

V-6

低温下におけるコンクリート桁の衝撃破壊挙動

北海道大学工学部 学生員 杉山 隆文
 “ 正 員 佐伯 昇
 “ “ 高田 宣之
 “ “ 藤田 嘉夫

1. まえがき

一般に複合材料であるコンクリートの性質は -100°C までの温度低下で大きく変化する。低温下でのコンクリートの挙動は温度、水セメント比、湿潤状態に大きく関係していることは知られている⁽¹⁾。飽和状態のコンクリートの圧縮強度は 0°C から -70°C まで直線的に増加し -70°C の圧縮強度は $+20^{\circ}\text{C}$ の2倍以上になると報告されている⁽¹⁾。しかしこれはコンクリートの含水量に大きく影響され、乾燥状態のコンクリートはほとんど増加しない。一方温度低下に従って弾性係数が大きくなり逆に終局ひずみエネルギーが小さくなることから動的荷重に対する飽和状態のコンクリートの耐力も増加すると考えられるが、実際衝撃力に対してコンクリートは低温下でより脆弱性(Brittleness)を示した⁽¹⁾と報告されている。

本研究の目的は衝撃力に対するコンクリートの挙動が低温と常温ではどのように異なるかを調べることである。今回は水セメント比、含水量を一定とした飽和状態のコンクリート桁を試験体として衝撃荷重による試験体の破壊形状、たわみ分布からその違いを検討した。また同一条件で静的試験を行い静的荷重による試験体の破壊形状を調べた基本的なデータを得た。破壊形状を調べる試験の結果、試験体は常温で衝撃荷重、静的荷重に対して斜めひびわれと曲げによる破壊を示したのに対して低温下では曲げによる破壊だけを示した。また考察でこれまで行なってきた衝撃試験の結果⁽²⁾と合わせて破壊に至るまでのコンクリートのたわみ挙動を常温と低温の場合でそれぞれ検討してみた。

衝撃力に対するコンクリートの実用的な理論解析はほとんど確立されていないが著者らは有限差分法によるモデル解析⁽²⁾を試みている。今回はThree-Mass モデルを使ってコンクリート全体の最大変位(Global Response)に関してこれまで行なってきたTwo-Mass モデル⁽³⁾と比較した。そして衝撃荷重を受けるコンクリート構造物に対するモデル解析の適応性を検討した。

2. 実験概要

使用した試験体はD10,D13の鉄筋を一本ずつ配筋した鉄筋比がそれぞれ0.95%,1.69%の単鉄筋はりである。図-1に試験体の形状を示した。コンクリートの配合は単位水量 $174\text{kg}/\text{cm}^3$ 、水セメント比45%、空気量5%で早強ポルトランドセメント、最大骨材寸法25mmの川砂利、川砂を用いたAEコンクリートである。

衝撃試験は先端が半径2cmの球状をした鋼柱を衝撃体とする自由落下方式で行なった。試験体は両端をこで支持し反動で上方向に移動するのを防ぐために上部にもこを置き鉄板と

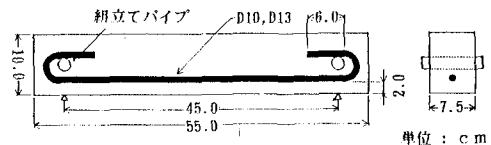


図-1 試験体の形状

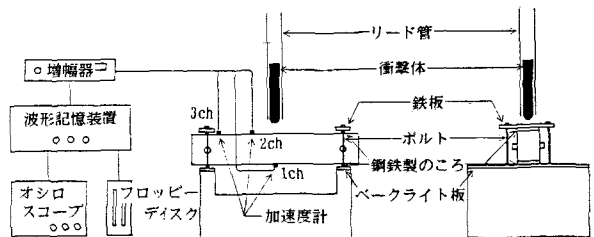


図-2 衝撃試験装置

Behaviour of Concrete Beam Subjected to Impact Load at Low Temperatures

by T.Sugiyama, N.Saeki, N.Takada, Y.Fujita

ボルトで閉めた。しかし軸方向に自由に移動できる可動支承とした。図-2に試験装置の概略を示した。

試験体は2週間水中養生後冷凍室に移し+20℃から1時間に10℃温度を下げ各実験温度(-2℃,-20℃,-80℃)で6時間その温度を保ち、その後取り出し室温(+23℃)でただちに実験を行なった。ただし常温の実験は養生後室温で行なった。

