

[108] 鉄筋コンクリート橋脚の動的破壊に関する基礎実験

正会員 町田篤彦（埼玉大学）

1. まえがき

地震のような動的外力を受ける鉄筋コンクリート構造物を合理的に設計するには、その破壊性状を解明することが重要であることは論を俟たない。しかし、鉄筋コンクリート土木構造物については、これが動的外力を受ける場合の破壊性状に関する研究成果が極めて少く、その性状が十分に解明されたとは言い難い。鉄筋コンクリート建築構造物あるいは部材に関しては、静的な外力を正負繰返して載荷する実験研究によって相当の研究成果が蓄積されているが、これとても、振動実験による検証は未だ十分ではないと思われる。

本研究は、鉄筋コンクリート構造物が動的外力によって破壊する場合の性状を解明することを究極の目的とするものであって、構造物としては極めて単純な構造型式である単一柱式橋脚をとりあげ、これを模した小型の供試体を用いて、静的正負繰返し載荷実験および振動実験によってこれを破壊に至らしめた結果に基き、いかなる動的外力が作用すればこの種の橋脚に破壊の危険が生ずるかを論じようとするものである。

2. 実験概要

実験に用いた供試体は、図1に示す断面のもので、高さが96cmおよび53cmの二種類である。この断面の主鉄筋の鉄筋比は1.4%である、通常の鉄筋コンクリート橋脚に模したものである。また、腹鉄筋比は、帯鉄筋の間隔を変えることによって0.125%と0.25%の二種類に変化させた。

実験は、静的正負繰返し載荷実験および振動実験の二種類を行なった。いづれの実験においても、供試体頭部に240kgの重錘をその中心で自由に回転出来るように緊結した。これによる供試体の軸方向応力度は、4.8kg/cmである。

静的実験では、供試体底部を固定し、頭部の水平変位が一定となるような水平力を図1に示すように正負繰返して与え、水平力と水平変位とを測定して、両者の関係を表す履歴曲線を求めた。

振動実験では、供試体底部を振動台上に固定し、振動台を一定の振動数、一定の加速度の正弦波で振動させて、供試体の応答が定常となった時期に、供試体頭部の振動台に対する水平相対変位および不動点に対する絶対加速度、振動台加速度、その他を測定した。一つの振動条件に対する測定が終了するたびに振動台を停止させて自由振動実験をおこない、振動数一定のまま加速度を増大させてた場合について測定することを振動台加速度が約0.15gに達するまで繰返した。この一連の実験が終了したのち、振動数を変化させて同様の実験を繰返して、供試体を破壊に至らしめたのである。

3. 静的正負繰返し載荷による破壊

静的正負繰返し載荷実験において、水平変位一荷重の関係を示す履歴曲線は、4～5回の繰返し載荷によってほぼ同一となった。この同一になった履歴曲線より、特定の状態に達したときの変位および荷重を求めた結果は、表1のようである。表1より明らかなように、本実験におけるように鉄筋比が小さい場合、主鉄筋の降伏後、相当地変位が増大しても圧縮部コンクリートの圧壊が生じにくく、大巾な

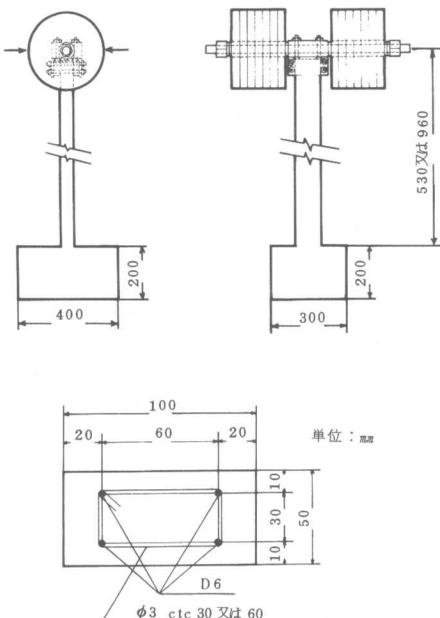


図1 実験に用いた供試体

荷重低下が認められないので、どの状態に達した時に破壊したかを判断するのが困難である。一応の目安として荷重が最大となった場合あるいは肉眼で圧壊が認められた場合（写真1参照）を破壊と見做せば、 9.6 cm の供試体の場合 $4.5 \sim 8\text{ cm}$ 、 5.3 cm の供試体の場合 $1.5 \sim 3\text{ cm}$ の変位を静的正負繰返し載荷による破壊変位とすることが出来る。しかし、これ以上の変位を生じさせても、耐荷力はなお残存しているのであって、例えば、 9.6 cm の供試体の場合、 15 cm 変位させても倒壊を生ずることはなかった。従って、静的な正負繰返し載荷実験からは、通常の橋脚のように鉄筋比が小さければ、破壊に対しても相当の韌性を有すると判断されるのである。

