土木学会論文報告集
第 285 号・1979 年 5 月
【論　　文】

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

MECHANICAL PROPERTIES OF REINFORCED CONCRETE MEMBERS AT VERY LOW TEMPERATURES

後藤幸正*・三浦　尚**
By Yukimasa GOTO and Takashi MIURA

1. まえがき

近年，わが国においては，天然ガスが都市ガスとして，あるいは火力発電所の燃料として使用されており，その使用量は年々増大している．これは，天然ガスは単位容積当りのカロリー量が石炭ガスの約2倍もあり，都市ガスとして使用した場合，既存のパイプを使って2倍のエネルギーを供給できること，また，わが国でおもに使用する天然ガスは硫黄分を含まないため，大都市周辺の公害対策上有利であること等による．

天然ガスは常温では気体であり，従来その大量輸送はパイプラインのみに限られていたため，島国であるわが国はこれを輸入することは少なかった．ところがこれを経済的に液化する技術が開発されてから以降，液化天然ガス（Liquefied Natural Gas, 略して LNG）として，原油と同じように船で運搬したり，常圧に近い状態でタンクに貯蔵することが行われ，大量に輸入されるようになった．

一方，LNG は沸点が −162°C と大変低く，これを貯蔵するためのタンク，あるいは運搬するためのタンカーの一部もこのような極低温にさらされることになる．一般には LNG に接するタンクの内側には断熱材を入れるため，タンクの構造材自身は LNG の沸点と同じ温度にはならないのであるが，かなりの低温になると考えられる．

従来は，LNG タンクのように低温下で使用される構造物の構造材料としては，低温用に作られた特殊な鋼材がおもであったが，最近では鉄筋コンクリート，あるいはプレストレストコンクリートも多くなってきている．その理由は，コンクリートが低温に強いことと，鋼材に比べて経済的であることによっており，すでに多くの鉄筋コンクリート製の LNG 貯蔵用タンクが作られている．また，近い将来には，LNG 運搬用タンカーも鉄筋コンクリート，あるいはプレストレストコンクリートで作られようとしている．

コンクリートは，極低温にさらされると，一般に性質が大きく変化し，常温と同じと考えることができなくなる．したがって，コンクリートをこのような低温にさらされる構造物の材料として使用するためにはコンクリートの低温下における性質を知ることが大切である．

本研究は，このように最近数多く作られるようになり，今後ますます増加するものと思われる極低温下で使用されるコンクリート構造物を，安全で経済的に設計・施工するための資料を得ることを目的とするものである．

内容としては，極低温下におけるコンクリートの圧縮および引張強度，コンクリートと異形鉄筋との付着性状と重ね継手強度，それに鉄筋コンクリートばりの曲げ強度とねばりに関するものである．

2. 極低温下におけるコンクリートの強度

(1) 概　　説

コンクリート構造物においては，コンクリートの強度は，基本的な問題であり，まず第一に調査されなければならない事項である．極低温下におけるコンクリート強度は，常温のときと比べて一般に増加するといわれており，その増加割合はコンクリートの配合のほか，含水量等によって大きく影響を受けるものである．

この章では，コンクリートの圧縮および引張強度が，極低温下ではどのように変化するかを調査し，常温時のコンクリート強度から低温時の強度を推定する方法をみつけることを目的としている．

* 正会員　工博　東北大学教授　工学部土木工学科
** 正会員　工修　東北大学助教授　工学部土木工学科

（2） 実験概要

a） 使用材料および供試体

実験に使用したセメントは普通ポルトランドセメントおよび早強ポルトランドセメント，細骨材は川砂（比重 2.55，吸水量 2.32 および 2.38%），粗骨材は砕石（比重 2.86，吸水量 0.76% および 1.45%）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．

供試体の形状寸法は，圧縮強度測定用には直径 10 cm，長さ 20 cm，引張強度測定用には直径 15 cm，長さ約 20 cm の円柱供試体を用いた．

養生は，供試体の含水量を変化させるため，**表—2** に示す 11 種類の方法で行った．

b） 実験方法

供試体の冷却方法を **図—1** に示す．すなわち断熱材で作製した低温槽の中に供試体を入れ，その中に液化窒素を噴霧することによって槽の温度を下げる．液化窒素の噴霧量は槽内が所定の温度になるよう．電磁弁で自動的にコントロールされる．一方，槽の中には温度測定用の供試体を一緒に入れておき，供試体の中央部と表面部との温度差が大きくならないよう槽内の温度を徐々に下

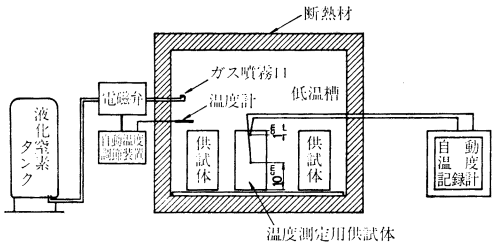
表—1 強度試験に用いたコンクリートの配合

No.	セメントの種類	コンクリートの種類	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 25 mm ～15 mm	15 mm ～10 mm	10 mm ～5 mm	混和剤 (cc)
1	普通	プレーンコンクリート	25	11±1	1.5±0.5	45	41	184	409	703	644	169	316	—
2			25	11±1	1.5±0.5	50	42	184	368	734	648	170	318	—
3			25	11±1	1.5±0.5	55	43	184	335	763	646	170	318	—
4		AEコンクリート	25	11±1	4±0.5	45	39	179	397	653	653	172	321	238
5			25	11±1	4±0.5	50	40	179	357	682	654	172	321	214
6			25	11±1	4±0.5	55	41	179	325	710	653	172	321	195
7	早強		25	11±1	4±0.5	50	40	190	380	663	636	167	313	228
8			20	11±1	4±0.5	50	38	194	388	622	(20 mm ～15 mm) 342	569	227	233

表—2 供試体の養生方法の種類

No.		材令 1	2	3……7……14…15……17……28……42	養生	セメント
1	コンクリート打設	キャッピング	脱型・養生開始	Ⓣ	水中	普通
2				水中 ……→Ⓣ	〃	普通 早強
3				水中 ……→Ⓣ	〃	普通
4				Ⓣ	気乾（室温 20°C，湿度 50%）	〃
5				空中 ……→Ⓣ	〃	〃
6				空中 ……→Ⓣ	〃	〃
7				空中 ……→ 乾燥炉 110°C →Ⓣ	炉乾（28 日気乾後，14 日乾燥）	〃
8				空中 ……→Ⓣ	気乾	早強
9				空中 ……→Ⓣ	炉乾（28 日気乾後，15 時間乾燥）	〃
10				空中 ……→ 乾燥炉 →Ⓣ	炉乾（28 日気乾後，3 日乾燥）	〃
11				空中 ……→ 乾燥炉 →Ⓣ	炉乾（28 日気乾後，14 日乾燥）	〃

Ⓣ は強度試験の実施を示す．



図—1　供試体の冷却装置

げてゆく．

供試体の載荷は 200 t 耐圧試験機で行った．その際，供試体を低温槽から取り出して試験が終了するまでの間に温度が上昇するので，各供試体について，その上昇分だけ温度を補正した．試験時間は 2〜3 分程度，補正量はそれぞれの温度のほぼ 5% 以内であった．

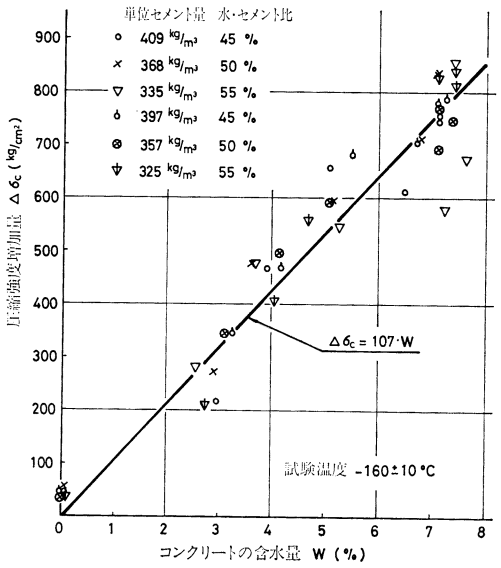
コンクリートの含水量は，供試体を小割にして +110°C の乾燥炉に入れ，脱水がほぼ終了した時点での脱水量と，脱水されたコンクリートの重量との比で表わす．

$$\text{含水量}(\%)=\frac{+110^\circ\text{C の乾燥炉によって脱水された水量}}{\text{乾燥炉で脱水されたコンクリート重量}}\times 100$$

