

(57) 逆L字形コンクリート橋脚の耐震特性に関する研究

横浜国立大学大学院 ○野中 聡
 建設省九州地方建設局 藤井 理隆
 横浜国立大学工学部 正会員 山口 隆裕
 横浜国立大学工学部 正会員 池田 尚治

1. はじめに

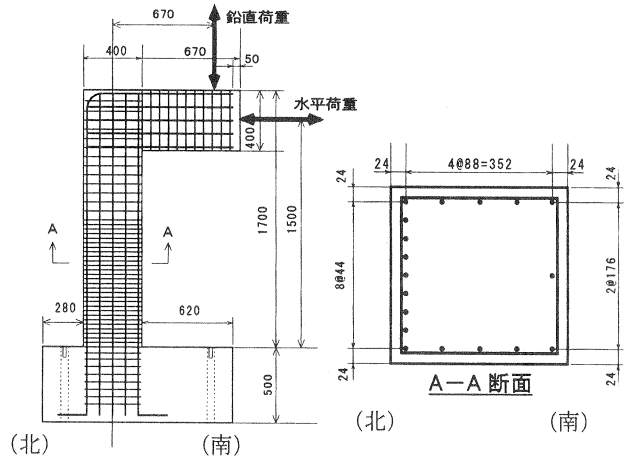
都市内の高架橋や高速道路のジャンクションなどの空間的制約を受ける場所においては逆L字形橋脚が採用される場合がある。この形式では、上部構造の重量および張り出し部分の自重により偏心鉛直荷重が柱断面に常時作用しているために、大地震時に張り出し側に応答変位が卓越することが確認されている⁽¹⁾。

本研究は、柱断面を非対称な鋼材配置とした場合の逆L字形鉄筋コンクリート橋脚、および逆L字形プレストレストコンクリート橋脚の耐震性能の把握を目的とした実験的研究である。

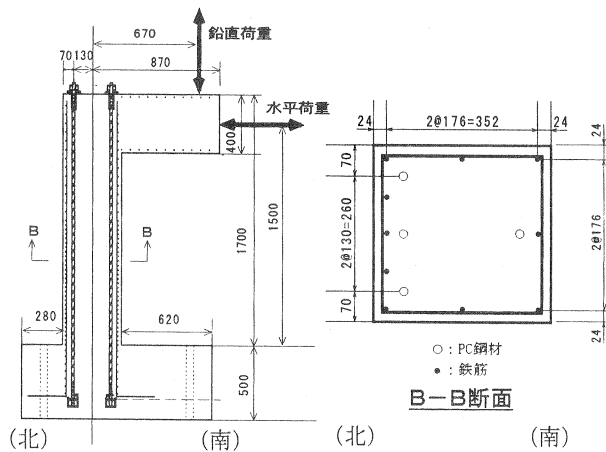
2. 実験概要

2. 1 実験供試体と荷重方法

本研究で用いた供試体は、逆L字形RC供試体と鉛直方向にプレストレスを導入した逆L字形PC供試体の2種類であり、各種類3体の計6体を作製した。逆L字形RC供試体、逆L字形PC供試体の形状を図-1に、供試体の一覧と諸元を表-1に示す。供試体は、フーチング付きの独立柱形式のものであり、柱の断面は40cm×40cmの正方形断面とし、フーチング天端から荷重点までの高さを150cmとした。張り出し部断面は柱躯体断面と同寸法で、張り出し部が破壊されないように十分補強されている。筆者らはこれまでの研究において、対称な鋼材配置で設計された逆L字形橋脚の耐震性能について検討しており、地震時に張り出し側に変位が卓越することを明らかにしている⁽¹⁾。今回の研究では、柱断面における配筋を偏心分を考慮して合理的に行う場合を想定し、RC供試体では張り出し側の軸方向鉄筋量をその向かい側の鉄筋の1/3の量とし、PC供試体ではPC鋼材を1/3の量になるように非対称な鋼材配置とした。断面図を



(a) RC 供試体



(b) PC 供試体

図-1 供試体の形状・断面

図-1に示す。PC供試体において、プレストレス導入後のPC鋼材の緊張応力度は規格降伏応力度の50%程度である。柱部の帯鉄筋量は全ての供試体で共通であり、D6鉄筋を図-1のようにフーチング天端より84cmまでの区間には3cm間隔、その他の区間には6cm間隔で配置した。なお、諸元に示した帯鉄筋比の値は、3cm間隔の区間に対するものである。柱部分の主鉄筋に使用した鋼材の力学特性を表-2に示す。コンクリートの骨材の最大寸法は8.5mmである。

