

(88) 3種類の剛体基礎の地盤反力係数と復元力特性

京都大学防災研究所 土岐憲三 佐藤忠信 清野純史 N.Kishi G.
 柳奥村組筑波技術研究所 耐震研究課 ○吉川正昭 荒野政信

1. はじめに

ハイブリッド実験では振動方程式を解くことにより、地震時に構造物が受ける変位量を定め、これを構造物に与え、目標の変位量に達したときの反力を計算機に取り込む。構造物が実際に呈する復元力特性に基づいて再び次の変位量を求めるため、コンピュータで変位を制御しながら地震時挙動を実現させる。最初にこの方法を用いて地盤-構造物の実験から得られた復元力特性を用いて質点系の地震応答に採り入れたのは伯野らの研究¹⁾である。この研究では、砂層中の杭模型の頂点における変位-復元力の関係をアナログ計算機と油圧サーボ試験システムに組み込み、

乾燥砂や飽和砂中の杭の振動時における地盤反力を求め、さらに模型杭-砂地盤の動的破壊を追求している。この実験では地盤-杭基礎の定性的な振動特性の把握に重点を置いている。そのため、原型における応力-ひずみ関係の定量的な考察は原型の相似条件を満足する模型の製作が難しいため、なされていない。そこで、動的相互作用により生じる地下逸散減衰効果ならびに復元力に含まれる振動数依存性をとり入れた動的非線形応答計算を提示した。この手法を用いたハイブリッド実験をHENESSIと称し、既に実験システムについて報告^{2) 3)}した。HENESSIを用いて地表面においた直接基礎、地表面下に埋込んだ直接基礎とケーソン基礎の3種類の基礎形式を対象構造物としてとりあげ、これらの地震応答特性を検討⁴⁾した。

2. HENESSIの特徴と実験の目的

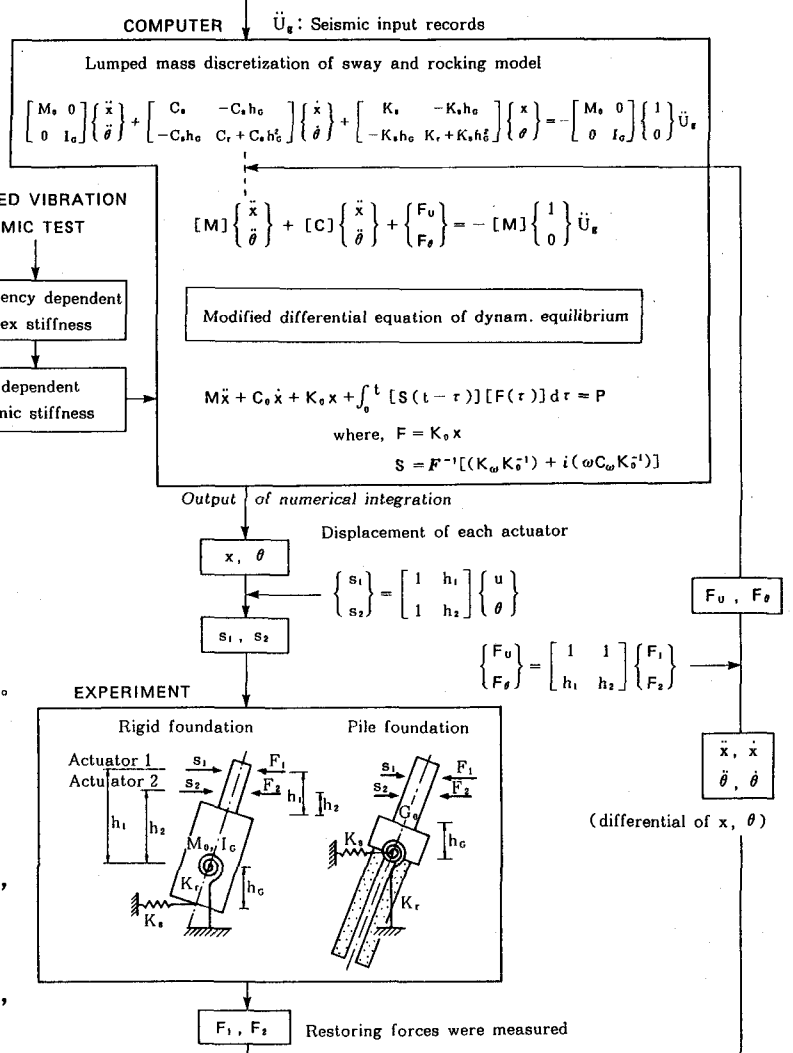
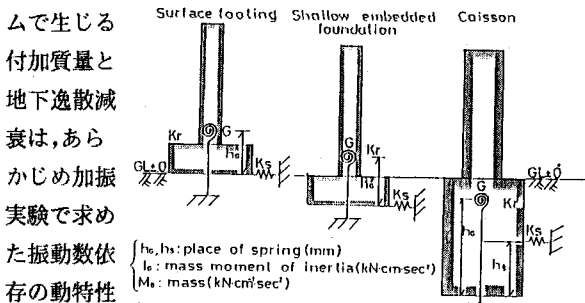


