[64]　極低温下における鉄筋の重ね継手強度に関する研究

正会員　○三　浦　　尚（東北大学工学部）
正会員　　長谷川　明巧（東北大学工学部）

１．まえがき

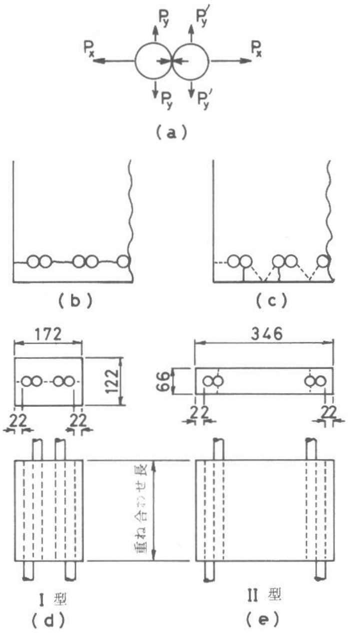
重ね継手は鉄筋の継手の種類の中で最も広く用いられている継手である。重ね継手は，鉄筋の応力を周りのコンクリートを介して他方の鉄筋へ伝えるものであり，従って，重ね継手強度は周りのコンクリート強度に大きく影響される．一方，コンクリートの強度は温度が０℃以下になるとその含水量や温度によって大きく変化し，極低温下においては，常温の場合と著しく異なるものである[1]．従って，重ね継手強度は，極低温下では常温の場合と様子が異なると思われる．さらに，重ね継手強度は，一般には，鉄筋の表面の付着力によって長さ方向に一様に鉄筋からコンクリートへ力を伝えるとして，ほぼその重ね合せ長さに比例すると考えられているのであるが，実際には，付着力の分布は重ね合せ長さ方向に常に一様になっているのではなくて，荷重が小さい時には端部では大きく中間部では小さいのである．ところが，破壊に近ずくと，付着力の大きい部分が降伏状態となり，付着力の分布は一様に近ずくと考えられているからこのように考えることができるのである．すなわち，重ね継手強度が重ね合わせ長さにほぼ比例すると考えることができるためには，コンクリートと鉄筋との付着破壊にある程度のねばりが必要となるのである．この点，極低温下においては，コンクリートは常温下と比べて強度は大きくなるがもろくなる傾向にあるため，鉄筋の重ね継手強度に対する重ね合わせ長さの影響は，常温と比べて異なった傾向を示すと考えられる．

本研究では，－１５０℃程度までの極低温下において重ね継手強度がどのようになるか調べるため，種々の重ね合わせ長さの供試体を用い，コンクリートの含水量も２種類（湿潤状態と気乾状態）に変えて実験を行なった．

２．重ね継手試験用供試体

一般に，鉄筋コンクリート構造物中の引張鉄筋の重ね継手周辺のコンクリートには，引張力とともにせん断力が作用しているのであるが，ここではせん断力の影響は無視した．重ね継手に引張力が作用した場合，最初に両鉄筋の先端部で横ひびわれが発生する．従って，重ね継手の力の伝達を調べる場合には，それらの横ひびわれの間の部分，すなわち，鉄筋が重ね合わされている部分のみを取出せばよいことになる．また，重ね継手が破壊する場合，かぶりが大きい，あるいは横方向鉄筋が多い場合以外では，一般に，図－１(b)(c)に示すように，かぶりコンクリートが割裂して破壊する．その場合の鉄筋がコンクリートに作用する力は，模式的に図－1(a)に示すようになると考えることができる．この内，P_yとP_y'とは，継手の一断面を取出した場合には一般に異なった値となるが，継手全長を平均すると，ほぼ等しいと考えてよい．また，P_xとP_yとの関係は，鉄筋間隔，鉄筋の各方向のかぶり，コンクリートの断面形状とその中での鉄筋の位置関係，横方向鉄筋の配置等，まわりのコンクリートによる各方向の拘束剛性の割合によって異なるため，簡単には求めることはできない．ただし，P_xやP_yの大きさと継手の間隔やかぶり等との関係によって，継手の破壊が図－１(b)のようになるか，図－１(c)のようになるかが決まると考えられる[2]．

