

論文

[1110] クサビの拡張力を受けるコンクリートの破壊挙動に関する研究

正会員 ○前田 克年 (名古屋工業大学大学院)
 正会員 上原 匠 (名古屋工業大学大学院)
 正会員 梅原 秀哲 (名古屋工業大学工学部)
 正会員 吉田 弥智 (名古屋工業大学工学部)

1. まえがき

場所打ちコンクリート杭の杭頭部には、施工時にスライムやレイタンスが発生し品質低下をまねく。また、構造物と剛結するためにもその部分を除去する杭頭処理作業が必要となってくる。この杭頭処理工法の1つとして、孔中にクサビを貫入して、その拡張力でコンクリートにひびわれを生じさせ、杭頭部を引き抜き取り除く工法が開発されている。しかし、この方法はほとんど経験に基づいて行われており、この作業を効率よく合理的に行うにはコンクリートの破壊荷重に影響を及ぼす要因を明らかにする必要がある。なお、この工法は径が600～1500mm程度の杭に対して有効である。

そこでこれまでに、実物大の供試体を用いて破壊荷重に影響を及ぼす要因を検討するとともに、破壊荷重に対してクサビ角や孔深等の要因がどのように影響を及ぼしているかを検討するためのモデル実験を行ってきた。^{1) 2)} 本研究では、さらに孔先端部の形状等を考慮したモデル実験を行うとともに、有限要素法による解析を行い、これまでに行ったモデル実験をも含めた実験結果と比較検討することにより、クサビの拡張力がコンクリートの破壊に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。そして、有限要素法による解析を実物大供試体にも適用し、場所打ちコンクリート杭の破壊挙動を推定することを試みた。

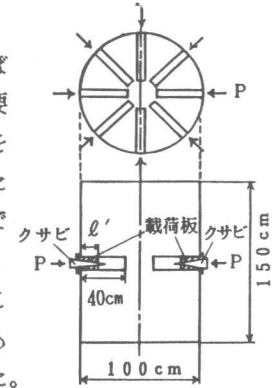


図-1 実物大実験の実験装置

2.1 実験の概要

2.1 実物大実験の概略

図-1に示すような、半径50cm高さ150cmの円筒型の供試体を作製し、静的に4または8方向から油圧ジャッキにより水平にクサビを貫入させて、破壊にいたるまで実験を行った。その結果を表-1に示す。実験結果よりクサビ角 $\phi = 4^\circ$ 、載荷長 $l' = 20\text{cm}$ 、孔数 $n = 8$ 個の場合が最も効率よく最小の荷重で破壊する要因であることが明らかになった。なお、場所打ちコンクリート杭は鉄筋を有するが本工法の場合、杭頭部の鉄筋はシール材で被覆され、コンクリートとの付着を切った状態であり、実験結果(供試体番号6)より破壊への影響はほとんどないことが明らか

表-1 実物大実験の結果

供試体番号	クサビ角 ϕ (°)	孔深 l (cm)	載荷長 l' (cm)	孔径 D (cm)	孔数 n (個)	圧縮強度 σ_c (kg/cm ²)	破壊荷重 P (kg)	P/σ_c
1			20		4	384	9500	24.74
2	4		10			390	4850	12.44
3		40	10	4	8	325	3900	12.00
4			20			343	5800	16.91
5	8		20			351	5060	14.42
6	8	40	20	4	8	380	4800	12.63

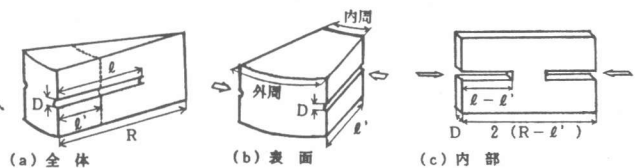


図-2 実物大供試体の分割方法

かとなった。したがって、本研究では無筋コンクリートについて検討を行うことにした。

2.2 モデル実験Ⅰの概略

実物大実験よりクサビの拡張力を受ける場所打ちコンクリート杭の破壊挙動は、図-2に示すように表面方向と内部方向の2方向に分けられ、これら表面と内部の破壊が組合わさったものであると判断された。そこで、表面の破壊を表すモデル図-2