Fig. 1 Conceptual flow of hybrid test

リアルタイムで生じる付加質量と地下逸散減衰は、あらかじめ加振実験で求めた振動数依存の動特性



h_0	1206	1323	2372
h_1	0	0	1500
h_2	1397	1627	74.75
M_0	0.1014	0.103	0.2492

分法を用い

Fig.2 Sway and rocking model

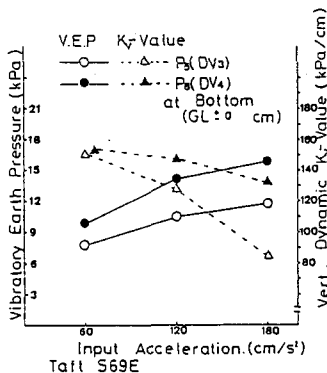
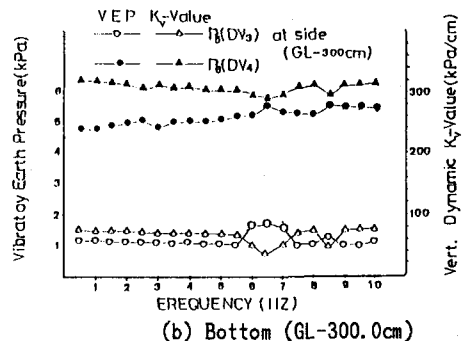
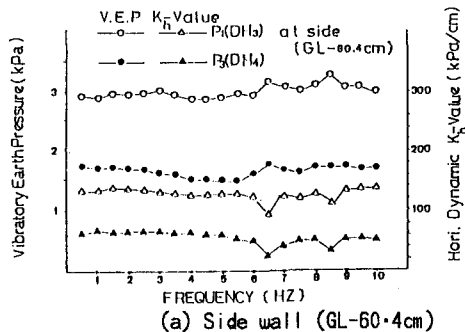
た。この動特性と実験から求めた変位と反力の非線形復元力特性とを図-1に示すように、ハイブリッドした。対象構造物として直径 2m, 高さ 75cmの直接基礎, 75cmに埋込んだ直接基礎とケーソン基礎の3種類をとりあげ、加振機2基を用いて、図-2に示す並進と動揺の2自由度モデルにした。加振実験は 10Hzの高振動数領域の入力に対し、2台の同時加振では同調するのが難しいため、Fig.3 Vib. earth pressure and dynamic K-value

主として下側の加振機を用いた。加振実験結果の中で、振動土圧から動的地盤反力係数を求めて検討した。次に、HENESSIによるハイブリッド実験結果のうち、動的地盤反力係数と、並進と動揺の復元力特性について述べる。

