

[180] 鉄筋コンクリートの動的応答特性に関する実験的研究

正会員 ○ 遠藤 達巳 (電力中央研究所)
 正会員 青柳 征夫 (電力中央研究所)

1. まえがき

地震時における鉄筋コンクリート (以下RC) 構造物の動的応答特性ならびに耐力・変形性状等の評価において、RC部材の力学的特性は静的と動的載荷条件下において同一と仮定している例が多く見られる。RC部材の地震時挙動の合理的な評価および解析精度の向上のためには、動的かつ繰り返し荷重下の種々の動的応答特性を明らかにする必要がある。しかし、部材レベルでの実験は行われているものの、特定の動的応答特性に着目した研究は数少ないのが現状である。

本研究は、RCの基本特性の中でも、ひずみ速度と繰り返し載荷の影響が大きいと考えられる、ひびわれ面間における動的せん断伝達特性ならびに鉄筋とコンクリートの動的付着特性を把握することを目的として実施したものである。本報告は、応力交番を含めた繰り返し載荷と単調載荷、ならびに、ひずみ速度・変形 (荷重) 速度による特性の相違に着目し、一般的に用いられている静的単調載荷条件下の特性と比較検討した結果について述べたものである。

2. 実験概要

2.1 鉄筋とコンクリートの動的付着実験

本実験では、付着試験法として両引試験法を採用した。

・試験体：試験体の形状・寸法を図-1に示す。かぶりは鉄筋径の3倍とし、試験体長さはCEB-FIP CODEで求めたひびわれ間隔の約3倍とした。鉄筋の両端部にはチャック用の丸鋼および抜け出し量測定用の鉄板を溶接した。試験に供した試験体は計12体であり、それらの諸元を表-1に示す。実験要因としては、①繰り返しと単調載荷、②ひずみ速度レベル (繰り返し載荷では周波数、単調載荷では荷重速度)、ならびに ③鉄筋径の3種類である。使用したコンクリートは平均試験時圧縮強度が約400kgf/cm²、引張強度が約28kgf/cm²であり、鉄筋はSD35規格のものを使用した。

・試験方法：載荷装置を図-2に示す。制御はロードセルによる荷重制御で行い、図-3に一例を示すように、繰り返し載荷では片振幅だけ引張荷重側にシフトさせた正弦波加振を2波づつ行い、徐々に振幅を増加させていった。単調載荷については、一定の荷重速度で鉄筋に引張力を加えた。測定は鉄筋ひずみと端部の鉄筋の抜け出し量について行った。鉄筋ひずみの測定に当っては付着性状の劣化を防止するため、鉄筋の縦リブを落し、幅3mm×深さ3mmの溝を切り、D19で36mm、D13で30mm間隔でゲージを貼付した。

表-1 動的付着試験体の諸元

試験体名	使用鉄筋	繰り返し単調の区別 (繰り返し)	荷重速度レベル	
			周波数 (Hz)	荷重速度 (単調のみ) (ton/秒)
G19C	D19	繰り返し	10	-
H19C	D19	繰り返し	5	-
L19C	D19	繰り返し	1	-
S19C	D19	繰り返し	0.003	-
H19M	D19	単調	-	100
S19M	D19	単調	-	0.01
G13C	D13	繰り返し	10	-
H13C	D13	繰り返し	5	-
S13C	D13	繰り返し	0.003	-
G13M	D13	単調	-	300
H13M	D13	単調	-	100
S13M	D13	単調	-	0.01

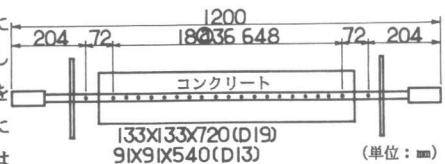


図-1 動的付着試験体の形状・寸法 (D19)

