コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.2，1993

論　文

[2187]　途中定着を有する鉄筋コンクリート橋脚の耐震性に関する研究

飯田寛之*1・山口隆裕*2・池田尚治*3

1．まえがき

昭和53年の宮城県沖地震や昭和57年の浦河沖地震では、鉄筋コンクリート橋脚の柱の中間部に大きな損傷が生じた道路橋がある。損傷は橋脚の軸方向鉄筋の本数を橋脚に作用する曲げモーメントに合わせて途中で減らした部分（以下途中定着部という）で生じている。途中定着する鉄筋の定着長が十分でなかったために、ここが弱点となったのである。

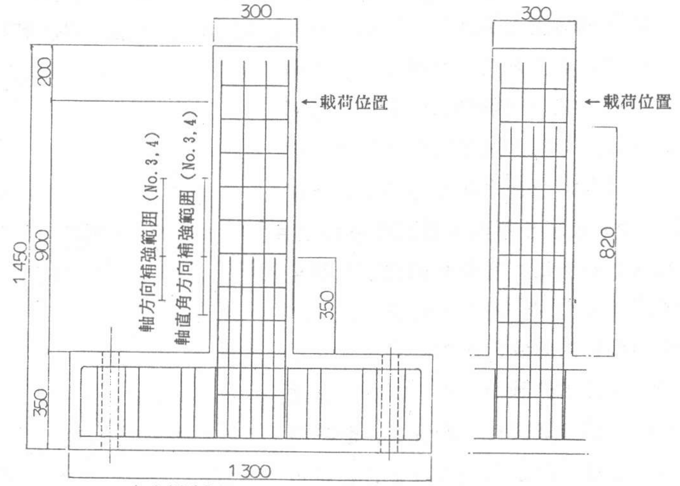
このような経験から昭和55年以降、道路橋示方書[1]やコンクリート標準示方書[2]（これら2つを含めて以下示方書ともいう）では、途中定着については軸方向鉄筋の定着長を十分確保することなどの対応が図られた。しかし、これ以前の示方書に基づいて設計された既存の鉄筋コンクリート橋脚のうち、途中定着部を有するものについては、地震時の安全性について検討することが必要である。

本研究は、途中定着を有する鉄筋コンクリート橋脚の地震時の挙動を橋脚模型を用いた静的載荷実験及び準動的載荷実験により把握し、十分な定着を有する橋脚については、その安全性を確認するものである。また、準動的載荷システムに組み込まれた動的映像録画装置を用いて橋脚の動的応答挙動の映像シミュレーションを行い、視覚的な面からも検討するものである。

2．載荷実験の概要

2．1　実験に使用した供試体

図－2．1に示すように3種類の供試体を製作した。供試体No.1～No.4は、昭和55年以降の示方書に準拠せず、途中定着部の影響を顕在化するよう設計した橋脚模型であり、供試体No.5及びNo.6は、昭和55年以降の示方書に準拠して設計した橋脚模型である。これらの供試体は、軸方向鉄筋の24本の中の12本について途中定着を行うこととして、その位置はモーメントシフトを考えない曲げモーメントに対する耐力に基づいて決定した。ただし、供試体No.1～No.4は、軸方向鉄筋の途中定着位置から定



(a)供試体No.1～No.4　　(b)供試体No.5,No.6

図－2．1　実験に使用した供試体

＊1建設省土木研究所地震防災部耐震研究室研究員（現 横浜国道工事事務所　正会員）
＊2横浜国立大学助手　工学部建設学科（正会員）
＊3横浜国立大学教授　工学部建設学科、工博（正会員）

着に必要な長さ（以下定着余長という）を全く考えなかった。また、供試体No.5及びNo.6については、現行のコンクリート標準示方書に従って十分な長さの定着長を持たせた。

さらに、供試体No.3及びNo.4については供試体完成後途中定着位置の上下を炭素繊維で補強することとした。炭素繊維による補強は、繊維を一方向に並べたシート状の連続炭素繊維を使用し、軸方向に対しては不足している定着長を補う範囲に、帯鉄筋の方向には、斜めひび割れが入ると考えられる範囲に、エポキシ系の樹脂により接着した。