実験における荷重方法として、今回の研究では、6体全て準動的荷重実験を行った。各供試体と作用地震波の関係を表-3に示す。RCタイプ、PCタイプとも3体の供試体内、2体は偏心鉛直荷重を一定として実験を行い、他の1体は作用地震波の鉛直成分により変動させて行った。準動的荷重実験の荷重には2本のアクチュエータを使用し、柱頭部に一定もしくは変動の鉛直荷重を荷重しながら水平変位を作用させた。荷重方向は南北方向とし偏心鉛直荷重用後は水平変位0mmとして、以降南側(張り出し側)への荷重および変位を正(+)の符号で、北側への荷重および変位を負(-)の符号で表すこととした。逆L字形橋脚ではその特性から、地震波の極性によって地震時の応答挙動が大きく異なるものと考えられる。そこで、加速度の極性のみを変えて入力する実験も行った。南側(張り出し側)に大きく応答する極性をもつ波を順波、その逆の極性をもつ地震波を逆波とする。

2.2 初期設定

準動的荷重実験に用いた初期設定値を表-4に示す。

(1) 入力地震波：
兵庫県南部地震の際に

神戸海洋気象台で観測された加速度波形のNS成分、UD成分を使用した。図-2に使用した地震波を示す。観測された加速度波形のNS成分の初期微動および後半部分を省略し、時間間隔を0.01秒として15秒間入力した。この場合、最大加速度の生起時刻は2.55秒時となっている。UD成分についてもNS成分と同様の部分を使用している。水平方向入力地震波の最大加速度の設定においては、参考文献(2)(道路橋示方書(V耐震設計編:H8))に準拠し、対象とする橋をB種の橋、地震動をタイプIIと設定した。さらに、対象構造物が $\delta_u = 5 \cdot \delta_y$ (δ_u :終局変位、 δ_y :降伏変位)で設計されたものとして等価水平震度 k_{he} を求めたところ $k_{he} = 0.80$ となった。そこで、実構造物と供試体の耐荷能力を考慮した相似則を適用して、供試体の設計地震力を仮想質量で除した加速度の値がこの $k_{he} (=0.80)$ に相当すると考え、比例計算により加速度レベル

表-1 供試体の一覧と諸元

供試体名	目標コンクリート	軸応力度	プレストレス	全軸圧縮応力度比	軸方向鋼材比(%)		帯鉄筋比(%)
	強度(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(%) ※1	鉄筋	PC鋼棒	
US-LR-C	35	1	0	2.9	1.43	0	0.53
US-LR-C-R	35	1	0	2.9	1.43	0	0.53
US-LR-V	35	1	0	2.9	1.43	0	0.53
US-LP-C	35	1	2.72	10.6	0.79	0.35	0.53
US-LP-C-R	35	1	2.72	10.6	0.79	0.35	0.53
US-LP-V	35	1	2.72	10.6	0.79	0.35	0.53

※1) ((軸応力度+プレストレス)/コンクリート強度)×100(%)
 US:非対称配筋 C:軸力一定
 L:逆L字形 V:軸力変動
 R:RC柱 R:逆波
 P:PC柱

表-2 鋼材の力学特性

種類	鉄筋			PCより線			
	降伏応力(MPa)	引張強度(MPa)	弾性係数(GPa)	種類	降伏荷重(kN)	引張荷重(kN)	弾性係数(GPa)
D13	408	588	206	SWPR7B(φ15.2)	239	270	196

表-3 荷重方法

供試体名	構造	断面形状	荷重方法	地震波	鉛直荷重
US-LR-C	RC	非対称配筋	準動的荷重	順波	一定
US-LR-C-R				逆波	
US-LR-V				順波	
US-LP-C	PC	非対称配筋	準動的荷重	順波	一定
US-LP-C-R				逆波	
US-LP-V				順波	

