

実大杭試験にみられる急速載荷試験の特性 —スタナミック試験での事例—

加藤一志¹・日下部治²・松本樹典³

¹正会員 工修 大成建設(株)横浜支店 課長 (〒231 神奈川県横浜市中区長者町6-96-2)

²正会員 Ph.D 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

³正会員 工博 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科 (〒920 石川県金沢市小立野2-40-20)

杭の性能確認試験としての急速載荷試験の適用性の検討を目的として、実大杭によるスタナミック試験を実施し、静的載荷試験の結果と比較した。これに加え、試験条件の異なる10例の実大杭の載荷試験結果を収集し、載荷特性と試験結果に含まれる動的効果の大きさを明らかにした。さらに、試験条件と試験結果の関係を整理し、動的効果の影響因子には、杭体の貫入速度、載荷荷重と降伏荷重の大小関係、杭の施工法、杭の剛性、土質条件、地下水の有無等があることが解った。急速載荷試験の結果から動的効果を差し引くためには、これらの動的効果の影響因子を考慮した解析が必要であることを示した。

Key Words: pile, statnamic load test, static load test, dynamic effect, field test

1. はじめに

構造物の設計に関する最近の国際的な動きは、従来の仕様を規定する設計法から性能規定に基づく設計法、いわゆる性能設計へ移行する傾向にあり、わが国でも性能設計の導入に向け検討が進められている。また、性能設計の手法のひとつである限界状態設計法は、基礎設計の分野においても各機関で設計基準への適用が試みられている¹⁾。性能設計においては、性能を確認できる試験が不可欠で、その試験方法を確立することが重要な課題となる。杭基礎に関する性能確認試験として行なう鉛直載荷試験法は、信頼性の高い方法であるとともに、作業工程を極力遅延させず現場で迅速に実施でき、簡易で安価な試験であることが求められる。

これらの要求を満足する試験方法として、杭の急速載荷試験が挙げられる。急速載荷試験は、0.1～0.2秒の載荷継続時間で杭を急速に鉛直載荷する試験である。この載荷方法に用いる試験装置にはいくつものものが考案されている^{2),3)}が、実用化され数多く実工事で実施されているものにスタナミック試験装置がある。スタナミック試験装置は、載荷荷重の5%程度の反力体を推進火薬のガス圧により約20Gの加速度で上方に打上げ、その反力を杭頭に

載荷するものである⁴⁾。急速載荷試験方法の内、検討に使用できる試験データの蓄積がなされているのは、現在ところスタナミック試験のみであると言えよう。そこで、本研究ではスタナミック試験に限定した杭の急速載荷試験(以後STNと略す)を検討対象とする。

STN時の杭体は、静的載荷試験(以後SLTと略す)と打撃による動的載荷試験(以後DLTと略す)の中間の挙動を示す。すなわち、DLTほどではないが、杭体は速度、加速度を持って貫入するので、SLTと比べ動的効果は無視しえない。STNにより静的な荷重～変位関係を求めるには、試験結果から動的効果の影響を差し引く解析が必要である⁵⁾。

これまでに日本では40例以上のSTNが実施されている⁶⁾が、それらは各試験ごとに個別の検討がされているのみで、STNの試験特性について系統的な評価はなされていない。STNを杭の性能確認試験としての載荷試験方法として確立するには、地盤条件、杭種、施工法など試験条件の異なるSTNの試験データを検討し、その試験特性を明らかにする必要がある。

著者等で構成する急速載荷試験法研究会では、STNの載荷特性や動的効果を定量的に評価するため、千葉県東葛飾郡沼南町において、一連の実大杭

の STN と SLT の比較試験 (以後沼南シリーズ試験と呼ぶ) を実施した。本文は、これらの試験結果に加え、これまでに公表されている地盤条件、杭種、施工法の異なる 10 例の実杭の STN の試験結果についても合わせて検討し、STN の載荷特性と動的効果を系統的に定量評価する。さらに、STN と SLT の関係について得られた知見をまとめ、SLT に代わる杭の鉛直載荷試験としての STN の適用性を評価する。

2. 試験目的と検討の視点

沼南シリーズ試験の主な目的と検討の視点は、以下の通りである。

(1) 急速載荷試験の載荷特性の把握

杭の鉛直載荷試験では、杭頭に荷重を与え、その変位や軸力の分布を計測するが、荷重の継続時間 (載荷時間) や増加速度 (載荷速度) によって、載荷中の杭体の挙動に違いが生じる場合もある。すなわち、荷重の載荷時間や載荷速度といった載荷特性により、載荷中の杭体の挙動に波動現象や共振現象が生じる可能性がある。波動現象は、載荷時間が短く載荷速度の大きい衝撃的な載荷の場合に顕著に生じる。共振現象は荷重の載荷周期と杭体の固有周期が近づくと生じ、静的に載荷した場合よりも変位応答が大きくなる。したがって、STN における載荷時間および載荷速度といった載荷特性を試験データより明らかにし、波動現象や共振現象が生じる可能性があるかを検討する。

(2) 載荷特性が試験結果に及ぼす影響の検討

土の圧縮試験 (圧密非排水三軸圧縮試験) については、土のひずみ速度の違いにより応力～ひずみ関係が変化することが知られており、その性状の違いは総称してひずみ速度効果 (Strain-rate effect) と呼ばれている。杭の鉛直載荷試験の場合においても同様のことが考えられる。STN では、杭体が速度および加速度を持って動的に貫入されるため、載荷時の地盤の変形は土の圧縮試験と同様に、SLT の場合と異なった性状を示すと考えられる。ここでは、STN における杭頭の荷重～変位関係および軸力分布の特徴をいくつかの試験結果から考察する。さらに、STN と SLT の両者を実施した試験結果を比較し、STN の載荷特性が試験結果に及ぼす影響、すなわち地盤のひずみ速度効果と杭体および地盤の慣性力による効果を含む動的効果について検討する。

(3) 動的効果の影響因子の究明

動的効果の影響因子はいくつか考えられるが、例えば以下のようなものがある。

a) 土質

前述の土の圧縮試験では、ひずみ速度効果は粘土の方が砂より大きい。粘土の場合その状態や性質によってばらつきが多いが、たとえば軸ひずみ速度 $\dot{\epsilon}'=1000\%/s$ 程度の試験では、せん断強度は静的試験 ($\dot{\epsilon}'=0.1\%/s$ 程度) より 50~100% 大きくなるとの報告がある。また、飽和砂では、15~50% 静的試験より大きくなり、乾燥砂の場合は、ひずみ速度効果は小さく最大 10% 程度の増加である⁷⁾。以上より、急速載荷試験においても土質の違いによって動的効果の程度が異なることが予想されるので、土質の異なる試験結果の比較によりこれを検討する。

b) 地下水の有無

STN の場合、杭周囲の飽和地盤では非排水状態に変形すると言われている⁸⁾。SLT のように荷重を保持する場合には、保持時間内に排水が生じ、せん断変形と体積圧縮が生じる。しかし、非排水状態の変形では、地盤はせん断変形しか生じない。そのため、同一荷重で比べると、STN での杭変位は SLT より小さくなることが予想される。また、前述の通り土の圧縮試験では、飽和砂と乾燥砂でひずみ速度効果による強度増加の割合が異なり、飽和砂の方がその増加率は大きい⁷⁾ ことより、STN 時の飽和地盤の杭抵抗力は不飽和地盤に比べて増加することが予想される。以上より、地下水の有無により動的効果の大きさが変わると考えられるので、その影響度を検討する。

c) 杭の支持力機構

同一地盤に同一諸元の杭を施工しても異なる工法が用いられれば杭の支持力機構が違ってくる。それにより、急速載荷した場合の動的効果も異なったものになると考えられる。周面摩擦力と先端抵抗力の動的効果の大きさが異なる場合、全支持力値が同じでも両者の分担率が違えば、杭全体の動的効果は同一にならないであろう。したがって、杭の急速載荷において、施工法の異なる杭で動的効果が異なるかを調べる。

d) 荷重レベル (杭の降伏荷重との関係)