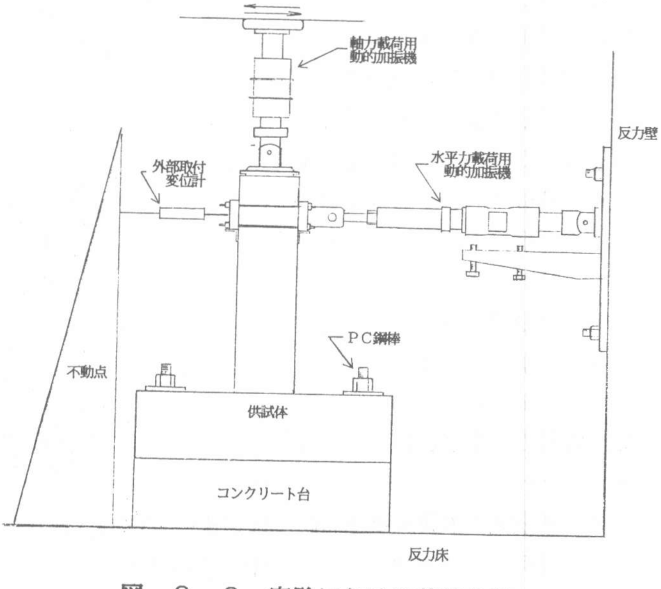
表－２．１　供試体の諸元

供試体		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
実験方法	静的載荷実験	○		○		○	
	準動的載荷実験		○		○		○
断面　d×B　(cm^2)		30×30					
かぶり　(cm)		3.0					
載荷高さ　h　(cm)		90					
せん断支間比　h／d		3.0					
軸方向鉄筋	材質，径	SD295, D10					
	中途定着高さ　(cm)	35				82	
	鉄筋比　(%)	1.90（中途定着後0.95）					
帯鉄筋	材質，径	SD345, D6					
	鉄筋比　(%)	0.18					
コンクリート	材質	普通ポルトランドセメント					
	最大骨材寸法　(mm)	20					
	圧縮強度　(kgf/cm2)	188					
炭素繊維補強		無	無	有	有	無	無

表－２．１に示したように奇数番号の供試体は静的載荷実験用で、偶数番号の供試体は準動的載荷用である。断面は30cm×30cmの正方形断面で、基部から載荷位置までの高さは90cmである。軸方向鉄筋はSD295D10の鉄筋を各面に対して一列に配置し、帯鉄筋はSD345D6の鉄筋を最小必要量に対応して12cm間隔に配置した。

２．２　静的載荷実験

静的載荷実験では、図－２．２のように供試体を床面に固定して橋脚模型供試体天端の鉛直方向には動的軸力載荷装置（動的載荷能力±30tonf）を用い、水平方向には動的水平力載荷装置（動的載荷能力±20tonf）を用いた。軸力は、上部工等の死荷重に相当する９tf（10kgf/cm^2）を作用させた。載荷の手順は、まず荷重制御で軸方向鉄筋の引張最外縁部の実験上の応力度が1800kgf/cm^2、2700kgf/cm^2及び降伏応力である3600kgf/cm^2となる荷重を順次に正負交番載荷した後に、変位制御に切り替えて降伏応力到達時の変位をδ_yとしてその整数倍の変位を段階的に１回ずつ正負交番に載荷した。ただし、途中定着部で降伏した場合は、他の供試体と降伏の定義が異なることから$\delta_y{}^*$と表す。



図－２．２　実験における載荷状況

２．３　準動的載荷実験

供試体を１自由度モデルとして線形加速度法による応答計算をパーソ

ナルコンピューターで行いながら準動的地震応答載荷[3]を行った。載荷に使用した地震波は、El Centro 1940（NS方向）の0.02秒間隔のデータを0.02～16秒まで用いた。作用させた最大加速度は、静的載荷実験の供試体No.5の実験結果から得られた降伏時の剛性を使って、コンクリート標準示方書で「かなりの損傷」とされている4δ_y相当の加速度である94galと「破壊」に対応させた4δ_yの2倍の加速度188galとした。載荷手順は、4δ_y相当の地震波で加振したのち、「破壊」レベルの地震波で加振した。また、設定した減衰定数は0.05、1自由度系換算仮想質量は91.2tonとした。これらの条件は全ての供試体とも同じとした。

表－3．1　各供試体の耐震性能

供試体	No.1	No.3	No.5
降伏耐力 P_y(tf)	6.0*	7.0*	7.0
最大耐力 P_{max} (tf)	6.9	8.0	9.0
P_{max}/P_y	1.15	1.14	1.29
降伏変位 δ_y (mm)	4.4*	5.5*	4.8