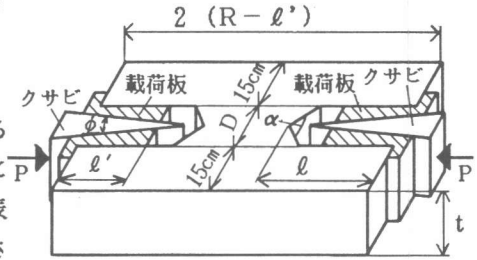


図-3 供試体寸法

(b) と内部の破壊を表すモデル

図-2(c) とに分けて考え、それぞれの影響を調べることにした。しかし、表面の部分は孔深が小さい場合、また内部は供試体の幅がせまい場合と考えることによって、図-3に示すようなモデル供試体を作製し、その適用方向を変えることでこれらの破壊挙動を同時に把握することができる。モデル実験Ⅰでは、破壊におよぼす要因としてクサビ角(ϕ)、孔深(l)、載荷長(l')の3個に孔径(D)と供試体の幅(t)を付け加えて、これらの要因を組合わせた20個の実験を行った。実験では、荷重およびクサビの貫入量を計測するとともに、コンクリート表面にゲージをはるることによってひびわれ状況を観察した。その結果を表-2(供試体番号1~20)に示す。実験結果より最も効率よく最小の荷重で破壊する要因は、ク

表-2 実験結果および解析結果

供試体番号	クサビ角 ϕ ($^{\circ}$)	幅 t (cm)	孔径 D (cm)	載荷長 l' (cm)	孔深 l (cm)	孔先端部の形状	圧縮強度 σ_c (kg/cm 2)	破壊荷重		傾き		$\frac{P}{P_0}$	
								実験値 P (kg)	解析値 P_0 (kg)	実験値 (kg/mm)	解析値 (kg/mm)		
1	4	20	3.0	5.0	10	○	316	690	658	460	405	1.05	
2					15	○	285	620	534	270	410	1.16	
3					20	○	277	330	487	194	408	0.68	
4					7.5	○	334	340	490	155	376	0.69	
5					10	○	316	425	750	283	463	0.57	
6			15	○	334	400	755	174	470	0.53			
7			20	○	301	245	607	111	468	0.40			
8			7.5	○	277	320	349	139	195	0.92			
9			40	3.0	5.0	10	○	314	1050	1316	875	811	0.80
10						15	○	351	1040	1230	650	816	0.85
11		20				○	332	500	981	1250	822	0.51	
12		7.5				○	346	830	911	244	754	0.91	
13		5.0				○	338	1225	1259	261	651	0.97	
14		7.5		○	285	655	699	252	391	0.94			
15		4.5		5.0	10	○	305	825	671	688	544	1.23	
16					15	○	295	605	468	465	584	1.29	
17					20	○	295	500	398	1000	575	1.25	
18					10	○	345	1130	971	305	505	1.16	
19			15		○	275	520	474	208	576	1.10		
20		20	○	282	245	504	408	551	0.49				
21	8	20	4.5	5.0	45	○	373	805	809	447	509	1.00	
22					90			821	740	456	492	1.11	
23					135			790	737	527	549	1.07	
24					45			1047	1019	616	496	1.03	
25					90			996	916	623	508	1.09	
26			135	795	743	530	549	1.07					
27			45	910	990	337	515	1.08					
28			90	1013	1084	675	511	0.93					
29			135	780	809	488	545	0.96					

サビ角 $\phi = 4^{\circ}$ 、孔深 $l = 20\text{cm}$ 、載荷長 $l' = 5.0\text{cm}$ 、孔径 $D = 4.5\text{cm}$ 、供試体の幅 $t = 20\text{cm}$ であることが明らかになった。

2.3 モデル実験Ⅱの概略

実験Ⅱでは、孔先端部の形状が破壊荷重に及ぼす影響を調べるために、 ϕ 、 t 、 D 、 l' を一定とし、破壊要因を孔深(l)と孔先端部の角度(α)としてこれらを組み合わせた9個の実験を行った。その結果を表-2(供試体番号21~29)に示す。孔深(l)については、 $l = 15 \sim 17.5\text{cm}$ では破壊荷重は減少したが、 $l = 12.5 \sim 15\text{cm}$ では角度(α)の違いにより異なる傾向を示した。また、 $\alpha = 135^{\circ}$ では孔深による影響はほとんど見られなかった。孔先端部の角度(α)については、 $\alpha = 90^{\circ} \sim 135^{\circ}$ では破壊荷重は減少したが、 $\alpha = 45^{\circ} \sim 90^{\circ}$ では破壊荷重は孔深の