静的載荷試験の場合からも解るように、荷重レベルが降伏荷重を越えると急激に杭体の変位が大きくなり、降伏点を境に弾性挙動と塑性挙動の異なった性状を示す場合が多い。急速載荷の場合にも同様に、降伏点を境に杭体の挙動が変化し、動的効果の程度が異なるかどうかを検討する。

表-1 試験条件・試験内容一覧表

杭番号	試験条件						試験内容					備考
	杭種 工法	杭径(mm) 板厚(mm)	杭長 (m)	根入長 (m)	土質		試験 順序	載荷方法 (試験No.)	試験日	載荷公称 能力(MN)	目標荷重 (MN)	
					先端	周面構成(%)						
SH94T1	P H C 杭 セメントミルク工法	300 60	7.0	7.0	細砂	As:7, Ac:54 Loam:39	①	SLT	94/01/26	---	---	沼南シリーズ 試験
							②	MLT	94/01/26	---	---	
							③	STN1	94/01/28	0.6	0.6	
							④	STN2	94/01/29	0.6	0.6	
SH94T2	P H C 杭 セメントミルク工法	300 60	7.0	7.0	細砂	As:7, Ac:54 Loam:39	①	STN	94/01/26	0.6	0.6	沼南シリーズ 試験
							②	SLT	94/01/29	---	---	
							③	MLT1	94/01/29	---	---	
							④	MLT2	94/01/29	---	---	
SH94T3	P H C 杭 セメントミルク工法	300 60	7.0	7.0	細砂	As:7, Ac:54 Loam:39	①	STN1	94/01/24	0.6	0.4	沼南シリーズ 試験
							②	STN2	94/01/25	0.6	0.4	
							③	STN3	94/01/25	0.6	0.6	
SH94T4	P H C 杭 プレボーリング 最終打撃工法	300 60	7.0	7.0	細砂	As:7, Ac:54 Loam:39	①	STN1	94/01/28	0.6	0.3	沼南シリーズ 試験
							②	STN2	94/01/28	0.6	0.3	
							③	STN3	94/01/28	0.6	0.6	
SH94T5	P H C 杭 プレボーリング 最終打撃工法	300 60	7.0	7.0	細砂	As:7, Ac:54 Loam:39	①	SLT	94/01/25	---	---	沼南シリーズ 試験
							②	MLT1	94/01/25	---	---	
							③	MLT2	94/01/25	---	---	
							④	STN	94/01/29	0.6	0.6	
SH95T6	鋼管杭 打込み工法	400 9	13.0	12.0	細砂	As:47, Ac:30 Loam:23	①	STN1	95/03/14	8.0	1.5	沼南シリーズ 試験
							②	STN2	95/03/14	8.0	1.8	
							③	STN3	95/03/14	8.0	1.3	
							④	SLT	95/03/27	---	---	
NNO-T1	鋼管杭 打込み工法	800 12	11.0	8.2	泥岩	珪藻泥岩:100	①	SLT	91/09/27	---	---	
							②	STN	92/11/31	8.0	8.0	
YKN	P H C 杭 中掘根固工法	600 90	54.0	54.0	砂礫	Ds:11, Dc:13 Slip layer:76	①	SLT	93/06/04	---	---	アクション カット杭
							②	STN	93/06/18	8.0	8.0	
HASAKI	鋼管杭 打込み工法	400 12	13.0	13.0	砂	S:100	①	SLT	93/10/01	---	---	
							②	STN	93/10/21	8.0	8.0	
OHITO	場所打ち杭	1500	11.5	10.5	砂礫	S:67, C:33	①	SLT	94/02/20	---	---	
							②	STN	94/03/02	16.0	14.0	
SK-T1	鋼管杭 打込み工法	1500 22	47.6	32.5	Ds	Ac:23, Ds:36 Dc:41	①	STN	94/11/30	16.0	15.0	海上杭
SK-T2	鋼管杭 打込み工法	1500 22	40.0	24.9	Dc	Ac:31, Ds:37 Dc:32	①	STN	94/12/12	16.0	10.0	海上杭
HAN7	場所打ち杭	1500	24.0	24.0	Ds	As:38, Ac:8 Ds:25, Dc:29	①	STN	95/09/05	16.0	6.0	
HAN8	場所打ち杭	1500	24.3	24.3	Ds	As:37, Ac:7 Ds:27, Dc:29	①	STN	95/09/08	16.0	6.0	
TACHI1	鋼管杭 中掘打撃工法	1600 19	30.0	11.0	砂岩	SCP:58 砂岩:42	①	STN	96/02/27	16.0	12.0	海上杭
TACHI2	鋼管杭 中掘打撃工法	1600 19	29.0	13.0	頁岩	頁岩:100	①	STN	96/06/13	16.0	12.0	海上杭

注) As:沖積砂, Ac:沖積粘土, Ds:洪積砂, Dc:洪積粘土, S:砂, C:粘土

3. 試験プログラム

沼南シリーズ試験と検討に用いたその他 10 例の試験事例について試験条件と試験内容をまとめて表-1 に示す。以下に試験の詳細を述べる。

(1) 沼南シリーズ試験^{9),10)}

沼南シリーズ試験は、1994 年と 1995 年の 2 回に分けて実施した。試験場所の地盤は図-1 に示すように、表層に厚さ 2.7m のローム層が存在し、下位には粘土層、細砂層が堆積している。粘土層の平均

一軸圧縮強度は $q_u=56\text{kN/m}^2$ であった。地下水位は、1993 年 11 月の調査では地表から深さ 4m であったが、1995 年 1 月の調査では地下水位が深さ 16m まで低下した。このような地下水位の突然の低下の原因は現在のところ定かではない。

試験杭の平面配置を図-2 に示す。1994 年の 5 本の試験杭(表-1 の SH94T1~T5)は、長さ 7m のコンクリート杭である。施工法の違いの影響をみるために、T1, T2, T3 杭はプレボーリング孔に建込み、セメントミルクで根固めするセメントミルク工法で施工した。T4, T5 杭はプレボーリング孔に建込

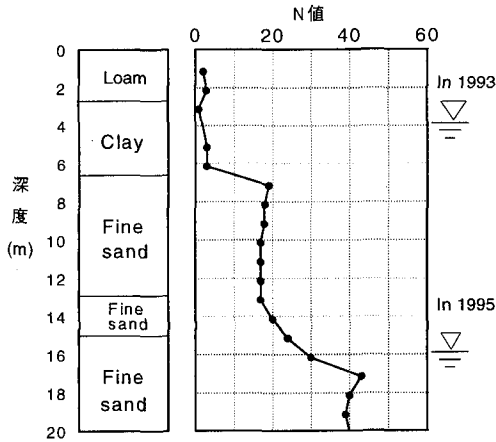


図-1 試験地盤概要

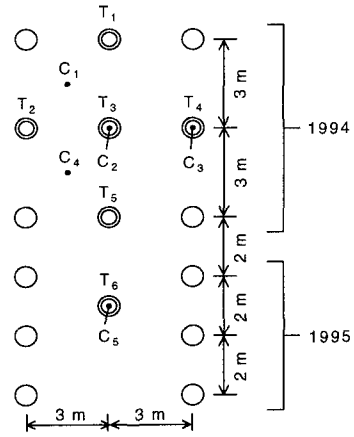


図-2 試験杭と反力杭の配置

み、最終2mをドロップハンマーで打込むプレボーリング最終打撃工法で施工した。SLTを実施した杭では杭頭から1.0, 4.0, 6.5mの位置に鉄筋計を埋込み軸力を計測した。1995年の試験杭(表-1のSH95T6)は、長さ13mの鋼管杭で、ドロップハンマーによる打込み工法で施工した。この杭には、杭頭から1.5, 7.0, 12.5mの位置にひずみゲージを貼付け軸力を計測した。