試験体の破壊形状を調べるために衝撃体の落下高さ(h),質量(m)は $h_1=6.15m, m_1=4.0kg$ とした。また、たわみ分布を調べるために $h_2=0.5m, m_2=2.0kg$ でそれぞれ実験を行なった。

たわみを求めるために試験体の上縁,下縁に合わせて3個の加速度計(1000g,7500Hz)を取り付けた。(図-2)そして衝撃荷重による試験体の加速度の経時変化をローパスフィルターを内蔵した増幅器を介して波形記憶装置に取り込みオシロスコープ上で操作しディスプレイに出力した。サンプリングタイムは20μsecである。得られた加速度は線形加速度法を用いてたわみに変換した。

3. 実験結果

表-1は今回用いたコンクリートの各温度におけるシリンダーによる圧縮,引張試験の結果を示している。

表-1 圧縮,引張強度

	+23℃	-2℃	-20℃	-80℃
σ_c (kgf/cm ²)	419.9	461.3	603.7	858.2
σ_t (kgf/cm ²)	31.8	32.7	54.9	84.4

3-1 破壊形状

図-3は試験体温度が+23℃と-80℃の時の衝撃,静的試験による破壊形状を示している写真はのうち衝撃試験の破壊形状のものである。

D10の鉄筋を使用した試験体では温度低下にかかわらず最終的に衝撃,静的荷重に対して曲げによる破壊を示した。一方,D13の鉄筋を使用した試験体では+23℃で静的荷重でせん断破壊を起こし衝撃荷重では曲げひび割れと斜めひび割れによる破壊を生じていた。それに対して-80℃では衝撃,静的荷重に対して曲げによる破壊であった。

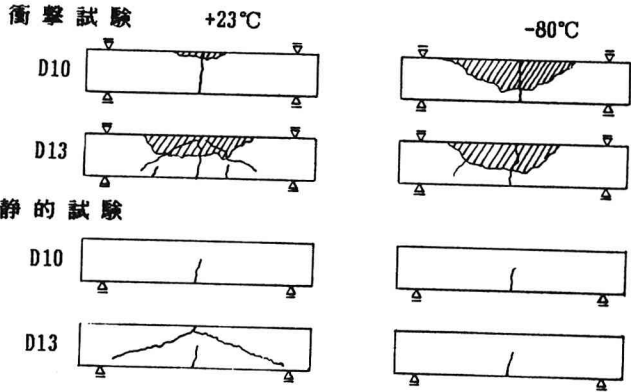


図-3 破壊形状

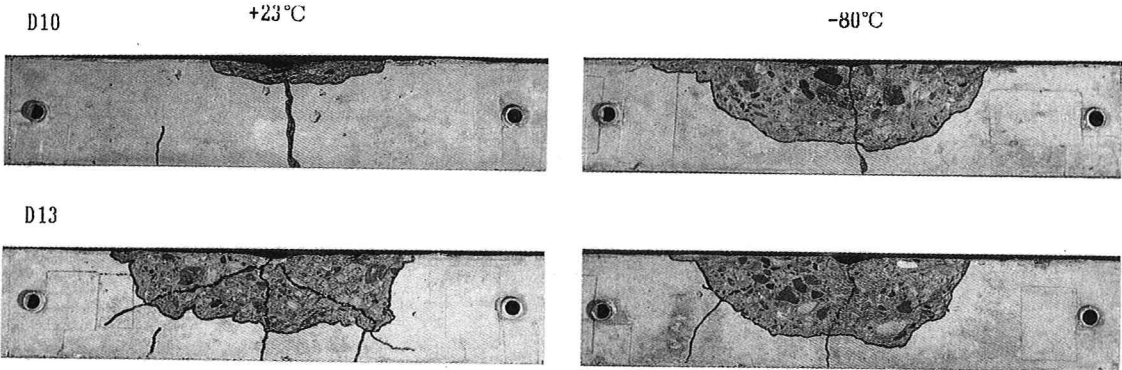


写真-1 衝撃試験による破壊形状

3-2 たわみ分布

表-2 はそれぞれD10,D13の試験体を用いて各測定点でのたわみを求めその中で測定点1chが最大たわみに達した同じ時刻における2ch,3chのたわみを表わしている。ただし+23℃,1chのたわみを1としてそれに対する比で表わした値である。図-4 は特に表中より+23℃,-80℃の時の各chのたわみ分布を示した。

