

[97] 極低温下における鉄筋の重ね継手性状におよぼす 横方向鉄筋の性質の影響

正会員 ○三浦 尚 (東北大学工学部)

正会員 妹島 淳生 (東北大学大学院)

1. はじめに

コンクリートおよび鉄筋は、両材料とも、低温になると常温の時に比べて強度がかなり増加するものの、構造物の材料として必要なねばりが失なわれてもろくなってしまう特性をもつ、とくにそれらを組み合わせた鉄筋コンクリート中の鉄筋の重ね継手は、温度が低くなると、継手部に配置した横方向鉄筋が継手の破壊時に脆性的に破断する場合があること、局所的な縮ひびわれが終局耐力に比べてかなり低い荷重で継手端部に発生すること等、常温における場合とはかなり異なった挙動を示すことが、過去の研究^{1),2)}において指摘されている。

このようなことをふまえて、ここでは、横方向鉄筋として普通鉄筋の他、低温下で脆性を示しにくいような特殊な鉄筋を使用したり、鉄筋を曲げる際の加工程度を変化させて、両引供試体による極低温下の重ね継手の実験を行い、極低温下における重ね継手の、静的強度、繰り返し载荷された場合の強度、およびコンクリートと主鉄筋との間の相対的な変形能におよぼす横方向鉄筋の性質の影響について検討した。

2. 実験概要

1). 使用材料およびコンクリートの配合

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、そして粗骨材は碎石である。

表-1 に使用したコンクリートの配合を示す。

表-1 使用したコンクリートの配合

粗骨材の最大粒径 (mm)	スランパの範囲 (cc)	空気量 (cc)	水セメント比 w/c (cc)	細骨材 R/A (cc)	単位量 (kg/m ³)						
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G			A/B 剤 (cc)
20	11±1	4±0.5	50	3B	194	388	622	342	569	227	233
								20mm	15mm	10mm	
								15mm	10mm	5mm	

主鉄筋としては、市販の横フシ異形鉄筋 (SD30) D22 を使い、横方向鉄筋としては、市販の横フシ異形鉄筋 D10 および低温脆性を示す遷移温度が -160°C 以下となるように成分調整した横フシ異形鉄筋 D10 を使った。横方向鉄筋それぞれの機械的性質を表-2 に示す。

2). 実験方法

実験に使用した供試体は、図-1 に示すように鉄筋の重ね継手を2カ所対称に組み合わせたもので、破壊は鉄筋レベルでのコンクリートの割裂で生じる Side Split Failure と仮定したものである。重ね合わせ長さは 25cm で一定とした。横方向鉄筋には、普通鉄筋を冷間で図に示すような横方向鉄筋に曲げ加工したもの、普通鉄筋を加工後アニールしたもの、および成分調整した鉄筋を冷間で加工したままのもの計3種を使い、さらに普通鉄筋では曲げ加工の加工程度および形状を変化させている (表-3 参照)。また、比較のため横方向鉄筋を入れない供試体の実験も行った。

表-2 横方向鉄筋の機械的性質

種類	試験温度 (°C)	降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	しほり (%)
普通	常温	41.9	59.2	25.9	45.6
	-50	43.2	65.5	22.5	47.8
	-99	57.5	73.5	28.1	54.2
	-148	67.3	80.6	26.9	50.3
低温用	常温	61.5	61.9	28.1	76.9
	-50	69.3	70.2	27.5	71.6
	-99	78.7	78.3	28.1	73.4
	-150	86.0	88.0	17.5	69.8

「普通」市販のSD30

「低温用」低温脆性を示しにくいように成分調整したもの

表-3 横方向鉄筋の種類

供試体		A	B	C	D	E
鉄筋						
形状	r (mm)	20	40	20	20	20
	l (mm)	0	0	30	80	130
種類	普通	○	○	○	○	○
	アニール	○	—	—	—	—
	低温用	○	—	—	—	—