表-1に示す通り、全杭に対してSTNを行った。SH94T1, T2, T5杭では、STNとSLTの試験結果の比較・検討を主目的としてSLTも合わせて実施した。SLTは、土質(地盤)工学会のクイの鉛直載荷基準のA法に準じた繰返し載荷法で行った。また、SLTの試験装置を用いて5分程度で極限荷重まで一気に載荷するモニタリング載荷試験(以後MLTと略す)も合わせて実施した。SH94T1, T3, T4杭では、載荷条件を変えて2および3回のSTNを実施し、載荷条件が試験結果に及ぼす影響を調べることを主目的としている。SH95T6杭では、杭径の10%を越える大沈下を生じさせる試験を含めた3回のSTNとSLTを実施した。この試験杭では降伏荷重以降の杭体の挙動を調べることを主目的としている。

(2) その他の試験

沼南シリーズ試験に加え、地盤条件、杭種、施工法の異なる10例の実杭で実施されたSTNの試験結果についても合わせて検討する。これらの試験の地盤条件、杭種、施工法、試験装置といった試験条件と実施された試験内容は表-1に示す通りである。これらの試験の内、NNO-T1, YKN, HASAKI, OHITO杭ではSTNを行う前にSLTが実施されており、STNとSLTの試験結果の比較・検討が可能である。

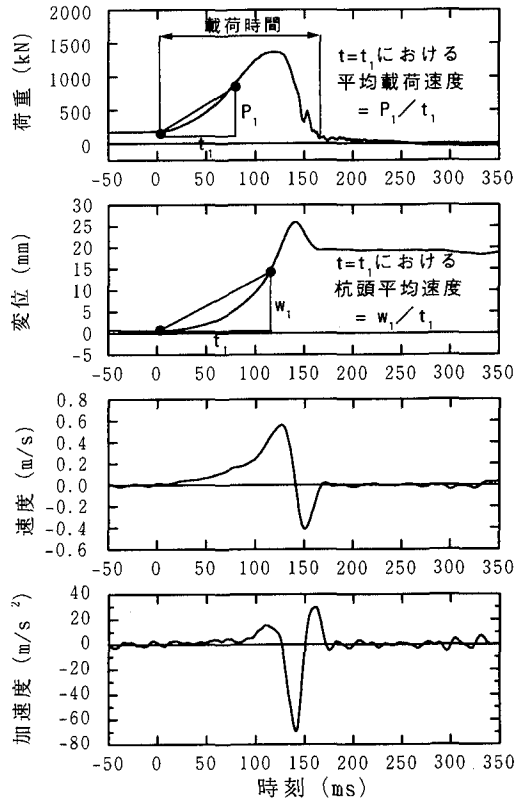


図-3 計測シグナル例 (SH95T6-STN1試験)

4. 試験結果と考察

(1) 計測シグナル

STNの典型的な計測シグナルの例としてSH95T6-STN1試験の計測結果を図-3に示す。同図には、杭頭においてロードセルおよびレーザー変位計にて計測された荷重と変位の時刻歴、変位を時間に関し

表-2 急速載荷試験の載荷特性

試験番号 (STN)	載荷能力 (MN)	杭長 (m)	載荷時間 (ms)	振動数 (Hz)	弾性波の 往復回数 (回)	荷重			載荷速度			載荷速度/載荷能力	
						初期荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	同左時刻 (ms)	平均値(*) (kN/ms)	最大値 (kN/ms)	最大/平均	平均値 (1/s)	最大値 (1/s)
SH94T1-1	0.6	7.00	95	5.3	33.9	38	510	51	9.2	16.0	1.73	15.4	26.7
SH94T1-2	0.6	7.00	98	5.1	35.0	54	610	48	11.6	23.3	2.01	19.3	38.8
SH94T2-1	0.6	7.00	91	5.5	32.5	43	530	45	10.8	17.4	1.61	18.0	29.0
SH94T3-1	0.6	7.00	91	5.5	32.5	40	440	50	8.0	13.1	1.64	13.3	21.8
SH94T3-2	0.6	7.00	97	5.2	34.6	41	360	54	5.9	9.5	1.61	9.8	15.8
SH94T3-3	0.6	7.00	89	5.6	31.8	41	540	47	10.6	17.8	1.68	17.7	29.7
SH94T4-1	0.6	7.00	118	4.2	42.1	42	310	59	4.5	9.4	2.07	7.6	15.7
SH94T4-2	0.6	7.00	119	4.2	42.5	41	350	70	4.4	7.0	1.58	7.4	11.7
SH94T4-3	0.6	7.00	95	5.3	33.9	40	520	55	8.7	17.4	1.99	14.5	29.0
SH94T5-1	0.6	7.00	96	5.2	34.3	59	640	44	13.2	25.8	1.95	22.0	43.0
SH95T6-1	8.0	13.00	169	3.0	35.8	164	1366	142	8.5	19.1	2.26	1.1	2.4
SH95T6-2	8.0	13.00	163	3.1	31.3	179	1606	111	12.9	25.3	1.97	1.6	3.2
SH95T6-3	8.0	13.00	189	2.6	36.3	159	1173	137	7.4	12.4	1.68	0.9	1.6
NN-T1	8.0	11.00	116	4.3	26.4	377	5722	64	83.5	167.1	2.00	10.4	20.9
YKN	8.0	54.00	118	4.2	5.5	438	5704	56	94.0	157.6	1.68	11.8	19.7
HASAKI	8.0	13.00	121	4.1	23.3	282	3677	77	44.1	84.0	1.90	5.5	10.5
OHITO	16.0	11.50	120	4.2	26.1	896	12127	59	190.4	356.5	1.87	11.9	22.3
SK-T1	16.0	37.00	80	6.3	5.4	1140	17290	50	323.0	680.0	2.11	20.2	42.5
SK-T2	16.0	29.00	121	4.1	10.4	1140	15430	58	246.4	500.0	2.03	15.4	31.3
HAN7	16.0	24.00	154	3.2	16.0	603	6066	85	64.3	120.0	1.87	4.0	7.5
HAN8	16.0	24.27	138	3.6	14.2	582	5990	87	62.2	113.0	1.82	3.9	7.1
TACHI1	16.0	30.00	131	3.8	10.9	957	11855	62	175.8	299.4	1.70	11.0	18.7
TACHI2	16.0	29.00	128	3.9	11.0	951	11465	63	166.9	292.5	1.75	10.4	18.3

注) 平均値(*)は、最大荷重時の平均載荷速度 = (最大荷重 - 初期荷重) / 載荷開始から最大荷重までのに要した時間) を表す。

て微分して求めた速度、加速度の時刻歴を合わせて表示してある。なお、下向きの変位、速度、加速度の値を、いずれも正としている。

図-3のように、STNでは杭頭の荷重が最大に達した後に変位が最大となり、荷重と変位の間にタイムラグが生じる。また、最大変位時には、杭頭は速度は0で、上向きの加速度が生じている。

図-3には、載荷特性と杭頭の応答特性を表すパラメータとして以後の検討に用いる載荷時間、平均載荷速度および杭頭平均速度の定義を示す。載荷時間は、載荷開始から終了までの経過時間である。平均載荷速度は、ある時点の載荷荷重の初期値からの増分を載荷開始からその時刻までに要した時間で除した値とする。杭頭の平均速度は、ある時刻での杭頭変位の初期値からの増分を載荷開始からその時刻までの時間で除した値と定義する。これ以外にも、荷重を時間で1階微分した載荷速度、変位を時間で1階微分した杭頭速度も用いる。

(2) 急速載荷試験の載荷特性

全試験についての試験諸元と STN の載荷特性に係わるパラメータ、すなわち載荷時間とそれより求まる特性値および載荷速度の関係を表-2に示す。

a) 載荷時間

表-2によれば、載荷時間は80~189msの範囲である。杭打ちにおける載荷時間は、5~10msの範囲であるから、STNの載荷時間は、杭打ちの場合の約8~40倍である。

