

PC くい溶接継手部の変形性能に関する研究

六 車 熙*
富 田 幸 次 郎**

1. ま え が き

PC くい は、軸圧および曲げの両者に対して高い耐力を持ち、かつ、経済性にも富むことからその利用が急速に増大している。長尺ぐいにおいては継ぐいとされるが、継手部の力学的性質はくい本体部分と同等またはそれ以上であることが必要であることはいうまでもない。

継手部とくい本体部の力学的性質が同等であるということは、継手部近傍のくい本体曲げひびわれ耐力、継手部の曲げおよび圧縮破壊耐力がくい本体部のそれと同等またはそれ以上であり、かつ、継手部変形性能（曲げ剛性および圧縮剛性）がくい本体部と同等またはそれ以上であることである。とくに問題となるのは継手部曲げ破壊耐力および曲げ剛性であって、これらがくい本体部と同等であることは、換言すれば継ぐいであっても単ぐいと同等の曲げ性能を持ち、単ぐいと全くかわらないことを示すものである。現在用いられている PC くい継手はいずれも溶接継手であって、耐力の点では単ぐい（くい本体部）のそれと同等以上であることが多くの実験的研究で明らかにされている^{1),2)}。しかし、変形性能（とくに曲げ剛性）については直接これを研究したものは皆無である。

本研究は、現在用いられている代表的溶接継手の曲げ剛性を実測して単ぐいのそれと比較検討し、現行継手の力学的欠点を論ずるとともに、その改良の基本的方策について研究したものである。

2. 曲げ試験による継ぐい変形性能の判定

継ぐいの曲げ性能については、従来は曲げ試験によって継ぐいの曲げ耐力および中央たわみが単ぐいのそれとほとんどかわらないことから、両者の曲げ性能が同等と判断している。図-1(a) および 図-2(a) は、現在 PC くに広く用いられている代表的継手である端板式継手および円筒式継手の場合の曲げ試験による中央たわみ

実測結果の一例を示したものである。前者はくい径 $D=40$ cm, 肉厚 9 cm, PC 鋼材 12- $D10$ mm (JIS 2 種異形鋼棒), 有効プレストレス 65 kg/cm², 全長 9 m, スパン 8 m, 曲げスパン 1.2 m で静的曲げ荷重を行なったもの、後者はくい径 $D=40$ cm, 肉厚 7.5 cm, PC 鋼材 6- $D10$ mm (JIS 2 種異形鋼棒), 有効プレストレス 40 kg/cm², 全長 4.3 m, スパン 4 m, 曲げスパン 1 m で静的曲げ荷重を行なったものである。これらでとくに問題となるのは、曲げひびわれ発生以前の弾性範囲

図-1 (a)

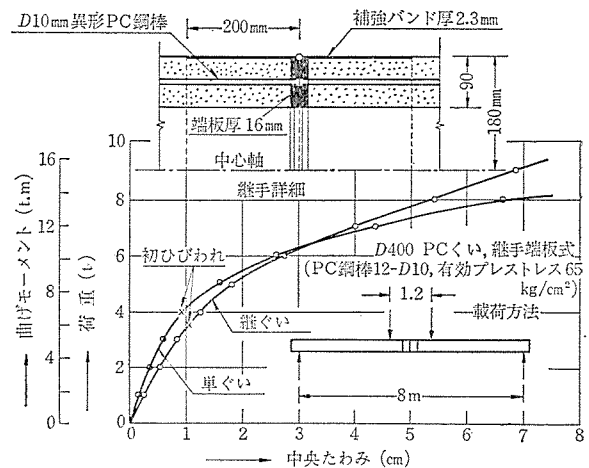
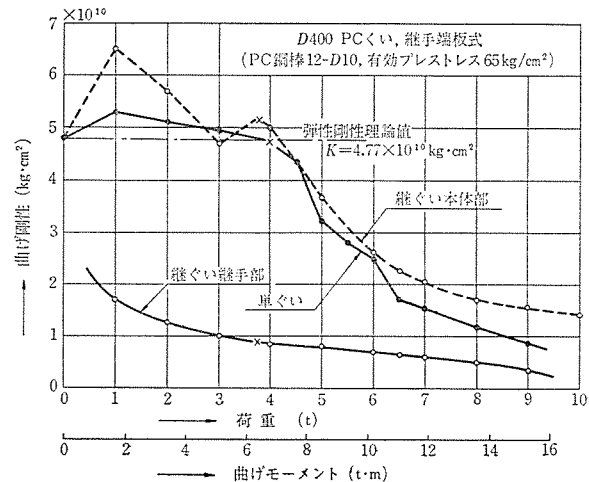