表-4 準動的荷重実験の初期設定値

供試体名	固有周期	初期初期剛性	仮想質量	減衰定数	水平入力最大加速度
RCタイプ	0.3秒	16.7kN/mm	38t	0.03※	277gal(818gal相当)
PCタイプ		35.3kN/mm	80t		211gal(818gal相当)

※剛性が初期剛性の25%になるまでは0.03、それ以後は0

818galに相当する入力最大加速度を求めた。鉛直荷重の載荷に関しては、鉛直方向の応答による増幅がほとんどないと考え、鉛直方向の加速度による偏心鉛直荷重の変動のみを考慮した。すなわち、入力加速度の倍率を1倍として初期値の157kNを基点に計算した鉛直荷重を変動して載荷した。

(2) 初期剛性：今回、静的正負繰返し載荷実験を行っていないことから、初期剛性 K は、ファイバーモデルによる解析結果により得られた荷重-変位曲線を用いて求めた。実験に用いた逆L字形柱は、偏心鉛直荷重を載荷した時点でひび割れが発生するために、初期剛性は、鉛直荷重載荷前と張り出し側降伏荷重の1/2の点を結ぶ剛性とした。

(3) 固有周期と仮想質量：固有周期 T は、供試体のひび割れ前の初期弾性周期とし、作用地震波の加速度応答スペクトルを参照して全供試体で $T=0.3$ 秒と統一した。仮想質量 M は、部材を1質点1自由度にモデル化していることから、固有周期と初期剛性を用いて求めた。

(4) 減衰定数：水平方向の減衰定数 h は既往の研究成果を参考にし、剛性が初期剛性の25%になるまでは $h=0.03$ とし、それ以後は $h=0$ とした。

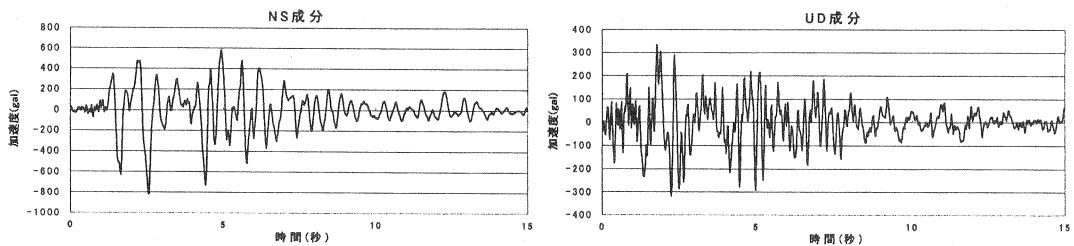


図-2 入力地震波

3. 実験結果と考察

(1) 非対称配筋による挙動の特徴

表-5に各供試体の最大応答変位および1.5秒時の残留変位を示す。図-3には実験により得られた供試体US-LR-CとUS-LP-Cの時刻歴応答変位曲線を示す。また、比較のために、作用させた地震波も同一のものであるが、鋼材配置を対称とした実験結果⁽¹⁾も合わせて示す。RC、PCタイプとも、本研究の供試体の張り出し(正)側の鋼材量は、その逆の負側のおよそ1/3であるが、図-3に示すように

表-5 最大応答変位・残留変位

供試体名	最大応答変位		残留変位
	正側	負側	
US-LR-C	44.9	-1.6	37.7
US-LR-C-R	39.3	-8.9	32.9
US-LR-V	51.4	-2.8	43.7
US-LP-C	38.8	-7.3	13.4
US-LP-C-R	35.7	-2.5	11.8
US-LP-V	36.0	-9.7	13.0

(単位:mm)

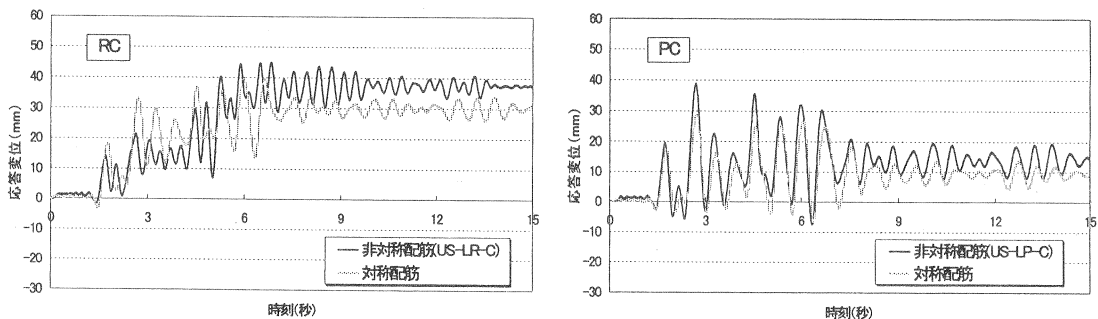


図-3 時刻歴応答変位曲線

鋼材量配置を対称として設計された部材と地震応答挙動に特徴的な差はなく、両断面とも大きな地震力が作用すると共に張り出し(正)側にシフトし、負側への応答はほとんど生じなかった。