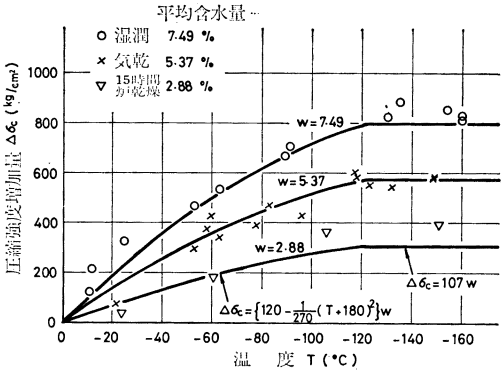
なお，脱水がほぼ終了するのに 4 日間必要であった．

（3） 実験結果とその考察

圧縮強度の測定結果によると，コンクリートの圧縮強度は，一般に温度が低下するにつれて増大する．そしてその増加の状態は，温度，配合，含水量によっても異なる．そして，コンクリートが冷やされたために，強度が常温のときから増加した分（低温時の強度から，常温時の強度を差引いたもので，以下“強度の増加量”という）



図—2　−160°C におけるコンクリートの圧縮強度の増加量



図—3　圧縮強度増加量と温度・含水量との関係

は，配合によらずほぼそのコンクリートの含水量に比例する[1]．

図—2 に −160°C における種々の配合のコンクリートの圧縮強度増加量と含水量との関係を示す．これらの関係を最小自乗法で求めると，$\Delta\sigma_c=107\,w$ となる．

ここに，$\Delta\sigma_c$ は圧縮強度増加量 (kg/cm²)，w はコンクリートの含水量（%）である．

これらの関係を各温度について表わしたのが **図—3** であり，コンクリートの圧縮強度増加量とコンクリートの含水量との関係は次式で近似できる[2]．

$$\left.\begin{aligned}&\Delta\sigma_c=\left\{120-\frac{1}{270}(T+180)^2\right\}\cdot w\\&\text{ただし}\quad \Delta\sigma_c\leqq 107\cdot w\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots(1)$$

ここに，T はコンクリート温度（°C）である．

以上の結果から，コンクリートの常温における強度と含水量がわかれば，低温時の強度は次式によって推定できる．

$$\sigma_{cL}=\Delta\sigma_c+\sigma_{c0}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(2)$$

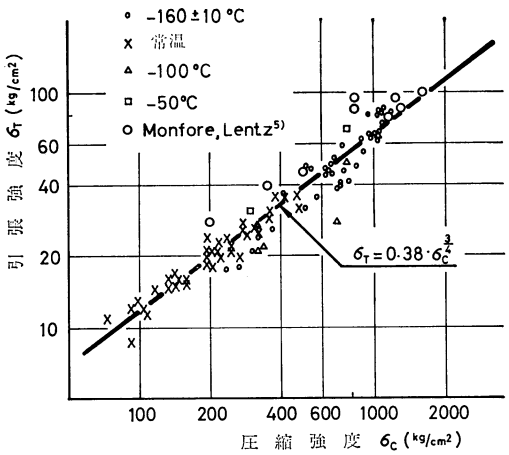
ここに，σ_{cL} は低温時のコンクリート強度，σ_{c0} は常温時のコンクリート強度である．

図—3 でもわかるように，コンクリートは一般に温度の低下とともに強度が増加するのであるが，その原因としては，コンクリート中の間隙にある自由水が凍結したことによって，いままで液体の水が占めていた間隙が強度をもつ固体に変わるためであると考えられる．また，温度が −120°C 付近で増加の様子が異なり，ばらつきも大きくなるのであるが，これはコンクリート中の氷の状態がこの付近で変化するからであろうと思われる[3]．

コンクリートの引張強度も，圧縮強度と同様に，温度の低下につれて増加する．増加の様子は圧縮強度の場合と若干異なるが，同じコンクリートの圧縮強度と関連があるようである．

図—4 に低温時の引張強度と圧縮強度との関係を示すが，ほぼ次の関係があると考えられる[4]．

$$\sigma_T=0.38\,\sigma_c^{3/4}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(3)$$



図—4 引張強度と圧縮強度との関係

ここに，σ_T はコンクリートの引張強度（kg/cm²），σ_c はコンクリートの圧縮強度（kg/cm²）である．

なお，以上の関係式は，一般に使用される水/セメント比 45～55% 程度のコンクリートについてはすべてあてはまると考えられ，実験数は少ないが，常温での圧縮強度が 800 kg/cm² 程度の超高強度コンクリートでもほぼ合うことがわかっている．

3. 極低温下における異形鉄筋の付着特性と重ね継手強度

（1） 概　　説

鉄筋コンクリートは，圧縮に強く引張に弱いコンクリートと，引張に強い鉄筋とが組み合わされ，一体となって働く部材である．したがって，一般には鉄筋とコンクリートとは十分付着した状態にあり，設計荷重の範囲内であればひびわれ付近等を局部的にみる場合のほかは，全体としてずれは生じないと考えている．

コンクリートと鉄筋との付着に関する性質を表わすものとして，一般に，ひびわれ分散性と定着性とが考えられる．ひびわれ分散性とは，鉄筋コンクリート部材中の鉄筋に引張応力が生じた際，まわりのコンクリートに鉄筋軸に直角方向に生じるひびわれの発生状態（ひびわれ幅の大きいものが数少なく発生するか，ひびわれ幅の大きいものが数多く発生するか）を表わすものであり，一般には，ひびわれ幅の小さいものが数多く発生するのがよいと考えられている．定着性とは，鉄筋の端部等で鉄筋とコンクリートとの力の伝達性能を表わすものである．

また，重ね継手は，一方の鉄筋に作用する力を，まわりのコンクリートを介して他方の鉄筋へ伝える継手であり，鉄筋とコンクリートとの付着の影響が大きいと考えられる．

このように，鉄筋とコンクリートとの組み合わせが成り立つためには，鉄筋とコンクリートとの付着は大変重要な問題である．一方，極低温下においては，常温と比べてコンクリートおよび鉄筋の性質が大きく変化し，付着の状態も異なっていると考えられる．

本章では以上のことから極低温下における鉄筋とコンクリートとの付着について実験的に調べることにした．

（2） 実験概要

a） 使用材料

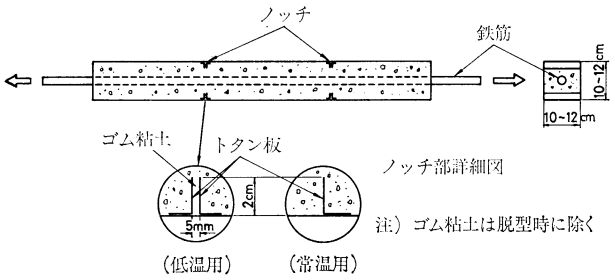
実験に使用したコンクリートは，表—1 の No. 7 と同種のものである．

コンクリートは恒温室（温度 20°C, 湿度 50%）にて打設し，材令 2 日で脱型して水温 20±1°C の水中で養生した．そして材令 7 日で実験を行った．

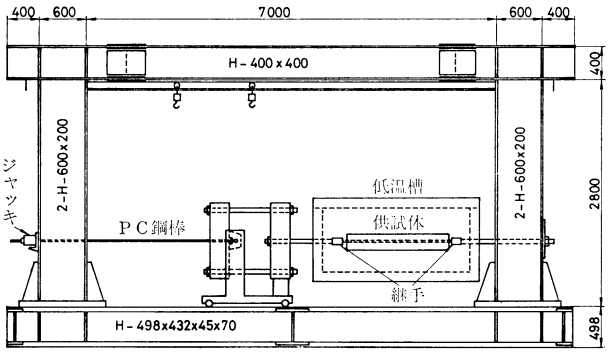
表—3 付着試験に用いた鉄筋の性質

鉄筋	SD 30		SD 30 L	
試験温度	常温	−160°C	常温	−160°C
引張強さ (kg/mm²)	58	71	47	66
降伏点 (kg/mm²)	38	—	37	59
伸び（標点距離 20 cm）(%)	25	—	22	24

注） 試験片は，母材をそのままで用いたもの．



図—5 ひびわれ分散性試験用供試体



図—6 ひびわれ分散性試験装置

使用した鉄筋は，市販の SD 30，および極低温用に試作された SD 30 相当の鉄筋（以下 SD 30 L と記す）の2種類とした．いずれも D 22 の斜ふし異形鉄筋である．

