

論文 セン断キーを有する継手部におけるせん断耐荷力および疲労特性に関する実験的研究

金 関七^{*1}, 松井 繁之^{*2}, 佐藤 崇^{*3}, 袴田 文雄^{*4}

要旨: 橋梁床版としてPCa床版を用い、橋軸方向にプレストレスを与える方式を前提とし、PCa床版のせん断キー継手の静的耐荷力、および、せん断キーの疲労特性に関する研究を行った。継手部分において主にせん断力が作用する装置を用い、実物厚のはり供試体を作成し、実験的に耐荷力を評価した。また、継手部分に交番繰返しせん断力を与えて、このせん断キー継手部分の疲労特性を調べた。

キーワード: プレキャスト床版、せん断キー継手、プレストレス、せん断耐荷力、疲労耐久性

1. はじめに

本研究は、内ケーブル、外ケーブル、あるいはジャックアップ・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プレキャスト床版で用いられる、モルタル充填型のキー継手の静的せん断破壊機構を調べるため、はり供試体を対象にして主にせん断力が作用する試験装置を開発し、実験を行ったものである。

また、せん断キー継手の疲労耐久性を調べるため、橋軸方向に導入したプレストレスの大きさと継手の形状をパラメータとし、疲労試験を行った。これも着目する継手部分に純せん断力で交番繰返しせん断を与える上記の試験機を用いて行った。

以上の2種の試験結果を報告し、継手の挙動について考察する。

2. 実験概要

せん断キー継手の静的および疲労試験に用いた供試体は表-1、図-1に示した3種・3タイプである。先行した静的試験の結果¹⁾から、くさび形状のCタイプが最も合理的であったことから、これを基準として疲労破壊機構を調べた。Cタイプの供試体を合計で18体用意した。また、継手の形状をフラットにしたFLATタイプ継手を2体、そして、継手のない基本はり部分の疲労強度を調べるためPCaNJを2体、さらに、Cタイプの静的供試体SCを3体用意した。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および幅は25cmとした。供試体の詳細寸法・配筋は図-1に示すとおりである。PCa部分で破壊が先行しないようにスターラップを配置した。

表-1のプレストレス量を太字で示したものはまだ疲労試験を行っていない予定のものである。

橋軸方向に導入したプレストレス量を0, 0.98および1.96MPaの3種に変化させた。しかし、FLタイプ供試体は数が少ないため、プレストレス量を0.98MPaに限定した。なお、プレストレスは静的試験と同様に外ケーブル方式で、鋼棒によって与え、プレストレス量は鋼棒のひずみで管理した。

コンクリートの強度として静的と同様に母体のコンクリートの設計強度は30N/mm²、充填材の設計強度を50N/mm²とした。SCタイプ、CタイプおよびFLタイプで用いた充填材は無収縮モルタルである。コンクリートと充填モルタルの材料試験結果は表-2に示した。

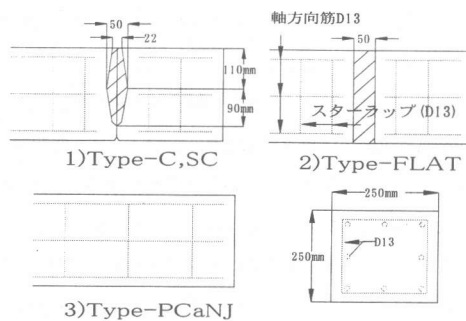


図-1 各せん断キー供試体の概要図

*1 大阪大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 工修 (正会員)

*2 大阪大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 工博 (正会員)

*3 大阪大学 工学部 土木工学科

*4 阪神高速道路公団 大阪建設局 建設企画部 設計課

表-1 疲労供試体のパラメータ

供試体	充填材	プレストレス量(MPa)	最大載荷荷重 単位: % (kN)	供試体数	区分
Type-C	無収縮モルタル	0,0.49,0.98 [*] ,1.96	静的の 25(30),35(42),55(66),75(90)	18	疲労
Type-FLAT(	無収縮モルタル	0.98,1.96 [*]	静的の 55(66)	2	疲労
Type-PCaNJ	—	0	静的の 35(42),55(66),75(90)	3	疲労
Type-SC	無収縮モルタル	0,0.98,1.96		3	静的

表-2 継手部分における材料試験結果(MPa)

供試体名称	圧縮強度		引張強度		ヤング係数	
	母体	継手	母体	継手	母体	継手
Type-SC	29.4	54.4	2.61	3.42	31300	22185
Type-C	30.0	53.9	2.65	3.21	32000	23324