図-1 (b)



* 工博 京都大学教授, 工学部建築学科

** 日本建築総合試験所主任研究員

図-2 (a)

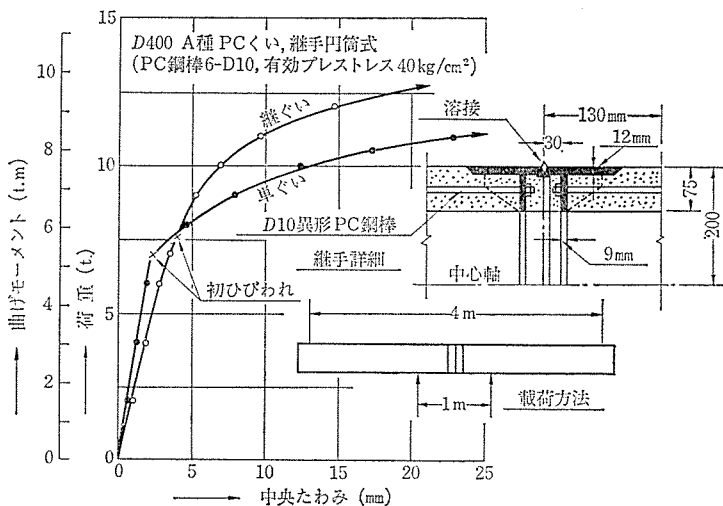
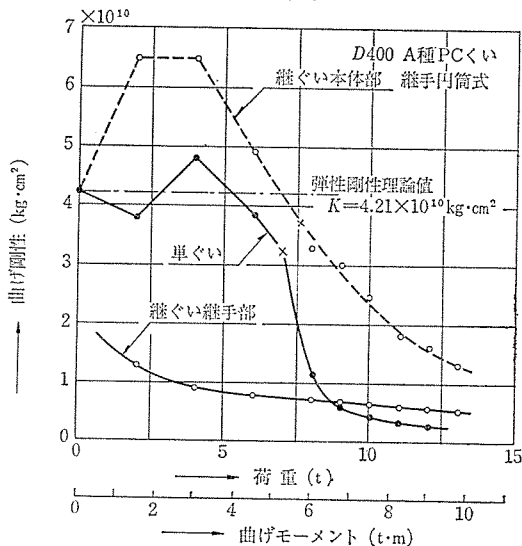


図-2 (b)



での継ぐい中央たわみが単ぐいよりも、やや大きいことである。従来はこの程度のたわみの差であれば継ぐいと単ぐいの弾性曲げ剛性（厳密にはみかけの曲げ剛性）はほとんどかわらないと判断している²⁾。

もちろん、PCくいの特徴とする常時使用状態では断面にひびわれが発生しないという点から考えて、変形性能で問題にすべき範囲は曲げひびわれ発生までの弾性範囲に限定すればよいのであるが、継ぐいの継手部と単ぐいの本体部との曲げ変形性能の直接的比較という立場からは、上記の中央たわみによる判断は力学的にいて全く無意味であり、かつ、変形性能ほぼ同等とする結論は全く誤りである。すなわち、図-1(a) または 図-2(a) のように、継ぐい中央たわみが弾性範囲において単ぐいのそれよりも大きいことは、継ぐい継手部の弾性曲げ剛性が小さいことを意味するものであるが、中央たわみはたとえ局部的に剛性のいちじるしく劣る箇所が部材に存在しても、力学的には載荷形式、スパン長なども調整す

ればそれほど増大するものではなく、図のようにみかけ上わずかなたわみ増加ですむものである。このようなことは力学を真に理解するものであれば常識として熟知するところであって、いまさらくわしく説明するまでもないが、図-3 に示す単純支持部材の中央部分に曲げ剛性の小さい部分を持つ場合の中央たわみと曲げ剛性一様の場合のそれとを算例によって比較してみよう。曲げ載荷はスパン l 、曲げスパン l_1 で行なうものとし、図示のようにスパン中央部をのぞく各部の曲げ剛性を K （一様とす）、スパン中央部の曲げ剛性の小さい部分の長さを αl_1 ($\alpha \leq 1$)、曲げ剛性を K/k ($k \geq 1$) とすれば、部材各部の回転角分布は同図最下段に示すようになる。したがって、この場合の中央たわみ δ_k は、つぎのようになる。