ただし，図－１(c)のひびわれが発生した場合には，P_xの値が急激に小さ



図－１　供試体

くなるため，その分P_yが大きくなって図中の点線で示した破壊又は(b)図と組合わさった破壊になると考えられる

以上のことから，本研究においては，重ね試験用供試体としては，図−1(b)の破壊を現わす図−1(d)，図−1(c)の破壊を現わす図−1(e)，の2種類を用いることとし，実際の破壊はこのどちらか，又はそれらが組合わさったものであろうと考えることにした．

3．実験概要

(a) 使用材料

実験に使用したセメントは早強ポルトランドセメント，細骨材は川砂（比重 2．52， 吸水率 2．50％），粗骨材は砕石（比重 2．86， 吸水率 0．76％）である．混和剤としては，ポリオキシエチレン，アルキルアリルエーテル型非イオン界面活性剤をセメント重量の0．06％使用した．

表−1に，使用したコンクリートの配合を示す．

主鉄筋は市販の横フシ異形鉄筋（SD30）D22である．本実験では，主鉄筋の機械的性質が実験結果に与える影響は小さいと考えられるので，その記述は省略する．横方向鉄筋は市販の横フシ異形鉄筋（SD30）D10で，その機械的性質を表−2に示す

表−1 使用したコンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 w/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m³) 水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G 20mm 15mm	15mm 10mm	10mm 5mm	AE剤 (cc)
20	11±1	4±0.5	50	38	194	388	622	342	569	227	233

(b) 実験方法

実験に使用した供試体は，図−1(d)(e)に示すように，鉄筋の重ね継手を2ヶ所対称に組合わせたもので，供試体Ⅰ型については重ね合わせ長さを25cmで一定とし，横方向鉄筋D10を，入れないもの，2本入れたもの，3本入れたもの，4本入れたもの，の4種類（図−2参照），供試体Ⅱ型については重ね合わせ長さを，25cm，50cm，75cm，100cm，の4種類とした．

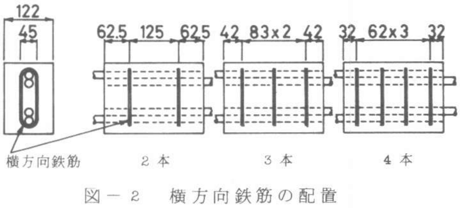
表−2 横方向鉄筋の機械的性質

試験温度 (°C)	降伏点 (kg/mm²)	引張強さ (kg/mm²)	伸び (%)	しぼり (%)
+9	39.0	56.2	26.1	59.3
−52	45.5	61.2	25.0	70.6
−105	52.6	64.4	21.0	67.0
−153	64.4	69.9	23.0	70.6

供試体はコンクリート打設後，湿潤状態にするものは20℃の恒温水槽中で，気乾状態にするものは気温20℃，湿度50％の恒温室で養生し，材令7日で試験をした。

実験には，図−3に示すような装置を用いた．

供試体を装置にセットした後，低温槽の中へ液体窒素を噴霧することによって槽の温度を徐々に下げ，供試体を冷却した．温度のコントロールは，自動および手動装置を用いて，供試体の中央部と表面部との温度差が20℃以下となるように行なった．