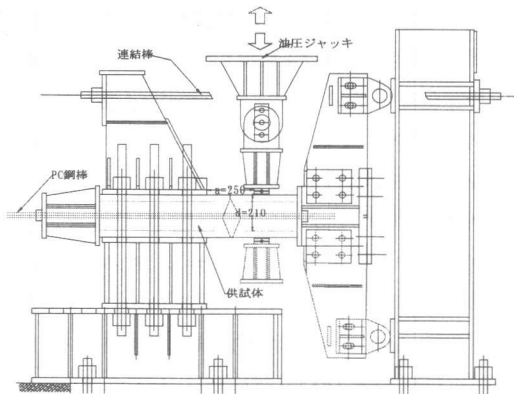


図-2 試験装置の概要図

3. 実験方法

試験装置を図-2 に示した。片持部先端の回転を拘束する部材を供試体先端に T 字型に取り付け、その両端に取り付けたローラーを介して反力柱で変位を拘束した。ジャッキをはり先端付近で上下させて交番するせん断力を与えるようにした。今回行ったせん断キー継手実験ではせん断スパン比(a/d=1.2)を 1.2 とした。

実験中、図-3 に示したように継手部を挟んだ床版間の相対鉛直変位(段差)をダイヤルゲージによって、開閉量をパイゲージによって計測した。主ひずみの方向やひび割れ発生荷重の確認のため、3 方向のひずみゲージを貼りつけた。また、載荷速度は変形量により異なるが 2~3Hz 程度とした。はり供試体の設置は図-3 に示すように PCa 版継手端部につけているモルタル落下防止用凸起部側を(以下、アゴ部という)上側にして、実橋とは逆にした。このアゴ部の接触幅は 50mm で、モルタルで充填され、床版が一体化されても、この部分は切り欠きになっている。

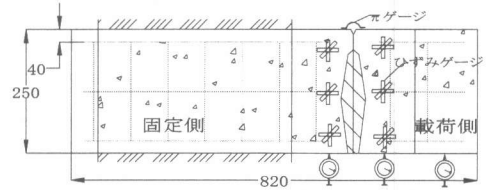


図-3 ゲージの位置

4. 実験結果

4.1 せん断耐力および最終ひびわれ状況

せん断キー継手を有する供試体を用いて、疲労試験を行う前に本試験装置で供試体に所期のせん断力が与えられるか否かを確認した。プレストレスを 0, 0.98 および 1.96MPa に変えて静的耐力を調べた。図-4 に静的最終ひび割れ状況を示した。継手界面の初期曲げひび割れは発生せず、全てせん断キー継手部中央を斜めに横切るせん断ひび割れが発生し、同時に耐力を失った。このような破壊状況から、供試体はせん断破壊したと言え、本試験法が適切なものと言える。斜めひび割れの発生角度はプレストレスの増加によって 45° から 35° 程度に緩やかになった。

図-4 のように純せん断ひび割れが発生する無筋はりの計算せん断ひび割れ耐力と実験結果とを比較することにした。プレストレスとせん断応力から、継手中央の主引張応力は次式で表される²⁾。

$$\sigma_1 = -\left(\frac{\sigma_{pe}}{2}\right) + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{pe}}{2}\right)^2 + \tau_{cr}^2} \quad \dots\dots\dots(1)$$

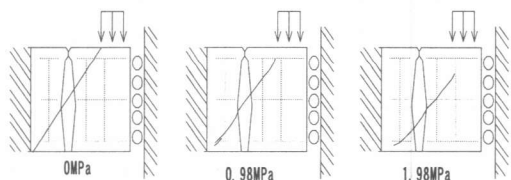


図-4 静的最終ひび割れ状況(Type-SC)

表-3 試験機による斜めひび割れ耐荷力の算定式

供試体名	V_{exp}	V_{cal}	V_{cal}/V_{exp}	破壊角度
Type-SC0	117.68	116.01	0.99	45
Type-SC0.98	147.11	152.5	1.04	41.58
Type-SC1.96	166.72	187.9	1.13	38.85
FLAT0	49.03			0
V_{exp} : 実測値(斜めひび割れ発生荷重)				
V_{cal} : 算定式				

単位: kN

ここで, σ_{pe} : 有効プレストレス(N/mm²)