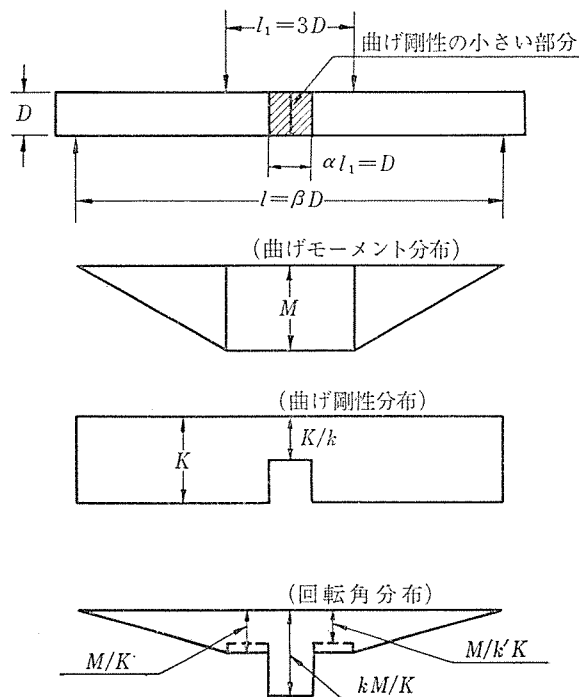
$$\delta_k = \frac{M}{K} \left[\underbrace{\frac{2l^2 + 2ll_1 - l_1^2}{24}}_{\text{①}} + \underbrace{\frac{\alpha l_1(k-1)(2l - \alpha l_1)}{8}}_{\text{②}} \right] \quad (1)$$

M : 中央曲げスパンにおける作用モーメント

上式で ① 項は全スパンにわたって一定値の曲げ剛性 K をとる場合の中央たわみを、② 項は中央部 αl_1 の長さにわたって曲げ剛性が K/k に減少することによっておこる中央たわみ増分を表わす。単ぐいの場合には曲げ剛性は全スパンにわたって一定値（すなわち、 $k=1$ ）であるから、中央たわみは

$$\delta = \frac{M}{K} \cdot \frac{2l^2 + 2ll_1 - l_1^2}{24} \quad (2)$$

図-3



となる。一方、継ぐいにおいては継手部分近傍のくい本体部には普通鉄筋を配置して補強しているが、補強による本体部曲げ剛性の増加はわずかであるので、ここではこれを無視すれば、剛性一様の場合の中央たわみ δ に比較して中央部分に曲げ剛性の局部的に小さい部分をもつ場合の中央たわみ δ_k の倍率は、つぎのようになる。

$$\frac{\delta_k}{\delta} = 1 + \frac{3\alpha l_1(k-1)(2l-\alpha l_1)}{2l^2 + 2ll_1 - l_1^2} \dots\dots\dots(3)$$

いま、くい径を D として

- 全スパン長 $l = \beta D (\beta \geq 3)$
- 曲げスパン長 $l_1 = 3D$
- 曲げ剛性の小さい区間長 $\alpha l_1 = D (\alpha = 1/3)$

とすれば、式 (3) はつぎのようになる。

$$\frac{\delta_k}{\delta} = 1 + \frac{3(k-1)(2\beta-1)}{2\beta^2 + 6\beta - 9} \dots\dots\dots(4)$$

種々の k の値に対して式(4)から求めた δ_k/δ の値を表一に示す。

表一 式 (4) による δ_k/δ 計算値

k	$\beta=10$	$\beta=15$	$\beta=20$
2	1.227	1.164	1.119
3	1.454	1.328	1.238
4	1.681	1.492	1.357