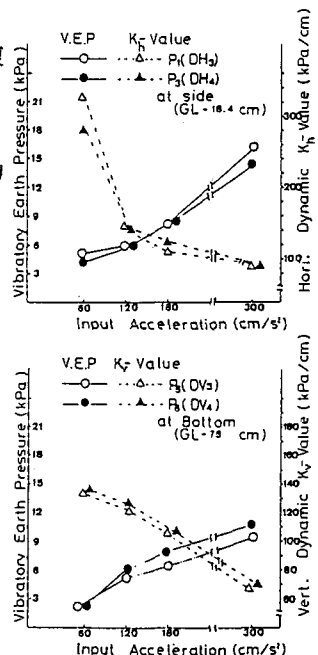
3. 実験結果

ケーソン基礎の加振実験から得られた振動土圧と変位から求めた局所的な動的地盤反力係数を図-3に示す。動的地盤反力係数は土圧計に最も近い変位計の最大応答変位で、最大振動土圧を除去して求めた。代表例として、ケーソン基礎のそれぞれ側面と底面の振動数依存曲線を示した。

次に、HENESSIにより、複素剛性を一定とし、TAFT (約 2.2 Hzにピーク) 入力時の振動土圧と応答変位の時刻歴応答波形を求めた。この結果を用いて最大振動土圧を最大応答変位で除して求めた地盤反力係数を図-4に示す。複素剛性A, B, C による相違を求めるため、ケーソン基礎にTAFTを入力したときの振動土圧の最大値と動的地盤



(a) Surface Footing



(b) Shallow embedded foundation

Fig.4 Vibratory earth pressure and dynamic K-value

(HENESSI)

反力係数を図-5に示す。同図はT A F Tの入力加速度振幅の最大値を 180ガルと 240ガルとし、茨城県南西地震 240ガル時の応答値も併記した。さらに、並進と動揺ばね取付位置で求めた水平反力と変位、抵抗モーメントと回転角の時刻歴応答波形を用いて求めた復元力特性曲線を図-6, 7に示す。地表面においた直接基礎の茨城県南西地震とT A F Tのそれぞれ 180ガル入力時の比較を図-6に示し、地表面下に埋込んだ直接基礎とケーソン基礎のT A F T 180ガル入力時の比較を図-7に示した。

4. 考察

図-3から、約 6.5Hzの共振時にピーク値を示す。側面と同様に、底面の上下方向の振動土圧も共振時に増加する。逆に、動的地盤反力係数は共振時に減少し、両者とも振動数に依存した特性を示すことが分かる⁵。振動土圧は図-4より、各入力加速度振幅の増加と共に増加する。逆に、動的地盤反力係数は変位の影響を受けるため減少する。底面のみで地盤と接触する直接基礎は入力加速度 180ガルを越えると極端に底面と地盤間に剥離と滑動を生じるため、動的地盤反力係数(上下方向)は 180ガルを越えると求められない。ケーソン基礎の各複素剛性A(振動数依存)、B(付加質量)、C(一定)モデルによる振動土圧と動的地盤反力

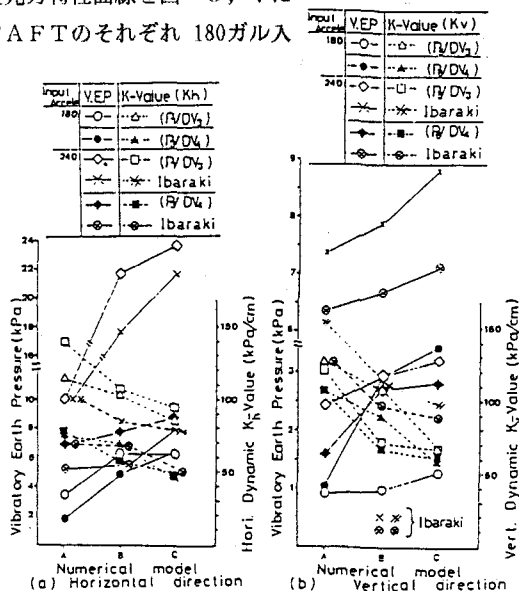


Fig.5 Vibratory earth pressure and dynamic K-value (HENESSI of Caisson)