τ_{cr} : 床版図心位置における最大せん断応力度

この主引張応力が引張強度に達したときにせん断ひび割れが発生すると仮定すると, せん断ひび割れ発生応力は次式で表わされる。

$$\tau_{cr} = \sqrt{f_t^2 + f_t \sigma_{pe}} \quad \text{.....(2)}$$

そして, せん断ひび割れ発生耐力は断面で積分して次式のように表される。

$$V_{cal} = 0.67bh\sqrt{f_t^2 + f_t \sigma_{pe}} \quad \text{.....(3)}$$

ここに, f_t : コンクリートの引張強度(N/mm²)

ただし, 式(3)は同一材料の算定式であるので, 本供試体のように母体と継手の強度が異なる場合には, 厳密な算定にはひび割れ断面の分担力をコンクリート強度毎に分けて算定する必要がある。

プレストレスを導入したときの破壊面の角度はプレストレス量とせん断ひび割れ発生応力から次式で表される。

$$2\theta = \tan^{-1} \left(\frac{2\tau_{cr}}{\sigma_{pe}} \right) \quad \text{.....(4)}$$

この算定式を用いて SC タイプの斜めひび割れ耐荷力ひび割れ荷重を計算すると表-3 のようになり, 実測値とよい一致を示しているといえる。

4.2 せん断疲労試験

実橋床版に作用する曲げモーメントおよびせん断力と等価な断面力が供試体に発生する荷重を求めた。支間 3m の単純支持の実橋床版を想定し, 設計輪荷重に衝撃を加えた荷重, あるいは, 実測の最大輪荷重を比較した。後者の大きい方の 147kN を採用し, FEM 解析で断面力を求めた。その結果, 最大断面発生位置での幅 25cm はり部分に作用するせん断力は 15.1kN, 曲げモーメントは 7.7kN・m となる。この内せん断力を荷重として, 試験装置に与えるとは

りの固定端で発生する最大曲げモーメントは 2.5kN・m となり, せん断力卓越型となる。

しかし, はり供試体の破壊耐力は約 120kN であったため, 上記の荷重で実験を行っても全く破壊することはないと考えられるので, 静的耐力の 25%, 35%, 55% および 75% を交番繰返し載荷で与えて継手の疲労耐久性を調べることにした。

4.2.1 各供試体のひび割れ状況とひび割れ開口幅およびたわみの比較

4.2.1.1 プレストレス 0MPa 時のせん断キー継手の挙動

全ての供試体の最終ひび割れ状況を図-5 に示す。載荷荷重 25% (30kN) ではせん断キーの図芯部から斜めにひび割れが発生するとともに, 継手のアゴ部からもせん断キーの境界に沿って, 厚さの半分まで入ったが, その後 200 万回まで, ひび割れの進展はなかった。

また, 疲労載荷荷重 35% になると, 継手のアゴ部から下側にせん断キーに沿ってひび割れが入り, さらに交番繰返し荷重なので継手の下からも上側にひび割れが進展した。せん断キー継手の中央部(くさび部分)までひび割れが入ると母体の方にひび割れが進展した。図-5 に示したように母体に入ったひび割れは支点の方に進展するが, 母体端部に配置したスターラップ筋と交差し, それ以上ひび割れは進展しなかった。

図-6 および図-7 に各供試体の荷重直下のたわみとアゴ部の開きの結果を示す。たわみの上側最大値および下側最大値と回数の関係によって示す。凡例の up, down は載荷方向を示す。また, 開きの結果も交番載荷なので, 両側の値が取れた。せん断キー供試体が上下対称ではないため, たわみおよび開きの値も載荷荷重を引き下げた場合の方が若干大きくなった。これはアゴ部のノッチ部からひび割れが発生するためである。

さらに, 載荷荷重を 55% にあげて疲労載荷すると, ひび割れ発生は載荷荷重 35% と同様にアゴ部から入り, 継手に沿ってひび割れが進展する。そして, 疲労回数が 5 万回程度になると母体の方に斜めひび割れが発生する。くさび中央部から斜めに進展するひび割れは 35 万回程度まで成長した。それ以降, この斜めひび割れも停止した。ひび割れが母体のスターラップと交差し, スターラップがせん断抵抗したものと考えられる。