表一から明らかのように、 β (すなわちスパン l) が大きくなるほど δ_k/δ の値は1に近づく。とくに、たとえば $k=2$ の場合を例にとると、図一3 曲げスパン中央部では局部的に曲げ剛性が本体部の1/2であるにもかかわらず、中央たわみの増分は $\beta=10$ (すなわち $l=10D$) で22.7%、 $\beta=20$ (すなわち $l=20D$) で11.9%増大するだけである。このように局部的に曲げ剛性がいちじるしく小さくなくても、中央たわみではその差がいちじるしく小さくなることがわかり、中央たわみからは局部的な曲げ剛性の小さいことを判断することは全く不可能であることがわかる。したがって、図一1(a) または 図二(a) の例にみるように、中央たわみが継ぐいの場合には弾性範囲でわずかな増加にしかすぎないとして、単ぐいと継ぐいの変形性能(曲げ剛性)をほぼ同等と判断することは全く誤りであるといわざるを得ない。中央たわみは局部的な曲げ剛性の変化に対していちじるしく鈍感であることを知るべきである。

3. 現行溶接継手部の曲げ剛性

上記の理由から継ぐいの変形性能の直接的判断には、継手部の曲げ剛性を直接実測し、単ぐい断面のそれと比較する以外にはない。図一1(b) および 図二(b) には、それぞれわが国慣用の代表的溶接継手である端板式および円筒式継手の場合の曲げ剛性実測結果例が示してある。これらはそれぞれ 図一1(a) および 図二(a) の中央たわみ曲線に対応するものである。実測方法はいずれも曲げスパン内で継手部をまたいで上下縁ひずみを検

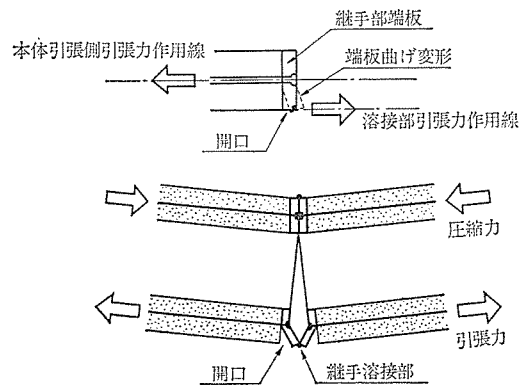
長10 in, 10⁻⁴ in, Huggenberger 手持式ひずみ計を用いて実測し、これよりこの区間における平均回転角 ϕ を求め、曲げ剛性 $K=M/\phi$ (M は載荷モーメント) を求めたものである。これらの実測結果から明らかなように、継手部曲げ剛性はひびわれ発生までの弾性範囲でいちじるしく小さく、端板式、円筒式によらずいずれも単ぐい本体弾性剛性の1/4程度であった。このことはくい打込み時のように持続軸力がまだ作用していない状態において継手部に $M=1$ が作用するときにおこる継手部回転変形は、単ぐいに $M=5$ が作用したときにおこる変形と同じであることを示すものである。もちろん、継手部曲げ剛性の低下はくい径 D の大きさによって異なる。筆者の現在までに行なった多数の実験結果を総合して、くい径別に弾性範囲における継手部曲げ剛性を単ぐい本体部弾性曲げ剛性に対する比で表わすと 表二のようになる。

表二 ひびわれ発生直前の継手部弾性曲げ剛性の大きさ

くい径 D (cm)	単ぐい本体部弾性曲げ剛性に対する 継ぐい継手部のその比	
	回転角実測検長 10 in の場合	回転角実測検長をくい径 D にした場合
30	1/3	1/2.69
40	1/4	1/2.91
50	1/4	1/2.52

このように継手部曲げ剛性が単ぐい本体部と比較していちじるしく小さい理由は、図一4 上部に示すように引張側P C鋼材軸線、すなわち、くい本体側の引張合力作用位置と、これを伝達する継手溶接部との不一致による耐圧板の曲げ変形によるものである。図一4 は端板式継手を例として示してあるが、円筒式であっても同様であって、耐圧板はくいのコンクリート端面にP C鋼材によって圧着されてはいるが、耐圧板外周位置でこれを引張れば、引張力による曲げによって簡単にひきはがされることは当然であり、その結果、同図下部に示すように引張側で耐圧板とコンクリート端面とが、はだばなれをおこし、この部分が大きく開口して結果的には回転変形が継手部に集中しておこり、曲げ剛性が、いちじるしく小さ