(2) 変動鉛直荷重の影響

偏心鉛直荷重が作用地震波の上下動とともに変動する場合の影響を見るために、図-4に時刻歴応答変位の比較を示す。PCタイプにおいては、鉛直荷重の変動の有無にかかわらず、全く同じ挙動を示している。また、RCタイプにおいても5秒付近までは全く同じ挙動を示した。その後、応答周期に差は見られないが鉛直荷重の変動の影響により応答の張り出し側へのシフト量が若干大きくなり、それにともない最大応答変位も増大している。これらの結果から判断すると、今回の実験の範囲内では、偏心鉛直荷重の変動は、非対称配筋を持つ逆L字形橋脚の地震応答挙動に致命的な影響を与えるものではないと言える。

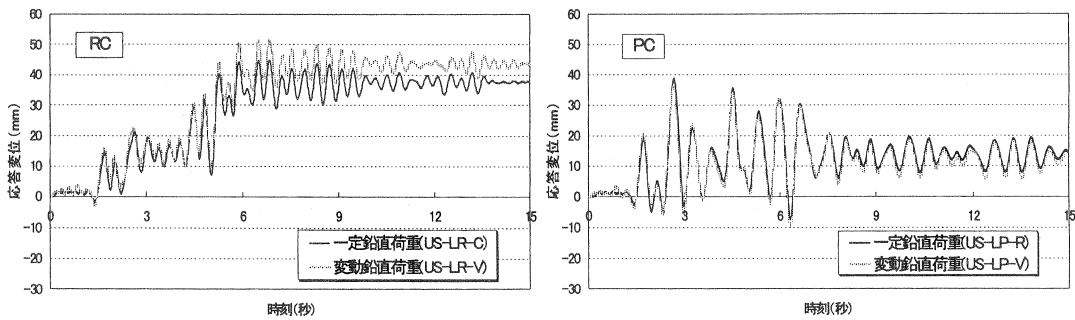


図-4 時刻歴応答変位曲線

(3) 地震波の極性の違いによる影響

作用地震波の極性の相違による時刻歴応答変位曲線の比較を構造タイプ別に図-5に示す。RC、PCタイプとも当然ながら、順波と逆波で得られる応答変位の位相が逆転しているが、応答の中心の偏心側へのシフト量は、両波で大きな差は見られない。一方、正側と負側それぞれの最大応答変位の絶対値を合わせた値を全振幅とすれば、両構造タイプとも逆波の方がその値は大きくなっている。特に、PCタイプにおいてはその影響が顕著で、2.68秒時に負側に大きく応答し、この時張り出し側の主鉄筋は降伏したが、PC鋼材の高い復元力特性および偏心鉛直荷重の影響で、正側にも大きく応答し最終的には応答変位は正側にシフトした。このため、全振幅は順波と逆波で約1.5倍も異なる結果となった。実際の地震波の極性は予測できないため、PC橋脚において負側にも大きく応答したという結果は、今後PC構造の逆L字形橋脚を設計するうえで注意すべき課題であると思われる。