違いにより異なる傾向を示した。また、 $\ell = 17.5\text{cm}$ では角度による影響はほとんど見られなかった。次に、図-4に荷重・貫入量曲線の一例を示す。この図から明らかなように、貫入量が0~1.0mmのところはクサビのあそびを示すもので、この部分を除けば荷重と貫入量の関係はほぼ直線で表される。ところで、ほとんどの供試体において、ひびわれは孔先端部よりもう一方の孔先端部に向けて発生し、ひびわれ発生後すぐに破壊に至ったが、破壊は、荷重・貫入量曲線の傾きを示す直線上で生じることが判明した。

3. 解析の概要

3.1 解析方法

解析は、有限要素法を用いて、図-5に示すようにモデル供試体の上半分を対象として行った。なお、解析モデルの下端の拘束条件は、モデル供試体全体の解析結果と比較し、中央の1点を固定支承、その他の節点を単純支承とした。なお、この解析プログラムではひびわれは各要素において最大主応力がコンクリートの引張強度を越えた時に、最大主応力方向に垂直に発生すると仮定し、ひびわれ発生後は、最大主応力方向の剛性を零として、逐次計算を行うことにより解を求めた。また、荷重方法はクサビの上端3点に強制変位を与え、その点の反力を載荷荷重とした。

3.2 境界要素

クサビと載荷板との間の力の伝達を考えると、クサビの貫入力に対しその垂直方向に拡張力が生じる。貫入力に拡張力として伝達されるには、クサビと載荷板との間に力が生じる必要がある。そこで、本解析では図-5に示すようにクサビと載荷板との間に境界要素を使用した。この境界要素に作用する力として、2つの力が考えられる。1つは摩擦力であり、もう1つは剥離力である。そしてプログラムではこの2つの力を以下のように表すことにした。

$$\text{摩擦力} = A \times \text{ズレ}$$

$$\text{剥離力} = B \times \text{剥離量} \quad (\text{剥離量} \leq 0), \quad 0 \quad (\text{剥離量} > 0)$$

この関係式を用いて解析を行うため、変数A (kg/cmf)、B (kg/cmf)を実験と解析との比較により次のように決定した。図-6に示すような実験装置を作製し、表-3に示す6種類についてクサビを貫入させることにより発生する拡張力を左右の2つのロードセルで測定し、貫入力と拡張力の関係を調べた。一方、解析では図-7に示すような要素分割図を用いて変数A、Bを種々に変化させた。なお、クサビ上端3点に強制変位を与え反力を貫入力とし、供試体の左右

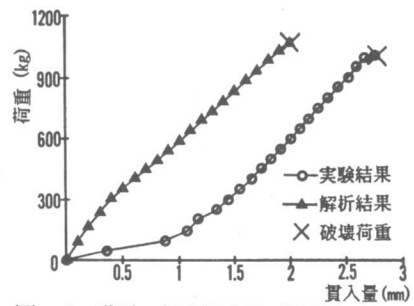


図-4 荷重-貫入量曲線 (供試体番号28)

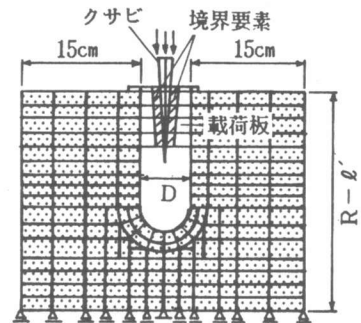


図-5 解析モデル図

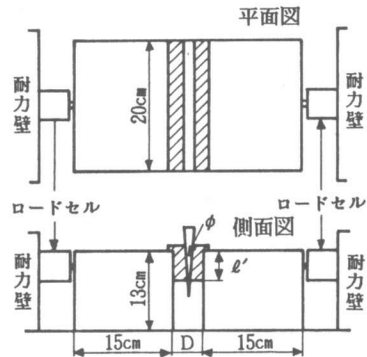


図-6 実験概要図

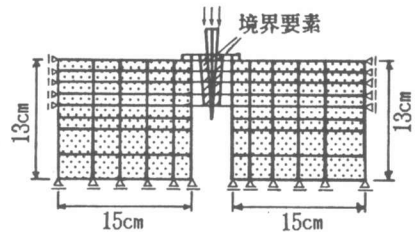


図-7 要素分割図

端の5節点の反力を拡張力として求めた。

実験結果および解析結果の一例を図-8に示す。そして両方の結果に示される貫入量と拡張力の関係がほぼ一致した時の変数A、Bを表-3に示す。これらの変数A、Bを用いてモデル実験における供試体29個について解析を行った。