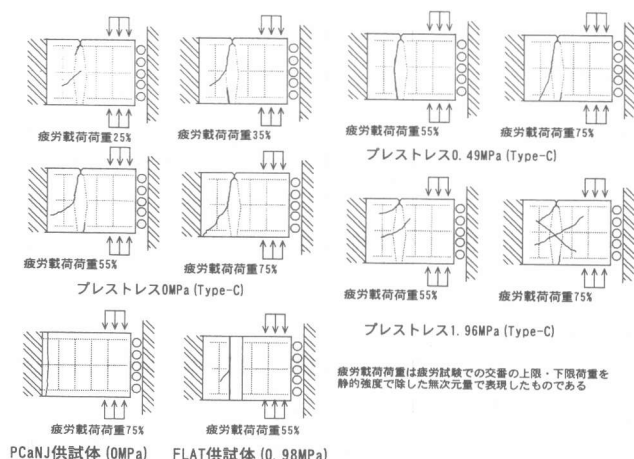


図-5 疲労最終ひび割れ状況

最後に、載荷荷重75%で載荷すると、少ない疲労回数で疲労破壊した。すなわち、疲労載荷開始5千回程度でアゴ部からひび割れが入り始め、充填部中央から床版母体に斜めひび割れとなり、7万回程度で床版下面に達し、ひび割れが貫通し、段差が大きくなった。

以上の結果をまとめると以下のようである。

35%以下の載荷荷重では所定の疲労回数（200万回）までひび割れが発生してもたわみと開きの値が上昇する気配はみられなかった。これは、はり部材の端部回転を拘束したため、付着切れひび割れが発生しても圧縮側ではせん断キークが抵抗しているため、貫通ひび割れとならないためである。55%程度になるとせん断キークの中央部から本体に斜めひび割れに発展するため、たわみは若干増加傾向を示すようになった。75%では、そのひび割れでのずれが大きくなり、スターラップで全せん断力を担い、たわみは非常に大きくなった。

また、疲労載荷によってたわみおよび開きの結果は明瞭な違いがないため、各供試体において貫通ひび割れが発生した時を使用限界寿命と定義する。

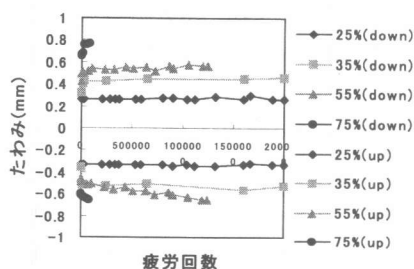


図-6 OMPa のたわみ変化

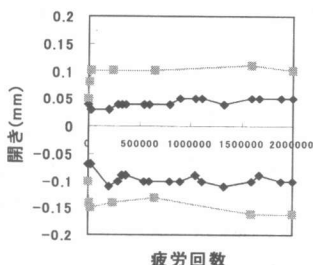


図-7 OMPa の開き変化

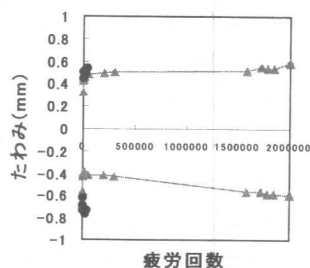


図-8 0.49MPa のたわみ変化

4.2.1.2 プレストレス0.49MPa 時のせん断キークの挙動

橋軸方向にわずかであるが、プレストレスを導入したので、載荷は55%から行った。55%の場合、アゴ部から初期の付着切れひび割れが約10万回で発生し、その後、下側からも発生し、約60万回で充填部の全高にわたる貫通する付着切れひび割れが発生した。橋軸方向にプレストレスなしの供試体と比べ、初期の付着切れひび割れの発生は約5万回程度遅れる結果となった。

疲労荷重を75%に上げると、1万回程度でアゴ部から下の方に付着切れひび割れが発生しはじめて、間もなく床版下面からも上の方に斜めひび割れが進んでいた。およそ、20万回程度で完全に貫通ひび割れが発生し、たわみが増加したので、使用限界に達したとして載荷を終了した。プレストレス0のものと比較すると約13万回載荷回数が増加した。

図-8 は載荷荷重55%および75%の最大・最小たわみの変化を示す。75%の場合のたわみ変化は初期の急増から直線的に増加の傾向を示し、進行性破壊を起こしていると判断できる。載荷荷重55%では初期付着切れひび割れから斜めひび割れに進展して貫通ひび割れとなったが、200万回までの漸増速度はプレストレスなしのものより小さかった。

4.2.1.3 プレストレス1.96MPa 時のせん断キークの挙動

橋軸方向にプレストレス1.96MPaを導入するとアゴ部からの付着切れひび割れは発生しなくなり、その代わりに静的耐力試験時のひび割れと同様にせん断キークの中心付近からせん断キークを横断する斜めせん断ひび割れが発生した。せん断応力が一番大きい図心からひび割れ始め、支点および載荷点に向かって進展した。載荷荷重が55%の