表—3 に実験に用いた鉄筋の性質を示す．

b）供試体および実験方法

① ひびわれ分散性試験

ひびわれ分散性を調べるために，正方形断面を有する角柱の両引き供試体を用いた．供試体は **図—5** に示すように一辺 10 cm および 12 cm の2種類とした．ここでノッチの構造が低温用と常温用とで異なっているが，これは低温時にはトタン板とコンクリートとが凍りついてしまい，常温用のノッチ構造ではノッチの働きをしなくなるためである．使用鉄筋は，常温試験には SD 30，低温試験には SD 30 L とした．

載荷装置は **図—6** に示す．

低温時におけるコンクリートの強度は，そのコンクリートの含水量によって異なるので，実験はすべて水中養生から取出した直後の湿潤状態（含水量 7% 程度）で行った．

鉄筋の低温における強度は常温における強度より大きいため，低温槽の外に出る部分は断面を大きくする必要がある．そのため，低温槽の中で，**図—7** に示すような継手を設け，鉄筋で破断をすることを防いだ．

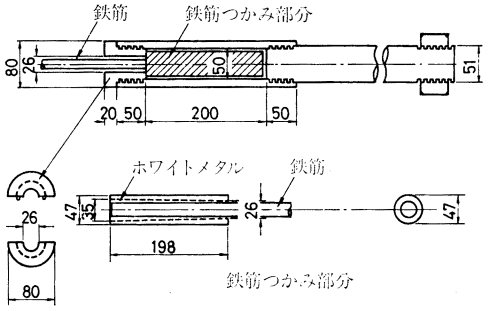
② 定着試験

定着試験としては，**図—8** に示すような，主としてコンクリートの割裂で破壊する定着試験（A）と **図—9** に示すような，主として鉄筋がコンクリートから引抜けて破壊する定着試験（B）との2種類を行った．

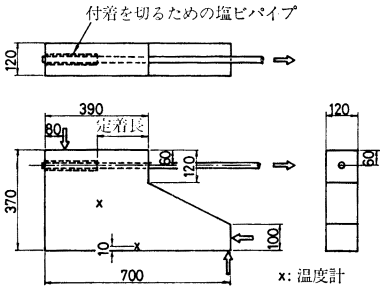
一般に，異形鉄筋の定着性に影響を及ぼすと思われる因子としては，鉄筋径，鉄筋表面形状，鉄筋比，かぶり，定着長，せん断スパンと有効高さとの比，鉄筋の機械的性質，コンクリートの諸強度等があるが，この実験では，供試体の大きさ，かぶり，使用材料を一定とし，定着長のみを変化させて常温状態と −160°C とにおいて試験を行い，比較検討した．

載荷装置は，**図—10** に示す．

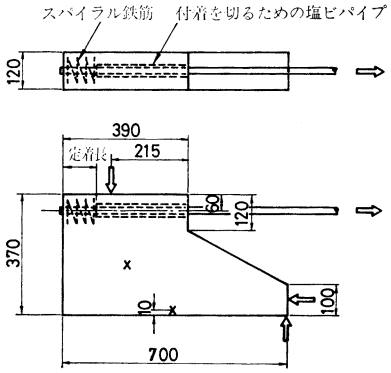
③ 重ね継手試験



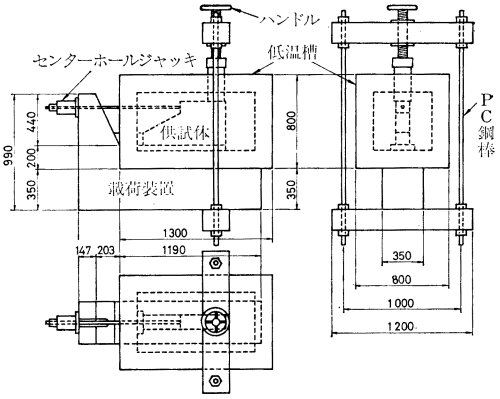
図—7　低温槽中の鉄筋の継手構造



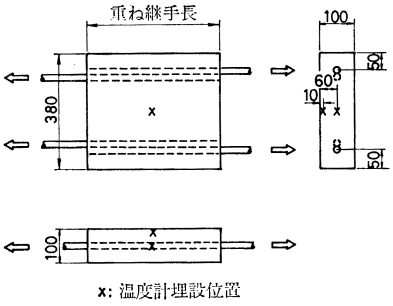
図—8　定着試験（A）用供試体



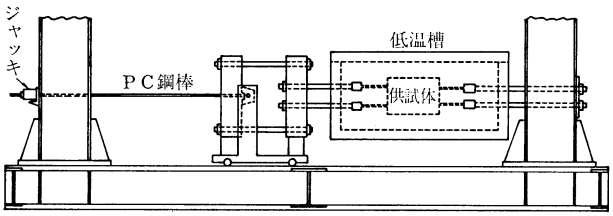
図—9　定着試験（B）用供試体



図—10　定着試験用載荷装置



図—11　重ね継手試験用供試体



図—12 重ね継手試験用載荷装置

重ね継手の実験に使用した供試体は，図—11 に示すように，継手を2か所対称に組み合わせたもので，幅 38 cm，厚さ 10 cm の断面のもの（かぶり 3.9 cm）と，幅 40 cm，厚さ 12 cm の断面のもの（かぶり 4.9 cm）との2種類とし，それぞれ重ね合わせ長を変化させて実験を行った．

載荷装置は 図—12 に示す．

④ 供試体の冷却方法

供試体の冷却は，低温槽の中へ液体窒素を噴霧することによって行った．温度のコントロールは，自動および手動装置を用いて，供試体の中央と表面部との温度差が 20°C 以下となるように行った．

供試体が所定の温度で一様になった状態で載荷を行った．ひびわれ分散性試験では，ひびわれ状態の確認のため低温槽の上蓋を開けたが，そのための温度上昇は 10°C 程度であった．

（3） 実験結果とその考察

a） ひびわれ分散性試験

ひびわれ分散性試験結果の一例を 図—13，14 に示す．表—4 にそれらをまとめて示す．

この結果によると，かぶり 3.9 cm の供試体の実験結果では，常温の場合にはあまりばらつきがなく，鉄筋軸に直角方向に生じる横ひびわれの最大ひびわれ間隔は 20 cm から 22 cm 程度であることがわかる．それに対して，−160°C の場合にはかなりのばらつきがあり，最大ひびわれ間隔は 30 cm から 36 cm 程度であろうと思われる．

また，別に行ったかぶり 4.9 cm の実験結果によると，常温における最大ひびわれ間隔が 25 cm から 30 cm であるのに対し，−160°C では，55 cm から 59 cm 程度になった．

以上をまとめると，鉄筋コンクリートにおける最大ひびわれ間隔は，−160°C では常温のときの4割から8割，場合によってはそれ以上大きくなることがわかる．

このように低温下で最大ひびわれ間隔が大きくなる理由としては，次のように考えられる．

横ひびわれの最大ひびわれ間隔 L は概略次式の関係にある．

$$\sigma_T=\frac{\pi D}{A_c}\int_0^{L/2}u_x dx$$

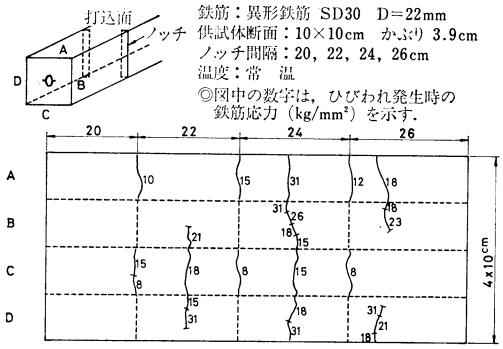
ここに，

σ_T：コンクリートの引張強度

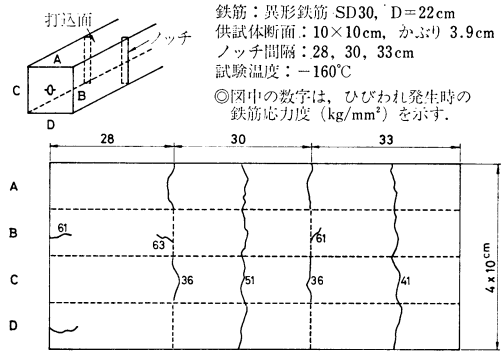
D：鉄筋直径

A_c：コンクリート断面

u_x：ひびわれから x の位置における付着応力度 $=u_m f(x/L)=u_m f(\phi)$



図—13 ひびわれ分散性試験の結果の一例（常温）



図—14 ひびわれ分散性試験の結果の一例（−160°C）

表—4 ひびわれ分散性試験結果一覧表

常温

鉄筋＼ノッチ間隔 cm	18	20	22	24	26
SD30	○ ○	○○○ ○○○	○○● ◑●●	●●● ●●●	●●● ●●◑

−160°C

鉄筋＼ノッチ間隔 cm	25	28	30	33	36	38	40	45	50	54	56	58	60	80
SD30L		○	○○○ ○○	○○ ◑○	○●● ○○●	◑ ●	○ ● ●	◑	●	● ●	●	○	○	
SD30	○ ○	○○○ ○○○	○○◑○ ○○○○	◑○●◑ ○○◑●	◑ ◑		●		●	●			●	●