低温になるに従って1chのたわみが小さくなり逆に2ch,3chのたわみが大きくなる傾向がある。また低温で1chのたわみよりも2ch,3chのたわみが大きくなるのは測定点が1chは試験体下縁,2ch,3chが上縁であり上縁と下縁では衝撃荷重に対してその境界線でのたわみ量が異なるためだと予想される。

表-2 各Chのたわみ比 (上 D10,下 D13)

ch	+23℃	-2℃	-20℃	-80℃
1	1.00	0.93	1.10	0.72
2	0.72	1.10	1.10	1.07
3	0.51	0.98	0.90	0.97

ch	+23℃	-2℃	-20℃	-80℃
1	1.00	0.99	0.98	0.72
2	0.77	1.11	0.78	1.10
3	0.65	0.98	0.93	1.00

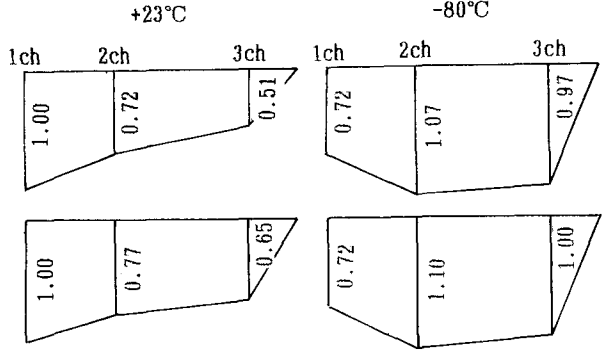


図-4 たわみ分布 (上 D10,下 D13)

4. 実験考察

これまで行なった無筋コンクリートの押し抜き試験より低温になるに従ってコンクリートの押し抜き耐力が増加し+10℃と-70℃では2倍近く増加していた。それに対して今回行なった静的試験で試験体が曲げひび割れを起こす時の耐力は+23℃と-80℃では約1.2倍の増加しか見られなかった。これは低温下でコンクリートのせん断耐力は曲げ耐力の増加よりも大きく、従って最終的な破壊形状は実験結果で述べたように低温になるほどせん断破壊を伴はない、曲げだけによる破壊を起こすと考えられる。

次に衝撃荷重に対してコンクリートは時間的な要素も含めてはじめに荷重を受けた上縁にそってコンクリートの引張力で抵抗する⁽³⁾。従って荷重を受けた直後のコンクリートの挙動は上縁にそった境界上が押しつぶされるようにたわみ下縁にそった境界上は変化しない。そして徐々に全体的なたわみで荷重に抵抗して行こうとする。特に低温下で上縁(2ch,3ch)のたわみが下縁(1ch)のたわみよりも大きくなっていたのはこのように上縁と下縁でそれぞれたわみ量が異なるためだと思われる。

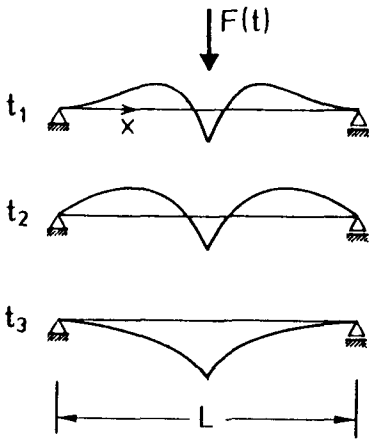


図-5 衝撃試験による曲げモーメント図⁽⁴⁾

また一般に行なわれる衝撃試験(常温)から考えられる曲げモーメント図はJ.Eiblの論文⁽⁴⁾によると図-5のように示している。図は衝撃力を受けた後から時間的に連続して3つの段階に分けた曲げモーメント図である。そして衝撃力に関してはりの中央のせん断力は静的と変わらないが曲げモーメントは約1/3に減少すると述べている。このことより衝撃力を受けたコンクリートは曲げによって応答する前にはりの中央でせん断破壊を起こすと考えられる。この挙動は衝撃力を受けたスラブが曲げひび割れが生じずに押し抜き破壊(Punching failure)を起こした実験例からも確かめられている。

