

2 径間連続 R C ばりのシェイクダウン実験

SHAKEDOWN TESTS ON TWO-SPAN CONTINUOUS REINFORCED CONCRETE BEAMS

梶川康男*・福嶋 徹**

By Yasuo KAJIKAWA and Tooru FUKUSHIMA

Shakedown tests have been done using two-span continuous reinforced concrete beams under repeated loads. The tests have been made and compared for static collapse tests and shakedown tests with three different rectangular sections.

From these tests it is clear that the shakedown occurs on reinforced concrete beams, and the testing shakedown loads are less than static collapse loads and are in good approximation with the analytical results based on the simple plastic theory for bending moments.

1. まえがき

構造材料の塑性領域に入るような繰り返し荷重が構造物に作用するとき、一般に残留変形が生ずるが、ある繰り返し数を越えると構造物の残留変形が一定値に収束し、以後は弾性的な挙動を示す、いわゆる変形硬化 (Shakedown、またはたわみ安定性) 現象に関する研究は主に鋼構造について活発に行われてきた^{1)~8)}。

一方、鉄筋コンクリート構造についても、塑性ヒンジの生成によるモーメント再配分が期待され、鋼構造と同様、変形硬化現象は生ずるものと考えられる。しかし、RC構造の変形硬化に関する研究は非常に少なく、しかも理論的な研究⁹⁾にとどまっている。これは、RC構造の実験は供試体や装置が大掛かりなことや、不静定構造の実験が難しいことなどが原因しているものと考えられる。

そこで、著者らは繰り返し荷重作用下のRCばりの変形硬化現象を確認し、曲げ理論による研究成果の適用限界を知るために、2径間連続RCばりの変形硬化 (シェイクダウン) 実験を行った。

2. RCばりの載荷実験

鉄筋コンクリートばりの変形硬化を確認するために、長尺のRCばりを打設し、2径間連続ばりとしての載荷実験を行った。

* 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 (〒920 金沢市小立野2-40-20)

** 工修 前田建設工業(株) 土木部 (〒102 東京都千代田区富士見2-10-26)

(1) 実験供試体

連続ばりの実験のために製作したRCばりは、鉄筋径10mm、13mm、16mm（SD30）の3種類であり、各5体ずつ製作した。5体のうち2体は、1点および2点の単調載荷試験に用い、残りの3体を繰り返し載荷試験に用いた。また、同じ断面の単純ばり用の供試体も製作し、単調載荷試験を行った。以下、供試体の形状と寸法を示す。

供試体D10とD13はそれぞれ異形鉄筋、径10mm、13mmをかぶり3cmで4本ずつ使用した複鉄筋矩形断面であり、図-1に示すように同一寸法であり、断面15×15cmで、支間長131cmとした。また、D16は異形鉄筋、径16mmをかぶり4cmで4本ずつ使用した複鉄筋矩形断面であり、図-2に示すように断面20×15cmで、支間長176cmとした。なお、D16はD10やD13とほぼ同じせん断スパン比となるようにしたために寸法や支間長が異なっている。また、各供試体ともスターラップ（D10とD13には、径6mm（SR24）、D16には、径10mm（SD30）を10cm間隔）を配置した。供試体に用いたコンクリートと鉄筋の強度を表-1に示した。

(2) 実験・計測方法

図-3と写真-1、2に示したように、荷重は載荷装置のロードセル（S）の値を用い、また、連続ばりであるため支点A、Cにはロードセル（東京測器製、CLU-20）を支点として設置し、A、C点の反力を求め、そして、E点の反力はS点の荷重とA、C点の反力から計算することとした。なお、2径間連続ばりに集中荷重が載荷される場合、支間中央点への載荷が曲げモーメントを最大とはしないが²⁾、文献¹⁾、⁸⁾に基づいて、荷重の載荷は各支間の中央点（B、D点）とした。また、1点載荷時には支点Eが負の反力のために、はりの浮き上がりが予想されるため、床にアンカーを設け、上下方向に剛な拘束ができる支承を用いた。