供試体断面 10cm×10cm
かぶり 3.9cm

○ 印：ひびわれの発生しなかった供試体
● 印：間にひびわれが発生した供試体
◑ 印：どっちともいえない供試体

u_m：最大付着応力度

ゆえに，

$$L=\frac{A_c\sigma_T}{\pi D u_m\int_0^{1/2} f(\phi)\,d\phi}=\frac{2A_c\sigma_T}{\pi D\bar{u}} \quad \cdots\cdots\cdots(4)$$

ここに，

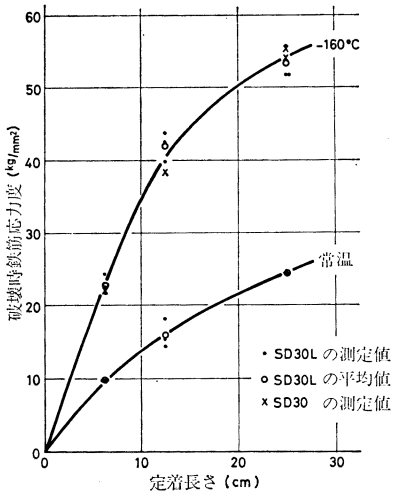
$\bar{u}$：区間 $L/2$ における付着応力度の平均値

上式から最大ひびわれ間隔は $\sigma_T/\bar{u}$ に比例することがわかる．一方，温度が低下するとコンクリートの付着剛性が増大し，付着応力度の鉄筋軸方向の分布形は横ひびわれを頂点とした三角形分布に近づく傾向になると予想される．

したがって，L が長い場合，温度が低くなると付着破壊時の $\bar{u}$ の増加量は σ_T の増加に比べて相対的に小さくなり，$\sigma_T/\bar{u}$ の値は常温のときより大きくなると考えられる．また，L が大きくなるに従って，すなわち鉄筋直径に比してコンクリート断面が大きくなる（かぶりが大きくなる）に従って，このような影響が大きく表われるため，かぶりの大きい場合は低温と常温との最大ひびわれ間隔の差がより大きくなる．

b）定着試験

定着試験（A）の結果を **表—5**，**図—15** に示す[6),7)]．これから，−160°C における各定着長さの付着強度は，ほぼ常温の場合の 2.2 倍から 2.6 倍になることがわかる．



図—15 定着試験（A）の結果

一方，定着強度は，コンクリートの引張強度にほぼ比例することがわかっているので，計算によって引張強度の比を求めると以下のようになる．

① コンクリートの常温における圧縮強度の平均値および含水量は，それぞれ $\sigma_c=328\,\mathrm{kg/cm^2}$ および 7.52% であった．

② 式 (1)，(2) より，−160°C における圧縮強度は，$328\,(\mathrm{kg/cm^2})+107\times7.52=1\,133\,(\mathrm{kg/cm^2})$ となる．

③ 常温および −160°C におけるコンクリートの引張強度は，式 (3) より，常温が 29 kg/cm²，−160°C が 74 kg/cm² となり，その比は 74/29≒2.5 となる．

すなわち，実験値は計算値に，ほぼ合っていることがわかった．

定着試験（B）の結果を **表—6** に示す．これによると，強度は定着試験（A）と比べると大変大きくなっているが，低温値と常温値との比はあまり変らず，やはりコンクリートの引張強度の比に似た傾向を示すと考えられる．

表—5 定着試験（A）の結果の1例（かぶり 4.9 cm）

定着長 (cm)	番号	常温 (SD 30) 破壊荷重 (t)	破壊時鉄筋応力度 (kg/mm²)	平均付着応力度 (kg/cm²)	−160°C (SD 30 L) 破壊荷重 (t)	破壊時鉄筋応力度 (kg/mm²)	平均付着応力度 (kg/cm²)	低温値/常温値
25.0	1	9.4	24.3	53.7	20.0	51.7	114	
	2	9.6	24.8	54.9	20.0	51.7	114	
	3	9.4	24.3	53.7	22.0	56.8	126	
	平均	9.5	24.4	54.0	20.7	53.4	118	2.19
12.5	1	7.1	18.3	81.1	15.4	39.8	176	
	2	5.6	14.5	64.0	16.9	43.7	193	
	3	6.0	15.5	68.6	16.5	42.6	189	
	平均	6.2	16.1	71.2	16.3	42.0	186	2.61
6.25	1	3.8	9.8	86.9	8.4	21.7	192	
	2	3.8	9.8	86.9	9.4	24.3	215	
	3	3.8	9.8	86.9	8.7	22.5	199	
	平均	3.8	9.8	86.9	8.9	22.9	203	2.34

表—6 定着試験（B）の試験結果

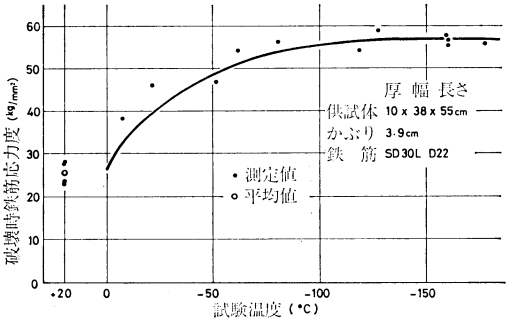
定着長 (cm)	番号	常温 (SD 30) 破壊荷重 (t)	破壊時鉄筋応力度 (kg/mm²)	平均付着応力度 (kg/cm²)	低温 (SD 30) 試験温度 (°C)	破壊荷重 (t)	破壊時鉄筋応力度 (kg/mm²)	平均付着応力度 (kg/cm²)	低温値/常温値*
10	1	14.5 (鉄筋降伏)	37.4	—	−160	27.0 (鉄筋破断)	69.8	—	—
5	1	9.2	23.7	263	−160	22.5	58.1	643	2.42
	2	9.9	25.5	282	−168	25.0	64.6	714	2.68
	3	8.9	23.1	254					
	平均	9.3	24.1	266					

* 常温値は平均値を用いた．

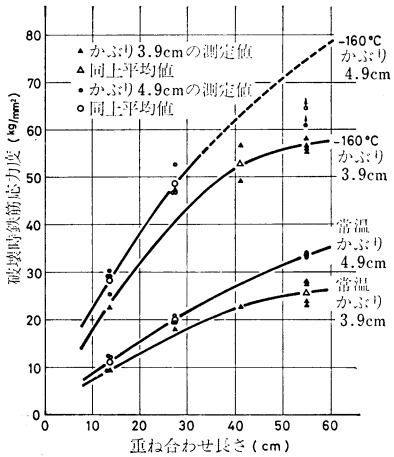
c） 重ね継手試験

重ね継手強度と試験温度との関係を **図—16** に示す[7]．**図—17** には重ね継手強度と重ね合わせ長さとの関係を示す．**図—18** には，−160°C と常温との重ね継手強度の比と重ね合わせ長さとの関係を示す．

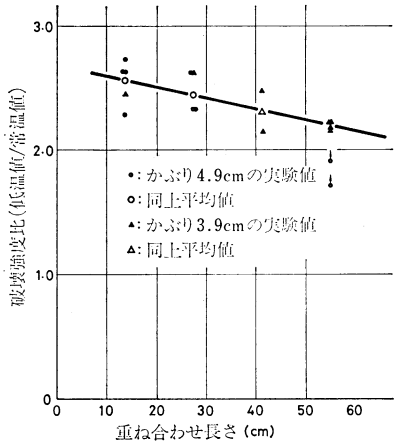
図—17 によって，各重ね合わせ長さに対する重ね継手強度が求められるが，図中点線の部分は試験装置の制限から破壊させることができなかったもので，**図—18** の関係を用いて推定した値である．