＊：中途定着部の降伏時の耐力及び変位
備考：ファイバーモデルによって計算した供試体No.5の降伏耐力と終局耐力は、それぞれ7.8tonf、10.0tonfであった。ただし、降伏荷重は最外縁の引張鉄筋の応力が降伏応力度の3600kgf/cm^{2}に達する時の値である。

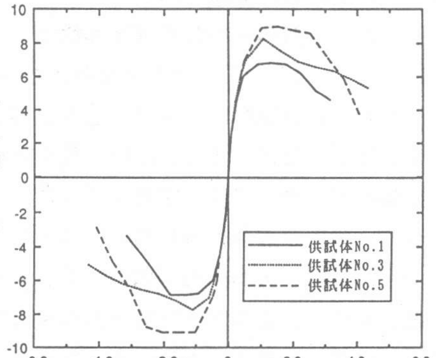
2．4　動的映像録画装置

動的映像録画装置は、準動的載荷を行う際に供試体の挙動を載荷の各ステップ毎に録画するものである[4]。録画の方法は、ビデオカメラが常時録画が可能な状態にして、ビデオデッキの一時停止と一時停止の解除（録画）を準動的載荷システムからの電圧信号により行うものである。これにより準動的載荷実験の載荷ステップ毎の静止映像を一定時間毎にコマ撮り（1ステップ当り0.2秒）して、それを連続的に再生することで、地震波による供試体の動的応答挙動を振動台実験を行わずに地震波の時間軸と対応して視覚的に生起させることができる。これにより、地震により被害を受けた橋脚についても橋脚に作用した地震動がわかれば被害の進展が時間を追って確認できる。

3．静的載荷実験の結果

3．1　耐力の比較

静的載荷実験における耐力を比較するために各供試体の耐震性能を表－3．1に、また、荷重～変位の包絡線を図－3．1に示す。これらによると供試体No.5は5δy(24.0mm)載荷まで大きな荷重の低下は見られず、途中定着を施したことによる悪影響は見られない。しかし、供試体No.1については途中定着部が基部よりも先に降伏し、供試体No.5の降伏耐力にまで達せず、最大耐力についても供試体No.5よりも23％程度小さい値を示した。供試体No.3については、炭素繊維の補強効果により降伏耐力及び最大耐力のどちらについても供試体No.1よりも向上していることがわかる。



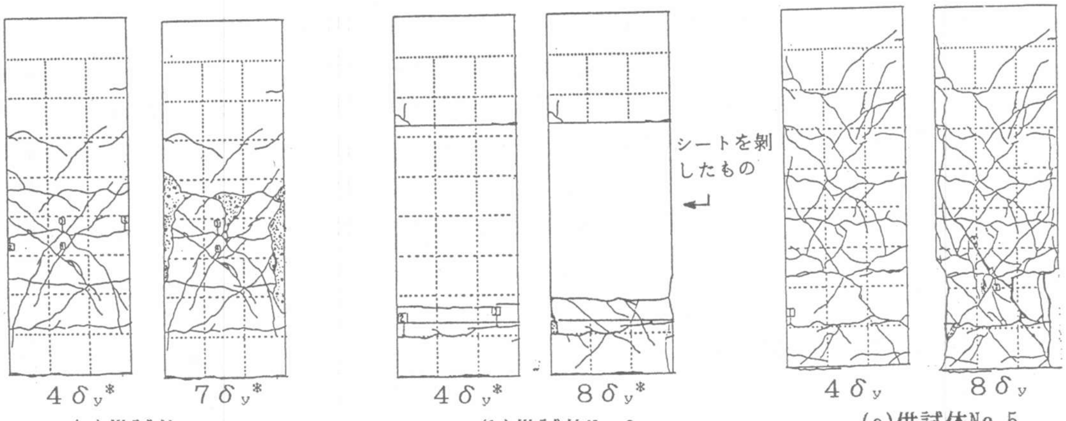
図－3．1　静的載荷における荷重～変位の包絡線

今回の実験において供試体No.1については、途中定着で降伏したにもかかわらず、4δ_y*(17.6mm)までは残存荷重を有していた。この理由としては、計算上の帯鉄筋間隔は42cmとなるところを示方書の構造細目に従い12cm間隔に配置したことで