はりの変位は、載荷点B、Dで測定した。B点ではA、C点の支点沈下の影響を避けるために、支点AとCの間に山形鋼を渡し、その山形鋼に変位計（東京測器製、CDP-50）を設置し、D点ではE点での支承構造の関係から、床面から設置した。鉄筋のひずみは、B点およびC点の引張鉄筋のひずみゲージ（コンクリート打設前に貼布）にて測定した。コンクリートの圧縮ひずみは、B点とD点の上面とC点の下面に、それぞれひずみゲージを2枚ずつ貼布して測定した。荷重載荷装置には、油圧式載荷装置（島津製作所製、EHF40）を用いて荷重制御にて使用した。

計測装置は、図-4に示すようにパーソナルコンピュータ（TEAC製、PS85）を用いて、他の機器を制御した。変位とひずみは静ひずみ測定器（東京測器製、TDS-100）で測定し、RS232Cインターフェイスを介してPS85に接続した。また、荷重と反力はロードセルを動ひずみ測定器（東京測器製、DA-12A）に接続し

表-1 供試体に用いた材料の特性

供試体の種類	D10	D13	D16
コンクリート圧縮強度(kgf/cm ²)	399	412	426
鉄筋降伏強度(kgf/cm ²)	4080	4100	3920
鉄筋比(%)	0.83	1.46	1.74