図—16 重ね継手強度と試験温度との関係



図—17 重ね継手強度と重ね合わせ長さとの関係



図—18 −160°C と常温との重ね継手強度比と重ね合わせ長さ

図—18 によると，−160°C と常温との強度の比はかぶり厚さにはあまり関係せず，重ね合わせ長さが大きくなるに従って低下することがわかる．すなわち，重ね合わせ長さが長くなることによる付着応力の集中の程度が常温のときより低温下で大きくなったものと予想できる．この原因としては，ひびわれ分散性試験のところで述べたことと同様に，低温下ではコンクリートの剛度が増大すること，あるいは低温下でコンクリートの降伏後の伸びが小さくなって，応力集中の影響が大きく表われること等が考えられる．

いずれにしても，これらから，低温下においては，異形鉄筋のコンクリートへの定着強度あるいは重ね継手強度はコンクリートの引張強度の増加割合とほぼ等しい割合で増加することのほか，反対に長さが長くなるとその増加割合が低下するということが予想される．したがって，低温下で使用される鉄筋コンクリート構造物の設計にあたっては，これらの点を十分考慮しなければならないと思われる．

4. 極低温下における鉄筋コンクリート部材の性質

（1） 概　　説

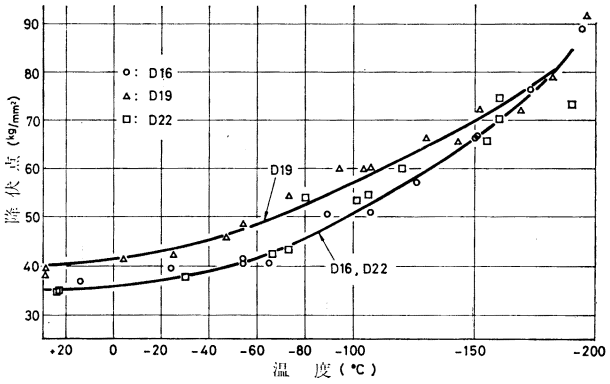
LNG 貯蔵用タンク，あるいは運搬用タンカーの材料に鉄筋コンクリートが使用された場合，地震時におけるタンク，あるいは衝突その他の事故時におけるタンカーには，強度とともに十分なねばりが必要となる．また，構造物の破壊時の警告のため，あるいは応力の再分配のためにもねばりが必要といわれている．

低温下における鉄筋コンクリート部材の強度（主として曲げ強度）およびねばりは，コンクリートや鉄筋の性質が十分わかっている場合にはある程度推定することができると思われるが，極低温下におけるそれらの性質はまだ十分解明されていない．そこで，本章では低温下における鉄筋コンクリート部材の終局曲げモーメント，および曲げに対するねばりを実験的に求め，常温の値と比較するとともに，低温下で使用される鉄筋コンクリート部材の強度の推定法，および十分なねばりをもたせる方法について検討する．

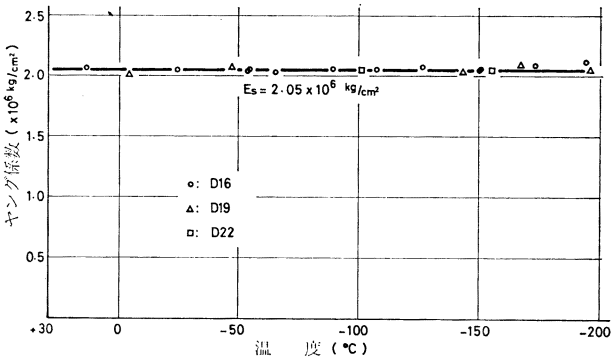
（2） 実験概要

a） 使用材料

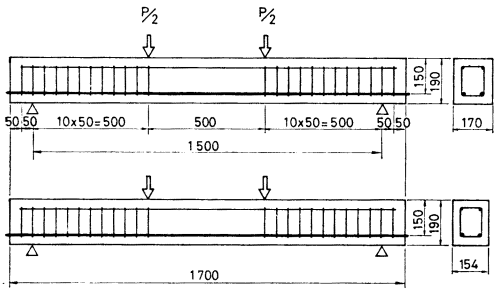
実験に使用したコンクリートは，**表—1** の No. 8 と



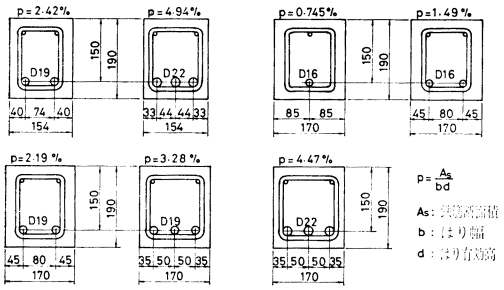
図—19 使用した鉄筋の降伏点と温度との関係



図—20 使用した鉄筋のヤング係数と温度との関係



図—21 はり供試体の寸法図



図—22 はり供試体の断面および鉄筋量

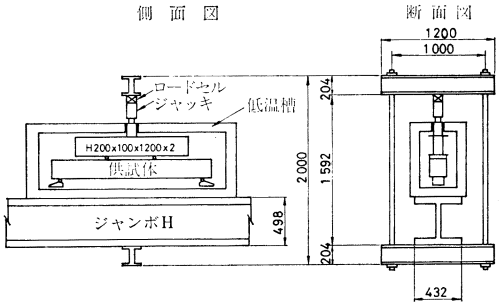
同種のものである．

コンクリート打設後，材令1日で脱型し，気乾養生のものは気温 20°C，湿度 50% の恒温室で，水中養生のものは水温 20°C の恒温水槽で養生を行った．試験材令は試験の都合上14日から17日までの間とした．

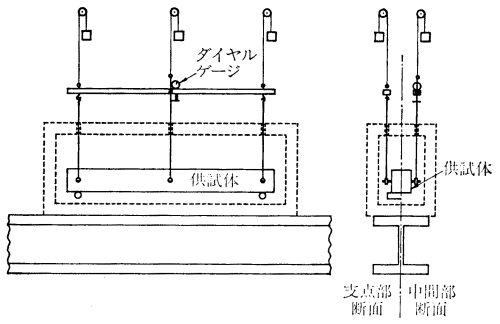
使用した鉄筋は SD 30, D 16, D 19, D 22 の3種類とし，それぞれの降伏点の測定結果を **図—19** に示す．なお，この値はすべて鉄筋の測定断面積（D 16 : 1.90 cm², D 19 : 2.79 cm², D 22 : 3.80 cm²）に基づいて整理したものである．**図—20** には各温度におけるヤング係数の測定結果を示す．

b） 供試体および実験方法

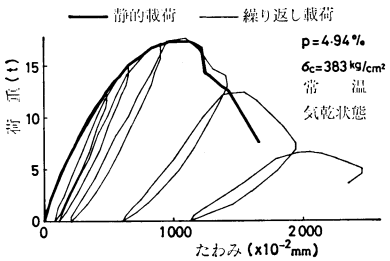
実験に用いた供試体は，スパン 1.5 m，長さ 1.7 m の単鉄筋ばりとし，種々に鉄筋比を変えたものを用いた．また，コンクリートは含水量によって性質が異なるため，湿潤状態のものと気乾状態のものとの2種類について実験を行った．**図—21, 22** にそれらの供試体の寸法および鉄筋量を示す．載荷は3等分点の2点載荷とし，供試体を低温槽の中に入れた状態で，外から載荷した（**図—23** 参照）．測定項目は，荷重，たわみ，コンクリートひずみ，および供試体温度とした．はりのたわみは，**図—24** に示すように，はり支点部と中央部から低温槽外へロッドを出し，その相対移動量によって測定した．なお，この方法によって求めたたわみの値は実際のはりのたわみを正確に表わしていることも確認した．



図—23 はり試験載荷装置



図—24 はりのたわみ測定装置



図—25 繰り返し載荷と静的載荷との比較例（常温 $p=4.94\%$）

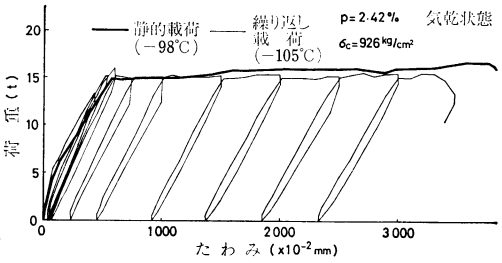
載荷方法は片振りの低サイクル繰り返し載荷を考えたが，供試体 No. 1（$p=2.42\%$）および No. 2（$p=4.94\%$）においてそれぞれ常温 −50°C, −100°C, −150°C の 4 種類，計 8 種類の状態において，繰り返し載荷を行った場合と繰り返しを行わずに静的に単調増加載荷した場合とを比較した結果，ほぼ同じたわみ挙動を示すことがわかったので，その後の実験では静的にのみ載荷した．**図—25**，**26** にその結果の 1 例を示す．