図一4



くなることになる。事実、打込まれたPCくいの傾斜角の多数の実測結果^{3)~5)}によると、くい本体部は多少斜めに傾斜してはいるが、本体部そのものが、曲線状に曲がって入っておらず、継手部分で回転変形が集中して起こっており、その結果、継手部においてくいの折れ曲がりが起こっている。もちろん、継手折れ曲がり打込み前に上ぐいを下ぐいに継ぐ場合にくい端面がくい材軸と完全に直角でないことによっても起こるが、その大きさはせいぜい10~20°程度であるのに対し、打込まれたくいの継手部折れ曲がり角度は40°~1°にも達するものが多くあり、打込み作業中に継手部での折れ曲がりが増加したことになる。このような折れ曲り角度の増加はくい本体部が打込み後も曲げ変形を起こしていない事実を考え合わせると、継手部の曲げ剛性がくい本体部のそれよりもいちじるしく小さいことに起因するものと判断せざるを得ない。もし、継手部曲げ剛性が本体部と同等またはそれ以上であれば、端面のくい材軸との直角度の変化による折れ曲がり以外には継手部での折れ曲りは原則的に起こりうるものではなく、この意味でも継手部弾性曲げ剛性は、本体部のそれと同等またはそれ以上になるよう改良することが大切である。筆者は、現在使用されている継手のようにいちじるしく小さい弾性曲げ剛性を示す継手を使用する限り、継手部分の変形性能のいちじるしく劣ることを考慮に入れて、継手を1箇所設けたことによるくい支持力の低減など、安全性を増すべき処置が必要であると考え。少なくとも継手部曲げ剛性が本体部と同等であることを保証して始めてこのような低減は除外して100%のくい支持力を認めるべきであろう。

4. 継手部の改良

前項でのべたように、継ぐい継手部の弾性曲げ剛性が単ぐいのそれよりもいちじるしく小さいことは、**図-4**に示したように継手引張側の引張合力作用線が溶接部で一致しないという力学上の根本的な欠点によるものであるから、少なくとも曲げひびわれ発生以前の弾性範囲において、単ぐい本体部と同等の曲げ剛性を示すように改良するためには、原理的に**図-5**上部に示すように引張合力作用線が本体部から継手部に平滑に移向するようにすることである。その方策としては、耐圧板が曲げ変形を起こさないように耐圧板曲げ変形をとめることである。**図-5**下部にはその一例として端部補強バンドにチェッカープレートなどコンクリートとの付着が十分であるものを用い、コンクリート表面に完全定着する方法、および補強鉄筋を継手溶接部近傍に

とりつけて補強する方法を示してある。**図-6**は補強バンドに厚さ3.2mmのチェッカープレートを用いた改良溶接継手の曲げ剛性実測結果例であって、単ぐい本体部とくらべて弾性曲げ剛性は全く同等であり、かつ、単ぐい本体部では曲げひびわれ発生以後は曲げ剛性が急激に低下するのに対し、改良継手ではひびわれ耐力以後もほとんど剛性低下がみられず、継手としては理想的であることがわかる。参考のために**図-7**左側には**図-6**のくいに対する中央たわみ曲線を、右側には回転ひずみ

