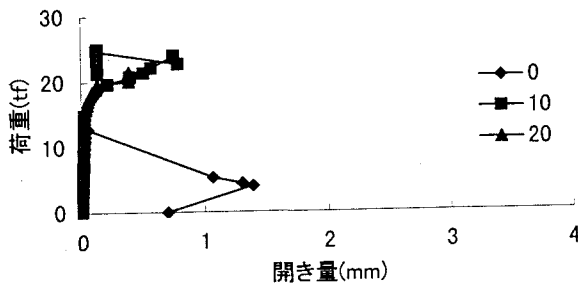


図-8(b) NC 供試体の荷重-開きの関係

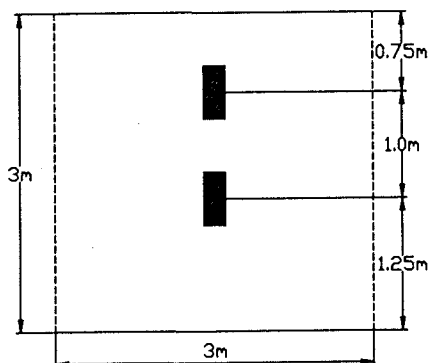


図-9(a) 解析モデル

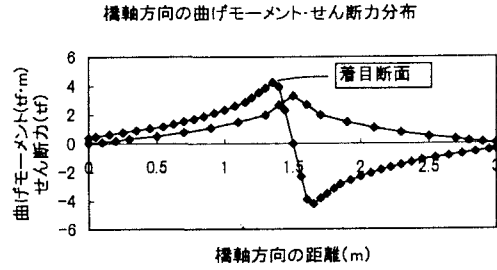


図-9(b) 橋軸方向の応力分布
橋軸直角方向の曲げモーメント・せん断力分布(Mx)

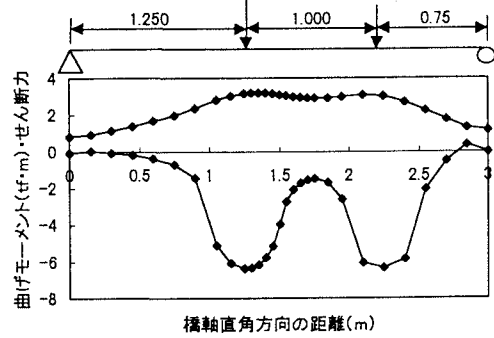


図-9(c) 橋軸直角方向の応力分布

5. 修正場圧縮理論による耐荷力の算定

棒部材のせん断耐力の推定式については種々の提案式がある。例えば、土木学会のせん断耐力式、45°トラスモデル、角度修正トラスモデル、圧縮場理論、修正圧縮場理論等による算定式があげられる。ところで、土木学会のせん断耐力式はトラス理論から導かれる理論式を基礎としたものであり、せん断力による圧縮斜材角度を 45° としている。しかし、軸力を受けるはりではせん断ひびわれ角度は、軸力による影響で部材内の主応力の方向が変化するため、必ずしも圧縮斜材角度は 45° とならないことが指摘されている。修正圧縮場理論は、コンクリート部材のひびわれの発生した部分をマクロにとらえ、その要素内の平均応力・平均ひずみに対して力の釣り合い条件及び変形の適合条件を用いて解く理論である。

その中でプレストレスの効果を考慮できる修正圧縮場理論を用いて、各供試体のせん断耐荷力を求める。各プレストレス力を変化した場合の主引張ひずみと破壊角度の関係を図-10 に示した。プレストレス力によって破壊角度が 45° ~ 35° 程度となり、本実験でも、せん断破壊角度は図-5 の最終破壊状況からも分かるようにプレストレスが増すことによって破壊角度がなだらかになった。また、ひずみとせん断耐力との関係を図-11 に示す。せん断耐力はひずみが 0.001 以上になるとコンクリートに

せん断ひびわれが入ることから、その時の耐力とすることにした。その結果、プレストレスによって15~25tf程度であることが分かった。供試体数がまだ、少ないので、明確には言えないが、実験値はほぼこの計算値とよい一致を示していると言える。本来、修正場圧縮理論は継手なしの一体した棒部材において、耐力算出式であるが、継手部で厚さの中心を通して破壊する今回の継手供試体にも適用性があると思われる。

Angle-principal strain relation

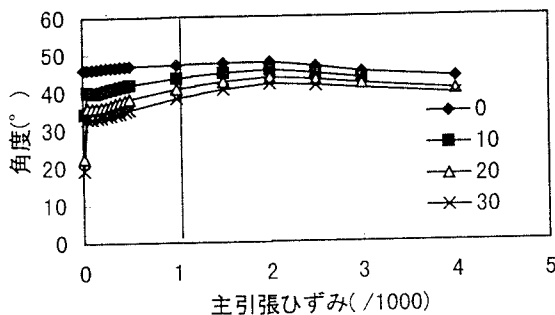


図-10 主引張ひずみ-破壊角度

Shear strength-principal strain relation

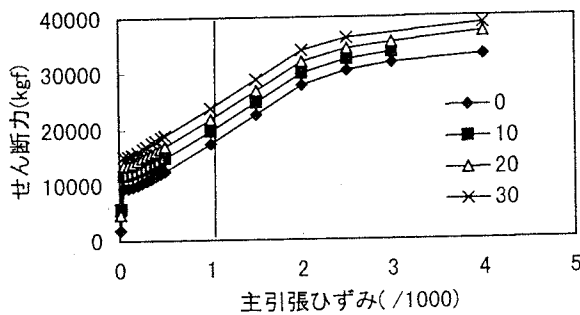


図-11 主引張ひずみ-せん断耐力

5.まとめ

本せん断試験装置を用いた実験から以下の結果が得られた。

- 1) 片持部先端の回転を拘束することによってはり供試体で継手部のせん断破壊が再現できるようになった。
- 2) 接合部の形状の違いによる明確な差異は得られなかった。また、プレストレス量が増加するにつれ耐荷力も増加したが、プレストレス 30kgf/cm^2 には明確な増加は見られなかった。
- 3) プレストレスが増すことによってせん断破壊ひびわれの角度はなだらかになった。
- 4) プレストレス 0kgf/cm^2 の D タイプは接合部の付着

力が大きいことから初期ひびわれ発生荷重及び最終破壊荷重が大きかった。

- 5) 荷重-開きの結果から開きは非常に小さいので実橋の活荷重レベルでは A タイプで十分安全であると考えられる。
- 6) せん断キーの強度は最低母体と同様の強度が望ましい。
- 7) 修正場圧縮理論を用いたせん断耐力は実測値に近い結果を示した。

6.あとかき

現在、せん断キー継手を有するはり供試体の疲労試験を行っている。別の機会にせん断キー継手を有する疲労試験について報告したい。

【参考文献】

- (1)小川、中村、上松、竹中：逐次ジャッキアップ・ダウン工法を用いたプレキャスト床版連続桁橋の設計、土木学会第53回年次学術講演会概要集、1998.10
- (2)浜田、阿部、阿部：プレストレスプレキャスト床版接合部の曲げ疲労強度に関する基礎的研究、土木学会論文集 No.564/V-35, 57-73, 1997.5
- (3)コンクリート標準示方書（平成8年度版）設計編、土木学会、1996
- (4)Collins, M.P. and Mitchell, D : Prestressed Concrete Structures, PRENTICE HALL, Inc, 1991
- (5)鄭、松井：外ケーブルのせん断補強に関する解析的研究、コンクリート工学年次論文報告集 Vol.20, No.3, 1998