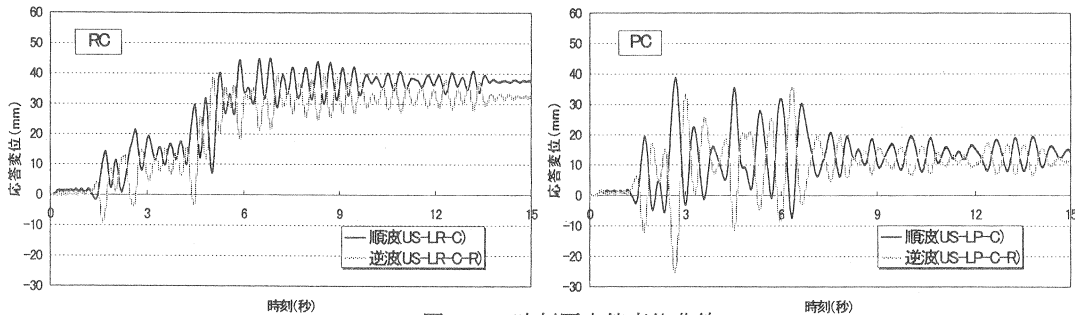


図-5 時刻歴応答変位曲線

(4) PC 橋脚と RC 橋脚の比較

一定鉛直荷重で順波を作用させた、RC構造の供試体 US-LR-C と PC構造の US-LP-C において得られた復元力-応答変位関係の比較を図-6 に、時刻歴応答変位曲線の比較を図-7 にそれぞれ示す。これまでの研究結果と同様に PC 構造の US-LP-C が RC 構造の US-LR-C より残留変位が小さく原点指向性が高いことが明確に示されている。表-5 に示すように、載荷終了後の残留変位は、RC 構造の US-LR-C では 37.7mm、PC 構造の US-LP-C では 13.4mm と約 1/3 となっている。今回の供試体は、対象構造物の終局変位を $\delta_u = 5 \cdot \delta_y$ とし道路橋示方書に準じて設計を行ったわけであるが、PC 橋脚の実験後の残留変位が回転角で 1/100 以下の値となっており、道路橋示方書での安全性の判定の条件を満たしている。載荷終了後の基部の損傷状況を写真-1 に示す。RC 橋脚では曲げひび割れが多く残っているのに対し、PC 橋脚では最大応答変位時に見られたひびもほぼふさがり、この点からみても PC 橋脚は優れているといえる。これらのことより、常時偏心鉛直荷重が作用し、応答変位が張り出し側にシフトする構造においては、PC 構造は極めて有効であるといえる。