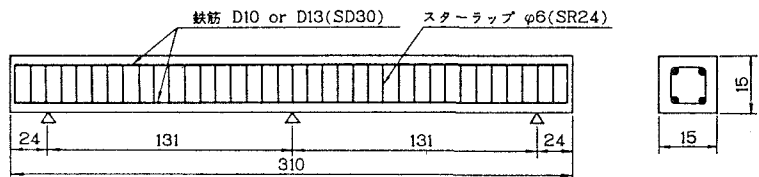


図-1 連続ばり供試体（D10、D13）の寸法

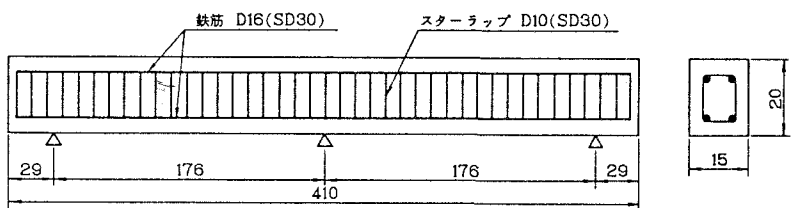


図-2 連続ばり供試体（D16）の寸法

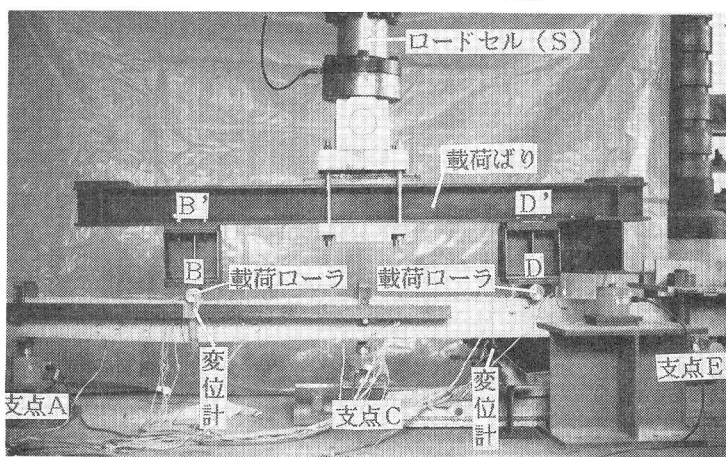
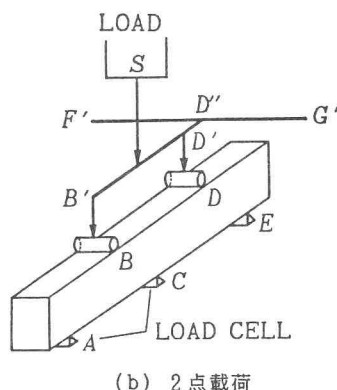
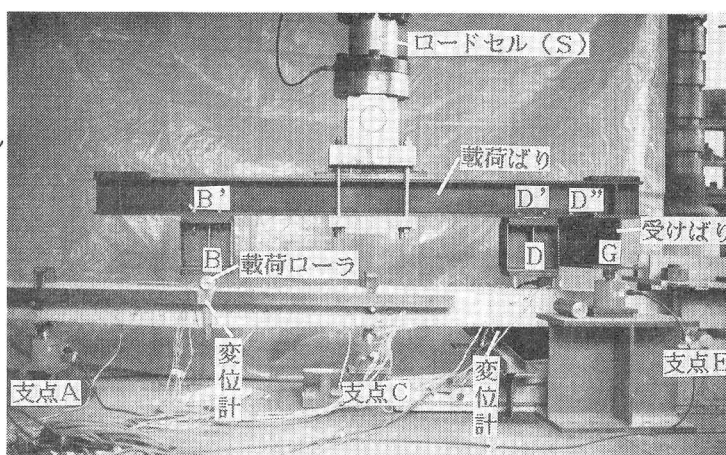
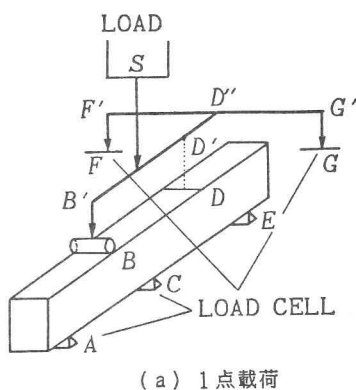


図-3 連続ばり載荷の概略

写真-2 連続ばり2点載荷の状況

AD変換によりPS85にデータを採取した。さらに、演算の結果をD/A変換によってPS85から油圧载荷装置へ電圧を出力することにより荷重の制御を行った。

a) 単調 1 点載荷試験

図-3(a)と写真-1のように載荷ばりB'D"のD"点を鋼ばりで受け、F点、G点にそれぞれ置いたロードセルに反力を持たせることにより、B点への荷重をSの値からF、G点の値を差し引いて求めることができる。このようにして、B点の荷重をモニターしながら支間中央のB点に1点載荷し、荷重をゼロから単調増加させ、変位とひずみを測定した。載荷点(B)とロードセル側(F、G)との間の荷重の分配が常に一定とは限らないため油圧載荷装置の荷重値を初めは目標値の3/4程度とした後、S、F、Gの荷重値をフィードバックして載荷点B点とロードセルF、Gの分配率を計算し徐々に載荷することにより目標の荷重値となるようにした。

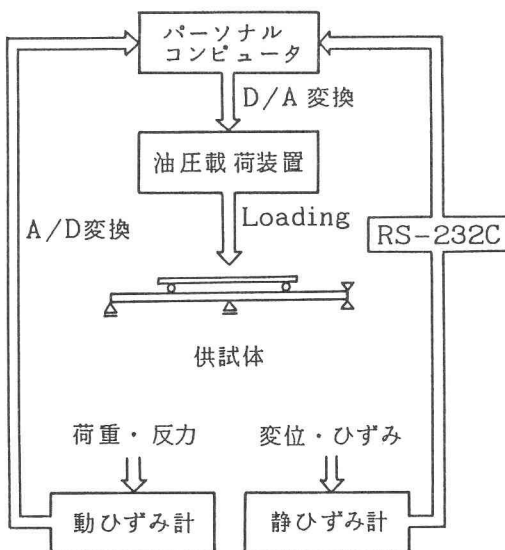


図-4 計測装置の概略

b) 単調2点荷重試験

図-3 (b) と写真-2 のように荷重ばりのD点に荷重ローラを入れることにより、受けばりのF点とG点はロードセルに触れないようにすることができる。BCとCD間とは同じ距離であるのでB、D点に荷重が等分されるものとした。このようにして、支間中央のB、Dの2点に荷重し、荷重をゼロから単調増加させ、変位とひずみを測定した。

c) 繰り返し荷重試験 (変形硬化試験)