(注-1) r と l は次のように定義する



(注-2) 「普通」「低温用」表-2参照

「アニール」普通鉄筋を曲げ加工後アニールしたもの

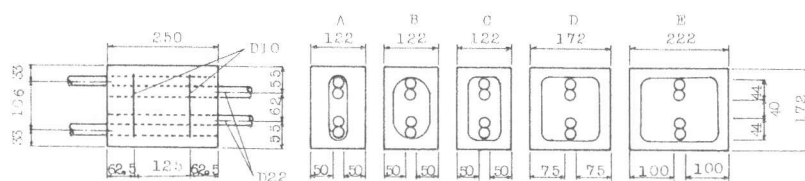


図-1 供試体の形状寸法

単位: mm

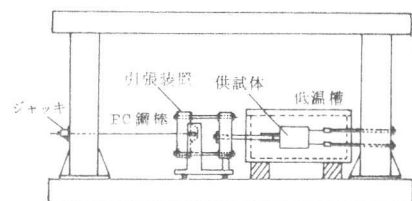


図-2 載荷装置

供試体は、水温 $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ の恒温水槽で水中養生した後、材令7日または8日で試験した。供試体を図-2に示す載荷装置にセットし、つづいて液体窒素を槽内に噴霧することによって供試体の温度をゆっくりと下げ、供試体の温度が所定の温度で一樣になった後に、ジャッキで引張載荷した。

実験は、同時に作製した供試体2体を1組みとして、一方を静的載荷、他方を繰り返し載荷した。繰り返し方法は、図-3に示すように、下限応力を鉄筋の平均付着応力度で $1.6\text{kg}/\text{cm}^2$ 、上限応力を継手の静的強度の80%、90%、95%、100%としその間でそれぞれ各10回づつ繰り返しを行うことを原則とした。

コンクリートと主鉄筋との間の相対変位量は、カンチレバー式の変位計で測定した。すなわち、図-4のようにコンクリートの端面に主鉄筋と平行に埋めこんだボルトに変位計をとりつけ、主鉄筋のコンクリートからの抜け出し量を測定した。変位計は、十分にキャリブレーションしたものを用いた。

3. 実験結果および考察

1). 静的強度について

まず破壊状況について述べる。^{3), 4)} いずれの供試体も予想通り鉄筋レベルでの割裂破壊 (Side Split Failure) で破壊した。しかし横方向鉄筋を入れた場合に、試験温度および鉄筋の性質の違いから、破壊の仕方に次のような違いが見られた。

常温下では、すべての供試体で横方向鉄筋は破断しておらずその拘束の影響で供試体は複雑な破壊をしている。

低温下では、横方向鉄筋に普通鉄筋を用いて曲げ加工をしたAの供試体では、すべて主鉄筋レベルで横方向鉄筋が脆性的に破断し、典型的な割裂破壊となっている。これに対し、C、DおよびEのように鉄筋レベルを横ぎる部分を直線としたものは、横方向鉄筋は割裂面で破断せず、割裂面から離れた曲げ加工部で破断している。一方、Bのように曲げ加工度を小さくすると破断しにくくなる。また、曲げ加工後に熱処理を行ったもの、および低温用に成分調整をしたものを用いた場合にも、横方向鉄筋は破断しにくくなり、その壊れ方は常温のものに近い。

次に強度について述べる。図-5に重ね継手強度 (最大平均付着応力度で示す) と試験温度との関係を示す。ここで最大平均付着応力度とは、最大荷重を継手部分の鉄筋の表面積で割ったもので、重ね合わせ長さに沿って付着応力度が一樣であると仮定したものである。この図から、低温下において横方向鉄筋の性質を変え、それが破断してもしなくても、重ね継手強度はほとんど変わらないことがわかる。