最後に前回行なったRC版の衝撃試験で常温では衝撃エネルギーを局部的に吸収する割合が大きいのに対して低温では全体的にそれを吸収する傾向があることを述べた⁽²⁾。

以上のことがらを参考に衝撃荷重を受けたコンクリートが破壊に至るまでのたわみ分布は常温と低温ではそれぞれ図-6に示すようになることが予想される。

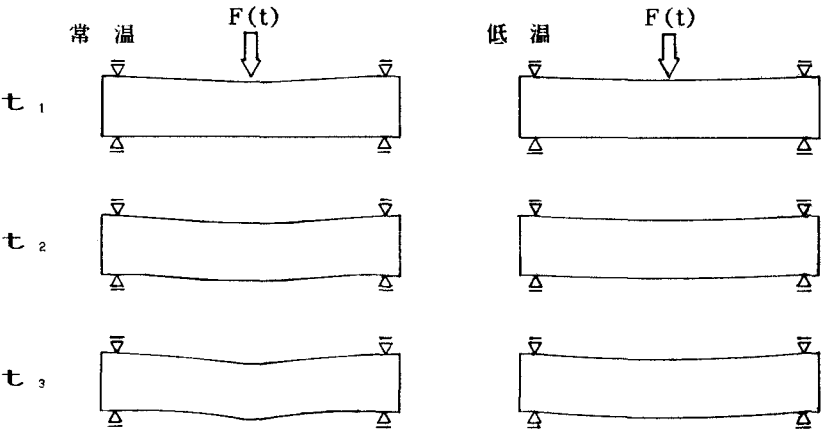


図-6 衝撃荷重によるたわみ挙動の予想

5. モデルによる数値解析

これまで衝撃荷重を受けるコンクリート構造物は局部的と全体的応答で衝撃に抵抗すると仮定してそれぞれを2つのバネと質点で置き換えたTwo-Massモデル⁽⁴⁾を採用し、そのモデルを微分方程式におき、差分法を用いて解き各質点の変位を求めた⁽²⁾。

今回は図-7に示すように3つのバネと質点によるThree-Massモデルでコンクリート構造物を置き換えたTwo-Massモデルでは質点2とバネ1を考慮しない数値解析であった。Three-Massモデルを用いて付け加えた第3のバネ (R_1) が質点3の最大変位 X_{Three} にどのように影響するのかを調べ、Two-Massモデルから計算した X_{Two} と比べてみた。また衝撃試験から得られた試験体1Chの最大たわみを実験値としてそれぞれのモデル解析の結果と比較した。

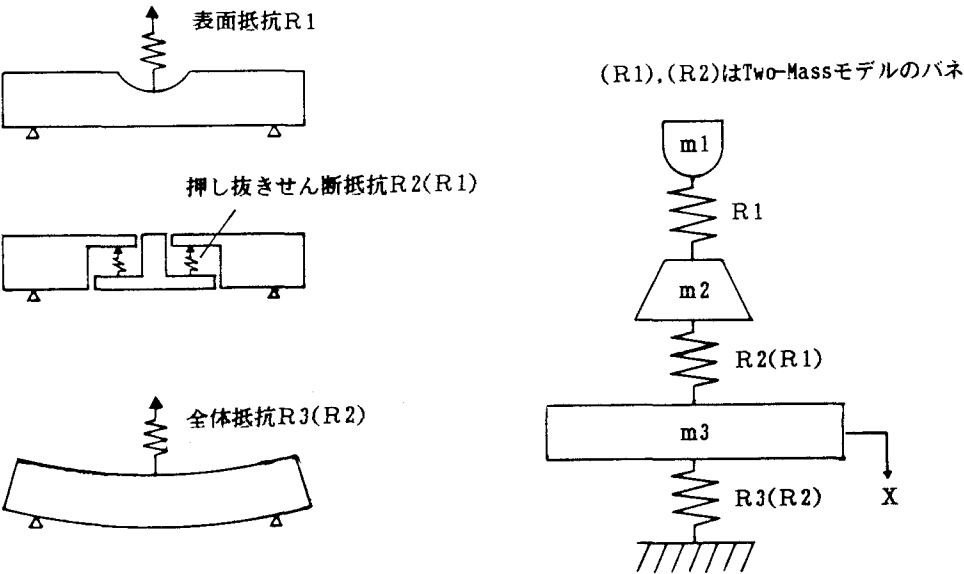


図-7 Three-Mass モデルを使ったコンクリート構造物のモデル化

5-1 質点とバネ

質点1は衝撃体でその質量は2Kgである。質点2は押し抜きコーンで質量は0.2Kgと仮定した。そして質点3はコンクリート試験体でその質量は押し抜きコーンの質量を差し引いた9.8Kgとした。