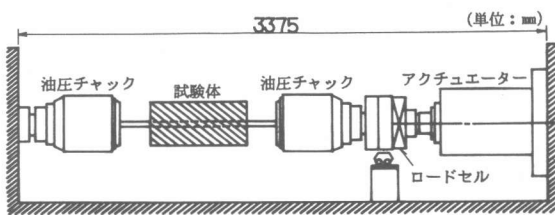


図-2 動的付着試験装置

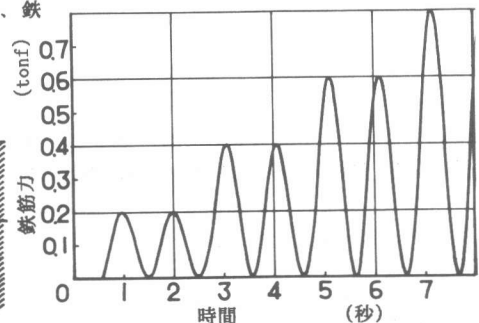


図-3 動的付着試験の繰り返し載荷パターン

2.2 鉄筋コンクリートブロックの動的せん断実験
実験は、ひびわれ面における一面せん断試験である。

・試験体：試験体の形状寸法は図-4に示すT字型の試験体であり、せん断面（ひびわれ面）は30×14.3cm (429cm²)である。この面に直交して鉄筋が4本貫通している。今回対象とした試験体は12体であり、それらの諸元を表-2に示す。実験要因としては、動的付着実験と全く同様である。材料強度も付着試験と同様である。

・試験方法：载荷実験前に、せん断面の面側にナイフエッジをあて、鉄筋ひずみおよびひびわれ幅で制御して、割裂ひびわれを予め導入しておいた。载荷装置を図-5に示す。制御は载荷治具のガタツキおよび弾性変形を相殺するため、試験体のすべり量を変位計で測定し、その信号をアクチュエーターにフィードバックする方式を採用した。繰り返し载荷の载荷パターンについては、加振波形は正弦波とし、所定のすべり量で各3波づつ加振し、順次すべり量を増加させた。その際には、変位速度がほぼ一定になるように、周波数を変化させていった。単調载荷では、変位速度を一定として、一方向にのみ、すべり変位を与えた。

3. 鉄筋とコンクリートの動的付着特性

測定した鉄筋ひずみから各測定点での鉄筋力を算出し、その勾配から局部付着応力を算出した。また、鉄筋とコンクリートの相対すべり量は、コンクリートひずみを無視し鉄筋ひずみが極値になる点（ひびわれ発生前は中央点）からの鉄筋ひずみを積分することにより算出した。

3.1 静的载荷条件下における繰り返し载荷と単調载荷の比較

図-6に静的条件下における繰り返しと単調载荷試験の一本目のひびわれが発生した後の付着応力-すべり量の比較を示す。動的せん断特性とは違い、繰り返しと単調载荷試験結果はほとんど差が無く、今回の実験のような片方向载荷では繰り返し载荷の影響は小さいと考えられる。

3.2 単調载荷条件下におけるひずみ速度の影響

図-7に単調载荷条件下における、ひずみ速度をパラメータとした付着応力-すべり量関係の比較を示す。

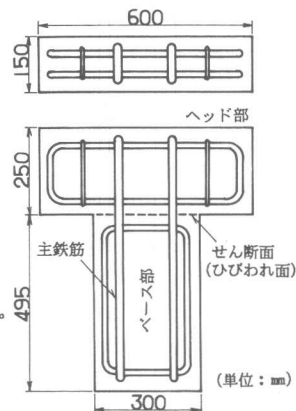


図-4 動的せん断試験体の形状・寸法

表-2 動的せん断試験体の諸元および結果一覧

载荷方法	試験体名	鉄筋比 (%) ()内使用鉄筋	すべり変位速度+ (mm/sec)	最大応力 τ / \sqrt{E} (kg/cm ²) ²	Sシリーズに対する比率	最大応力時すべり量 (mm)	最大応力時ひびわれ幅 (mm)
繰り返し	S-10	2.67(D19×4)	0.02	4.94	1.0	0.63	0.31
	D L-19	#	50	5.68	1.15	0.69	0.34
	D H-19	#	100	5.80	1.17	0.56	0.23
	S-13	1.18(D13×4)	0.02	3.32	1.0	0.50	0.31
	D L-13	#	50	4.18	1.26	0.47	0.29
	D H-13	#	100	3.92	1.18	0.50	0.33
単調	S-10	0.67(D10×4)	0.02	2.39	1.0	0.30	0.24
	D L-10	#	50	2.74	1.15	0.35	0.30
	D H-10	#	100	2.74	1.15	0.34	0.25
繰り返し	H-S-13	1.18(D13×4)	0.005	4.21	1.0	0.47	—
	H-DL-13	#	5	4.26	1.01	0.47	0.21
	H-DH-13	#	50	4.61	1.11	0.32	0.24