まず、1点荷重で供試体B点の引張鉄筋ひずみが弾性限度近くになるまで荷重 (D10で2.0tf、D13で3.1tf、D16で4.9tf) を単調増加させた。一旦除荷し図-5に示すように再び1点荷重して点Bの変位が安定した後、除荷した。そして、D点に荷重用ローラを入れて2点荷重とし、1点荷重でB点にかけた荷重値と同じ大きさの荷重をそれぞれB、D点に荷重し、B点の変位が安定した後、除荷した。このように、(1) B点への1点荷重、(2) 除荷 (3) B、D点への2点荷重、(4) 除荷の順序で1サイクルとして実験を行った。

図-6に実験手順のフローチャートを示した。測定は所定の荷重値に達した後、ひびわれ等が進行するのを待ち、B点における変位が十分安定してから行った。同じ荷重値で荷重サイクルを繰り返し、荷重サイクル数にかかわらずB点の変位が前サイクルの値に収束すれば荷重をわずかに増加させ収束していなければ同じ荷重のまま1サイクルの荷重を繰り返した。そして、繰り返しとともにB点の変位が大きくなり発散するようになって漸増崩壊が確認された時点で実験を終了した。そのときの荷重の一段階前の荷重を変形硬化 (シェイクダウン) 荷重とした。

d) 単純ばりの単調荷重試験

製作したRCばりの基本的な特性を把握するために、単純ばりの荷重試験を行った。連続ばりの荷重試験と同様の計測装置を用いて荷重制御することから、図-7のように2本の荷重ローラ (支間長の1/10の間隔) 上にさらに直角方向にローラを置き、その上に鋼ばりF' G' を渡した。すなわち、RCばり (AE) と鋼ばり (F' G') の十字形格子ばりである。このようにしてRCばりの鉄筋が降伏したあともRCばりのたわみが急激に増加するのを防ぎ、降伏後の変形挙動を正確に把握した。RCばりへの荷重荷重はロードセル (S) の値から、支点反力 (F、G) を差引いて求められ、図-4に示した計測装置を用いて、除荷することなく単調に荷重を増加させた。変位やひずみの測定については連続ばりと同様である。