（3） 実験結果とその考察

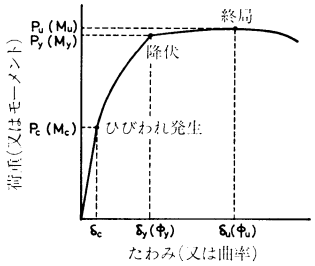
a） 鉄筋コンクリートばりの強度

実験結果の一部を **表—7** に示す．ここで終局曲げモーメントというのは，**図—27** に示すように，荷重-たわみ曲線で荷重が最大となって低下する直前における曲げモーメントを意味している．また，終局曲げモーメントの計算においては，次の 2 種類の応力ブロックを仮定して以下のように行った（**図—28** 参照）．

① 三角形応力ブロック



図—26 繰り返し載荷と静的載荷との比較の例（−100°C, $p=2.42\%$）



図—27 荷重-たわみ曲線の模式図

表—7 鉄筋コンクリート

（ ）内は降伏モーメント　　気乾

温度区分	温度 (°C)	鉄筋比 p (%)	終局曲げモーメントの測定値 M_u(t-m)	三角応力ブロックと仮定する方法 モーメントの計算値 M_{uc}	三角応力ブロックと仮定する方法 M_u/M_{uc}	矩形応力ブロックと仮定する方法 モーメントの計算値 M_{uc}	矩形応力ブロックと仮定する方法 M_u/M_{uc}
常温	常温	0.745	(0.900) 1.13	0.969	(0.929) 1.17	0.974	(0.924) 1.16
		1.49	(1.93) 2.17	1.84	(1.05) 1.18	1.86	(1.04) 1.17
		2.19	2.88	2.72	1.06	2.78	1.04
		3.28	3.91	3.71	1.05	3.84	1.02
		4.47	4.56	4.26	1.07	4.46	1.02
−50	−50	1.49	(2.23) 2.65	2.15	(1.04) 1.23	2.17	(1.03) 1.22
	−52	2.19	3.40	3.55	0.959	3.59	0.946
	−50	3.28	4.96	4.89	1.02	4.99	0.995
	−50	4.47	5.46	5.64	0.968	5.79	0.943
−100	−99	1.49	(2.68) 3.25	2.71	(0.989) 1.20	2.73	(0.982) 1.19
	−105	2.19	4.33	4.41	0.982	4.47	0.970
	−104	3.28	5.85	6.21	0.942	6.34	0.922
	−103	4.47	6.85	7.24	0.947	7.43	0.922
−150	−149	0.745	(1.63) 2.03	1.82	(0.896) 1.11	1.83	(0.891) 1.11
	−150	1.49	(3.80) 3.88	3.53	(1.08) 1.10	3.56	(1.07) 1.09
	−148	2.19	4.83	5.23	0.924	5.30	0.911
	−149	3.28	7.68	7.40	1.04	7.56	1.02
	−149	4.47	8.73	9.04	0.966	9.31	0.938

$$\left.\begin{aligned} &\frac{bx\sigma_c'}{2}=A_s\sigma_{sy} \\ &\therefore\ x=\frac{2A_s\sigma_{sy}}{b\sigma_c'}=\frac{2p\sigma_{sy}d}{\sigma_c'} \end{aligned}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(5)$$

$$M_u=A_s\sigma_{sy}\left(d-\frac{x}{3}\right)$$

$$=A_s\sigma_{sy}d\left(1-\frac{2p\sigma_{sy}}{3\sigma_c'}\right) \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(6)$$

② 矩形応力ブロック（ACI の規準の値を用いた）

$$k_1k_3x\sigma_c'b=A_s\sigma_{sy}\ \therefore\ x=\frac{p\sigma_{sy}d}{k_1k_3\sigma_c'} \cdots\cdots\cdots(7)$$

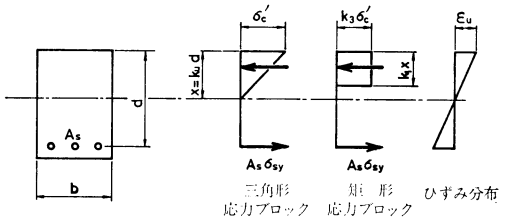
$$M_u=A_s\sigma_{sy}\left(d-\frac{k_1x}{2}\right)$$

$$=A_s\sigma_{sy}d\left(1-\frac{p\sigma_{sy}}{2k_3\sigma_c'}\right) \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(8)$$

ここで，

b：はりの幅（cm）

σ_c'：コンクリートの標準供試体による圧縮強度



図—28 仮定した応力ブロックの種類

ばりの強度試験結果

湿潤

温度区分	温度 (°C)	鉄筋比 p (%)	終局曲げモーメントの測定値 M_u(t-m)	三角形応力ブロックと仮定する方法 モーメントの計算値 M_{uc}	三角形応力ブロックと仮定する方法 M_u/M_{uc}	矩形応力ブロックと仮定する方法 モーメントの計算値 M_{uc}	矩形応力ブロックと仮定する方法 M_u/M_{uc}
	常温	0.745	(1.05) 1.30	0.972	(1.07) 1.34	0.978	(1.07) 1.33
		1.49	(1.93) 2.31	1.87	(1.03) 1.23	1.89	(1.02) 1.22
		2.19	3.00	2.81	1.07	2.85	1.05
		3.28	4.08	3.91	1.04	4.01	1.02
		4.47	4.85	4.55	1.06	4.71	1.03
−50	−52	1.49	(2.20) 3.00	2.19	(1.00) 1.37	2.20	(1.00) 1.36
	−53	2.19	(3.38) 4.10	3.65	(0.926) 1.12	3.69	(0.915) 1.11
	−61	3.28	5.73	5.45	1.05	5.53	1.04
	−50	4.47	6.05	5.80	1.04	5.93	1.02
−100	−105	1.49	(2.80) 3.48	2.85	(0.982) 1.22	2.87	(0.976) 1.21
	−104	2.19	(4.25) 5.00	4.53	(0.938) 1.10	4.57	(0.930) 1.09
	−107	3.28	6.93	6.60	1.05	6.70	1.03
	−105	4.47	7.95	7.77	1.02	7.91	1.01
−120	−119	1.49	(3.03) 3.81	3.05	(0.993) 1.25	3.07	(0.987) 1.24
−140	−137	1.49	(3.35) 3.90	3.35	(1.00) 1.16	3.37	(0.994) 1.16
−150	−150	0.745	(2.10) 2.47	1.84	(1.14) 1.34	1.85	(1.14) 1.34
	−154	1.49	(3.80) 4.05	3.66	(1.04) 1.11	3.68	(1.03) 1.10
	−152	2.19	(5.38) 5.63	5.37	(1.00) 1.05	5.43	(0.991) 1.04
	−150	3.28	7.75	7.59	1.02	7.73	1.00
	−150	4.47	9.28	9.35	0.99	9.58	0.97

(kg/cm²)（式 (1) σ_T に相当する）

A_s：鉄筋断面積 (cm²)