3.3 解析結果

解析結果を表-2に示す。なお実験では、ひびわれは孔先端部よりもう一方の孔先端部に向けて発生し、ひびわれ発生後すぐに破壊に至ったので、解析ではひびわれが図-5に示す解析モデルの最下段の要素に到達した時の荷重を破壊荷重Pとした。いずれの供試体でも破壊荷重は実験値とほぼ一致した値であり、 P/P_0 の値の平均値は0.93で標準偏差が0.241である。また、ひびわれ発生状況も実験結果とほぼ一致した。さらに、図-4に示すように解析においても荷重と貫入量の関係は直線関係であることが明らかとなった。そこで、この直線部分の傾きの比較を行ったが、表-2に示すように必ずしも十分な一致が見られなかった。この理由として、荷重方法が実験では連続的であるのに対し、解析ではステップごとに断続的に強制変位を与える形で行ったため荷重が大きくなり、ほとんどの場合において解析値の傾きが大きくなったものと思われる。しかし、直線関係であることは示されており、定性的には解析により十分挙動が推定できることを表している。

4. 実物大の供試体の解析

すでに述べたように、実物大の供試体は表面部分と内部部分に分けられ、これら2つの部分破壊が組み合わさったものと考えられる。したがって、解析においても表面部分と内部部分でそれぞれ解析モデルを分けて解析を行った。なお、ここでは表面部分と内部部分のそれぞれの破壊荷重の和が全体の破壊荷重であると仮定して求めることにした。すなわち図-2に示す全体部分が破壊するには、引張破壊領域が内部部分だけでなく表面部分にも進展しなければならず、それぞれの領域で破壊が独立して生じると考えた。

4.1 表面部分

表面部分は、図-9に示すように図-2(b)をモデル化し、モデル供試体の解析と同様の形状で、図-10に示すような要素分割図を用いて解析を行った。なお、このモデルは実際は扇形となるが、解析では内周と外周の平均を求めモデルの長さとし

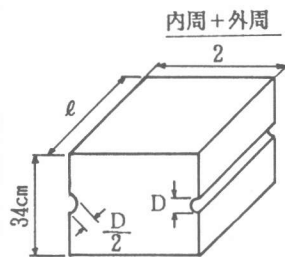


図-9 表面部分のモデル化

た。また、上端はコンクリートの自重を考慮し、下端は実験時が固定であることを考慮して両方ともY方向のみを固定し

表-3 変数A、B

クサビ角 (ϕ)	孔 径 D (cm)	載荷長 l (cm)	変数 A	変数 B
4	3.0	5.0	70.0	1.0×10^7
		7.5	50.0	1.0×10^7
	4.5	5.0	70.0	1.0×10^6
		7.5	50.0	1.0×10^7
8	3.0	5.0	90.0	1.0×10^7
	4.5	5.0	90.0	1.0×10^7