*繰り返し载荷の場合は最大すべり変位速度

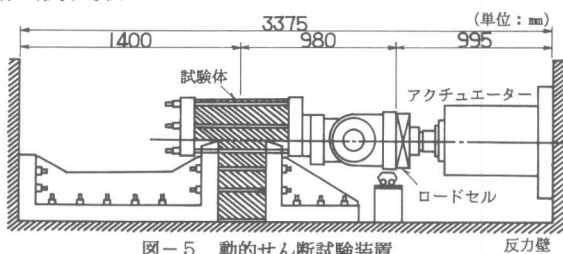


図-5 動的せん断試験装置

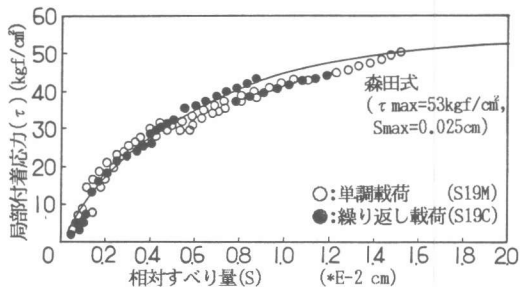


図-6 静的载荷における繰り返しと単調载荷の比較

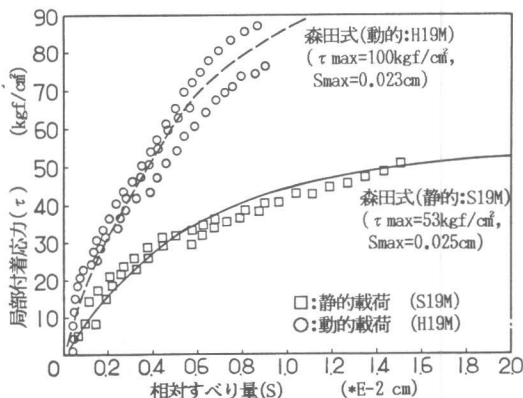


図-7 単調载荷におけるひずみ速度の影響

図から判るように、動的と静的載荷条件下では明らかに異なった性状を示している。すべり量のレベルが小さい段階から、動的載荷の方が付着応力が大きく、剛性も高い結果となっている。また、最大付着応力値も、静的に比べ動的載荷の方が、D13, D19とも約2倍程度になった。代表的な付着すべりの構成式である森田式によると、静的条件下では、 $\tau_{max}=53\text{kgf/cm}^2$, $S_{max}=0.025\text{cm}$ となるのに対し、動的では $\tau_{max}=100\text{kgf/cm}^2$, $S_{max}=0.025\text{cm}$ となる。(図-7参照) また、図-8にひびわれ発生前の付着応力分布図を示す。単調載荷における動的載荷の分布形は静的載荷の場合と異なり、中央付近ですべり量が非常に小さいと考えられるフラットな部分が存在している。すなわち見掛け上、完全付着領域が長くなっていると考えられる結果である。端部では付着性状の乱れが生ずると言われているが、繰り返し・単調載荷の区別無く、静的な条件下でも多少の乱れは生じているが、ひずみ速度が速くなるほど、その傾向は顕著になることが明らかとなった。

3.3 繰り返し載荷条件下のひずみ速度の影響

図-9に繰り返し載荷条件下における付着応力-すべり量関係の比較を示す。単調載荷の場合と比べるとその程度は小さいが、ひずみ速度が大きい程最大付着応力値ならびに剛性が大きくなった。

森田式によると、静的条件下では、 $\tau_{max}=53\text{kgf/cm}^2$, $S_{max}=0.025\text{cm}$ となるのに対し、動的では $\tau_{max}=70\text{kgf/cm}^2$, $S_{max}=0.025\text{cm}$ となる。図-8から判るように、単調載荷条件下で認められた完全付着領域長さのひずみ依存性は、繰り返し載荷条件下では認められなかった。