σ_{sy}：鉄筋の降伏強度 (kg/cm²)（図—19 により求める）

p：鉄筋比$=\dfrac{A_s}{bd}$

d：はりの有効高さ (cm)

k_1：ACI の規準により

$$k_1=0.85 \quad (\sigma_c' \leqq 280\,\mathrm{kg/cm^2} \text{ のとき})$$

$$=0.85-0.05\left(\frac{\sigma_c'-280}{70}\right)$$

$(280\,\mathrm{kg/cm^2} < \sigma_c' \leqq 560\,\mathrm{kg/cm^2}$ のとき)

$$=0.65,$$

（$\sigma_c' > 560\,\mathrm{kg/cm^2}$ のとき応力-ひずみ曲線が直線に近づくので一定と仮定）

とする．

k_3：同様に $k_3=0.85$ とする．

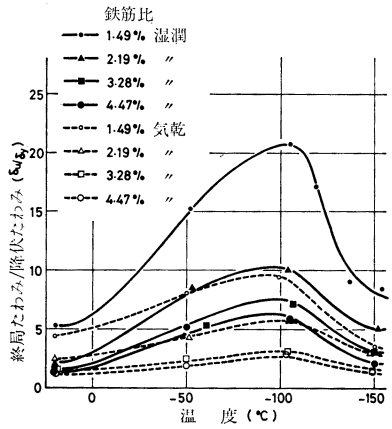
表—7 の結果をみると，応力ブロックを三角形に仮定しても矩形に仮定しても，計算結果と実測値はよく合うことがわかる[9]．ただし，鉄筋比が特に小さいはりでは計算値は終局曲げモーメントより降伏曲げモーメントの実測値に近い．この理由としては，鉄筋比があまり小さいものでは，実際のはりは終局時にたわみが大変大きくなり，鉄筋がひずみ硬化の領域に入って応力度が計算で仮定する降伏応力度よりかなり大きくなるためと思われる．

b） 鉄筋コンクリートばりのねばり

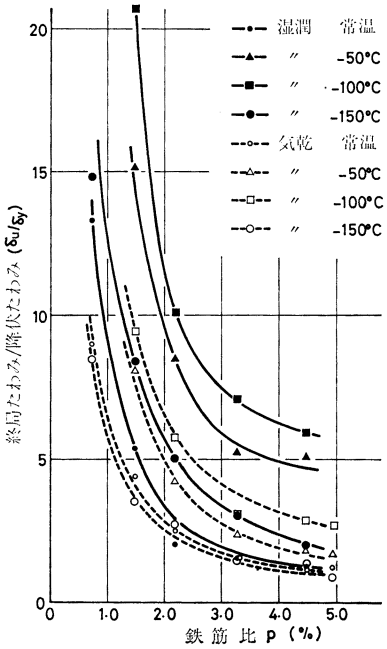
鉄筋コンクリートばりのねばりを表わす指標として，はりが荷重を受け変形したときの，終局たわみ δ_u と降伏たわみ δ_y との比 δ_u/δ_y を用い，これを“たわみによるじん性率”ということにする．

図—29，30 これらの結果を示す．

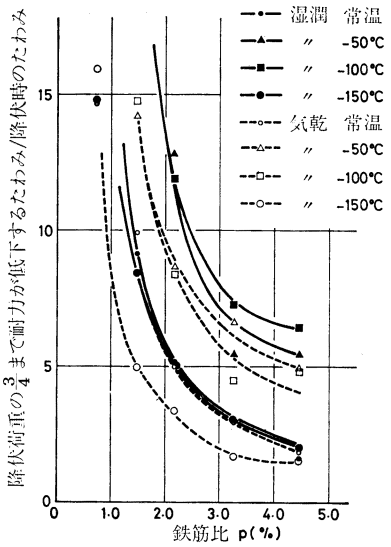
これらの結果によると，鉄筋コンクリートのじん



図—29　じん性率 (δ_u/δ_y) と温度との関係



図—30　じん性率 (δ_u/δ_y) と鉄筋比との関係



図—31 終局たわみ以降の挙動を考慮したねばりと鉄筋比との関係

性率は，温度が低下するにつれて増大するが −100°C をすぎると逆に急激に低下し，−150°C 程度で常温の値まで，特に気乾状態のものではそれ以下にまで低下する．この原因としては，この付近でコンクリート中の氷の状態が変化することによるものと思われる．また，鉄筋コンクリートばりのねばりについて，低温時と常温時とを比較してみると，じん性率が同じものであっても低温時のはりは最大荷重に達した後の強度低下が急激に生じている．したがって，はりのねばりを考える場合，じん性率で比較するのみでは不十分であり，最大荷重後の強度低下の程度も考慮しなければならないと思われる．

この点を表わす一方法として，耐力が降伏荷重の 3/4 以下になるまでのはりのたわみ量を求め，これをはりの降伏時のたわみ量で割った値で比較してみた．**図—31** にそれらの関係を示す．

以上の結果を用いて，低温時に鉄筋コンクリートばりに常温時と同程度のねばりをもたせるための方法の1例を以下に示す．

常温で，$\sigma_{ck}=370\,\mathrm{kg/cm^2}$ のコンクリートと $\sigma_{sy}=35.7\,\mathrm{kg/mm^2}$ の鉄筋を用いて鉄筋コンクリートばりを作る場合，許容応力度を $\sigma_{ck}/3$ および $\sigma_{sa}=2\,000\,\mathrm{kg/cm^2}$ として許容応力度設計法で設計を行うと，鉄筋比 $p=1.4\%$ 程度となる．**図—30** によると，気乾状態でのはりのじん性率は 4.35 となり，それに相当するねばりを −150°C で得るためには $p=1.25\%$ と，約1割鉄筋比を小さくしなければならない．ところが耐力の急激な低下を考慮して **図—31** を用いると，$p=0.97\%$ となり，約3割も鉄筋比を減少させる必要があることになる．以上の計算には，使用した図の精度の問題等からかなりの誤差を含んでいる可能性はあるが，傾向としては以上のようになり，鉄筋コンクリートばりのねばりは，−100°C 程度以下の低温になるとかなり低下する場合があるので十分注意しなければならない．

また，鉄筋コンクリート部材のじん性率は，一般性をもたせるため，部材が曲げモーメントを受けて変形したときの曲率の関係から ϕ_u/ϕ_y で表わすことが多い．ここに，ϕ_u は **図—27** に示すように終局モーメント (M_u) が作用したときのはりの曲率，ϕ_y は降伏モーメント (M_y) が作用したときのはりの曲率である．構造物を設計する際には，このはりのじん性率は一般には，少なくとも 4〜6 程度は必要と考えられている[8]が，実際にどのくらいに取る必要があるか決めることは大変むずかしく，不静定構造物のヒンジ作用からの要求，あるいは，地震作用時等のエネルギー吸収量からの要求，その他，その構造物の種類や荷重の性質等によって異なってくるものである．

他の資料と比較できるように今回の実験結果から曲率によるじん性率を以下のようにして求めた．この方法はある程度誤差が含まれていると思われるが，鉄筋コンクリートばりの荷重-たわみ曲線から曲率を求める一方法として計算したものである．

まず，鉄筋コンクリート断面に荷重が作用したときの曲げ剛性 EI は，① ひびわれ発生前 (EI_0)，② ひびわれ発生から鉄筋が降伏するまで (EI_c)，③ 鉄筋が降伏した後，の3段階に分けられると仮定する．そして，降伏モーメントと終局モーメントがほぼ近似していると仮定すると **図—27, 32** に示すように，作用モーメントによってはりの状態も3段階に分類できる．

したがって，

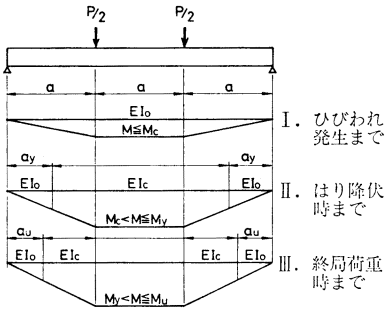
① ひびわれ発生まで

$$EI_0=\frac{23\,P_c a^3}{48\,\delta_c} \quad \cdots\cdots(9)$$

② ひびわれ発生からはり降伏まで

$$EI_c=\frac{a^3 EI_0(23\,P_y{}^3-8\,P_c{}^3)}{48\,EI_0 P_y{}^2\delta_y-8\,a^3 P_c{}^3} \quad \cdots\cdots(10)$$

したがって，はり降伏時の曲げスパンの曲率 ϕ_y，曲率



図—32 荷重の大きさによるはりの剛度の変化

半径 ρ_y は,

$$\phi_y=\frac{1}{\rho_y}=\frac{P_y a}{2EI_c} \quad \cdots\cdots(11)$$

③ 終局荷重まで

はり降伏後はたわみが大きいので,

$$\frac{\dfrac{d^2y}{dx^2}}{\left\{1+\left(\dfrac{dy}{dx}\right)^2\right\}^{3/2}}=-\frac{1}{\rho_u}$$

の関係を用いて解くと,

$$\delta_u=\rho_u+\frac{P_c{}^3a^3}{6EI_0P_u{}^2}+\frac{a^3}{6EI_cP_u{}^2}(P_u{}^3-P_c{}^3)+\frac{a^2}{\sqrt{4\rho_u{}^2-a^2}}-\frac{\sqrt{4\rho_u{}^2-a^2}}{2} \quad \cdots\cdots(12)$$

となり，この式より，終局時の曲げスパンの曲率半径 ρ_u，曲率 $\phi_u(=1/\rho_u)$ が求まる.