バネ1は半無限弾性地盤上の鉛直集中荷重による表面変位による抵抗を仮定した。ブーシネスク解⁽⁶⁾より表面変位は次式のように表わされる。

$$\omega = \frac{P(1-\nu^2)}{2aE}$$

ω : 表面変位 a : 載荷体の半径
 P : 集中荷重 E : 弾性係数
 ν : ポアソン比

従ってバネ定数は次式のようにした。

$$R_1 = \frac{P}{\omega} = \frac{2aE}{(1-\nu^2)}$$

バネ2は押し抜きコーンが起こす局部変形による抵抗を仮定した。バネ定数 R_2 はこれまで行なった押し抜き試験の結果⁽²⁾より求めた。

バネ3は全体的応答による抵抗を仮定した。バネ定数 R_3 はけたのたわみ曲線(弾性曲線)を求める微分方程式から求めた。

$$R_3 = \frac{P}{\delta} = \frac{48EI}{l^3}$$

δ : 中央点のたわみ
 P : 集中荷重
 l : スパン

またバネ1, 3を静的試験から得られたデータをもとにそれぞれのバネ定数を仮定してみた。(常温)バネ定数 R_1 は塑性変形を起こした表面変位から求めた。実際に静的試験後、荷重点のくぼみ深さ(d)を測りそれを試験体の破壊荷重(P_u)で割った値 $R_1 = P_u/d$ を計算した。バネ定数 R_3 はコンクリートのひび割れ荷重(P_{cr})時における荷重点下縁のたわみ(δ_1)を求め $R_3 = P_{cr}/\delta_1$ として計算した。

表-3は理論から得られる各バネ定数の値である。表-4は常温で静的試験から求めたバネ定数である。

5-2 モデルの微分方程式

モデルの微分方程式は次式で与えられる。

$$\begin{cases} m_1 \ddot{X}_1 + R_1(X_1 - X_2) = 0 \\ m_2 \ddot{X}_2 + R_2(X_2 - X_3) - R_1(X_1 - X_2) = 0 \\ m_3 \ddot{X}_3 + R_3 X_3 - R_2(X_2 - X_3) = 0 \end{cases}$$

差分法を使って上式は次式のように展開される。

$$\begin{cases} X_1^{t+\Delta t} = (2 - \frac{R_1}{m_1} \Delta t^2) X_1^t + \frac{R_1}{m_1} \Delta t^2 X_2^t - X_1^{t-\Delta t} \\ X_2^{t+\Delta t} = (2 - \frac{R_1}{m_2} \Delta t^2 - \frac{R_2}{m_2} \Delta t^2) X_2^t + \frac{R_1}{m_2} \Delta t^2 X_1^t + \frac{R_2}{m_2} \Delta t^2 X_3^t - X_2^{t-\Delta t} \\ X_3^{t+\Delta t} = (2 - \frac{R_2}{m_3} \Delta t^2 - \frac{R_3}{m_3} \Delta t^2) X_3^t + \frac{R_2}{m_3} \Delta t^2 X_2^t - X_3^{t-\Delta t} \end{cases}$$

初期条件は

$$\begin{aligned} X_1^0 &= 0 & X_{2,3}^0 &= 0 & \text{なお } \Delta t &= 20 \mu\text{sec} \\ \dot{X}_1^0 &= \sqrt{2gh} & \dot{X}_{2,3}^0 &= 0 & h &= 0.5\text{m} \\ \ddot{X}_1^0 &= g & \ddot{X}_{2,3}^0 &= 0 \end{aligned}$$

5-3 計算結果と考察

図-8は理論から求めたバネ定数を使い2つのモデルを計算した X_{Three} , X_{Two} のグラフと衝撃試験から得られた1Chの最大たわみのグラフである。

表-5は理論と静的試験から求めたバネ定数を組み合わせて計算した結果を示している。なお静的試験から求めたバネ定数を理論値と比較すると R_1 はおよそ1/100倍、 R_3 は2~7倍である。