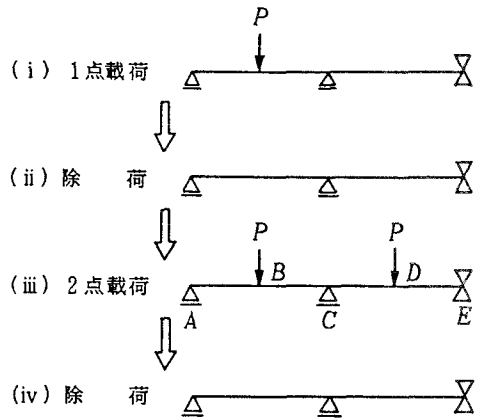


図-5 1サイクルの荷重

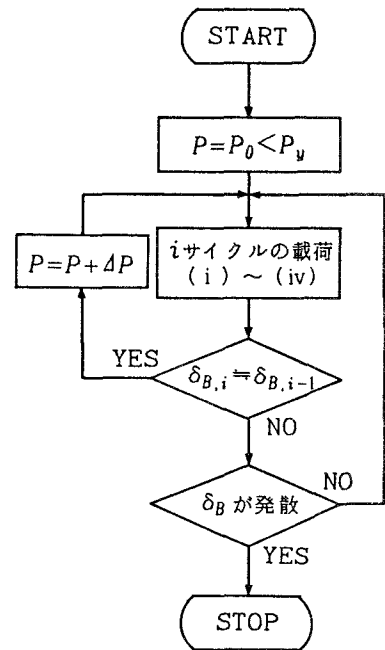


図-6 繰り返し荷重の手順

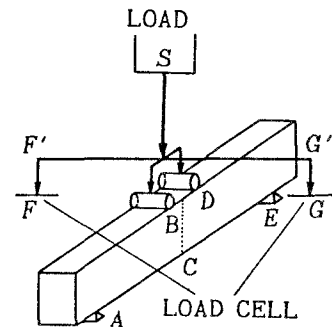


図-7 単純ばりへの荷重の概略

3. 実験結果

以上のRCばりの載荷実験の結果を示す。

(1) 単純ばりの載荷試験結果

図-8に単純ばりの単調載荷試験時の荷重と支間中央点での変位との関係を示し、表-2には表-1に示した材料定数を用いて単純塑性理論に基づいた計算塑性モーメントと降伏荷重ならびに実験時の崩壊荷重と崩壊モーメントを示した。なお、載荷装置の荷重(S)の増分をほとんど鋼ばりが受けてしまう状態に達した時を崩壊とみなした。また、図-9には、崩壊時のひびわれ状態を示した。

これらの結果より、本実験で用いる供試体は曲げに対して十分な回転能を有していることが確認され、しかも、計算値に近い耐力を持つことがわかった。

(2) 連続ばりの載荷試験結果

図-10に連続ばりの1点ならびに2点の単調載荷時および繰り返し載荷時の荷重と点Bでの変位の関係を示した。なお、繰り返し載荷では同一荷重の繰り返しのうち、第1回目の1点載荷時の変位と収束時の変位を図中に示したが、この間には少ない時で3回、多い時で10回程度の繰り返しを行っているが、図が煩雑になるために省略した。図中のX印は、RCばりが崩壊し、荷重制御のため変位が急激に大きくなったことを示している。表-3には、それぞれの実験での崩壊荷重を示した。表中の計算値(A)は塑性モーメントとして、単純塑性理論に基づく表-2の値を用いた

表-2 単純ばり載荷試験結果

供試体の種類	D10	D13	D16
計算塑性モーメント M_r (tf・m)	0.695	1.108	2.229
計算降伏荷重 P_y (tf)	2.36	3.76	5.63
実験崩壊荷重 P_u (tf)	2.59	3.17	5.61
実験崩壊モーメント M_u (tf・m)	0.763	0.934	2.222