場合は斜めひび割れは1本だけであったが、75%の場合には×印のように交番せん断力に対応する2本の斜めひび割れが発生した。プレストレスを導入すると1方向のひび割れが発生しても、荷重が反対向きに作用する場合、最初のひび割れのずれが拘束されるため、新しいひび割れが発生したものと考えられる。

4つの供試体の最大・最小たわみの変化を図-9に示す。載荷荷重25%および35%では全くひび割れが発生せず、200万回で終了したが、55%になるとアゴ部および図心部から斜めひび割れが発生するため、たわみは若干大きくなった。さらに75%になると、たわみは急変した。

図-10に回数による開きの結果を示す。継手の開きはプレストレスの影響で荷重が25%時では全く開かず、200万回をクリアした。しかし、疲労荷重35%になると開きが発生する。上側の開きは0.1mm以上になるが、下側の開きは0.075mm程度で、約75%であった。

4.2.1.4 フラット(FLAT)供試体における継手の挙動

せん断キー継手の形状をフラット状態にし、せん断キーのくさび効果をなくした場合についても実験を行い、比較の対象とした。

このフラット供試体(Type-FLAT)の静的耐荷力は49kNであった。橋軸方向にプレストレスを導入しなかったら、ただ付着せん断力のみ耐力しか考えられないので、橋軸方向にプレストレスを0.98MPa導入した。疲労載荷荷重はせん断キーと同様に静的55%(せん断キー継手の耐力を基準にして、66kN)をかけた。疲労載荷を開始するとすぐ貫通ひび割れが発生したが、載荷を継続した。貫通ひび割れの断面でもプレストレスによる摩擦で抵抗しているため、120万回までは大きな変化は無かった。しかし、120万回以降に目地の中央部から支点部に向かう斜めひび割れが発生し、160万回以降たわみが増加した。200万回で載荷を終了した。よって、プレストレスが導入された場合にはフラットな継手でも左端側の摩擦抵抗によって、疲労耐久性があることが実証できた。

図-11に最大・最小たわみの変化を示した。120万回までは、たわみの変化はなかったが、120万回以降増加した。160万回程度で継手の中央部から発生した斜めひび割れが成長してたわみは漸増した。従って、たわみが増加する160万回をこの供試体の使用限界と考えられる。

4.2.1.5 PCaNJ 供試体の疲労挙動

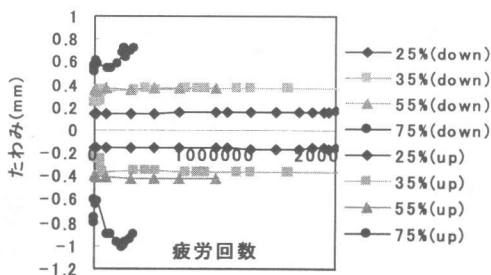


図-9 1.96MPa のたわみ変化

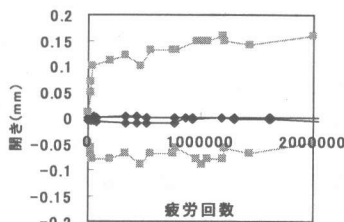


図-10 1.96MPa の開き変化

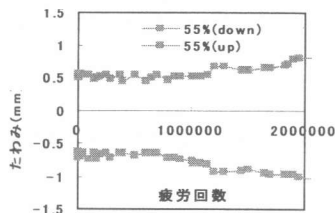
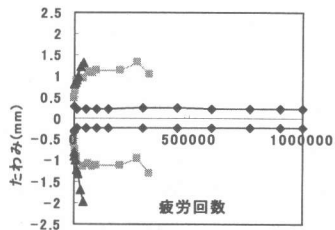


図-11 Type-FLAT のたわみ変化



凡例は同様

図-12 PCaNJ たわみ変化

継手なしの供試体(PCaNJ)についても実験し、この結果とせん断キー継手の結果と比較する。橋軸方向プレストレスを導入せず、載荷荷重を静的荷重の35%と55%および75%の3種とした。この供試体では図-1に示したように橋軸方向の鉄筋が繋がっている。

疲労載荷の結果、載荷荷重が35%であれば200万回の載荷では全くひび割れが発生せず、変化しなかった。載荷荷重55、75%に上げると図-5に示すように固定端の前からひび割れが発生した。せん断キー継手と同じ断面位置で配力鉄筋が繋がっているため、負曲げモーメントが最も大きい固定端が弱点となった。75%の場合、30万回程度