図-5

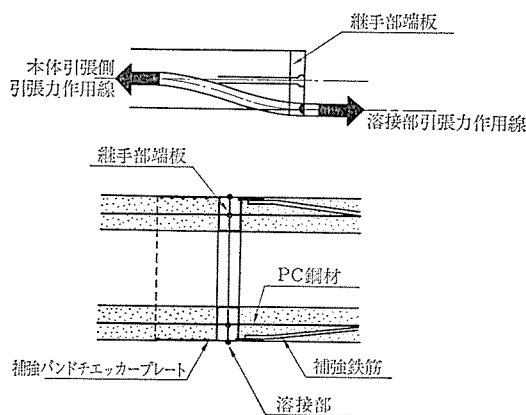


図-6

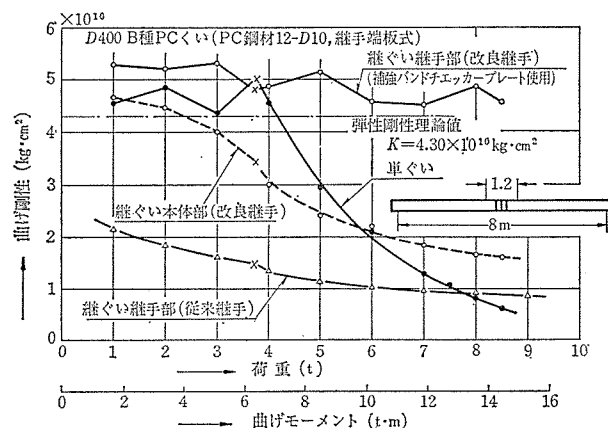
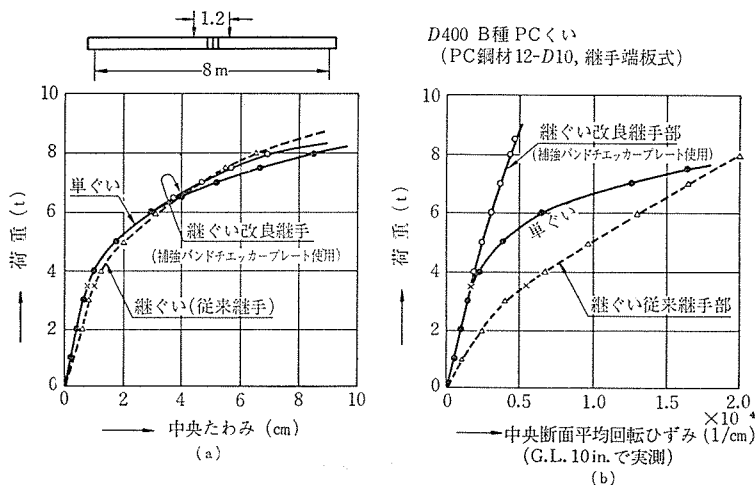


図-7



実測結果を示してあるが、弾性範囲ではいずれも単ぐいのそれと全く同じであることがわかる。なお、くい打ちの際の打撃によってチェッカープレートとコンクリートとの間の付着が損なわれると、曲げ剛性は従来継手と全く同等となるが、筆者の研究では打撃をあたえても付着の損なわれることは全くないことが確かめられている。これについては稿を改めて発表することにする。

なお、補強鉄筋による継手の改良も可能であり、二、三の成功例もあるが、詳細は別の機会にのべることにする。ただ、従来は継手部補強鉄筋をPC鋼材配置位置と同じ円周上に配置するものが多いが、これは図-4から明らかなように、継手部曲げ剛性の点からは全く無意味であり、かつ、打込み時の偏打などによってコンクリートが破壊する際の破壊位置が補強鉄筋の埋込み終端部の断面の不連続点付近が多いことなどを考慮すれば、むしろこのような継手部補強鉄筋は入れない方が望ましいことを付記する。継手部剛性の改良のために耐圧板厚さをまして、曲げ変形を少なくすることも理論的には可能であるが、実用にはならない。

5. 結 論

継ぐいであっても、これと同じ単ぐいと同等の力学的性質をもつことを保証しなければならないことはいうまでもないが、とくにPCくいでは、くい施工時、常時使用状態において外力に対し全断面が有効に働き、ひびわれが発生しないことが特徴であるから、継手部においても単ぐい本体部と同等の性能を持つことが強く要求されて当然である。継手部曲げ耐力については、現在使用されている各種溶接継手は単ぐい耐力と同等以上であることが従来の多くの研究で明らかにされているが、曲げ変形性能（曲げ剛性）については直接これを研究したものは皆無であった。本研究においては、わが国の代表的な溶接継手である端板式および円筒式継手をとり上げ、曲げ剛性を直接実測して、単ぐいととの比較検討を行なったが、その結果、つぎのような結論を得た。

1) 現在慣用の端板式および円筒式継手は、単ぐい本体部と比較して、曲げひびわれ耐力および曲げ破壊耐力は同等以上であるが、継手部弾性曲げ剛性は異常に小さい。くい径によって異なるが、本研究の範囲では継手形式いかんにかかわらず 1/3~1/5 程度の弾性曲げ剛性であった。

2) 曲げ剛性が異常に小さいことが、くい打込み時の継手部におけるくい折れ曲がりに関係することが従来のくい折れ曲がり実測結果を参照して推論される。

3) 弾性曲げ剛性の異常に小さい理由は、曲げを受け

た場合の引張側PC鋼材軸線（すなわち、くい本体側の引張合力作用位置とこれを伝達する継手溶接部との不一致による耐圧板の曲げ変形のためである。このため、ひびわれ発生以下の弾性範囲において、継手部耐圧板とコンクリート端面とのはだばなれが生じ、PC鋼材の発錆切断の原因となりかねない。