せん断に対して十分補強できたため、ある程度までの変形については脆性的な荷重の低下が防止できたものと思われる。

3．2　供試体の損傷状況

静的載荷実験における載荷方向に平行な面の４δ_y載荷後と実験終了後の破壊状況を図－３．２に示す。破壊の進展は軸方向鉄筋の定着余長を持たない供試体No.1については、１δ_y*載荷時に供試体の脚部の全面に曲げクラックが生じ、２δ_y*載荷からは幅の広い斜めクラック（クラック幅1.5mm程度）が途中定着部付近から柱の基部にわたり発生した。そのため、変形を途中定着付近だけで受持ち、途中定着位置付近のコンクリートが７δ_y*で剥離して鉄筋が座屈する破壊形態になった。これに対して、軸方向鉄筋の定着余長を十分確保した供試体のNo.5は、１δ_y載荷時に供試体の脚部の全面に曲げクラックが生じ、その後もクラックの数は増えていった。クラックの幅が広がったのは３δ_y載荷からで基部の曲げクラックが幅約1.2mmに広がった。コンクリートの剥離は７δ_y載荷時に柱の基部に生じた。供試体No.5についてはクラックの発生状況から見ても途中定着による悪影響が生じていないことが確認できた。供試体のNo.3の破壊は途中定着部の損傷は見られず、補強の効果があったことが確認できた。



図－３．２　各供試体の損傷状況（４δ_y載荷時と実験終了段階）

４．準動的載荷実験の結果

４．１　供試体の挙動及び損傷状況

図－４．１に４δ_yレベルの載荷より得られた供試体No.2及び供試体No.6の載荷履歴曲線を示す。供試体No.2と供試体No.6の最大応答変位はそれぞれ、15.1mmと15.8mmであり、これは、定着余長を十分確保した供試体No.5の静的載荷実験の降伏変位のそれぞれ3.1倍と3.3倍に相当する。

損傷状況については、定着余長を持たない供試体No.2の場合、基部には幅の広いクラックは発生せず、途中定着部付近に斜めクラックが集中して生じた。しかし、「かなりの損傷」といったものではなく、致命的な損傷には至らなかった。準動的載荷実験及び静的載荷実験の損傷状況を比較した場合、静的載荷実験の方が損傷程度が大きく途中定着による悪影響がはっきりと現われた。「破壊」レベルの地震波を作用させると基部から約24cmの高さから途中定着位置までのコンクリートが剥離しその部分の軸方向鉄筋が座屈し、残留変形が生じた。定着余長を十分に確保した供試体No.6は、４δ_y相当の地震波を作用させた場合では供試体全体に曲げクラックが生じたがその幅は狭く、供試体No.2よりもさらに損傷の度合は低い。「破壊」レベルの地震波では、基部

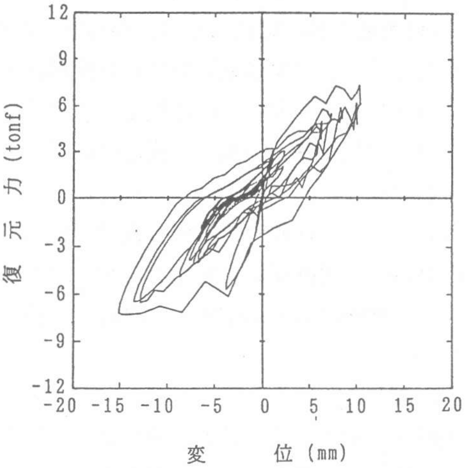
と一番下の帯鉄筋の範囲で生じた斜めクラックに沿ってコンクリートが剥落し、残留変形が生じた。炭素繊維補強を施した供試体No.4は全体としては健全なうちに載荷が終了した。実験後補強シートを剥しても、曲げクラックが基部から40cmの高さ付近にある程度で途中定着部に損傷はなかった。