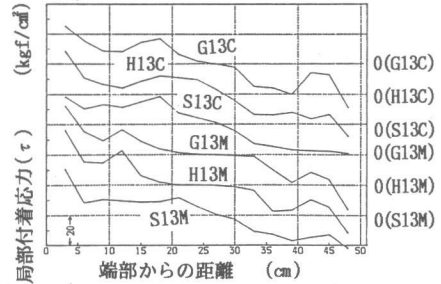


図-8 付着応力分布の比較(D13)

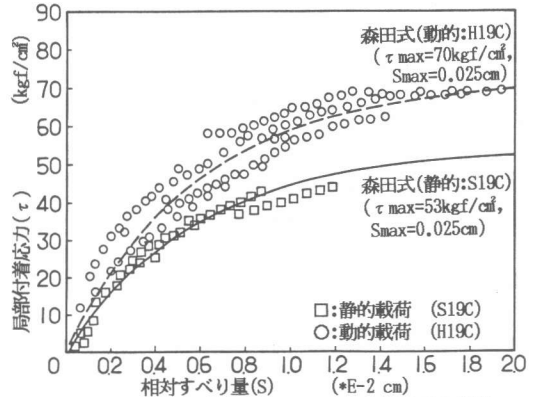


図-9 繰り返し載荷におけるひずみ速度の影響

4. ひびわれ面間の動的せん断伝達特性

4.1 ひびわれ導入結果

載荷前に行ったひびわれ導入では鉄筋比2.67, 1.18, および0.67%でそれぞれ約200, 250, および300 μ の先行鉄筋ひずみが発生した。先行ひびわれ幅については何れの試験体でも約0.005mm程度であった。

4.2 単調載荷と繰り返し載荷の比較

図-10にひずみ速度の影響の無い静的条件下における、単調載荷と正負交番繰り返し載荷のせん断応力-すべり量関係を示した。正負繰り返し載荷の場合の各特性が、すべり量の正負で変化しなかったため、正方向(押し)のみの各加振ステップ(約30ステップ)における最大応力・すべり量を結んだスケルトンカーブとして表している。また、コンクリート強度のパラツキの影響を除去するために、せん断応力を

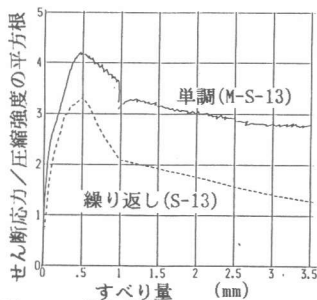


図-10 静的載荷における繰り返しと単調載荷の比較

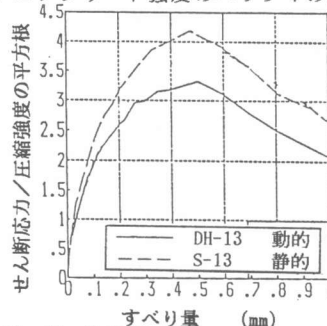


図-11 繰り返し載荷におけるひずみ速度の影響

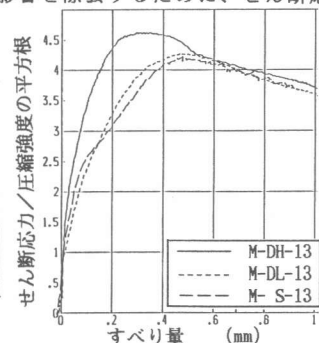


図-12 単調載荷下のひずみ速度の影響

コンクリートの圧縮強度の平方根で除している。

図から判るように、すべり量が小さい段階から繰り返し载荷の方が発生応力およびせん断剛性が小さい結果となった。最大応力発生時のすべり量は差が無いものの、最大せん断応力値は単調载荷の方が繰り返し载荷よりも約30%程度大きく、最大応力発生以後の応力低下についても繰り返し载荷の方が大きいことが明らかとなった。これらは、交番繰り返し载荷によるひびわれ面の劣化に起因すると考えられる。