4) 継手部の曲げ剛性を少なくともひびわれ発生までの弾性範囲において単ぐい本体部と同等に改良することは、上記の剛性の小さくなる原因から考えて技術的にきわめて容易であり、本研究では、端部補強バンドチェッカープレートなどのコンクリートと付着性の高いものを用いれば、単ぐい本体部の曲げ剛性と同等の剛性に改良できることを示した。

なお、本研究を行なうにあたり供試体の製作、提供を賜った日本ヒューム管工業株式会社および東急コンクリート工業株式会社に厚く謝意を表するものである。

参 考 文 献

- 1) 吉成元伸：既製鉄筋コンクリートぐいの継ぐいの耐力性状，建築技術，No. 158, pp. 57~65, 1964.9
- 2) 坪井・末永・重信：基礎ぐいの径長さ比に関する基礎的研究，その1-1 実験的考察，日本建築学会論文報告集，第141号，pp. 37~41, 昭42.11
- 3) 山肩邦男：新型傾斜計によるPCぐいの傾斜角測定結果，土と基礎，Vol. 14, No. 5, pp. 11~18, May 1966
- 4) 橋本敏秀：複雑な地層に打込まれるPCぐいの諸挙動，建築技術，No. 188, pp. 51~56, April 1957
- 5) 坪井・末永・重信：基礎ぐいの径長さ比に関する基礎的研究，その2 PCぐい傾斜角の測定結果に対する統計的考察，日本建築学会論文報告集，第143号，pp. 27~37, 昭43.1, 第144号，pp. 13~20, 昭43.2

◀付 録▶

継手部曲げ剛性判定簡便試験法の提案

本年6月に制定されたプレテンション遠心力PCくいJISには、継ぐい継手部の曲げ変形性能が単ぐいのそれと同等以上であることが要求されている。曲げ試験によってこれを調べるためには本研究で述べたようにスパン中央たわみの比較では全く無意味であり弾性曲げ剛性を直接実測して比較すべきである。曲げ剛性は曲げスパン内断面上下ひずみ実測値から次式によって計算される。

$$\text{断面回転ひずみ } \varphi = |\varepsilon_1| + |\varepsilon_2| / D \dots \dots \dots (1)$$

$$\text{曲げ剛性 } K' = M / \varphi \dots \dots \dots (2)$$

ε_1 : 上縁ひずみ, ε_2 : 下縁ひずみ, D : くい外径,

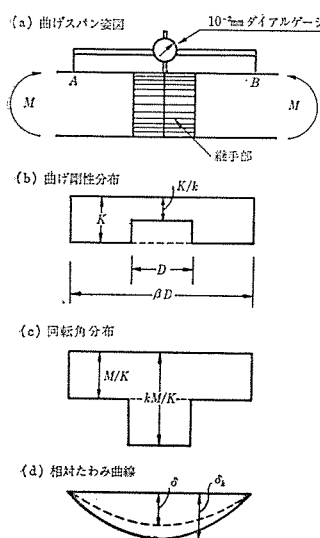
M : 載荷曲げモーメント

コンクリート断面上下縁ひずみ ε_1 および ε_2 は適当な標点距離のひずみ計を用いて実測するわけであるが、実測値は標点距離間のコンクリートの相対変形を標点距離で割ったいわゆる平均ひずみである。コンクリートは微

視的には不均質なものであり、かつ、曲げ試験においてはひびわれが発生して巨視的にも不均質になるものであるから、これらの不均質性を十分カバーして均質とみなし得る十分な長さを標点距離としてえらばなければならない。このことはコンクリートを研究する者は誰しも熟知するところである。PCくいについては、少なくとも20~30 cm 程度の標点距離が適当であろう。継ぐいについては継手部分を中央にはさんでひずみ実測の標点距離をとらなければならないが、この際比較の標準となる単ぐいのそれと同じ長さの標点距離でひずみ実測を行なうことが大切である。