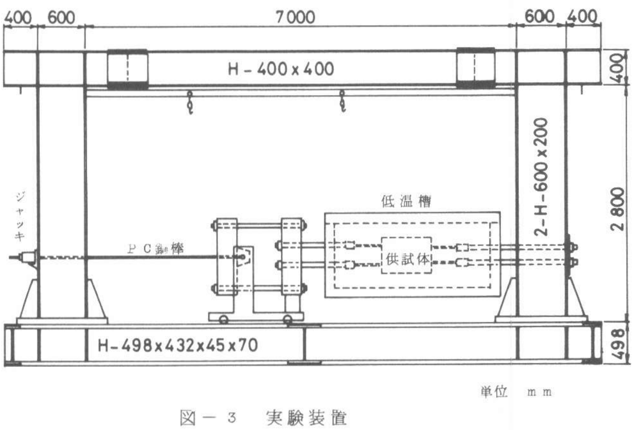


図−2 横方向鉄筋の配置

供試体の温度が所定の温度で一様になった状態で，ジャッキにより引張載荷した．

4．実験結果とその考察

表−3には，供試体Ⅰ型による実験結果を示す．ここで，ひびわれ荷重とは，供試体の端面に張った歪ゲージが，ひびわれのため死んだ時の荷重である．平均付着応力度とは，破壊荷重を鉄筋の表面積（1本の鉄筋の周長×重ね合わせ長さ×2）で割ったものであり全重ね合わせ長さにわたって付着応力度が等



図−3 実験装置

しいと仮定した時の鉄筋の付着応力度である.

温度が低い場合，破壊荷重よりかなり低い荷重で供試体端部にひびわれが発生しているが，これは，コンクリートがもろくなったことによって両引試験の際に発生する，横ひびわれ面からの局部的な縦ひびわれ（参考文献一1参照）であろうと思われる. 従って，重ね継手強度には直接的にはあまり影響無いと思われる.

表中の計算値は，参考のため，C. O. ORANGUN，らの堤案した考え方[3]と同じ方法によって計算した平均付着応力度である. ただし，極低温下においては，コンクリートの引張強度と圧縮強度との関係は常温の場合と異なるので，その温度におけるコンクリートの引張強度の測定値から求めるように修正した式(1)，および文献一1で提案した関係を用いてその温度におけるコンクリートの圧縮強度から求めるように提案した式(2)の2通りで計算した. すなわち，

$$u_1 = \left(0.191 + 0.505\frac{C}{\phi} + 8.28\frac{\phi}{l} + \frac{A_{tr}\,\sigma_{syt}}{225\,s\phi}\right)\sigma_t \quad (kg/cm^2) \quad 式(1)$$

$$u_2 = \left(0.0724 + 0.192\frac{C}{\phi} + 3.15\frac{\phi}{l} + \frac{A_{tr}\,\sigma_{syt}}{592\,s\phi}\right)\sigma_c^{\frac{3}{4}} \quad (kg/cm^2) \quad 式(2)$$

ここに，C：かぶりや継手間隔によって定まる値（文献一3参照）（cm），ϕ：主鉄筋径（cm），l：重ね合わせ長さ（cm），A_{tr}：破壊面に直交する横方向鉄筋の断面積（cm^2），σ_{syt}：横方向鉄筋の降伏強度（kg/cm^2），s：横方向鉄筋の中心間隔(cm) σ_t, σ_c：コンクリートの引張及圧縮強度（kg/cm^2）

表一3　供試体I型の実験結果

温度 °C	横方向鉄筋	コンクリート強度 圧縮 (kg/cm²)	コンクリート強度 引張 (kg/cm²)	測定値 ひびわれ荷重 (t)	測定値 破壊荷重 (t)	平均付着応力度 (kg/cm²) 実測値	計算(1)	計算(2)
常温	無し	339	28.1	14.0	14.0	40.0	39.4	42.1
〃	2本	339	28.1	15.0	15.0	42.6	52.0	55.6
〃	3本	310	26.4	13.0	16.2	46.3	54.9	58.4
〃	4本	320	25.7	14.0	17.1	48.9	59.3	66.4
−52	無し	730	61.5	19.0	27.8	79.4	86.2	74.8
−53	2本	822	54.6	18.0	30.6	87.4	105	112
−51	3本	825	(68.3)	19.0	32.9	94.0	(150)	128
−52	4本	804	54.1	22.0	35.1	100	133	141
−99	無し	938	70.8	23.0	35.6	102	99.2	90.3
−102	2本	1010	60.5	21.0	39.1	112	121	137
−151	無し	1062	69.2	18.0	30.8	88.0	97.0	99.1
−148	無し	996	75.9	20.0	38.6	110	163	144