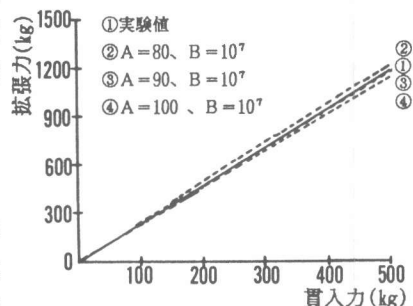


図-8 実験結果および解析結果

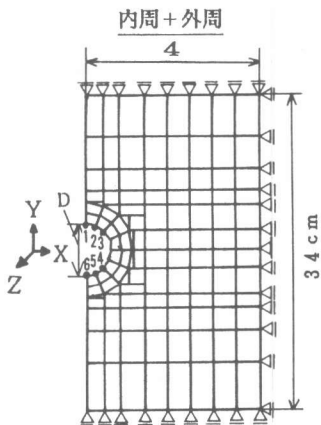


図-10 表面部分の解析モデル図

た。荷重方法は、実物大の実験のクサビ貫入方向が、表面部分のモデルに対して垂直方向（図-10に示すZ軸方向）であるため、この表面部分のモデルでは表すことができない。そこで、実際に載荷板が当たる孔上下部のそれぞれ3節点（図-10に示す1～6）に強制変位を与えて解析を行い、破壊荷重を示した時の強制変位を求めた。なお、強制変位を与えた節点に生じる反力は、コンクリートの要素にひびわれが発生する以前では与えた変位方向と同じ方向で表される。その反力はクサビの拡張力と考えられ、その向きが与えた変位方向と逆になった時、すなわち、クサビの拡張力が0より小さくなった時にコンクリートの要素が破壊したと判断した。次に図-11に示すように、表面モデルのクサビ貫入方向に対して平行な平面を考え、クサビの貫入力と載荷板がコンクリートに接する節点（図-11に示す1～12）の変位量との関係を調べ、その関係式と表面部分のモデルが破壊したと考えられる時の強制変位量から破壊荷重 P_1 を推定した。

4.2 内部部分

内部部分は、図-12に示すように図-2(c)をモデル化した。ただし、厚さを示す内周/2は、図-2

(c)で表された孔径 D だけにする

とクサビの貫入に対する垂直縦方向の影響しか考慮できない。そこで、垂直横方向も考慮するため、中心と内周の平均値、すなわち内周/2をとった。そして、図-13に示す要素分割図を用いて解析を行った。実際の内部部分は力が直接加わるのではなく、クサビの貫入による拡張力はまず表面部分に伝わり、それが内部部分に伝わる。したがって、解析では図-13に示すように左端を10cmづつ余分に考え、その部分にクサビと載荷板を入れて、表面部分とのつながりを考慮するとともに、クサビ左端3点に強制変位を与えその反力を載荷荷重とした。なお、破壊荷重 P_2 はひびわれが図-13に示す要素分割図の右端に到達した時の荷重とした。

4.3 解析結果

表-4に、解析結果及び表面部分と内部部分を組み合わせた実物大供試体の破壊荷重の推定値を示す。破壊荷重の推定値は実験値とほとんど一致した値であり、 $P/(P_1 + P_2)$ の平均値は0.98で、標準偏差が0.017で

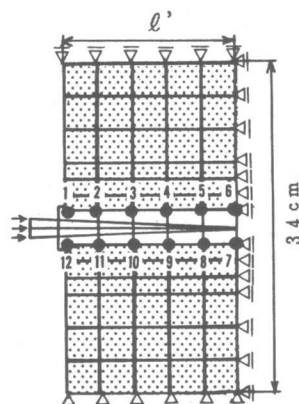


図-11 表面部分に垂直な面の解析モデル図

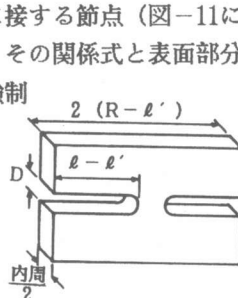


図-12 内部部分のモデル化

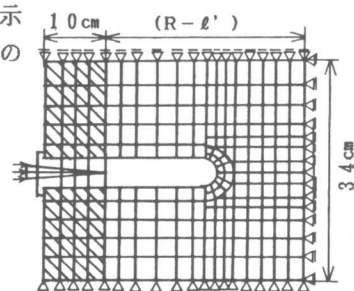


図-13 内部部分の解析モデル図

表-4 実物大の供試体の解析結果

供試体番号	表面モデル		内部モデル	実物大(表面+内部)		P / (P ₁ + P ₂)
	変位量 μ ($\times 10^{-2}$ cm)	破壊荷重 P ₁ (kg)	破壊荷重 P ₂ (kg)	解析値 (P ₁ + P ₂) (kg)	実験値 P (kg)	
1	20.5	8132	1398	9530	9500	1.00
2	21.0	3003	2020	5023	4850	0.97
3	18.5	3241	692	3933	3900	0.99
4	19.0	3470	2302	5772	5800	1.00
5	19.0	4588	657	5245	5060	0.96

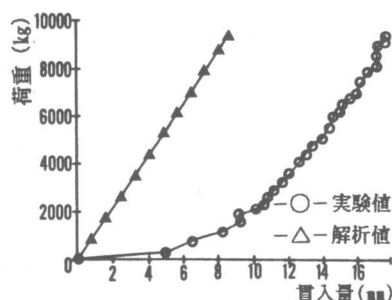


図-14 荷重-貫入量曲線(供試体番号1)