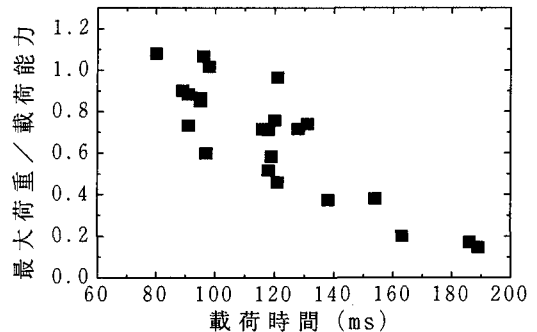


図-4 載荷時間と最大荷重/載荷能力の関係

STNの載荷時間をサイクル荷重の半周期と仮定して求められる載荷の振動数は、2.6~6.3Hzの範囲にある。基礎構造物に用いられる通常の杭の固有振動数は、おおよそ20~50Hzであるから、STNの載荷による杭体の動的応答倍率はほとんど無視できると考えられる。しかし、杭長が70mを越える鋼管杭では、固有振動数が小さくなり、STNの載荷振動数に近づくため、試験結果の検討には動的応答倍率を考慮する必要が生じる。

また、載荷時間内に弾性波が杭体を往復する回数 (=載荷時間 / (2 × 杭長 / 弾性波速度)) は、5~34回で、2例(YKN, SK-T1)を除いては、10回以上である。10回以上の場合、応力の波動伝播の影響は無視できるほど小さいと言われており¹¹⁾、実施された試験のほとんどはこの範囲にある。

図-4に最大荷重と載荷能力の比と載荷時間との

表-3 杭頭の応答一覧表

試験番号 (STN)	杭径 D (mm)	載荷 能力 (MN)	載荷 時間 (ms)	変位						速度				加速度			
				初期 変位 (mm)	最大 変位 W _{max} (mm)	W _{max} /D (%)	同左 時刻 (ms)	残留 変位 W _r (mm)	W _r /D (%)	平均値 (*) (m/s)	最大 速度 (m/s)	同左 時刻 (ms)	最小 速度 (m/s)	同左 時刻 (ms)	最大 加速度 (m/s ²)	同左 時刻 (ms)	最大 変位時 (m/s ²)
SH94T1-1	300	0.6	95	0.2	3.9	1.30	56	0.1	0.05	0.07	0.16	39	-0.23	81	13.2	32	-18.1
SH94T1-2	300	0.6	98	0.3	5.6	1.87	55	0.9	0.29	0.10	0.23	42	-0.24	94	36.4	39	-27.7
SH94T2-1	300	0.6	91	0.2	2.8	0.93	50	0.1	0.04	0.05	0.12	35	-0.15	72	6.0	31	-9.1
SH94T3-1	300	0.6	91	0.2	3.9	1.30	54	0.1	0.03	0.07	0.15	43	-0.19	78	7.0	39	-14.7
SH94T3-2	300	0.6	97	0.2	4.0	1.33	58	0.5	0.16	0.07	0.12	49	-0.20	89	6.6	31	-14.9
SH94T3-3	300	0.6	89	0.2	6.0	2.00	56	1.4	0.47	0.10	0.09	46	-0.27	77	29.0	26	-31.6
SH94T4-1	300	0.6	118	0.2	2.8	0.93	63	0.1	0.04	0.04	0.07	37	-0.15	105	7.5	32	-8.0
SH94T4-2	300	0.6	119	0.2	2.5	0.83	72	0.2	0.06	0.03	0.38	48	-0.14	101	7.5	31	-4.0
SH94T4-3	300	0.6	95	0.2	8.2	2.73	63	3.1	1.02	0.13	0.38	53	-0.35	79	29.9	51	-42.3
SH94T5-1	300	0.6	96	0.4	7.9	2.63	53	2.1	0.72	0.14	0.34	53	-0.34	88	21.0	38	-40.4
SH95T6-1	400	8.0	169	0.5	25.7	6.43	141	19.1	4.78	0.18	0.55	126	-0.41	151	16.3	112	-69.3
SH95T6-2	400	8.0	163	0.5	57.5	14.38	137	50.4	12.60	0.42	1.45	124	-0.58	147	58.5	105	-163.0
SH95T6-3	400	8.0	189	0.4	10.5	2.63	146	3.5	0.88	0.07	0.11	112	-0.26	171	-	-	-3.3
NNO-T1	800	8.0	116	0.7	21.1	2.64	75	2.5	0.31	0.27	0.68	56	-0.71	98	42.1	51	-62.2
YKN	600	8.0	118	2.0	56.6	9.43	70	1.5	0.25	0.78	1.82	52	-1.97	95	70.8	40	-121.6
HASAKI	400	8.0	121	0.7	37.2	9.30	89	15.8	3.94	0.41	0.85	77	-1.03	103	39.4	47	-114.0
OHITO	1500	16.0	120	0.3	8.1	0.54	72	1.8	0.12	0.11	0.20	45	-0.17	105	8.1	29	-7.6
SK-T1	1500	16.0	80	1.2	34.4	2.29	56	4.8	0.32	0.59	1.46	50	-2.46	67	43.6	48	-92.2
SK-T2	1500	16.0	121	1.2	28.1	1.87	63	4.1	0.27	0.43	0.92	50	-0.97	90	23.6	50	-48.3
HAN7	1500	16.0	154	1.1	4.3	0.29	96	0.4	0.03	0.03	0.07	68	-0.11	124	1.1	63	-2.9
HANS	1500	16.0	138	1.1	4.7	0.31	94	0.4	0.03	0.04	0.08	72	-0.12	126	2.3	44	-3.3
TACHI1	1600	16.0	131	1.8	27.6	1.73	76	5.2	0.33	0.34	0.69	55	-0.85	94	20.9	36	-43.3
TACHI2	1600	16.0	128	1.8	20.0	1.25	66	5.2	0.33	0.28	0.54	47	-0.60	98	22.3	38	-47.2

注) 平均値(*)は、最大変位時の平均速度 (= (最大変位 - 初期変位) / 載荷開始から最大変位までに要した時間) を表す

関係を表す。同図では、最大荷重と載荷能力の比が小さくなると、載荷時間は長くなる傾向がある。これは、使用する推進火薬量が少なく、発生するガス量も少ないため、燃焼室内のガス圧の上昇速度が遅くなることによると考えられる。装置の載荷能力が異なってもこの傾向は同じである。また、表-2 に示すように、スタナミック試験装置は載荷能力によらず最大荷重までの所要時間は45~142msとなる。
b) 載荷速度

表-2 によれば、試験装置の能力が大きくなると載荷速度も大きくなる。載荷能力の異なる装置で試験した結果を比較するために、表-2 に示す試験装置の載荷能力で除した載荷速度の平均値および最大値と載荷能力で除した最大荷重との関係を図-5 に示す。同図では、載荷能力で除した最大荷重が大きくなると、載荷能力で除した載荷速度の平均値および最大値はともに大きくなる。最大荷重と載荷速度の平均値は、比例関係にある。最大荷重と載荷速度の最大値に対する関係は、載荷能力より大きい載荷を行った3例を除けば、これもほぼ比例関係にある。載荷能力以上の載荷では急激に載荷速度の最大値が大きくなる。これらの関係は、載荷装置により差がない。表-2 に示すように、載荷速度の最大値と平均値の比は、載荷能力や最大荷重との相関性は見られず、1.58~2.26の値を取る。

