

干拓堤防の地震加速度特性

京都大学農学部 正員 沢田 敏男
 “ 正員 ○青山 咸康

1. ま え が き

八郎潟干拓における数度の地震被害や、宮城県沖地震による手樽干拓の被害のように、干拓堤防には、地震時の安全性について多くの課題があるが、地震時の堤体挙動を解析するための妥当な方法はまだ確立されてはいない。従って地震時の干拓堤防の挙動を知る事が重要となるが、フィルダムに比べ、干拓堤防の地震時データは極めて少ない。今回小規模ではあるが、3回の地震を受けた干拓堤防の加速度記録を得たので、この特性を調べ、あわせて、地盤-堤防系の振動がどのような確からしきで生じ得るのかを検討した。

現在鳥根県の中海において、農林水産省により実施中の中海干拓事業では、大小5工区の干拓地が造成中である。観測された記録は、その中の一つ、揖屋工区の主堤防で得られたものである。

2. 堤防断面と地震計の配列、および地震記録

本干拓堤防は、図. 1 に示す断面を有する、軟弱地盤上の砂置換、緩コウ配堤防である。その基礎地盤は一般に粘性土と砂レキ薄層の互層である。地震観測システムは、固有振動数500Hz、容量500galの加速度計を感震器としたものであり、

その配置を図. 1 の○印で示した。最深部に位置する⑧は基礎と想定可能な砂レキ層に位置している。本システムにより収録された地震のデータを表. 1 に示し、加速度波のrms振幅、ピーク値、卓越振動数を表. 2 に掲げる。表. 2の卓越振動数は、パワースペクトルの最大ピーク振動数より求めたものであり、空白欄は、記録漏れの成分である。

②、⑤、⑦等の場所には、間隙水圧計が併設されているが、いずれの地震にも、有意な間隙圧の発生は記録されていない。

'78.06.04 本震の加速度波形を図. 2 に示した。図から、天端において記録開始後水平動の最大ピーク値の生ずる時刻(図より8秒と読みとれる)をP-S時間差と仮定し、大森公式を適用すると(K=7.5)震央距離60kmとなり、表. 1 に示す震央距離に近い値が得られる。

表. 2 から3回の地震波は、ほぼ同様の規模と特性を有している事、および天端部の鉛直動が水平動とは全く異なる挙動を示す事がわかる。すなわち天端部の

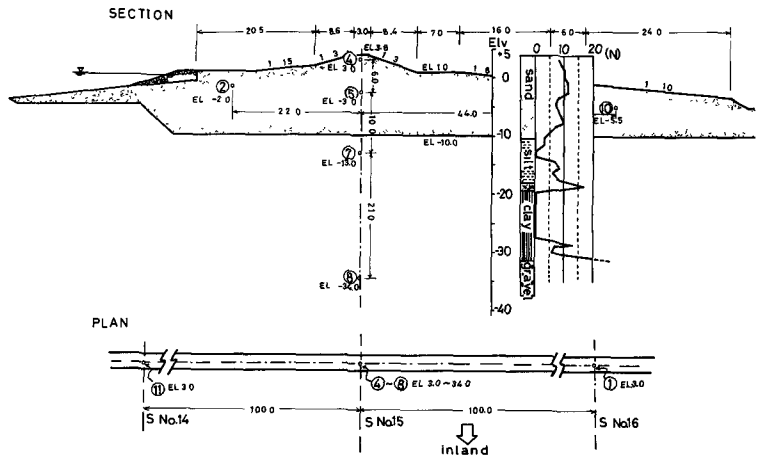


図. 1 地震計の配置と堤防断面

発生年月	'77.05.02	'78.06.04	'78.06.04
発生時刻	1:23	5:04	6:21
震央位置	{ E132.7° N 35.2°	{ E132.6° N 35.2°	{ E132.7° N 35.1°
深さ (km)	<10	<10	<10
震央距離 (km)	52.9	57.3	56.4
方位	S 51°W	S 61°W	S 49°W
マグニチュード	5.2	5.8	5.5

表. 1 観測地震データ

鉛直動の卓越周期は高く、10 Hz以上である事、および、rms値が他の場所に比べて大きく、水平動のそれに匹敵する程である。干拓堤防の地震時被害に多く見られる、天端の沈下を生ずる原因がこのような現象に帰因しているのではないかと想像される。しかしこのような現象も天端部（一般の表層部も同様と考える）に局限されており深部に達すれば、振幅も減少し、振動数も、2 Hz程度に低下する。

'77年の記録では始動部の1.5秒程度が失われていると思われた。'78年の2つの記録は、ほぼ等しい特性を示している。よって以下の考察では、主に'78年本震の水平動記録を用いた。