ある。また、荷重-貫入量曲線の一例を図-14に示す。なお、解析における荷重は表面部分と内部部分のそれぞれの破壊荷重の和をとり、貫入量も表面部分と内部部分のそれぞれの貫入量をとった。すなわち、破壊荷重の場合と同様に、それぞれの領域で破壊が独立して生じると考えたので、貫入量もそれぞれの和を全体の貫入量とした。モデル実験における荷重-貫入量曲線で見られたように、荷重と貫入量は実験結果のクサビのあそび部分を除けばほぼ直線関係であり、解析においても十分にその挙動が推定できると言えよう。以上のことから表面部分と内部部分に分けることにより十分に破壊挙動を推定できることが明らかとなった。

5. 合理的な破壊方法の検討

実際の杭頭を最も効率よく破壊する方法を検討するために、破壊要因を変えて解析を行った。なお、実際の施工を考慮し、また実物大の実験結果から判断して、クサビ角 $\phi = 4^\circ$ 、孔深 $l = 40\text{cm}$ 、孔数 = 8 は一定として、載荷長 l' を 5、15、30、40cm の 4 種類に変えて解析を行った。また、コンクリートの圧縮強度は 300kg/cm^2 とした。その結果を表-5 に示す。なお、 $l' = 10、20\text{cm}$ は実物大供試体の解析結果を用いている。それぞれを比較するため、破壊荷重の推定値を圧縮強度で除した値を示す。なお、破壊荷重はコンクリートの引張強度に大きく影響され、一般にこの引張強度が圧縮強度の関数で表されるとされているため $(P_1 + P_2) / \sigma_c$ を示した。この解析結果より、載荷長 $l' = 20\text{cm}$ の場合が最も効率よく最小の荷重で破壊することが明らかとなり、これは実物大実験の結果と同じ傾向であることを示している。

表-5 解析結果

載荷長 l' (cm)	表面モデル	内部モデル	表面+内部	圧縮強度 σ_c (kg)	$\frac{P_1 + P_2}{\sigma_c}$
	破壊荷重 P_1 (kg)	破壊荷重 P_2 (kg)	解析値 $(P_1 + P_2)$ (kg)		
5	1081	3392	4473	300	14.91
10	3003	2020	5023	390	12.88
15	2595	1574	4169	300	13.90
20	3241	692	3933	325	12.10
30	4625	862	5487	300	18.29
40	5693	373	6066	300	20.22

($\phi = 4^\circ$ 、 $l = 40\text{cm}$ 、 $D = 4\text{cm}$ 、 $n = 8$ 個)

6. 結論

本研究より得られた結論を要約すると以下ようになる。

- 1) 実物大の供試体による実験およびモデル実験の結果から、破壊荷重に影響を及ぼす要因として特にクサビ角 ϕ および載荷長 l' の 2 つが重要であることが明らかとなった。
- 2) モデル供試体を解析する際にクサビと載荷板との境界に摩擦力と剝離力を表す境界要素を適用し、その係数 A、B を実験と解析の比較により決定した。その結果を用いてモデル供試体の解析をおこなった結果、モデル供試体の破壊荷重、ひびわれ発生状況など、破壊に至るまでの挙動をほぼ推定できることが明らかとなった。
- 3) モデル供試体の解析結果をもとにして、この解析を実物大の供試体にも適用するため、実物大供試体を表面部分と内部部分に分け、それらを別々に解析し重ね合わせた結果、破壊荷重を十分な精度で推定できることが明らかとなった。したがって、解析によって実際の杭頭処理においてその破壊荷重を推定できる見通しが得られたと言えよう。さらに、実際の杭頭を最も効率よく最小の荷重で破壊する要因は、クサビ角 $\phi = 4^\circ$ 、載荷長 $l' = 20\text{cm}$ 、孔数 $n = 8$ 個の場合であることが判明した。

参考文献

- 1) 吉田、梅原、深津「場所打ちコンクリート杭のクサビを利用した杭頭処理に関する研究」第 5 回コンクリート工年次講演会講演論文集 1983。
- 2) 吉田、梅原、檜崎「クサビの拡張力を受けるコンクリートの破壊機構に関する基礎的研究」第 6 回コンクリート工年次講演会講演論文集 1984。