(3) 急速載荷試験時の杭頭応答の特徴

表-3 は、各試験における杭頭の応答結果の一覧

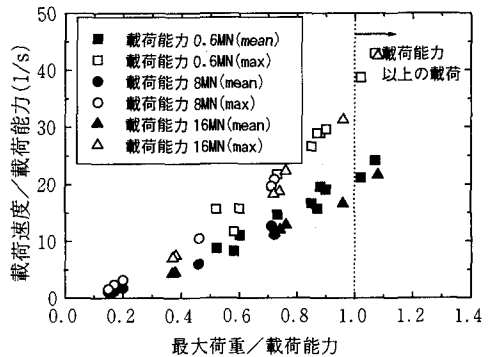


図-5 載荷速度と最大荷重の関係

表である。同表には、変位、速度、加速度の極値の他に、残留変位、最大変位時の平均速度と最大荷重時の加速度を合わせて示す。

最大変位は、杭径の0.5~3%の範囲の試験がほとんどである。杭頭速度は最大で1.82m/s (YKN) である。突出(自由長)が短く地表面近くで計測された速度では、最大1.46m/s (SK-T1) で、ほとんど場合1m/s以下となっており、杭打による杭体の貫入速度(4m/s程度)の半分以下である。荷重増加過程での下向き加速度は、最大70.8m/s² (7G)

(YKN) である。加速度の場合にも、杭打ち時に生じる加速度200~300G程度と比較するとかなり小さいことが解る。したがって、打撃による動的載荷試験と比べ、STNでは杭体の速度および加速度が小

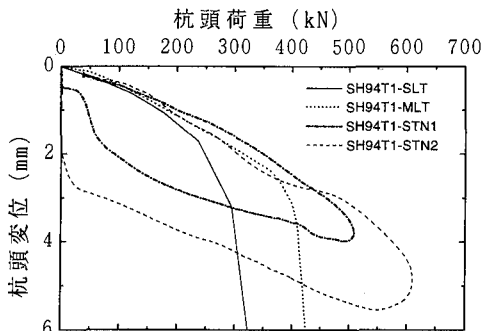


図-6 杭頭の荷重～変位関係 (SH94T1 杭)

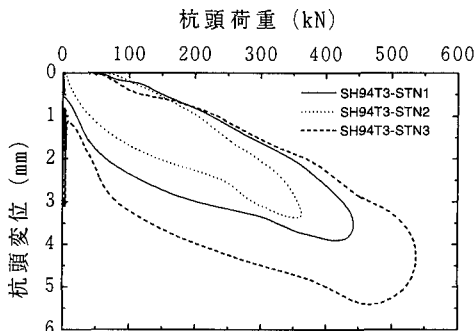


図-7 杭頭の荷重～変位関係 (SH94T3 杭)

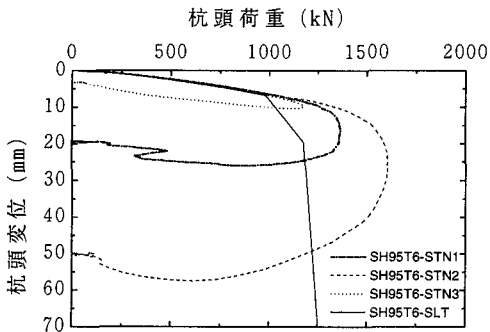


図-8 杭頭の荷重～変位関係 (SH95T6 杭)

さく、速度および加速度に比例して生じる杭体の貫入抵抗力も小さいことが解る。

海上杭 (SK-T1・T2, TACHI1・2) やフリクションカットを施した杭 (YKN) のように自由長 (周面摩擦力のない部分の長さ) の長い杭においては、自由長部の弾性変形による運動で、杭頭での変位、速度、加速度が大きくなっている。このような場合には、地表面での杭体の変位、速度、加速度により、動的効果や降伏に達したかの検討を行なう必要がある。

SH95T6-STN1～STN3 試験では、杭径の 10% を越える沈下を生じさせることを目的として、杭の支持力に対し十分能力の大きい載荷装置を用いて試験を

表-4 STN 最大荷重時変位での STN・SLT 荷重比

試験番号 (STN)	試験機能力 (MN)	STN最大荷重時変位での荷重比較			
		変位 (mm)	SLT荷重 (kN)	STN荷重 (kN)	STN/SLT
SH94T1-1	0.6	3.8	300	508	1.69
SH94T1-2	0.6	4.8	311	610	1.96
SH94T2-1	0.6	2.9	375	525	1.40
SH94T5-1	0.6	6.7	356	631	1.77
SH95T6-1	8.0	16.6	1142	1366	1.20
SH95T6-2	8.0	25.1	1202	1606	1.34
SH95T6-3	8.0	9.7	1029	1173	1.14
NNO-T1	8.0	18.3	3943	5812	1.47
YKN	8.0	44.0	5054	5704	1.13
HASAKI	8.0	30.1	3011	3678	1.22
OHITO	16.0	7.3	10806	12127	1.12

実施し、杭径の 14.4% の変位を生じさせた。杭径の 10% を越える載荷を行うには、十分能力の大きい (今回の試験においては、載荷能力の 20% 程度で載荷可能な) 装置を用いることが必要である。

(4) 杭頭の荷重～変位関係の比較

STN より得られる杭頭の荷重～変位関係の例として、SH94T1 杭、SH94T3 杭および SH95T6 杭に対する試験結果を図-6～8 に示す。いずれの図においても、STN の最大載荷荷重が異なる試験でも載荷初期の勾配にはほとんど差がない。

図-6 に示す通り、SH94T1 杭は MLT を実施しており、その試験から得られた荷重～変位曲線は、SLT と STN の両曲線の間を通る。MLT の杭の貫入速度は SLT と STN の間にあることから、杭の貫入速度が動的効果に関係していることが解る。

図-8 に示す SH95T6 杭の結果を見ると、SLT から得られた降伏変位 (第 1 限界荷重変位) に至らない部分では、SLT と STN の結果に差は小さく、降伏変位を越えると急激にその差が大きくなる。図-3 に示した STN の杭頭での応答例を見ると、杭頭荷重が SLT より得られる降伏荷重 (980kN) よりも大きくなり、100ms が経過した当りから急激に速度が増加することが解る。この速度の増加により SLT と STN の結果の差が大きくなったと考えられる。

さらに、SLT が実施された全ての試験を比較するため、表-4 に全 11 ケースの STN の最大荷重時変位に対する STN と SLT の荷重比を示す。同表によれば、STN の最大荷重点の変位において、SLT と STN の杭頭荷重の比は最大 1.96 で、動的効果により同一変位での荷重が SLT の結果に対して 2 倍程度までになることが解る。

(5) 軸力の比較

a) 軸力の時刻歴応答

STN 載荷中の軸力の時刻歴応答の例として、

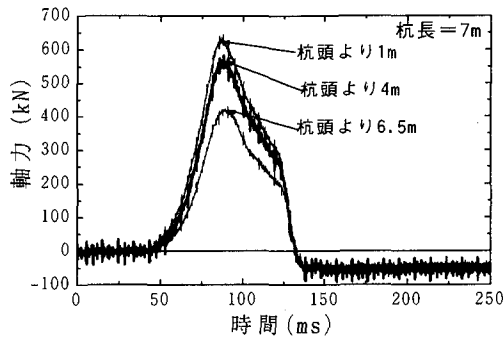


図-9 軸力の時刻歴応答(SH94T5-STN試験)

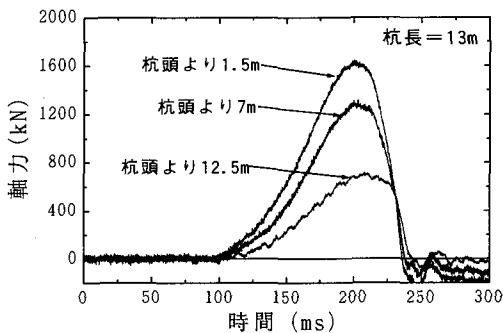


図-10 軸力の時刻歴応答(SH95T6-STN2試験)