4.3 せん断ひずみ(すべり量)速度の影響

図-11に繰り返し载荷条件下のせん断応力-すべり量関係を、また、図-12には単調载荷条件下の結果の一例を示す。繰り返し载荷ならびに単調载荷の場合も、静的载荷試験(Sシリーズ)に比べ、ひずみ速度の大きい動的载荷試験(DH,DLシリーズ)の方が、最大せん断応力が大きくなる結果となった。この現象は、いずれの鉄筋比でも同様であった。表-2に最大せん断応力の動的と静的試験結果の比を示したが、単調载荷条件下では、11%、繰り返し载荷条件下では15~20%程度、最大せん断応力が上昇することが明らかとなった。また、最大応力発生以後の挙動に関しては、単調载荷の場合は静的と動的でほとんど差が無いが、繰り返し载荷の場合は顕著な差が認められた。ひずみ速度の依存性は、単調载荷に比べ繰り返し载荷条件下の方が大きいと思われる。DLとDHシリーズでは各性状に変化が無く、本実験の範囲においては、変位速度が50mm/sec以上のひずみ速度の依存性は小さいと考えられる。

表-2および図-13に、それぞれ最大せん断応力時のひびわれ幅、およびひびわれ幅とすべり量の関係を示す。何れの試験体でもひびわれ幅はほぼ一定の値となっており、鉄筋比ならびに静的・動的载荷に関係無く、せん断破壊を司る重要な要因であることが確認できた。

せん断剛性(ここではKist:Interface shear Transferの意味)は、ひびわれ幅の関数として、次式で表現できると言われている。

$$Kist = A / Wm \quad [Kist:IST剛性(kgf/cm^2/cm), A:定数(=36), Wm:平均ひびわれ幅(cm)]$$

図-14にせん断剛性の実験値と上式への回帰曲線を示す。多少バラツキは有るものの、上式でせん断剛性を表現できると思われる。Aの値については、push-off試験から求めた値(=36)に比べ大きい値となっており、試験方法の差に起因するものと考えられる。定数Aの値は以下のような順で大きくなった。

単調・動的(A=76kgf/cm²/cm)→単調・静的(61)→繰り返し・動的(59)→繰り返し・静的(47)

単調・静的に対する比率はそれぞれ1.25,1.00,0.97,0.78となることが明らかとなった。

5. まとめ

以上の検討の結果、限られた範囲内ではあるが得られた結論を以下に示す。

- 1) 鉄筋とコンクリートの付着特性に関しては、静的条件下では繰り返し载荷の影響はほとんど無い。
- 2) ひずみ速度が付着特性に与える影響は大きく、動的载荷の方が静的に比べ、最大付着応力ならびに剛性が大きくなることが明らかとなった。特に、単調载荷でその傾向は顕著であった。
- 3) ひびわれ面間のせん断伝達特性に関しては、静的条件下でも、交番繰り返しの影響は大きく、単調に比べ繰り返し载荷の方が最大せん断応力およびせん断剛性が低下することが明らかとなった。
- 4) ひずみ速度の増大に伴って、最大せん断応力およびせん断剛性が上昇することが明らかとなった。

【謝辞】実験の遂行に際して御協力を得た、中山千春氏(前田建設工業)、池田隆明氏(長岡科学技術大学)、竹本真一氏(日本ソフトテクニカル)に謝意を表します。

【参考文献】1)遠藤,青柳:「動的繰り返し荷重下におけるひびわれ面間のせん断特性に関する研究」,第40回土木学会年講,1985,9、2)山田,青柳「ひびわれ面におけるせん断伝達」,JCI,コロキウム論文集,1983,10

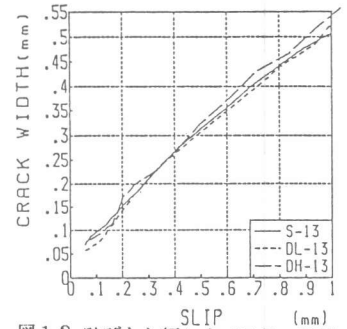


図13 ひびわれ幅とすべり量の関係(繰り返し:DL13)

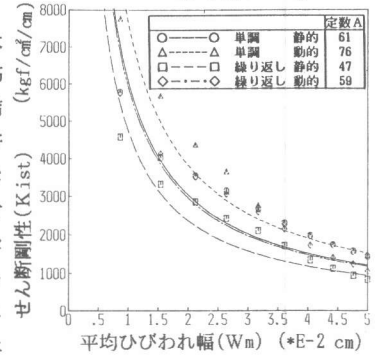


図-14 せん断剛性のひずみ速度依存性