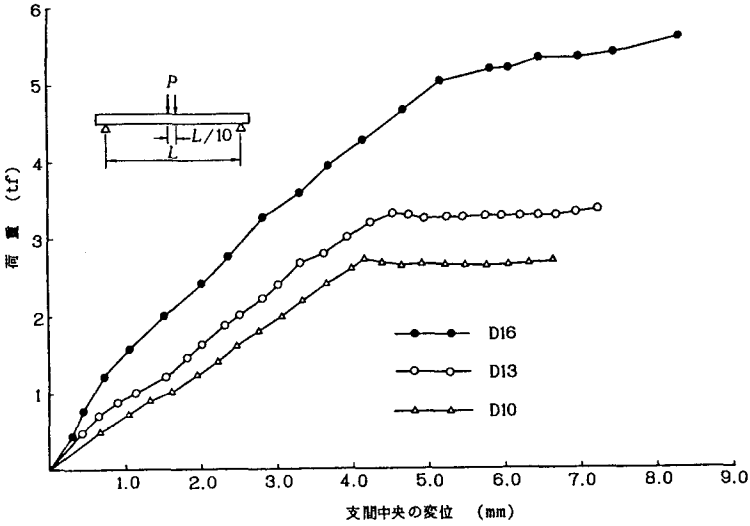


図-8 単純ばり単調載荷時の荷重と変位

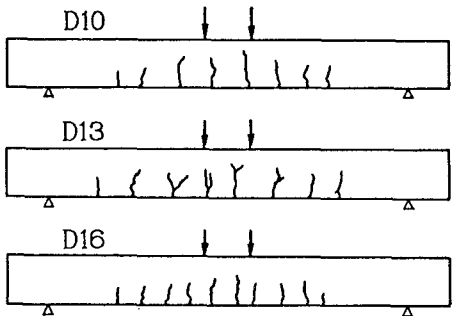


図-9 単純ばり供試体のひびわれ状態

表-3 連続ばり載荷試験結果

供試体の種類		D10	D13	D16
単 調 載 荷 崩 壊 荷 重	1点載荷(tf) 実験値	3.12	4.67	7.88
	2点載荷(tf) 実験値	3.63	4.99	7.50
	計算式 (tf) 計算値(A)	3.18	5.07	7.60
	$P_u = 6M_r/L$ 計算値(B)	3.49	4.28	7.58
繰 り 返 し 載 荷	漸増崩壊荷重(tf) 実験値	3.10	4.05	6.63
	変形硬化荷重(tf) 実験値	3.01	3.96	6.57
	計算式 計算値(A)	2.68	4.27	6.40
	$P_s = 5.053M_r/L$ 計算値(B)	2.94	3.60	6.38
載	崩壊時の曲げモーメント M_b (tf・m)	0.810	1.084	2.426
荷	係数 $\psi = P_s L / M_b$	4.87	4.79	4.77

場合であり、計算値（B）は単純ばり載荷試験結果より求められた崩壊モーメントを用いた場合である。そして、表-3のうち最下段の係数 μ は、変形硬化時の支点Aの反力（実験値）より求めた点Bの曲げモーメント M_B と変形硬化荷重（実験値）より求めたものである。そして、各供試体の崩壊時のひびわれを図-11に示した。

4. 考 察

以上の実験結果より、つぎのことがわかった。

1) 繰り返し載荷時に弾性限度を越える荷重が作用しているにもかかわらず載荷回数とともに変形が一定値に収束し、その後は材料が降伏しているけれどもほぼ弾性的な挙動を示す、いわゆる変形硬化（シェイクダウン）現象がRCばりでも生ずることが確認できた。

2) 変形硬化荷重は本実験で行ったような曲げが支配的な部材に対する固定点載荷については、使用した断面の塑性モーメントが正しく評価できれば、単純塑性理論に基づく解析値でほぼ近似できる。しかし、せん断の影響