準動的載荷実験を今回初めて途中定着部を有する鉄筋コンクリート橋脚について用いたが途中定着部の挙動を知る上で極めて有効な方法であることがわかった。

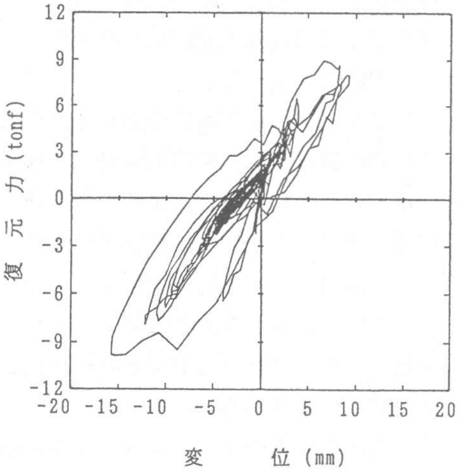
４．２　録画映像からみた供試体の挙動

準動的載荷実験では、準動的載荷システムに組み込まれた動的映像録画装置により収録した映像から供試体の動的な挙動が時間スケールでくり返し観察することができた。

写真－４．１に地震波の生起時刻における供試体の損傷状況を示す。この中で供試体の右下の数値は地震波の生起時刻（秒）を示している。２枚の写真を比較すると定着余長の有無により地震によって発生するひび割れの状況がどの様に異なるかが明らかとなる。また、供試体No.2の写真は実際の橋脚が受けた被害の状況と似ており、本システムの有用性が確認された。ビデオテープを再生して供試体の変形状況を観察してみると十分な定着余長を持つ供試体No.6は、供試体の基部が浮き上がり、全体が反っているように見えるが、定着余長を持たない供試体No.2では、供試体No.6ほど



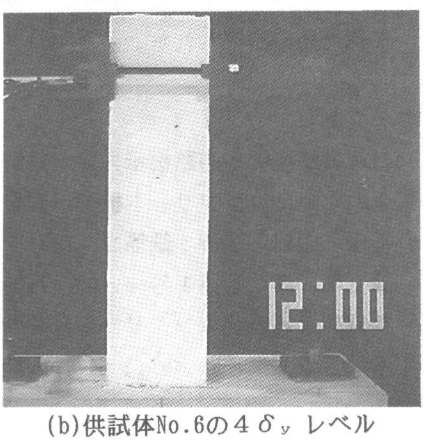
(a)供試体No.2



(b)供試体No.6

図－４．１　準動的載荷実験の載荷履歴曲線

(a)供試体No.2の４δ_y レベル



(b)供試体No.6の４δ_y レベル

写真－４．１　地震波の生起時間における損傷状況

浮き上がっているようには見えず、４δ_y相当の地震波を作用させた場合の地震波の生起時刻の2.1秒（最大応答変位に到る直前）からは、明らかに途中定着長を境に「くの字」に曲がるような変形をしている。炭素繊維で補強した供試体No.4では、軸方向の補強の下端のところから上の部分が曲がりながらも水平に移動しているように見える。また、各供試体とも「破壊」レベルの地震を作用させた場合、地震波の生起時刻で、５～６秒後に片側に偏った状態のまま変形していることがわかった。

このように、振動台に模型を乗せて加振するのに比べ準動的載荷実験では載荷が遅く地震波の載荷といった実感がわいてこないが、動的映像録画装置で収録したビデオは、地震時挙動を生起させ、臨場感のある地震応答が再現できる。

５．まとめ

本研究をまとめると以下の通りである。

１）　軸方向鉄筋の途中定着部を有し定着余長を持たない鉄筋コンクリート橋脚模型の耐力は、静的正負交番載荷実験の結果、荷重は降伏耐力に達しないことが確認された。損傷の進展は途中定着部の連続鉄筋が先に降伏して、変形もその部分に集中し、基部が降伏することなく徐々に耐力を失った。

２）　５５年以降の示方書に準拠して製作した橋脚模型では、十分な耐力が得られ、途中定着による悪影響は、静的載荷実験及び準動的載荷実験の双方において現われなかった。

３）　定着余長を持たない供試体の静的載荷実験と準動的載荷実験の損傷を４δ_yで比較すると静的載荷実験の方が顕著に悪影響が現われた。

４）　途中定着を有する橋脚模型において途中定着余長を持たない供試体は、静的載荷実験では降伏変位の４倍の変位を載荷するまでは急激な体力の低下はなかった。これは、示方書の構造細目に従い帯鉄筋の間隔を計算上の１／４程度としたため、せん断補強を十分に行えたことが理由と考えられる。

５）　動的載荷映像録画システムにより途中定着を有する橋脚模型の地震時挙動を視覚的に生起することができた。動的載荷映像録画システムは、再生によりくり返し観察することも容易である。そのため途中定着位置に破壊を受けた場合の基部と途中定着部の挙動が細かく観察できた。

６）　炭素繊維シートによる補強は、静的載荷試験と準動的載荷試験のどちらの実験についても十分な効果が得られた。

［参考文献］

１）日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ｖ耐震設計編，平成２年２月
２）土木学会：コンクリート標準示方書（平成３年版）設計編、平成３年９月
３）池田・山口・鵜澤：鉄筋コンクリート柱の地震時挙動と耐震設計の評価，コンクリート工学論文集，第２巻第１号pp.105～113,1991.1.
４）地震による鉄筋コンクリート柱の動的応答に関する映像シミュレーション：池田・山口，土木学会論文集，No.451,Ｖ-17,pp.139～147,1992.8.