ここに,

a：はりのスパンの3等分の長さ

δ_c：ひびわれ発生時のはり中央のたわみ（荷重 P_c）

δ_y：降伏時のはり中央のたわみ（荷重 P_y）

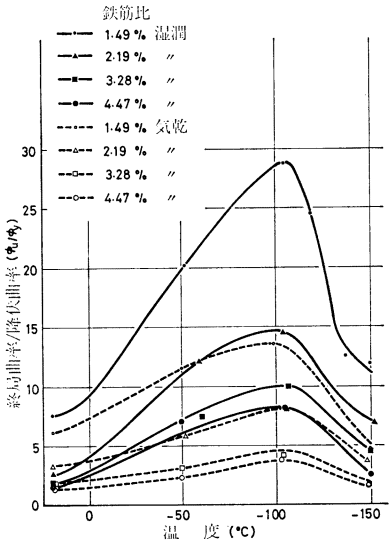
δ_u：終局時のはり中央のたわみ（荷重 P_u）

図—33，34 にこの方法による計算結果を示すが **図—29，30** とほぼ同様な傾向を示すことがわかる.

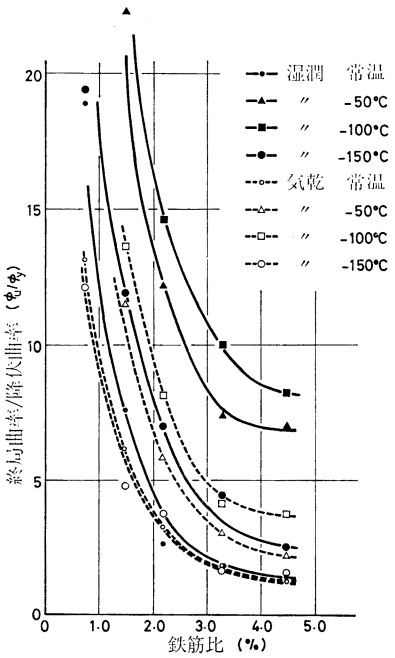
次にこれらの鉄筋コンクリートばりの最大荷重時のコンクリート上縁のひずみ ε_u を比較してみた.

求める方法としては，終局モーメントを計算したときの x（式 (5)，式 (7)）に，終局荷重時の曲率 ϕ_u（式 (12)）を乗じた.

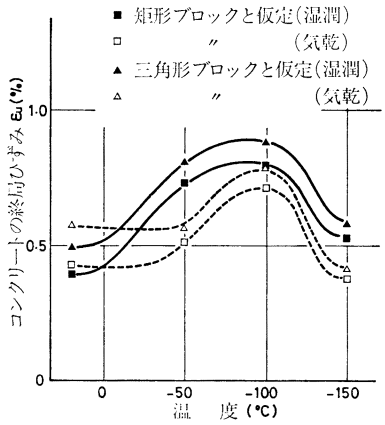
$$\varepsilon_u=\frac{x}{\rho_u}=x\cdot\phi_u \quad \cdots\cdots(13)$$



図—33 じん性率（ϕ_u/ϕ_y）と温度との関係



図—34 じん性率（ϕ_u/ϕ_y）と鉄筋比との関係



図—35 コンクリートの終局ひずみと温度との関係

これらの計算結果は **図—35** に示す．ただし，**表—7** において，終局モーメントを計算したときに，鉄筋のひずみが大きくなりすぎて計算値と合わないものがあったので，それらについては，式 (6)，式 (8) によって終局モーメントの測定値から鉄筋の応力度を逆算し，その値を用いて x を計算している．この方法は，かなり精度は悪いと思われ，めやすを得る程度のものであるが，この結果をみると，コンクリートの最大ひずみも温度低下とともに増大し，−100°C 程度以下になると逆に低下することがわかる.

このことから，−150°C においてコンクリートのじん性率が低下する原因の1つとして，コンクリートの最大

ひずみが低下することが考えられる．

なお，今回の実験は，単鉄筋ばりについて行ったものであるが，コンクリートばりのねばりは，複鉄筋の場合，あるいはスターラップが入った場合等，配筋によってかなり変化すると考えられる．したがって，今後は，配筋のちがいの影響をも調べる必要があると思われるが，温度の低下によるはりの性質の変化の傾向は，ほぼ同様であると考えられる．

5. まとめ

極低温下におけるコンクリートの性質，コンクリートと異形鉄筋との付着と重ね継手強度，それに鉄筋コンクリートばりの曲げ強度とねばりについて実験的研究を行った．それらの結果のおもなものをまとめると次のようになる．

（1） 極低温下におけるコンクリートの強度は，含水量によって異なるが，圧縮強度に関しては，次のような関係がある．

$$\begin{pmatrix}\text{低温下のコンク}\\\text{リート強度}\end{pmatrix}=\Delta\sigma_c+\begin{pmatrix}\text{常温下のコンク}\\\text{リート強度}\end{pmatrix}$$

$$\Delta\sigma_c=\left\{120-\frac{1}{270}(T+180)^2\right\}\cdot w$$

ただし，$\Delta\sigma_L \leqq 107\,w$

（2） 極低温下におけるコンクリートの引張強度は，圧縮強度から次式によって推定できる．

$$\sigma_T=0.38\,\sigma_c^{3/4}$$

（3） 極低温下における鉄筋コンクリートのひびわれ分散性は，常温とかなり異なり，最大ひびわれ間隔は，かぶり 3.9 cm の場合で5割程度大きくなり，かぶりが大きいものではさらに大きくなる．

（4） 極低温下における異形鉄筋の定着強度，および重ね継手強度は，コンクリートの引張強度に比例するとして，常温下における強度から推定できる．ただし，定着長，重ね合わせ長が長くなるにつれて，低温下の強度は相対的に低下するので，その補正をする必要がある．

（5） 極低温下における鉄筋コンクリートばりの曲げ強度は，低温下のコンクリート強度と低温下の鉄筋降伏点とを用いて計算で求められる．

（6） 鉄筋コンクリートばりの曲げに対するねばりは，−100°C 付近までは温度が低下するに従って増大するがそれ以下になると，急激に減少し，−150°C では常温の値程度になる．特にその状態はコンクリートの含水量の影響が大きく，気乾状態のものでは −150°C で常温のねばりをかなり下まわる．したがって，このような状態で使用される鉄筋コンクリート構造物を設計する際には，ねばりの低下を考慮して，場合によっては鉄筋比を下げる等の対策をしなければならないと思われる．

なお，本研究の一部は文部省科学研究補助金をいただいて行われたものである．また，本研究を行うにあたり，東北大学工学部土木工学科コンクリート研究室の職員および学生のみなさまの協力を受けたので心から感謝いたします．

参考文献

1) 後藤幸正・三浦 尚・阿部喜則：極低温下におけるコンクリートの性質について，土木学会第30回年次学術講演会講演概要集，土木学会，pp. 165～166, 1975.10.
2) 三浦 尚・後藤幸正・阿部喜則：極低温下で使用されるコンクリートの性質と含水比との関係について，土木学会第32回年次学術講演会講演概要集，土木学会，pp. 46～47, 1977.10.
3) Wischers, Gerd und Jürger, Dahms : Das Verhelten des Betons bei Sehr niedrigen Temperaturen, Beton Harstellung Vermendung Jg. 20, Heft 4, pp. 135～139, April 1970.
4) Goto, Yukimasa and Takashi Miura : Mechanical Properties of Concrete at Very Low Temperatures., Proceedings of the 21th Japan Congress on Materials Research, pp. 157～159, March 1978.
5) Monfore, G.E. and A.E. Lentz : Physical Properties of Concrete at Very Low Temperatures, Jour. of P.C.A. Research and Development Lab. Vol. 4, No. 2, pp. 33～39, May 1962.
6) 斎藤公夫・初崎俊夫・三浦 尚：極低温下における異形鉄筋の付着特性に関する研究，土木学会第30回年次学術講演会講演概要集，土木学会，pp. 343～344, 1975.10.
7) 後藤幸正・三浦 尚：極低温下における鉄筋の継手および定着に関する研究，鉄筋の継手および定着の設計施工に関するシンポジウム発表報文集，日本コンクリート工学協会，pp. 101～104, 1976.3.
8) Ferguson, P.M. : Reinforced Concrete Fundamentals, John Wiley & Sons, p. 325, 1973.
9) 三浦 尚・阿部善則・吉沢秀雄：極低温下における鉄筋コンクリート部材の性質について，東北支部技術研究発表会講演概要，pp. 201～202, 1977. 3.

（1978.6.23・受付）