なお、腹鉄筋比を増せば、韌性が増すことは広く認められているが、表1の結果からもこれは明瞭に認められる。

4. 動的外力による破壊

静的な載荷実験において変位-荷重の履歴曲線の包絡線が図2のようになる供試体を加振した場合、以下のことが認められた。すなわち、供試体を、 \overline{OA} の勾配で示される剛性 K より $f = \sqrt{K/m} / 2\pi$ によって求められる振動数で加振すると、 20 rad/s 以下の加速度であっても、簡単にひびわれを生じ $y_A \sim y_B$ の変位を示すが、同じ振動数で加振を続けても、変位がこれ以上増大することはなかった。これは、ひびわれの発生によって剛性が低下し固有振動数が低下したためである。このように、ひびわれを発生させ得る振動数の外力では、破壊的被害は生じないのである。しかし、この状態にある供試体を \overline{OB} の勾配で示される剛性 K より上記と同様に求めた振動数で加振した場合、上記ほどではないが、変位が序々に増加し、同じ振動数で加速度を増大させれば、変位が y_B を越え、破壊にも至ることが認められた。従って、この振動数を橋脚を破壊に至らしめ得る振動数の上限とすることが出来ると考えられるのであって、これを越える振動数では、加速度が 500 rad/s 以上となつても応答変位が y_B を越えることはなかったのである。応答変位が y_B を越え、例えば \overline{OC} になった供試体は、 \overline{OB} の勾配をもとにして求められる振動数で加振すれば、 \overline{OB} の勾配をもとにした振動数で加振する場合より容易に破壊に至り、急激に倒壊した。

振動実験における供試体の破壊状況は、写真2に示すように静的繰返し載荷実験におけるそれよりはるかに著しく、圧縮部のコンクリートは圧壊してはげ落ち、鉄筋のうち少くとも1本は破断することが認められた。鉄筋の破断の理由は明らかで

表1 静的実験における変位と荷重との関係

高さ、 腹鉄筋 比	ひびわれ発生時		鉄筋降伏時		最大荷重時		圧縮部コンク リート圧壊時	
	変位	荷重	変位	荷重	変位	荷重	変位	荷重
9.6 cm 0.125%	0.35	34	3.3	90	4.5	98	9.0	90
5.3 cm 0.125%	0.2	54	0.8	143	1.3	173	2.9	167
5.3 cm 0.125%	0.2	59	0.6	150	1.5	163	—	—
3 cm 0.25%	—	—	1.0	163	2.0	186	—	—