この原因としては、次のようなことが考えられる。温度が低くなると、コンクリートの剛性は増加するのに対し、鉄筋のそ

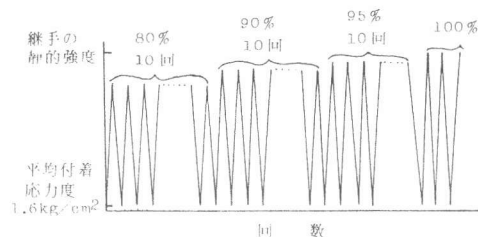


図-3 繰り返し載荷方法

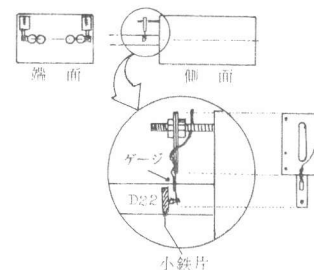


図-4 相対変位測定方法

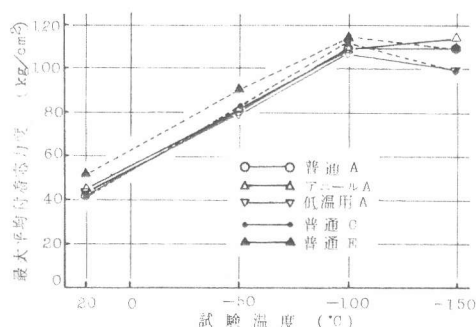


図-5 重ね継手強度と試験温度との関係

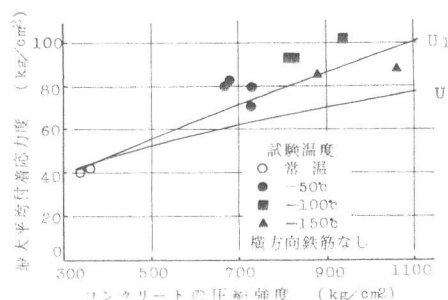


図-6 重ね継手強度とコンクリートの引張強度との関係

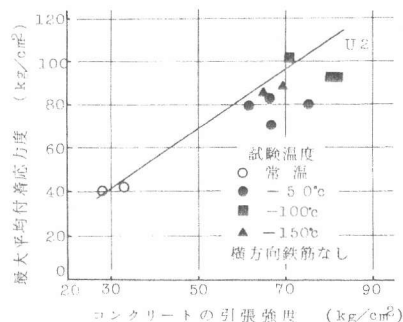


図-7 重ね継手強度とコンクリートの引張強度との関係

れはほとんど変化しない。そのため、破壊に至るまでのコンクリートの歪量は小さくなり、破壊時の横方向鉄筋の応力度は小さくなる。したがって、横方向鉄筋はあまり荷重を受けもたず、その性質の差異によって、その強度は影響を受けないと思われる。また、横方向鉄筋の破断は、コンクリートが割裂する際の衝撃的な力の作用によるものと思われる。

横方向鉄筋のない場合の重ね継手強度とコンクリートの圧縮強度および引張強度との関係を、図-6および図-7にそれぞれ示す。図中には、J. O. Jirsa 等⁵⁾の提案による計算値(U)の他、それを低温下における圧縮強度、引張強度を用いて計算できるように修正した計算値⁶⁾(それぞれU₁, U₂)を示している。ただし、U₁およびU₂は以下の式である。

$$U_1 = (0.0724 \cdot 0.192 C' / \phi \cdot 3.15 \phi_l \cdot A_{tr} \sigma_{sy} / 592 S \phi) \sigma_c^3 \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (1) \text{式}$$

$$U_2 = (0.191 \cdot 0.505 C' / \phi \cdot 8.28 \phi_l \cdot A_{tr} \sigma_{sy} / 225 S \phi) \sigma_t \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (2) \text{式}$$

ここに、C' : かぶりや継手間隔によって定まる値(文献-5参照)
 ϕ : 主鉄筋径、 ϕ_l : 重ね合わせ長さ、 A_{tr} : 破断面に直交する横方向鉄筋の断面積、 σ_{sy} : 横方向鉄筋の降伏点、S : 横方向鉄筋の中心間隔、 σ_c , σ_t : コンクリートの圧縮及引張強度、(単位は全てkg-cm系)。これから、計算値Uは低温下において実験値と一致しないこと、修正した計算値U₁, U₂は、U₂が若干危険側となるものの、実験値とはほぼ一致することがわかる。

横方向鉄筋のある重ね継手の破壊の考え方について、今まで筆者によって提案されているように、継手の破壊は横方向鉄筋の応力度が未だ小さくても、まわりのコンクリートが割裂破壊を起こす時に生じる、と考えるべきであると思われる。したがって、その考え方からすると、横方向鉄筋の重ね継手強度への鉄筋の影響分は、継手破壊時の割裂面における剛性への鉄筋の影響分と考えることができる。

以上のような考え方によって、(1)式及(2)式を修正すると次のようになる。

$$U'_1 = (0.0724 \cdot 0.192 C' / \phi \cdot 3.15 \phi_l) \sigma_c^3 \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (3) \text{式}$$

$$U'_2 = (0.191 \cdot 0.505 C' / \phi \cdot 8.28 \phi_l) \sigma_t \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (4) \text{式}$$

$$\text{ただし } C' = C \cdot (n-1) A_{tr} / 2S$$

ここに、 $n = (E_s / E_c) = 7.59$ (常温), 5.59 (-50°C), 4.23 (-100°C), 3.45 (-150°C)、 E_s , E_c : 鉄筋およびコンクリートの弾性係数 (kg/cm²) である。コンクリートの弾性係数としては、本来引張破壊時までの値を用いるべきではあるが、ここでは便宜的に圧縮応力が作用した時の値を用いた。