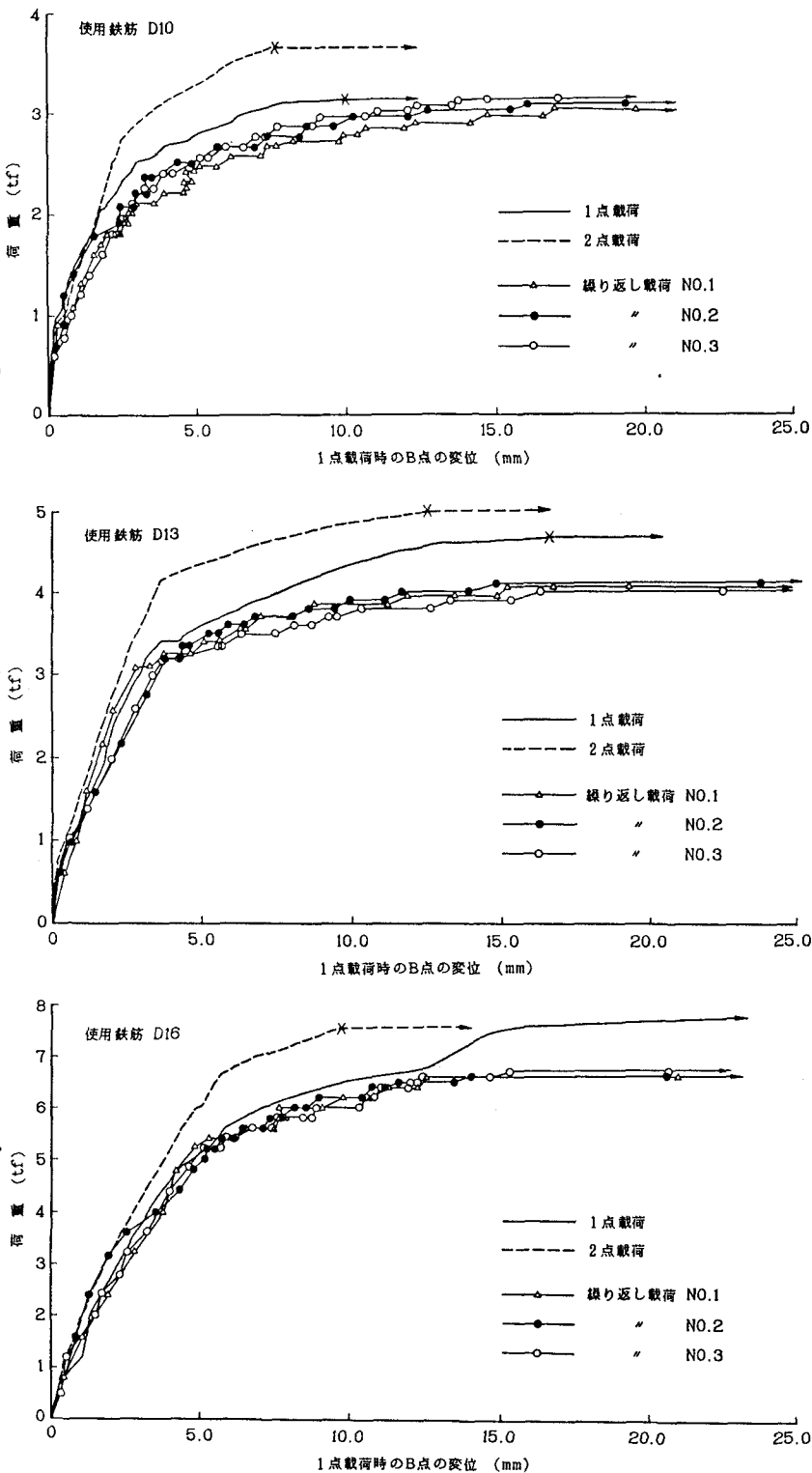


図-10 連続ばり載荷試験時の荷重と変位

が大きい部材や移動荷重の荷重については¹⁰⁾それらの影響を考慮に入れた解析が必要となり、単純塑性理論での解析では近似できないものと思われる。

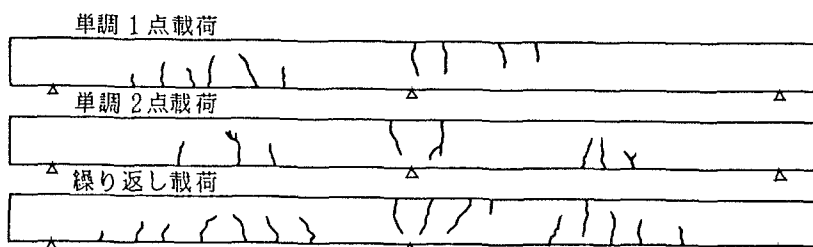
3) 本実験の範囲では、Darvall¹⁹⁾が示しているような軟化域は表われなかったが、より回転能のあるヒンジが形成される場合には軟化を考慮する必要がある。

4) 崩壊荷重の大きさについてみると、単調2点荷重、単調1点荷重、繰返し荷重の順であり、漸増崩壊荷重は単調荷重時の崩壊荷重よりも低い値である。このことは、RC構造物に繰返し荷重が作用するときには終局限界状態の1つとして変形硬化あるいは漸増崩壊を考慮する必要があることを示唆している。