さて、上記の断面上下縁ひずみ実測値から曲げ剛性を求める方法は、ひずみ実測のための標点距離 20~30 cm のひずみ計が必要である。Huggenberger 手持式ひずみ計(標点距離 10 in が標準)、Contact type ひずみ計(標点距離 10, 20 および 30 cm) などのダイヤルゲージを応用した機械的ひずみ計が適しているが、いずれも高価であり、かつ、測定にある程度の経験を必要とするので、工場、現場などでこれらを用いて簡単に実験することは一般には困難である。筆者はこれにかわるべき簡便な曲げ剛性実測方法として、曲げスパン内の相対たわみを実測することによって、継ぐい継手部分の曲げ剛性と単ぐいのそれとを比較する簡便試験法を提案するものである。付図-1 はその説明図であって、同図 (a) は曲げ載荷試験における中央曲げスパンの部分を取り出したもので、この区間では曲げモーメント M は一定である。この区間内の適当な長さ AB 間の中央相対たわみを図のようにダイヤルゲージで測定する。(b) は AB 間の曲げ剛性分布を示すもので、本体部曲げ剛性を K 、継手部分のそれを K/k ($k \geq 1$) としてある。(c) は回転角分布であって、これよりモールの定理を適用して相対た

付図-1



わみを求めることができる。簡単のために継手部分の剛性の変化する部分の長さをくい外径 D にとり、相対たわみ実測スパン長を βD ($\beta \geq 1$) とすれば、(c) の回転角分布に対する相対たわみ δ_k はつぎのようになる。

$$\delta_k = \frac{M}{8K} (\beta D)^2 \left[1 + \frac{(k-1)(2\beta-1)}{\beta^2} \right] \dots \dots \dots (3)$$

単ぐいの場合には $k=1$

であるから相対たわみは

$$\delta = M/8K(\beta D)^2 \dots \dots \dots (4)$$

したがって、 δ に対する δ_k の比は

$$r = \frac{\delta_k}{\delta} = 1 + \frac{(k-1)(2\beta-1)}{\beta^2} \dots \dots \dots (5)$$

となる。ここでは継手部分の曲げ剛性が本体部のその $1/k$ であることを相対たわみ比 r で判定するのであるが k の値が大きくても判定の基準となる r が小さくなっては高精度の判断ができない。 k の変化にともなう r の変化、すなわち、 r の感度を求めるとつぎのようになる。

$$\frac{dr}{dk} = \frac{2\beta-1}{\beta^2} \dots \dots \dots (6)$$

上記の感度は 1 に近いほどよいわけであるが、ここでは $dr/dk \geq 0.5$ $\dots \dots \dots (7)$

程度は確保することを条件とすれば式 (6), (7) より $\beta \leq 3.424$ $\dots \dots \dots (8)$

を得る。したがって、ここでは提案値として

$$\beta = 3 \dots \dots \dots (9)$$

をとれば、任意の k の値に対する r の値は式 (5) から

$$r = 1 + \frac{5}{9}(k-1) = \frac{4+5k}{9} \dots \dots \dots (10)$$

をうる。ちなみに種々の k に対する r の値を求めると付表-1 のようになり、曲げスパン内の相対スパン長 $3D$ に対する中央相対たわみ δ_k お

付表-1 種々の k に対する r の値 ($\beta=3$)

k	r	k	r
1	1	2.5	1.83
1.25	1.14	3	2.11
1.5	1.28	3.5	2.39
1.75	1.42	4	2.67
2	1.55	5	3.22

よび δ をダイヤルゲージで実測するだけで、継ぐい継手部と単ぐいのそれとの曲げ剛性を高精度で判定できることがわかる。

なお、理論上は継ぐい継手部の曲げ剛性と単ぐいのそれとが同等であることは、 $r=1$ であることであるが、実際上はくい肉厚の変動、コンクリート品質(とくに弾性係数)のばらつきなどにより、単ぐいそのものの弾性曲げ剛性は 10% 程度のばらつきがおこる。このようなばらつきを考慮すれば、

$$k = 1.1 \dots \dots \dots (11)$$

もって継手部と単ぐいとの弾性曲げ剛性が同等とみなすのが実情に則しているものと考えられる。すなわち、上記の限界 k 値に対する r を求めると

$$r = 1.055 \dots \dots \dots (12)$$

であり、 δ_k 実測値が δ 実測値よりも 5% 程度大きくなっても実用上は継手部と単ぐいとの弾性曲げ剛性が同等であると判定してもさしつかえないと思われる。