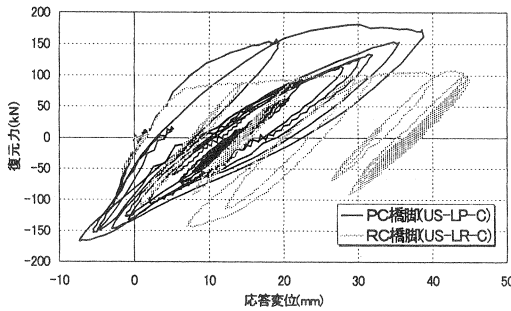


図-6 復元力-変位曲線

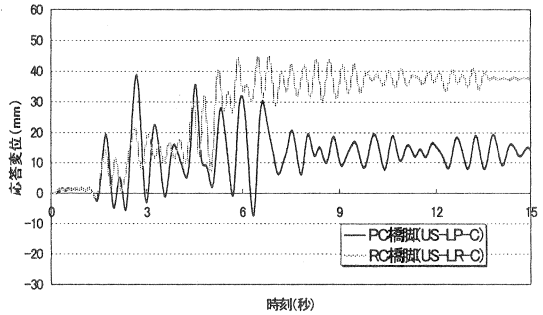


図-7 時刻歴応答変位曲線

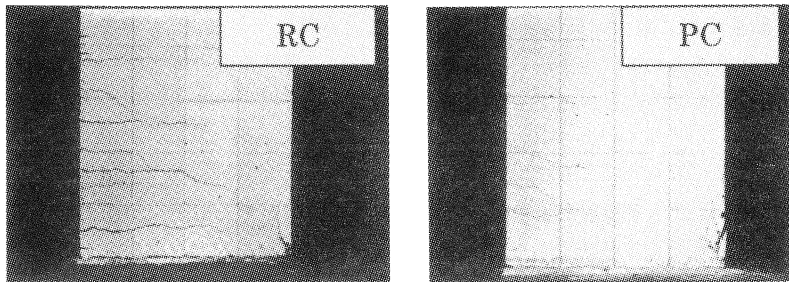


写真-1 基部の損傷状況

4. 応答挙動の解析

PCタイプの供試体について時刻歴応答解析を行った。図-8 に解析に用いた復元力モデルを示す。モデルは、基本的には通常よく用いられている鉄筋降伏後の除荷時剛性を塑性率により低下させる剛性低下型モデルである。特徴としては、スケルトンカーブを多数の直線で表し、鉄筋降伏後の載荷と除荷時剛性を任意の荷重で変化させているところである。この解析モデルは、一般のRC橋脚には高い精度で解が得られることが確認されている。今回は、ファイバーモデルで得られた荷重-変位曲線を基にし、モデルに偏心鉛直力を考慮した正負非対称な復元力特性モデルを採用し、逆L字形橋脚に用いた。図-9 に、解析の結果と実験結果を比較した図を示す。解析結果は、全体的に実験で得られた応答挙動をよく表しており、最大応答変位

や応答周期、および振動の中心が張り出し側にシフトしている様子なども再現できている。

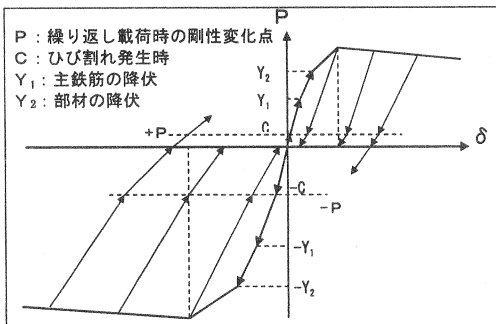


図-8 復元力モデル

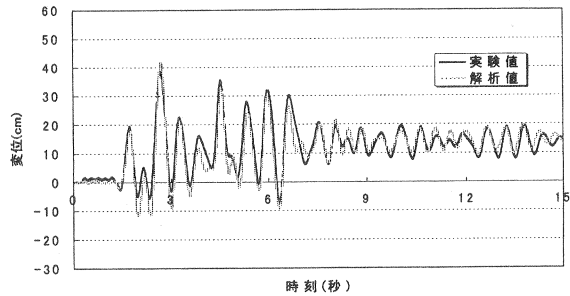


図-9 実験値と解析値の比較

5. 結論

本研究より得られた結論を以下に示す。

- (1) 柱部の断面を非対称な鋼材配置とした、逆L字形鉄筋コンクリートおよびプレストレストコンクリート橋脚の地震時の応答挙動を把握することができた。非対称配置した構造においても、対称配置した場合と同様に応答が早期に張り出し側にシフトし、逆側にはほとんど応答しないことが確認できた。ただし、PC橋脚は作用地震波の極性の影響を大きく受け、張り出し側と逆の側にも大きく応答する恐れのあることが示された。
- (2) 非対称鋼材配置された逆L字形橋脚においても、PC橋脚はRC橋脚に比べ残留変位の抑制、ひび割れの抑制という点で優れた性能を有することを確認できた。
- (3) 非対称鋼材配置された逆L字形橋脚において、地震波の鉛直成分を作用させる事により偏心鉛直荷重が変動した場合でも、変動しないときと比べて応答変位および残留変位に違いはなく、偏心鉛直荷重の影響が耐荷挙動に重大な影響をおよぼさないことが確認できた。
- (4) 正負非対称な復元力モデルを用いてPC橋脚について地震時応答解析を行った結果、応答の中心の張り出し側へのシフトなど、逆L字形に特有の応答挙動を再現することができた。

謝辞

供試体の製作において、(株)富士ピーエスの渡辺氏に多大なご協力を頂いた。また、実験の実施にあたり横浜国立大学文部技官の森下豊氏ならびに大学院生の池端信哉氏に協力を得た。ここに、関係各位に謝辞を表します。

参考文献

- (1) 池端信哉、坪井聡、山口隆裕、池田尚治：上下動と水平動を受ける逆L字形コンクリート橋脚の地震応答特性に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.22、No.3、pp1327-1332、2000
- (2) 道路橋示方書・同解説V耐震設計編、(社)日本道路橋会、1996
- (3) 川島一彦、運上茂樹、長島博之、飯田寛之、向秀毅、「RC橋脚の動的耐力に関する実験的研究(その5) 偏心曲げを受けるRC橋脚の動的耐力・変形性能」、土木研究所資料、No. 3319、1995
- (4) 池田尚治、森拓也、吉岡民夫、「プレストレストコンクリート橋脚の耐震性に関する研究」、プレストレストコンクリート、Vol. 40、No. 5、1998