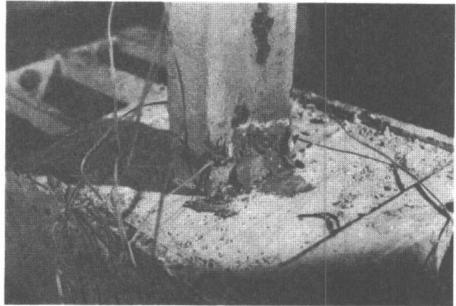


写真1 コンクリートの圧壊（静的試験）

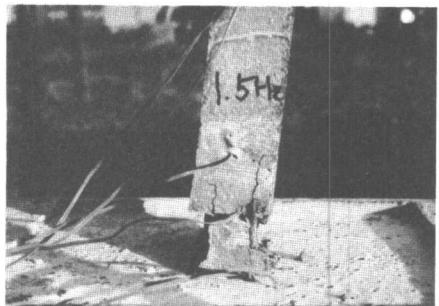


写真2 振動試験における破壊状況

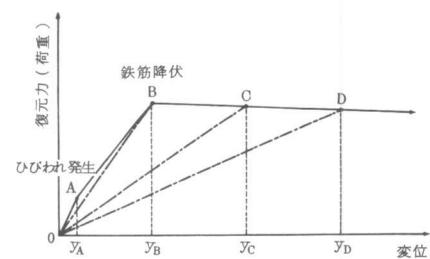


図2 供試体の振動性状

はないが、恐らくは高応力繰返しによる低サイクル疲労によるものと思われる。

最大変位が図2の γ_B を越えた供試体をそのときの固有振動数に近い振動数で加振した場合、加速度がある値以上であれば、急激に破壊するので、破壊時の変位を厳密に求めることは困難であるが、破壊直前に定常振動をしていた時の変位をその時の加振条件とともに示せば、表2のようである。表2の変位は、このように、必ずしも破壊変位ではないが、破壊がこの直後に急激に生じ、しかも鉄筋の破断および倒壊を伴う著しいものであることを考えれば、この変位に達したときは、最早、耐荷力を残存しないと考えて良いと思われる。この結果を表1の結果と比較すれば、本実験の場合、静的正負繰返し載荷における鉄筋降伏時の変位の大略2倍あるいは最大荷重時の変位が、動的外力の破壊変位に相当することがわかる。静的実験より、正負繰返し載荷される場合の破壊変位は一方向繰返し載荷される場合のそれより著しく低下することが認められているが、動的外力によるそれは更に低いのであって、静的正負繰返し載荷におけるような韌性は期待出来ないのである。一断面についての数少い実験より軽々に結果を下すことは出来ないが、通常の単一柱式鉄筋コンクリート橋脚が地震等によって破壊する場合の変位としては、静的な外力による鉄筋降伏時の変位の2倍程度をその一応の目安とすることが出来よう。

なお、表1の結果からは、腹鉄筋比の増加は韌性の向上に寄与することが認められるが、表2の結果からは、破壊する場合の外力の加速度がある程度増加するものの、変位には大きな影響を与えないことが認められる。動的外力を受ける場合の腹鉄筋の韌性に及ぼす効果に関しては、振動実験による詳細な検討が必要と思われる。

5. 橋脚を破壊に至らしめ得る動的外力の範囲

静的正負繰返し載荷実験より求められる変位-荷重履歴曲線の包絡線上の一点と原点とを結ぶ直線の勾配をもとに4.に述べたように計算される振動数は、その変位に達した時の固有振動数にほぼ等しいと考えられる(表2参照)。従って、4.で述べたことより、橋脚を破壊に至らしめ得る外力の振動数の上限は、橋脚下部において主鉄筋が降伏した場合の橋脚の固有振動数とすることが出来る。しかし、これは、変位の増大に

表2 動的破壊直前の定常振動の状況

高さ 腹鉄筋比	変位	固有振動数		外力加速度	
		静的剛性 より	自由振動 より	振動数	最大値
9.6 cm 0.125%	cm ±5.0	Hz 1.1	Hz 0.8	Hz 1.0	gal 60
5.3 cm 0.125%	cm ±4.2	Hz 1.4	Hz 0.5	Hz 1.4	gal 130
5.3 cm 0.25%	cm ±2.3	Hz 1.8	Hz 1.7	Hz 1.5	gal 100
	cm +2.8 -0.7	Hz 1.3	Hz 1.5	Hz 1.5	gal 75
	cm ±2.3 0.25%	Hz 2.3	Hz 2.0	Hz 2.0	gal 120