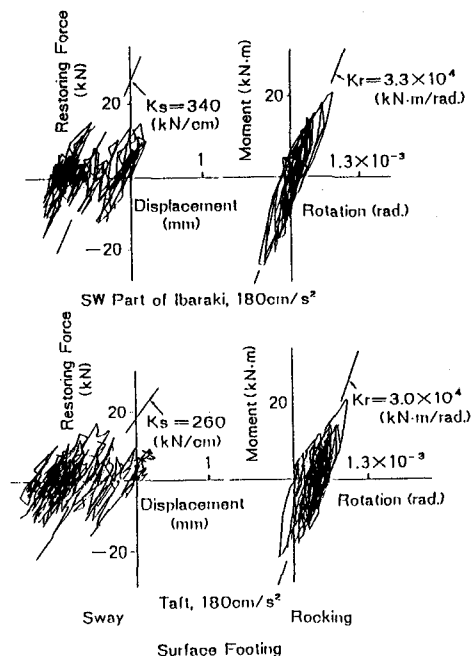


Fig.6 Restoring Force Characteristics of S.F. (SW Part of Ibaraki and TAFT, 180cm/s²)

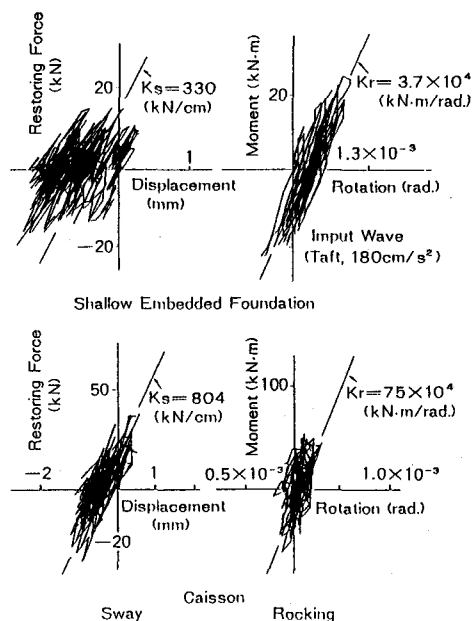


Fig.7 Restoring Force Characteristics of S.E.F. and CA. (TAFT, 180cm/s²)

係数の大小関係は図-5から、それぞれ $A < B < C$ と $A > B > C$ になる。最大応答変位、回転角の大小関係が $A < B < C$ となるため、振動土圧も $A < B < C$ となる。動的地盤反力係数は最大応答変位、回転角などが小さいほど線形領域に近いので、 $A > B > C$ となる。

Table.1 Equivalent spring constant and damping constant

kind	Surface Footing				Shallow Embedded F.				Caisson			
	Sway		Rocking		Sway		Rocking		Sway		Rocking	
K, C, or h.	Ks	Cs	Kr(X10 ³)*Cr(X10 ³)		Ks	Cs	Kr(X10 ³)*Cr(X10 ³)		Ks	Cs	Kr(X10 ³)*Cr(X10 ³)	
Static test	441		390		554		1250		1470		6680	
Vibration test	690	3	550	1.1	800	13	1000	5	1500	12	7000	17
{ hs, hr.		40		12		55		30		58		25
HENESSI(180cm/s ²)		he,s		he,r		he,s		he,r		he,s		he,r
SW, Ibaraki	340	5	3.3	23	490	4	4.8	13	920	5	85	8
									(630)	(6)	(49)	(7)
S69E, Taft	260	7	3.0	25	330	6	3.7	15	804	7	75	9
									(460)	(8)	(31)	(8)

地表面においた直接基礎の並進の履歴ループは図-6より、動揺の

unit: $\left\{ \begin{array}{l} Ks(kN/cm), Kr(kN\cdot m/rad.) \\ he,s(\%), he,r(\%) \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} Cs(kN\cdot sec/cm), Cr(kN\cdot m\cdot sec/rad.) \\ hs(\%), hr(\%) \end{array} \right\}$ () : at 240cm/s²