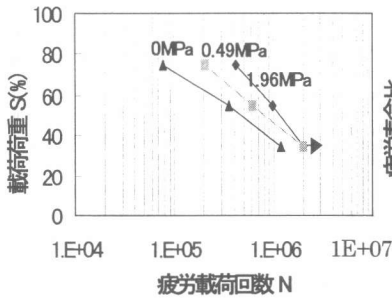


図-13 S-N 曲線

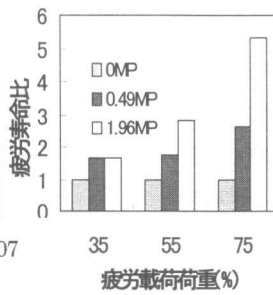


図-14 各供試体の寿命比比較

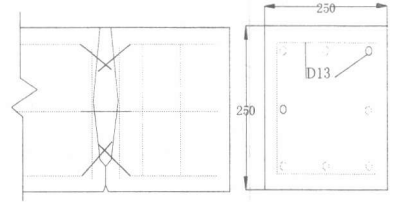


図-15 せん断キー供試体の提案

で貫通ひび割れが入り、上下たわみは2mmを超える大きなものとなったので載荷を終了した。貫通ひび割れになるとせん断力に対する抵抗がなくなるためである。

図-12 にたわみの結果を示す。載荷荷重が35%程度であれば200万回まで健全に抵抗できる。たわみ値は継手のありものの約1/2となった。しかし、載荷荷重を55%に上げると固定端の前面で貫通ひび割れが発生するため、たわみは大きくなった。

5. 各供試体のプレストレスと載荷荷重による疲労耐久性の関係

継手あり供試体のプレストレス量毎の載荷荷重とせん断キー継手の疲労寿命の関係を図-13に示す。プレストレスの導入量によって、疲労寿命は大きく向上することが理解できる。

プレストレスを変えて、同じ載荷荷重での疲労寿命の比較を図-14に示す。プレストレス0MPaの供試体寿命を1として、比率で示した。低い荷重では供試体が破壊以前で実験を中止しているため、寿命比較は困難である。しかし、載荷荷重55%では疲労寿命比はプレストレス力の0:0.49:1.96に対して1:1.75:2.82倍となった。載荷荷重75%ではそれらが1:2.63:5.34倍に増加することから、プレストレス量の増加率と継手のせん断破壊寿命の増加率は荷重が大きくなるにつれて大きくなることが確定できる。

6. せん断キー継手の継手部分の提案

せん断キー継手の疲労試験の結果、プレストレスを1.96MPa程度導入すると継手の疲労破壊はせん断キーの図芯から継手部を横断する斜めひび割れ破壊となり、局部破壊の起こらないものとなる。しかし、プレストレス量が少ないとひび割れはせん断キーの境界面に沿って入った。

従って、プレストレス量が少ない場合にはせん断キー継手部分は図-15のように配力鉄筋を境界面を貫通するように継手部内まで伸ばすと、疲労耐久性はさらに向上すると予測される。また、床版にはスターラップは配置しないが、継手近傍にだけ点線のスターラップを配置すると本体床版の斜めひび割れに対する耐久性が増加するので、プレキャスト版における配力鉄筋は上下で連続する囲い筋にすることが勧められる。

7. まとめ

今回、せん断キー継手を用いた疲労耐久性試験で得られた結果をまとめると以下のである。

- 1) 橋軸方向に導入するプレストレス量によってせん断キー継手のせん断疲労耐久性は向上する。
- 2) 大きい疲労載荷荷重領域で、疲労寿命比が増加することが量的に確認できた。
- 3) プレストレス量によって疲労によるひび割れパターンが変化する。1.96MPaでは全厚でのせん断破壊となり、0.98MPa以下では界面の付着破壊と圧縮側における床版の斜めせん断ひび割れとなる。
- 4) ひび割れの抑制および貫通ひび割れの制御のため、橋軸方向鉄筋の端部をせん断キー継手部分の内部に伸ばすと疲労耐久性が向上すると考えられる。
- 5) 配力鉄筋を囲い筋の形状にすると、継手部でスターラップを兼用することになり、疲労耐久性は向上すると考えられる。

参考文献

- 1) 金岡七，松井繁之，江頭慶三，宮川 治：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，JCI,1999.7
- 2) BSI:BS5400:Part4,pp.38-39,1990.