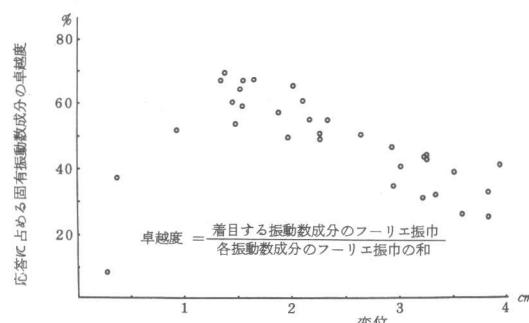


図3 応答に占める固有振動数成分の卓越度と変位との関係

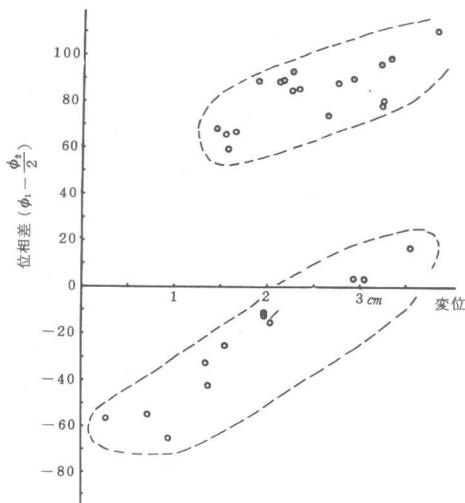


図4 固有振動数成分と外力振動数成分の位相差と変位との関係

伴って低下する固有振動数に応じて、これに近似するよう振動台の振動数を設定した場合の結果である。それで、 9.6 cm の供試体を用い、これに静的に動的破壊変位以上の 5.5 cm の変位を与えたのち、種々の振動数で加振して、鉄筋降伏点に対応する振動数以上で破壊に至るか否かを検討した。この結果、応答変位の波形は極めて複雑となるものの、振動台の能力一杯の加速度（ $0.2g$ ）としても、変位は 4 cm 程度が最大であって、破壊には至らないことが確かめられた。このように変位波形が複雑となって応答変位が大きくならない原因を究明するため、波形のフーリエ解析を行った結果、応答変位は、固有振動数成分と振動台の振動数成分とによってその大部分が構成されること、変位がある値以上になると変位の増大に伴って固有振動数成分の占める割合が低下すること（図3参照）、固有振動数成分の位相と外力振動数成分の位相の間に

は特定の関係があること（図4参照）、等が明らかとなった。すなわち、外力の振動数が固有振動数より大きい場合、上記のような規則性をもって二つの成分が合成されるため、変位が増大し難いものと考えられる。

橋脚を破壊に至らしめ得る外力振動数の下限について検討するため、動的破壊変位に近く変位した供試体を、鉄筋降伏時の変位の三倍の変位に相当する振動数（図2参照）で加振した結果、応答変位に上記とほぼ同様の現象があらわれ、破壊には至らないことが確かめられた。この下限値は、上限値の場合程十分を検証はなされていないが、概略の目安にはなり得る値と考えられる。

橋脚を破壊に至らしめ得る外力の振動数の範囲が分かれれば、種々の外力加速度に対する共振曲線を描くことによって、破壊に至らしめ得る外力加速度の下限値を求めることが出来る。図5は、 9.6 cm の供試体を用いてこれを試みた結果であるが、鉄筋コンクリートの場合、変位が変化すれば固有振動数が変化すること、振動実験において応答が定常化する前により大きな変化を生ずる可能性のあること、真の共振状態における測定が出来なかったこと、等により、厳密な共振曲線が得られず、目的を達成出来なかった。しかし、図5によても示唆されるように、橋脚を破壊に至らしめ得る外力加速度の下限値の存在は明らかであり、今後の十分な検討が必要とされる課題であると考えられる。

6. むすび

鉄筋コンクリート土木構造物の一例として、单一柱式橋脚をとりあげ、これにいかなる動的外力が作用すれば破壊の危険があるかを論じようとした。実際の橋脚に比し著しく小型の供試体しか用い得なかった上、その断面形状も限定されているので、本実験の結果をそのまま実際の橋脚に適用することは出来ない。しかしながら、鉄筋コンクリート橋脚が動的外力によって破壊する場合、静的正負線返し載荷実験から期待される程の韌性は有しないこと、動的外力による破壊変位は静的載荷の場合の鉄筋が降伏した時の変位の2倍あるいは荷重が最大に達したときの変位程度と考えられること、橋脚を破壊に至らしめ得る外力の振動数は、鉄筋が降伏した時の振動数から、降伏点に達した時の3倍の変位を生じた場合の固有振動数までの範囲がその目安となること、等が明らかとなつたのであって、この種の橋脚を耐震設計する場合の一資料は提供出来たと思われる。

本研究の一部は、昭和51、52年度科学研修費補助金（試験研究）によつたものである。また、研究の実施にあたっては、元大学院生露口雄次君（現、新日本技術コンサルタント）をはじめとする多くの埼玉大学コンクリート研究室卒論生の方々にご援助頂いた。ここに記して厚くお礼申上げる。

（参考文献） 太田実 「線返し荷重下における鉄筋コンクリート橋脚の挙動に関する実験的研究」

土木学会論文報告集、No.292 1979年12月

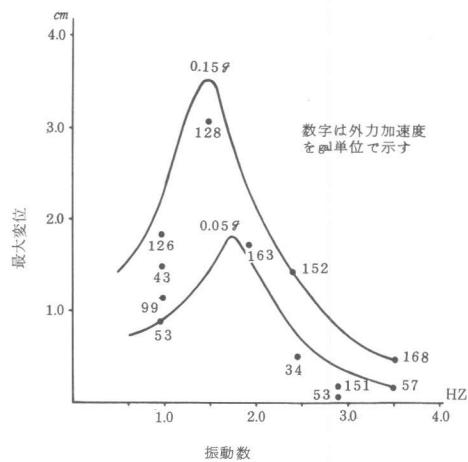


図5 共振曲線の一例