SH94T5-STN1試験およびSH95T6-STN2試験の結果を図-9, 10に示す。図-9に示す杭長が7mのSH94T5杭では、杭頭、中間部、杭先端の各部での最大軸力発生時刻はほぼ等しい。一方、図-10に示す通り、杭長13mとSH94T5杭の約2倍の長さのSH95T6杭の場合には、杭頭、中間部、杭先端の各部で最大軸力発生時刻にズレが生じ、杭頭、中間部、杭先端の順に最大を示す。これは、波動現象の影響が大きくなったことによるものと考えられる。杭長が長い場合には、STNから静的な軸力分布を求める際に時間遅れを考慮する必要がある。

b) 軸力分布

埋込みセメントミルク工法(コンクリート杭)、プレボーリング最終打撃工法(コンクリート杭)および打込み工法(鋼管杭)について、それぞれSH94T1杭、SH94T5杭、SH95T6杭におけるSLTとSTNの軸力分布を図-11, 12, 13に示す。STNの軸力分布は、同時刻における各部の軸力値を結び作成した。また、表-5は、各試験における杭頭荷重最大時の周面摩擦力および先端抵抗力を比較したものである。

図-11~13によれば、埋込みセメントミルク工法のSH94T1杭では、セメントミルクにより杭体周面と地盤が密着され、周面摩擦力が卓越(SLTの最大荷重において全支持力の65%：表-5参照)してい

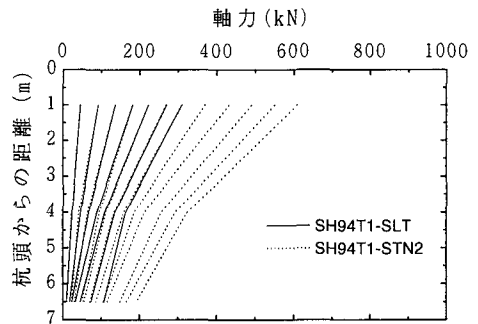


図-11 軸力分布：埋込みセメントミルク工法(SH94T1杭)

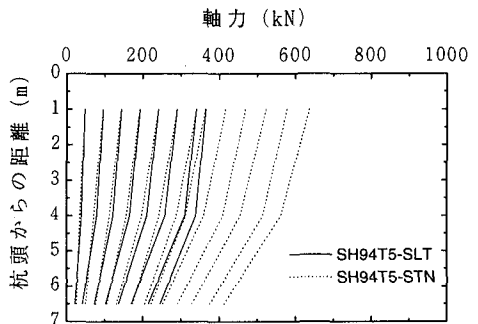


図-12 軸力分布：プレボーリング最終打撃工法(SH94T5杭)

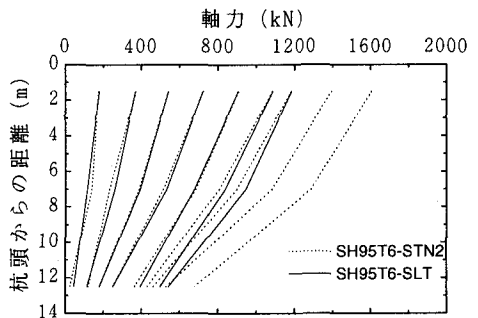


図-13 軸力分布：打込み工法(SH95T6杭)

る。プレボーリング最終打撃工法のSH94T5杭では、ボーリング孔に杭を建込んだだけのため杭周面と地盤の密着は悪いが、先端部は打撃により突き固められているので、先端支持力が卓越(SLT最大荷重において全支持力の68%：表-5参照)している。打込み工法のSH95T6杭では、前記2者の中間(SLT最大荷重において先端支持力は全支持力の46%：表-5参照)の性状を示す。

これらの試験杭は施工法の違いにより支持機構が異なるが、いずれの場合にもSLTとSTNの軸力分布はほぼ同じ形状を示し、支持機構の特性を検討する場合にはSLTに代わりSTNの結果を用いてもよい

表-5 杭頭最大荷重での周面摩擦力および先端抵抗力

	セメント工法 SH94T1-STN2			ﾌﾞﾚｯｷﾝｸﾞ最終打撃工法 SH94T5-STN			打込み工法 SH95T6-STN3		
	SLT(kN)	STN(kN)	STN/SLT	SLT(kN)	STN(kN)	STN/SLT	SLT(kN)	STN(kN)	STN/SLT
上部摩擦力	157	287	1.82	39	63	1.62	242	275	1.14
下部摩擦力	82	133	1.61	108	156	1.45	321	360	1.12
先端抵抗力	71	190	2.66	209	412	1.97	466	538	1.15
全抵抗力	311	610	1.96	356	631	1.77	1029	1173	1.14

注) 上部摩擦力：SH94T1, T5では杭頭から4mまでの、SH95T6杭では杭頭から7mまでの周面摩擦力の合計値。
下部摩擦力：上部摩擦力の範囲より下部の周面摩擦力の合計値。

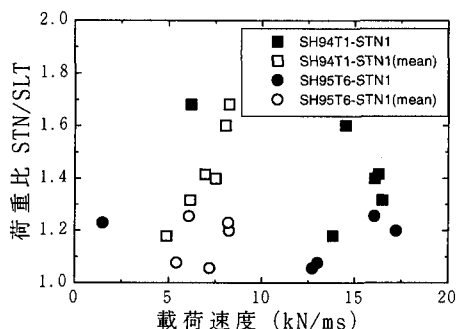


図-14 載荷速度と荷重比の関係

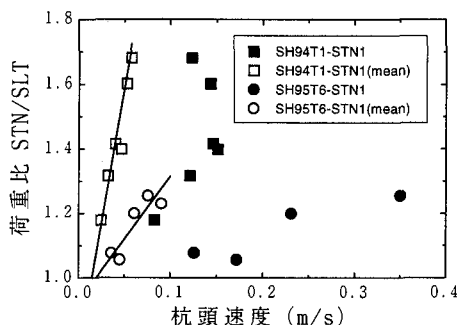


図-15 杭頭速度と荷重比の関係

ことが解る。

表-5 をみると、杭頭最大荷重における周面摩擦力および先端抵抗力に対する STN と SLT の比は、3 者とも先端抵抗力の方が大きくなっている。先端抵抗力では、周面摩擦力と同様の動的効果に影響する因子の他に先端地盤の排水条件の違いが影響すると考えられるので、周面摩擦力の場合よりも STN と SLT の比が大きいと考えられる。

3 者の先端抵抗力についての STN と SLT の比を比較すると、コンクリート杭である SH94T1 および SH94T5 杭は 2.66、1.97 と、鋼管杭である SH95T6 杭の場合の 1.15 と比べ大きな値となっている。先端抵抗力の動的効果は、開端の鋼管杭よりも先端が閉塞したコンクリート杭の方が大きいと予想される。しかし、SH95T6 杭の試験時には杭先端位置までに地下水が観測されず、2 章でも述べたように地下水の有無が動的効果に影響すると考えられるため、その影響も結果に含まれる。したがって、今回の結果のみで杭の開端と閉端の違いによる効果を定量的に評価することは難しい。

(6) 動的効果の影響因子

以上の結果を整理し、SLT との比較から動的効果の影響因子を分析する。本項では、動的効果は、同一変位における STN と SLT の杭頭荷重比により評価する。

a) 載荷速度と杭体速度

SH94T1-STN1 および SH95T6-STN1 試験の結果について、載荷過程において最大荷重時までの変位を 6 および 5 分割した各変位における載荷速度および平均荷重速度と荷重比との関係を図-14 に示す。また、図-14 と同一変位における杭頭速度および平均杭頭速度と荷重比との関係を図-15 に示す。