履歴ループに比べて、原点から移動している。水平反力、抵抗モーメント、回転角の時刻歴応答波形が入力加速度波形に対応して振動する対し、水平変位は最大加速度が入力されたあと、中立軸がずれ、残留変形が生じるためである。一方、図-7より、地表面下に 80cm 埋込んだ直接基礎の並進と動揺の履歴ループの形状は地表面においた直接基礎の履歴ループに類似し、動揺の履歴ループが S 字型のループを描くのに対し、並進の形状は塑性変形が進行し、S 字型の形状を示さない。ケーソン基礎の並進時の履歴ループは、残留変形が少なく、S 字型を示す。動揺時の履歴ループは直接基礎に比べて軟化程度が少なく、紡錘型を示すことがわかる。次に、入力加速度 180ガル時の履歴曲線から等価な並進と動揺のばね定数 Ks, Kr , 履歴減衰定数 he,s, he,r を求めて表-1 に示す。ばね定数と履歴減衰定数は最大値が生じる付近の勾配とそのときの履歴ループ

($he = \Delta w / 4\pi w$, Δw : 囲む面積, w : 弾性エネルギー) から求めた。同表に静的載荷試験から求めた初期剛性、加振実験から求めた振動数依存の複素剛性の実部において $f=0$ Hz 近傍時の剛性を求めて示した。同表より、応答過程で求められる履歴減衰定数は等価なばね定数とは逆に地表面においた直接基礎、地表面下に埋込んだ直接基礎、ケーソン基礎の順に小さくなる。また、並進時より動揺の履歴ループの履歴減衰定数の方が大きい。地表面においた直接基礎では、並進時、底面と地盤間にすべりが進行しており、履歴ループを描くことによる振動エネルギーは期待できない。一方、加振実験の共振曲線と位相曲線から求めた減衰係数 Cs, Cr には地下逸散減衰、内部摩擦減衰、粘性減衰などあらゆる減衰が含まれる。微小入力に対して求めたため、履歴減衰はほとんど含まれていない。そこで、減衰係数 Cs, Cr を減衰定数 hs, hr に変換し、同表に併記した。減衰定数 he, hr は履歴減衰とは逆に地表面においた直接基礎、地表面下に埋込んだ直接基礎、ケーソン基礎の順に大きくなり、並進時の減衰定数が動揺時の減衰定数より大きいことがわかる。

5. まとめ

- 加振実験で求めた振動土圧は共振時にピーク値を示し、動的地盤反力係数は逆に減少する。
- 地震入力加速度の増加に対し、振動土圧は増加し、逆に動的地盤反力係数は減少する。
- ケーソン基礎の複素剛性 A, B, C 各モデルによる振動土圧と動的地盤反力係数の大小関係は $A < B < C$ と $A > B > C$ になる。振動土圧は応答の大きさに比例し、動的地盤反力係数は逆の関係になる。
- 直接基礎は動揺時の回転に比べ、並進時の変位が残留変形を生じやすいため、動揺時の履歴ループが S 字型を描くのに対し、並進時、ループを描かない。ケーソン基礎の並進時の履歴ループは、残留変形が少なく、S 字型を示し、動揺時、直接基礎に比べて軟化程度が少なく、紡錘型を示す。

参考文献 1) 伯野, 横山, 佐藤; 模型杭基礎の復元力特性に関するオンライン・アルタイムの実験, 土論集, No.700, 1972 2) 吉川, 杉本, 荒野; 地盤-構造物系の非線形動的相互作用に関するハイブリッド実験システムの開発, 奥村組年報, No.14, 1988, PP.31-36 3) M.YOSHIKAWA他, 「HENESSI」, 9WCEE 4) 土岐他; 非線形動的相互作用を考慮したハイブリッド実験手法の開発, 地盤の地震時挙動シンポジウム, 1989.1, PP.231-238 5) 吉川他; ケーソン基礎の動的挙動解明のための模型実験, 土と基礎, Vol. 37, No. 4, 1989, 4, PP.45-51