湿潤状態，　重ね合わせ長さ25cm，

これから，供試体I型においては，極低温下において横方向鉄筋の無い場合の実験値は計算値とほぼ合っており，横方向鉄筋のある場合には，横方向鉄筋の効果をほぼ$\frac{1}{2}$にすれば（横方向鉄筋の効果を示す項に$\frac{1}{2}$を乗じる），計算値とよく合うことがわかった. なお，今回の実験結果から得られた重ね継手強度の実験式は，参考文献一5に示している.

横方向鉄筋を用いた場合の破壊は，温度が低い場合には，すべて横方向鉄筋が脆性的に破断しており（写真一1参照），常温の場合には，横方向鉄筋は主鉄筋に引張られてねじれていたり，横方向鉄筋の内側のコンクリートが引抜けたようになっているものもあった. したがって，温度が低いものについては供試体の破壊は予想通りほぼ横方向のひびわれによって生じているのに対し，常温のものは複雑な破壊をしている.

表一4には，供試体II型による実験結果を示す.

写真一2には，その破壊の一例を示す.

この場合，重ね合わせ長さ25cmの継手強度の計算値は，常温でu_1 = 40.0 kg/cm^2・u_2 = 42.8 kg/cm^2，−50°C でu_1 = 87.6 kg/cm^2・u_2 = 76.1 kg/cm^2，−100°C でu_1 = 101 kg/cm^2・u_2 = 91.8 kg/cm^2，−150°C でu_1 = 98.6 kg/cm^2・u_2 = 101 kg/cm^2，であった.

表一4　供試体II型の実験結果

養生	温度 (°C)	継手長 (cm)	破壊荷重 (t)	平均付着応力度
湿潤	常温	25	6.61	19.4
		50	14.8	21.7
		75	18.0	17.6
		100	19.2	14.1
	−47	25	13.6	39.8
	−52	50	24.2	35.4
	−57	75	27.6	26.9
	−50	100	30.0	22.0
	−96	25	15.7	46.0
	−105	50	27.0	39.5
	−99	75	29.7	29.0
	−98	100	29.2	21.4
	−151	25	22.3	65.3
	−149	50	30.5	44.7
	−150	75	31.1	30.4
	−146	100	33.7	24.7
気乾	常温	25	5.38	15.8
		50	8.06	11.8
		75	12.0	11.7
		100	16.4	12.0
	−105	25	12.3	36.0
	−97	50	19.6	28.7
	−97	75	21.8	21.2
	−97	100	29.3	21.5

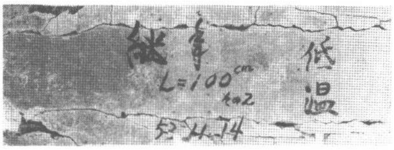
これより，供試体II型においては，実験値と計算値とはあまり合っていないことがわかる. この事から，実際の鉄筋コンクリートはり中の継手においては，図一1(c)のひびわれが最初に発生しようとする場合でも，破線で示すひびわれ又は(b)図のひびわれが発生して破壊するまでの間に，さらに荷重が増大するのではないかと考えられる. そして，実際のはりの重ね継手強度は，II型の供試体の値よりもI型の供試体の値により近いのではない

かと思われる.