図-14 では、SH94T1-STN1 の平均載荷速度と荷重比の関係はほぼ同一直線上にのるが、それ以外には相関性が見られない。図-15 によれば、杭頭平均速度と荷重比の関係は、両試験とも同一直線上にのっているが、杭頭速度の場合はややばらついている。杭頭平均速度についての直線は、荷重比=1.0 の軸線と両試験ともほぼ速度 0.02m/s で交わっている。これによれば、杭頭平均速度が 0.02m/s 以上で動的効果が表れると言える。しかし、今回の試験では杭頭平均速度 0.05m/s 以下の範囲は荷重が小さくロードセルの計測精度もあまり高くないので、今後この範囲の信頼性の高いデータを探り検討する必要がある。載荷速度と杭頭速度を比べると、杭頭速度の方が荷重比との相関がよい。載荷装置により与えられた荷重が杭を介して地盤に作用するため、荷重の変化よりも杭体運動の方が地盤変形と密接に関係するものと考えられる。また、杭頭速度が平均速度よりも相関が悪い理由としては、杭頭での速度が杭全体の挙動を代表する速度より大きくかつタイムラグが生じることが挙げられる。以上より、STN の動的効果の大きさを評価するパラメータとして

表-6 載荷荷重の大きさと荷重比の関係

試験番号 (STN)	杭剛性 EA/L (MN/m)	(SLT降伏変位) / 2の変位時				SLT降伏変位時				STN最大荷重時			
		変位 (mm)	SLT荷重 (kN)	STN荷重 (kN)	STN/SLT	変位 (mm)	SLT荷重 (kN)	STN荷重 (kN)	STN/SLT	変位 (mm)	SLT荷重 (kN)	STN荷重 (kN)	STN/SLT
SH94T1-1	253	1.3	200	260	1.30	2.6	272	442	1.63	3.8	300	508	1.69
SH94T1-2	253	1.3	200	225	1.12	2.6	272	386	1.42	4.8	311	610	1.96
SH94T2-1	253	1.2	220	266	1.21	2.4	353	467	1.32	2.9	375	525	1.40
SH94T5-1	253	2.9	246	382	1.55	5.8	353	628	1.78	6.7	356	631	1.77
SH95T1-1	175	3.4	611	641	1.05	6.8	980	1027	1.05	16.6	1142	1366	1.20
SH95T1-2	175	3.4	611	580	0.95	6.8	980	1025	1.05	25.1	1202	1606	1.34
SH95T1-3	175	3.4	611	607	0.99	6.8	980	976	1.00	9.7	1029	1173	1.14
NNO-T1	556	7.4	2587	3395	1.31	14.8	3897	5523	1.42	18.3	3943	5812	1.47
HASAKI	232	8.4	1781	1847	1.04	16.8	2549	2914	1.14	30.1	3011	3678	1.22

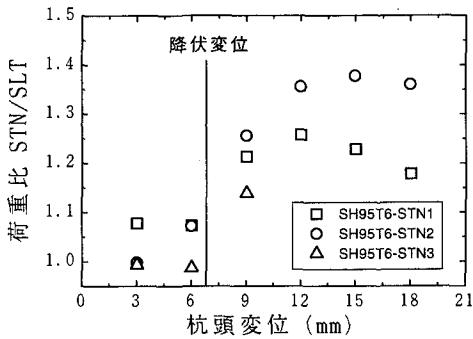


図-16 載荷過程における杭頭変位と荷重比の関係

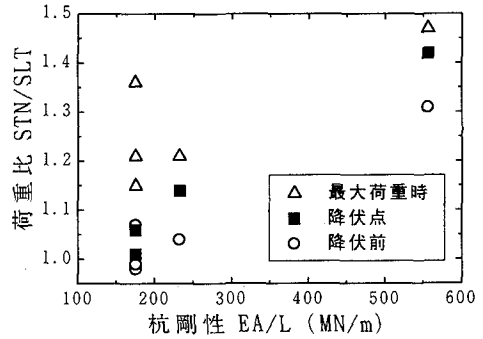


図-17 杭剛性と荷重比の関係

は平均速度が有効であると言える。

b) 荷重レベル (杭の降伏荷重との関係)

表-6 は、SLT が実施され、かつ、降伏荷重 (第 1 限界荷重) まで載荷されたすべての試験について SLT と STN の結果を比較したものである。なお、降伏荷重は「杭の鉛直載荷試験方法・同解説 (地盤工学会)」に基づき求めた。

載荷過程において、杭の鉛直支持力が降伏するとその前後で杭体の挙動が急変する。降伏前後における動的効果を比較するために、SH95T6 杭に対して実施した 3 回の STN について載荷過程における杭頭変位と荷重比の関係を図-16 に示す。同図には、SLT より得られた降伏点での変位を示している。図-16 よれば、SLT の降伏変位より小さい範囲では、STN と SLT の荷重比が 1.1 以下であるのに対して、降伏変位を越えるとその比が 15% 程度増加し、最大 1.38 になる。表-6 においても、同様の傾向が見られる。これより、杭の鉛直支持力が降伏すると杭体の貫入速度が増し、動的効果が大きくなることが解る。また、このことは STN における杭体の貫入速度が急変する荷重から静的な降伏荷重を推定可能であることを示している。

c) 杭の剛性

杭の剛性が動的効果に影響を及ぼすかを調べるために、表-6 に記した STN と SLT の荷重比と杭剛

性の関係を図-17 に示す。ただし、載荷能力 8MN の試験装置による NNO-T1 杭、HASAKI 杭および SH95T6 杭の結果により比較した。図-17 によれば、STN の載荷荷重が降伏荷重以下の場合には、載荷段階ごとに杭剛性と荷重比はほぼ比例関係にある。しかし、STN の最大荷重においては、プロットがかなりばらつき、他の因子の影響が大きいと考えられる。

d) 施工方法 (支持力機構の違い)

表-5 に示したように、杭諸元が同じで同一地盤に異なった工法で施工された SH94T1 杭 (埋込みセメントミルク工法) と SH94T5 杭 (プレボーリング最終打撃工法) では、全支持力に対する周面摩擦力と先端支持力の割合が異なっている。また、周面摩擦力と先端支持力の動的効果の大きさが異なっている。したがって、施工法による支持力機構の違いが動的効果に影響を与えていることが解る。

e) 土質条件 (砂質土と粘性土)

均一な粘性土地盤に施工された NNO-T1 杭と砂地盤に施工された HASAKI 杭の動的効果を比較する。なお、両者は鋼管杭と同じ打込み工法により施工され、試験装置も載荷能力 8MN の同じものを使用した。表-6 によれば、NNO-T1 杭と HASAKI 杭の動的効果の比は、降伏変位の半分の変位において 25% (=1.31/1.04)、降伏変位において 25% (=1.42/1.14)、最大

表-7 地下水の動的効果へ及ぼす影響の比較

	地下水あり			地下水なし		
	HASAKI-STN試験			SH95T6-STN3試験		
	SLT(kN)	STN(kN)	STN/SLT	SLT(kN)	STN(kN)	STN/SLT
周面摩擦力	1586	1669	1.05	321	360	1.12
先端抵抗力	1442	2008	1.39	466	538	1.15

注) SH95T6-STN3の周面摩擦力は砂層の下部のみの値である

荷重において 21% (=1.47/1.21)といずれも粘性土地盤である NNO-T1 杭の方が大きい。土質の性状については、粒度分布や粘土・シルトの含有率などと動的効果の関係を今後詳細に検討する必要がある。

f) 間隙水圧 (地下水の有無)

SH95T6 杭の試験時には、杭先端レベルまで地下水の存在が認められなかった。そこで、SH95T6 杭と杭諸元がほぼ同じで同じ試験装置を用いて地下水のある砂地盤で試験を実施している HASAKI 杭と動的効果を比較する。SH95T6 杭の根入れ部分の上部には粘性土地盤があるため、HASAKI 杭と同じ砂地盤である下部周面摩擦力および先端抵抗力について比較した結果を表-7に示す。