この計算値と実験値とを比較したものが表-4である。これから、上の考え方がほぼ妥当であることがわかる。

2). 繰り返し荷重を受けた場合の強度について

表-5に、繰り返し荷重を行った場合の結果を示す。表中の※印は、主鉄筋D22の破断を示すもので、その場合の強度の評価はコンクリートの破壊程度を観察して推定した。また、繰り返しによる強度の低下は、繰り返し回数も考慮して判断した。ひびわれ荷重とは、供試体の端部に貼ったゲージが切れた時の荷重であり、低温下に

表-4 計算値と実験値の比較

試験温度区分	横方向鉄筋の種類	コンクリートの強度		実験値		計算値	
		圧縮強度	引張強度	最大平均付着応力度	U ₁	実験値	U ₂
常温	普通A	343	30.0	41.7	43.1	40.3	1.03
	普通B	408	28.6	48.0	49.1	38.4	1.25
	普通C	331	30.7	40.9	42.0	41.3	0.99
	普通D	370	33.6	51.1	45.6	45.1	1.13
	フェニールA	376	31.4	44.9	46.2	42.2	1.06
	低温用A	362	28.4	43.1	44.9	38.2	1.13
-50°C	普通A	639	70.1	80.3	68.2	75.4	0.86
	普通B	634	62.7	73.6	67.8	70.2	0.84
	普通C	708	80.4	88.9	73.7	107	0.83
	普通D	655	73.0	83.1	69.5	97.2	0.85
	フェニールA	614	76.2	80.3	66.1	102	0.88
	低温用A	652	79.8	81.7	69.3	106	0.77
-100°C	普通A	940	85.2	110	80.5	113	0.77
	普通B	827	78.6	101.4	82.2	104	0.79
	普通C	954	79.2	114	91.5	105	1.08
	フェニールA	894	82.8	109	84.4	109	1.21
	普通D	899	72.6	112	87.5	96.1	1.17
	低温用A	889	73.8	107	86.8	97.7	1.10
-150°C	普通A	908	70.1	109.4	88.2	92.8	1.17
	普通B	996	75.2	110	94.1	98.5	1.11
	普通C	1019	66.9	99.1	95.8	88.2	1.12
	普通D	889	68.8	109	86.5	90.7	1.20
	普通E	1025	62.1	110	96.2	84.9	1.34
	フェニールA	976	67.4	114	92.7	88.2	1.28
-150°C	低温用A	906	67.0	99.1	87.7	88.4	1.12
	平均				1.15	平均	1.04
				変動係数	0.4%	変動係数	14.2%

表-5 繰り返し荷重の結果

試験温度区分	横方向鉄筋の種類	S or R	ひびわれ荷重 (ton)	最大平均付着応力度 (kg/cm ²)	強度低下の程度
常温	無し	S	14.6	14.6	41.7
		R	11.6	11.6	33.1
	普通	S	16.8	16.8	48.0
		R	15.1	15.1	43.2
-50°C	無し	S	14.8	24.6	70.4
		R	11.3	21.4	57.9
		S	17.9	28.9	82.6
		R	13.5	23.1	55.6
	普通	S	14.7	25.8	73.6
		R	13.4	24.2	70.0
	フェニール	S	16.7	31.5	90.0
		R	15.4	28.3	80.9
-100°C	無し	S	16.9	29.7	84.8
		R	15.7	26.7	76.2
	普通	S	16.9	32.5	92.8
		R	16.9	26.7	76.3
		S	23.4	32.5	92.8
		R	17.8	30.0 ^{注1}	83.3 ^{注1}
	フェニール	S	21.6	38.5	110
		R	19.3	36.7 ^{注1}	105 ^{注1}
-150°C	無し	S	20.1	35.2 ^{注1}	101 ^{注1}
		R	22.5	34.7	99.2
	普通	S	19.1	39.1	112
		R	20.3	37.4	107
	フェニール	S	22.5	38.2 ^{注1}	109 ^{注1}
		R	23.7	38.2	109
	低温用	S	20.6	29.8	85.1
		R	23.8	28.3 ^{注1}	80.8 ^{注1}

注) 供試体形状はすべてA

S:静的荷重 R:繰り返し荷重

X印:主鉄筋D22の破断を示す

においては終局耐力の50~70%程度で局部的にひびわれが発生している。このような状態で繰り返し载荷を行うと、横方向鉄筋がない場合に、 -50°C では強度は約20%も大きく低下するが、温度の低下とともに低下の程度は小さくなり、 -150°C ではほとんど低下しなくなるようである。横方向鉄筋がある場合には、強度の低下率は横方向鉄筋のない場合のほぼ半分であり、 -100°C では若干の低下にとどまるようである。