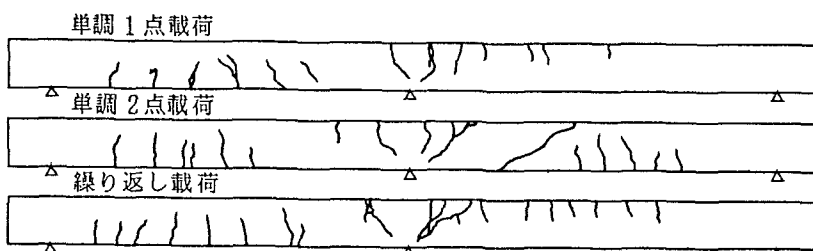
5) 単純塑性理論によると、単調1点荷重と単調2点荷重の崩壊荷重は同じであるが、初期降伏荷重ならびに初期塑性ヒンジの発生点が異なるため、破壊に至る過程が異なり、実験では2点荷重時の崩壊荷重が大きくなった。

5. あとがき

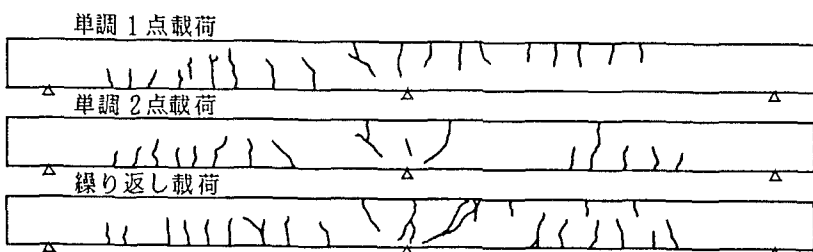
本研究では、繰返し荷重作用下の2径間連続RCばりの変形硬化現象を実験で確認し、曲げ理論による研究成果の適用について若干の考察を加えた。今後、塑性回転容量や鉄筋比の影響などについて、また、せん断の影響が大きい場合や移動荷重荷重の場合などについても、さらに研究する必要がある。最後に、長期にわたる根気の要る本実験に協力していただいた藤川進一君（現、佐藤工業（株））と松崎豊君（現、中央コンサルタント（株））に対して深く感謝いたします。



(a) D10供試体のひびわれ



(b) D13供試体のひびわれ



(c) D16供試体のひびわれ

図-11 連続ばり供試体のひびわれ状態

参考文献

- 1) 藤田、楠田、川井：塑性設計法、森北出版、pp.140-157、1964年。
- 2) 福本、吉田：くり返し荷重による連続桁橋のたわみ安定性について、
土木学会論文集、第120号、pp.25-32、1965年。
- 3) 福本、小堀、吉田：くり返し移動荷重によるたわみ安定性に関する理論と実験、
土木学会論文集、第144号、pp.1-10、1967年。
- 4) EYRE D.G. and T.V.GALAMBOS: Shakedown Tests on Steel Bars and Beams、
Proc.of ASCE, Vol.96, No.ST7, pp.1287-1303、1970。
- 5) 太田、今井、寺井：平面骨組構造物の静的、動的塑性曲げに対する数値解析法、
土木学会論文報告集、第239号、pp.15-23、1975年。
- 6) 石川、林、鯉淵：移動荷重を受ける骨組構造物の変形硬化荷重解析と最適塑性設計、
防衛大学校理工学研究報告、第20巻、第1号、pp.93-108、1982年。
- 7) CERADINI G.: Dynamic Shakedown in Elastic-plastic Bodies、
Proc.of ASCE, Vol.106, No.EM3, pp.481-499、1980。
- 8) 吉田、梶川、長谷川：繰り返し走行荷重による鋼製はりのダイナミック・シェイクダウンについて、
土木学会論文集、第356号、pp.361-368、1985年。
- 9) DARVALL P.L.P.: Shakedown with Softening in Reinforced Concrete Beams、
Materials and Structures, Vol.12, No.102, pp.421-426、1984。
- 10) 園田、鬼頭、増井：輪荷重の反復作用下での2径間RC連続桁の挙動、
土木学会第42回年次学術講演会講演概要集、V-240、pp.518-519、1987年。
(1987年10月16日受付)