同表によれば、周面摩擦力に関しては、両者の動的効果はほぼ同じ値であり、地下水の有無の影響がほとんどないと言える。一方、先端支持力の動的効果は、地下水のある HASAKI 杭で 1.39、地下水のない SH95T6 杭で 1.15 と、地下水がある場合の方が大きい。以上より、砂地盤においては、地下水の存在により、先端支持力の動的効果は増加し、周面摩擦力はほとんど変わらないことが解る。

5. 急速載荷試験と静的載荷試験の関係

前章で考察したように、STNはSLTと異なり杭体が動的(速度、加速度を持って)に地盤に貫入するため、静的に杭を載荷した場合よりも同じ杭頭変位における杭の抵抗力が大きくなる。こうしたSTNのSLTに対する動的効果は、STNを適用する際に十分に考慮することが必要となる。本研究では、種々の条件が異なるSTNおよびSLTの試験結果を検討した結果、STNによる杭頭荷重は動的効果により最大でSLTの約2倍、SLTの降伏荷重までの載荷ならばSLTの約1.4倍以下であった。

また、STNの動的効果に影響を与える因子としては、以下のものが明らかとなった。

- 1) 杭体の貫入速度
- 2) 荷重レベル (降伏荷重との大小関係)
- 3) 杭の施工方法 (支持力機構の違い)
- 4) 杭の剛性
- 5) 土質条件 (砂質土・粘性土)

6) 地下水の有無 (あるいは排水条件)

1) は、動的効果の大きさに最も影響する因子である。2) は、杭体の貫入速度に影響を与える因子である。3) は、周面摩擦力と先端抵抗力の動的効果の大きさが異なるため、周面摩擦力と先端抵抗力の比率が杭頭荷重での動的効果に関係する。4) は、載荷過程における周面摩擦力と先端抵抗力の発現の程度に係わる因子である。剛性が大きい場合、載荷初期から周面摩擦力と先端抵抗力が同時に発現するが、剛性の小さい場合には、周面摩擦力の発現が先行し、ある程度荷重が大きくなってから先端抵抗力が発現する傾向がある。5) および 6) は、地盤のひずみ速度効果の大きさに直接関係する因子である。

STNをSLTと同様の目的で適用する場合には、試験条件や目的に応じて使用方法を考える必要がある。砂地盤に施工された杭に対して、使用限界の照査で沈下予測する場合など、降伏荷重までの載荷試験では、本研究で得られた結果によれば、STNの動的効果は最大でSLTの15%であるから、動的効果以外の誤差の要因(地盤性状のバラツキ、試験の再現性等)と比較すれば、STNをそのままSLTの代わりに使用してもよいと考えられる。しかし、地盤が動的効果の大きい粘性土であったり、砂地盤でも降伏荷重を越える載荷が必要な場合には、STNをSLTに代わって用いるには、STNの動的効果を解析により把握し、STNの結果から動的効果を差し引き、SLTと同等な結果を得ることが必要となる。

6. まとめ

本研究では、地盤条件、杭種、施工など種々の試験条件の異なる実大杭で実施された急速載荷試験と静的載荷試験の結果に基づき、急速載荷試験の載荷特性とその試験結果に含まれる動的効果の大きさを定量的に検討した。さらに、各試験における動的効果を試験条件ごとに整理し、動的効果の影響因子となるものを示すとともに、急速載荷試験の適用方法についても検討した。検討の結果、得られた知見をまとめて、以下に示す。

- ① 載荷特性としては、載荷時間が80~189msの範囲で杭打ちの約10倍以上あり、最大荷重までの所要時間は試験装置の能力によらず45~142msである。載荷速度は最大荷重に応じて大きくなる。杭長が50m程度までの試験結果からではあるが、載荷の振動数は5Hz程度で杭体との共振現象は無視でき、波動現象の影響も小さい。
- ② 動的効果により杭頭荷重は、最大で静的載荷試験

の約2倍に、降伏荷重以下の場合には静的載荷試験の1.4倍以下となる。動的効果は、杭体の平均速度との相関が強く、ほぼ比例関係にある。

③動的効果の影響因子としては、杭体の貫入速度、荷重レベル（降伏荷重との大小関係）、施工方法の違い（先端支持力と周面摩擦力の分担率）、杭の剛性、土質条件（砂質土、粘性土）、地下水の有無が明らかとなった。

④急速載荷試験を静的載荷試験と同じ目的で適用する場合、砂地盤に施工され降伏荷重までの載荷試験の場合、静的載荷試験との結果の差は最大で15%であり、急速載荷試験の結果をそのまま使用できる。しかし、粘性土地盤や降伏荷重を越える載荷試験の場合には、解析により急速載荷試験の結果から動的効果を差し引くことが必要である。

急速載荷試験を杭の鉛直載荷試験として使用するには、試験条件に応じて急速載荷試験の結果を解釈するための解析が必要となる。今後は、試験目的に応じて要求される精度で急速載荷試験の結果を解析する方法の確立が求められる。

謝辞：本研究は「杭の急速載荷試験法研究会」の活動成果の一部をまとめたものであまたり、貴重なご意見とご指導を頂いた研究会会員の方々およびご協力頂いた関係機関に対し感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 基礎構造物の限界状態設計に関する研究委員会：基礎構造物における限界状態，土と基礎，Vol.42, No.9, pp.9-14, 1994.

- 2) 青木一二三：杭の載荷試験の最近の動向，土と基礎，Vol.43, No.5, pp.13-18, 1995.
- 3) 小椋仁志, Madan, K., 境友昭：新しい載荷試験の動向，基礎工，Vol.23, No.8, pp.41-47, 1996.
- 4) Bermingham, P. and Janes, M.: An innovation approach to load testing of high capacity piles, *Proc. of the International Conference on Piling and Deep Foundations*, pp.409-413, 1989.
- 5) 松本樹典, 続誠, 西村真二：スタナミック試験データを利用した杭の静的荷重～沈下曲線の一計算法，第29回土質工学会研究発表会講演集，pp.1431-1434, 1994.
- 6) 西村真二, 加藤一志：杭の新しい急速載荷試験，土木学会誌，Vol.81, No.6, pp.14-17, 1996.
- 7) 例えば，土質工学会編，土質基礎工学ライブラリー9，土と構造物の動的相互作用，1978.
- 8) 松本樹典, Middendorp, P., Bermingham, P., 続誠：珪藻泥岩に打設された鋼管杭の急速載荷試験，土木学会論文集，No.517/Ⅲ-31, pp.12-23, 1995.
- 9) 加藤一志, 篠田善朗, 坂本和雄, 三木正久, 永岡高：急速載荷試験によるモデル杭試験報告（その1）～施工法の異なる杭の荷重沈下特性比較～，土木学会第49回年次学術講演会概要集，3巻，pp.780-781, 1994.
- 10) 加藤一志, 坂本和雄, 山中宜昭, 尾身博明：大沈下を伴う鋼管杭のスタナミック試験（その1）～スタナミック試験と静的載荷試験の比較検討～，土木学会第50回年次学術講演会概要集，3巻，pp.930-931, 1995.
- 11) Middendorp, P. and Bielefeld, M. W. : Statnamic load testing and the influence of stress wave phenomena, *Proc. of 1st Statnamic Seminar*, pp.35-44, 1995.

(1997.2.14 受付)

CHARACTERISTICS OF RAPID LOAD TEST APPEARED IN VARIOUS PILES

- CASE OF STATNAMIC LOAD TEST -

Kazushi KATO, Osamu KUSAKABE and Tatsunori MATSUMOTO

The Statnamic load method has been developed for an alternative to the conventional static pile load test. The Statnamic test is one of rapid load tests where loading duration is within about 200 ms. The Statnamic test has several advantages such that no reaction beams and no reaction piles are required, and time for testing is very short compared to the static load test without of a delay of pile construction work. However, dynamic effects including inertial effect and penetration rate effect during Statnamic load have not been fully clarified yet. This paper compares the Statnamic test results and the static load test results of various pile types, and scrutinizes possible dynamic effects of the Statnamic test.