質点3の最大変位に関してバネ R_1 に理論値を用いて計算するとTwo-Massモデルとほとんど差がないが($X_{Three}/X_{Two}=1.02$)静的試験より求めた値を用いると変位は大きくなり、またTwo-Massモデルとの差も大きくなる($X_{Three}/X_{Two}=1.63$)。次に実験値と比べた場合、両モデルのバネ定数 R_3 に理論値よりも静的試験

表-3 バネ定数(理論値)

R	+23℃	-2℃	-20℃	-80℃
R_1	116.0	123.6	139.2	166.1
$R_2(R_1)$	8.8	13.1	14.5	15.9
$R_3(R_2)$	6.7	7.1	8.1	9.6

($\times 10^7 \text{ N/m}$)

表-4 バネ定数(静的試験,+23℃)

R_1	D10	2.2
	D13	1.3
R_2	D10	15.1
	D13	49.0

($\times 10^7 \text{ N/m}$)

から求めた値を用いて計算した方が実験値に比較的近い値になる。

Two-Massモデルから求めた最大変位が実験値とあまりバラつきがなかった。一方Three-Massモデルを使ってモデル解析をする場合バネ R_1 の決定がTwo-Massモデルと比較する場合重要になってくるが荷重点がくぼむなどの塑性変形を起こしていなければ、弾性理論から求めたバネ定数を使えば質点3の最大変位はあまり変わらないように考えられる。今回は衝撃エネルギーが一定($E=9.8\text{N}$)で、質点3の検討を行なった。しかしこれからはThree-MassモデルとTwo-Massモデルのどちらが有効であるのかは明らかではない。

6. 結論

今回行なった実験をまとめると次のようになる。

1. 常温と低温ではコンクリートの破壊形状は異なり低温になるほど曲げだけによる破壊に移る傾向がある。
2. 低温下で衝撃荷重を受けた場合コンクリートは全体的に変形してその衝撃エネルギーを吸収しようとする。
3. Three-Massモデルによる理論解析は理論から求めたバネ定数を使って計算した場合コンクリート桁中央の変位に関して実験値と比較的よく一致し、Two-Massモデルともほぼ一致していた。

謝辞：本実験にあたって有馬伸広の多大な助力を得たここにあわせて謝意を表する。

参考文献：(1)A.L.Murshall;Behaviour of Concrete at Arctic Temperatures.POAC 1985,9 (2)杉山ほか；低温下におけるRC版の衝撃破壊挙動 日本コンクリート工学年次論文報告集 1989.VOL 11 (3)Comite Euro-International du Beton;Concrete Structures Under Impact and Impulsive Loading.Synthesis Report 1988,8 (4)Ing J.Eibl;Design of Concrete Structures to Resist Accidental Impact.The structural engineer/volume 65A/No.1/1987,1 (5)Perry SH.;Assessment of Impact Damage Caused by Dropped Objects on Concrete Offshore Structures. 1985,4(6)S.P.Timoshenko;Theory of Elasticity. P380-432

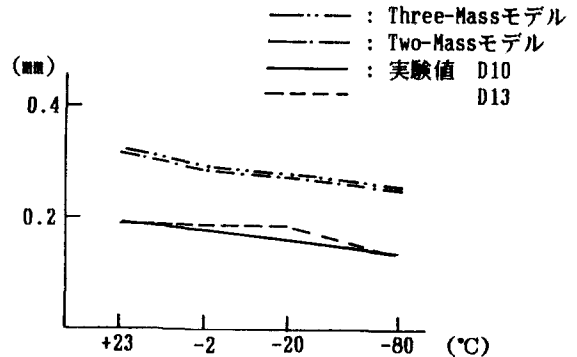


図-8 各温度におけるモデルから求めた最大変位Xと実験値との比較

表-5 質点3 (X) の最大変位の比較(+23℃)

	X
実験値	
D10	1.97
D13	1.93
Three-Mass	
A	3.26
B_1 (D10)	2.72
B_2 (D13)	1.84
C_1 (D10)	5.18
C_2 (D13)	5.32
D_1 (D10)	2.99
D_2 (D13)	0.46
Two-Mass	
A	3.21
B_1 (D10)	2.65
B_2 (D13)	1.99

($\times 10^{-1} \text{ mm}$)

A：理論値

B： R_1 ；理論値， R_3 (R_2)；静的試験

C： R_1 ；静的試験， R_3 ；理論値

D：静的試験