3. 変形能について

重ね継手における主鉄筋とコンクリートの間の相対変位と静的な引張荷重との関係の一部を図-8 および図-9に示す。

横方向鉄筋がない場合には、最大荷重に達したのと同時にそれ以上変形せずに急激に破壊してしまったのに対し、横方向鉄筋を配置することによって、とくに温度が低い場合に破壊までに大きく変形することが観察された。図に示された通り、横方向鉄筋として普通鉄筋を加工後アニールしたものを使用すると、他に比べて大きな変形能を得ることができた。

低温用鉄筋を横方向鉄筋として使った場合、鉄筋は破断しなかったことから、アニールを使ったものと同程度の大きな変形能を示すことが予想されたが、今回の実験ではそうはならなかった。これは、低温用鉄筋の降伏点が普通鉄筋のそれに比べて約5割も大きかったためと思われる。成分調整した低温用鉄筋は低温下で破断しにくいので、条件が同じであれば継手の変形能を高めるために効果的に働くと思われる。

4. 結論

本研究により、次のような結論を得た。

- (1) 極低温下における鉄筋の重ね継手において、横方向鉄筋の性質は、静的強度および繰り返し载荷を受けたときの強度に対して、ほとんど影響をおよぼさない。しかし、横方向鉄筋の低温脆性を改善した場合、横方向鉄筋は破断しにくくなり、継手の破壊状況に大きな変化をもたらすこと、変形能に関しても、横方向鉄筋としてアニールしたものを使った場合に大きな終局変位が得られ、成分調整したものを使った場合にも、条件が同じであれば、アニールしたものと同様の傾向が得られるものと推察されること等、横方向鉄筋の低温脆性改善は、継手のねばりを向上させるうえで効果的であると考えられる。
- (2) 重ね継手の強度の算定にあたっては、横方向鉄筋の効果を剛性比によってとらえ、換算断面積分だけを有効とする考え方に基いて計算することが適当と考えられる。

なお、この研究に対し特殊鋼材の提供その他の援助をして頂きました 住友金属工業(株)に対し深く感謝致します。
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第285号 1979年5月
- 2) 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
- 3) 藤原正雄, 三浦尚, 後藤幸正: 極低温下における鉄筋の重ね継手強度に対する横方向鉄筋の性質の影響について 昭和56年度土木学会東北支部技術研究発表会概要集 1982年3月
- 4) 妹島茂生, 三浦尚, 藤原正雄: 極低温下における鉄筋の重ね継手におよぼす横方向鉄筋の性質の影響について 土木学会第37回年次学術講演会概要集 1982年10月
- 5) G. Q. Orangun, J. Q. Jirsa, and J. E. Breen: A Reevaluation of Test Data on Development Length and Splices, Journal of ACI March 1977
- 6) 三浦尚, 長谷川明巧: 極低温下における鉄筋の重ね継手強度に関する研究 第3回コンクリート工学年次講演会講演論文集 1981年6月

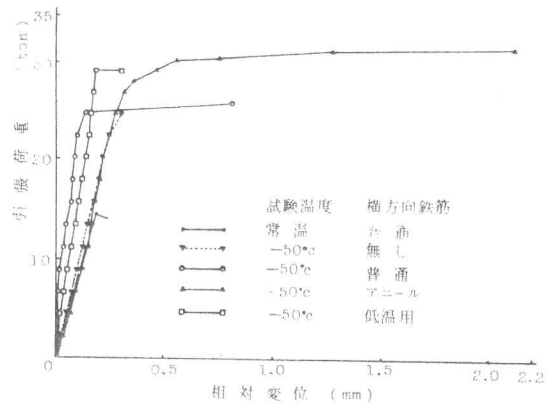


図-8 引張荷重と相対変位との関係

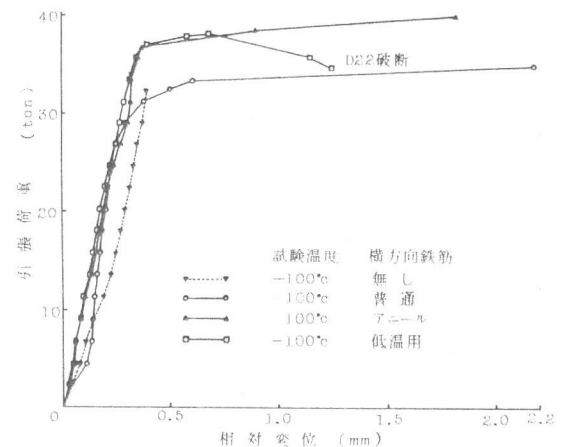


図-9 引張荷重と相対変位との関係