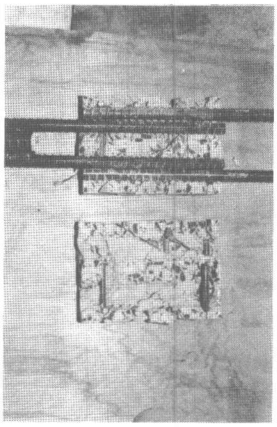
図－４には，重ね継手供試体Ⅱ型が破壊する時の平均付着応力度と重ね合わせ長さとの関係を示す[4].

図－５には，重ね合わせ長さ２５ｃｍの継手の平均付着応力度を１とした場合の，重ね合わせ長さが長くなることによる平均付着応力度の低減の割合を示す

これより，文献－１)で指摘したように，極低温下においては，重ね合わせ長さが長くなると平均付着応力度は大きく低下し，この点を常温の場合のように無視して考えることはできないことがわかる.



写真－２　供試体Ⅱ型の破壊例



写真－１　供試体Ⅰ型の破壊例

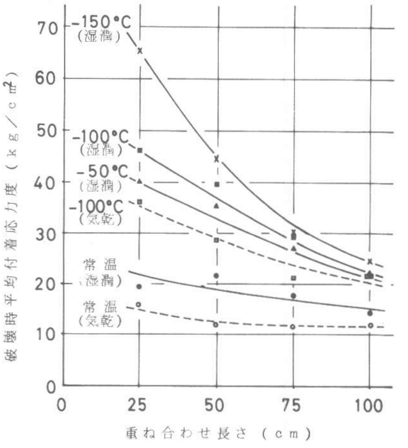
５．結論

本研究により，以下のような結論を得た.

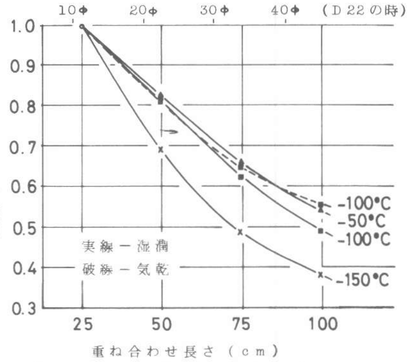
極低温下における異形鉄筋の重ね継手強度は，重ね合わせ長さが短かい場合，式(1)又は式(2)を一部修正することによってほぼ推定することができそうである．また，重ね合わせ長さが長い場合には，さらに図－５のような低減率を乗じる必要があるものと思われる.

今回の実験は未だ供試体の数も少なく，十分信頼度の高い結果は得られていないが，極低温下における重ね継手強度の傾向は示されたものと思われる.

今後の問題点としては，今回の実験で低温下において横方向鉄筋は脆性的に破断することがわかったので，横方向鉄筋の，低温じん性等の低温下での性質と，横方向鉄筋で補強された重ね継手強度との関係を調べる必要があると思われる．さらに，低温下においては重ね継手強度よりかなり小さい荷重で縦ひびわれの発生が認められたことから，重ね継手の疲労強度も常温の時と異なると思われるため，この点も十分調査する必要があるものと思われる



図－４　重ね合わせ長さの影響



図－５　重ね継手の強度低減率

参考文献

1) 後藤幸正．三浦尚：極低温下における鉄筋コンクリート部材の性質に関する研究，土木学会論文報告集２８５号　１９７９年５月

2) P. M. FERGUSON：Reinforced Concrete Fundamentals, John Wiley and Sons, Inc. p 186.　1973

3) C. O. ORANGUN, J. O. JIRSA, and J. E. BREEN：A Reevaluation of Test Data on Development Length and Splices, ACI Journal March, 1977

4) 三浦尚．阿部喜則．渡部直人：極低温下における鉄筋コンクリートの性状に関する研究－重ね継手強度－，土木学会第３４回年次学術講演会概要集，１９７９年１０月

5) 長谷川明巧．高橋英信．三浦尚：極低温下における鉄筋の重ね継手に関する研究，昭和５５年度土木学会東北支部技術研究発表会概要集，１９８１年３月