3. 加速度記録のパワースペクトル

堤防中心線上における3点の水平上下流方向の加速度記録線（始動から40.96秒間）のフーリエスペクトルを図. 3に示す。図より、基盤部⑧では各回とも5~6個のほぼ大きさの等しいピークが0.3~1.0 Hzの広い範囲に存在しているが、天端では、約1 Hz, 5.5 Hz, 2.5 Hzの順にピークの存在する形となり、堤防中央では、5.5 Hzのピークは天端に比べて減少している。又、天端や基盤においては、'78年の2回の地震には約0.3 Hzの低周波数の存在がみられるが、'77年の地震では、その存在はみられない。

図. 2の加速度時刻歴からも察せられるように、これ等の記録にはかなり明瞭な非定常性が存在すると考えられる。この点を明らかにするため、後藤教授によって定義された非定常パワースペクトル⁽¹⁾を④, ⑤, ⑧について求めたのが図. 4である。この図の縦軸は、スペクトル図と横軸の面積が1になるよう規準化されている。図から、天端では、0~9秒では2 Hzと6 Hz付近に2つの山のある形状であるが9秒以後には、新

地震	'77. 05. 02			'78. 06. 04 (本震)			'78. 06. 04 (余震)			
時間	2 0.4 6秒			4 0.9 6秒			4 0.9 6秒			
計器	項目	rms	ピーク値	卓越振	rms	ピーク値	卓越振	rms	ピーク値	卓越振
		(gal)	(gal)	動数Hz	(gal)	(gal)	動数Hz	(gal)	(gal)	動数Hz
①	Y	2.21	12.0	0.95	2.98	14.0	0.90	2.29	19.0	1.00
	Z	2.10	7.3	12.6						
②	Y	1.86	8.1	0.95	3.26	13.0	1.03	2.12	10.7	0.98
	Z	0.88	4.0	2.08	1.26	6.0	2.05	0.92	5.6	5.54
④	X	2.94	15.3	0.98	4.08	18.0	1.03	3.28	26.6	0.98
	Z	2.15	12.4	12.6	3.54	25.3	13.1	3.17	24.3	12.6
⑤	Y	1.91	8.3	0.93	2.87	17.0	1.03	1.95	11.7	1.03
	Z	1.15	4.4	2.00						
⑦	Y	1.40	7.1	0.93						
	Z	0.75	3.2	2.00	1.12	6.3	2.03	0.77	4.1	2.56
⑧	X				1.53	8.9	1.93	1.18	8.9	3.98
	Z	0.59	2.2	1.89	0.79	4.3	2.03	0.54	3.6	2.54
⑩	Y	0.82	3.7	0.88	2.51	13.4	1.03	1.74	10.0	1.03
	Z									
⑪	Y	2.34	10.5	1.03						
	Z	1.78	8.9	12.6						

表. 2 加速度記録の特性値 (X: 堤軸方向水平, Y: 堤軸直交方向水平, Z: 鉛直方向)

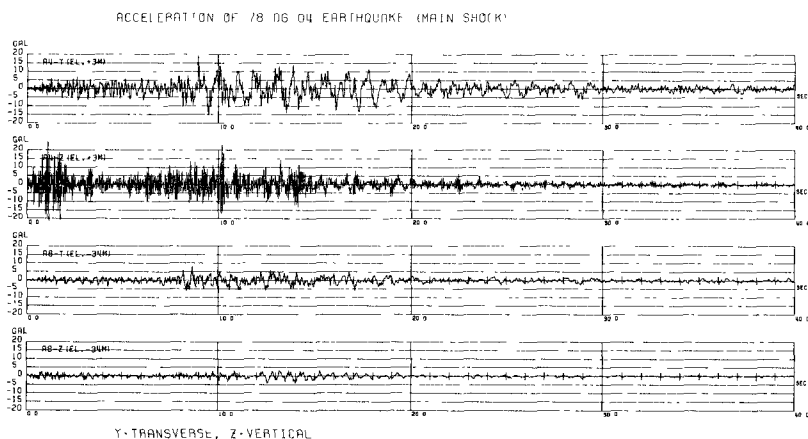


図. 2 '78年本震の⑧, ④の加速度波形

たに生じた1Hzの山が急激に優勢となるが、終えん部で再び5.5Hzの山が表出している。基盤部のスペクトルも、ほぼ同様の時間変化をしているから、天端の振動は、基盤のそれに追従しているようである。しかし⑤に代表される堤体中央部では最初から1~2Hzに存在する山が卓越する形状であり、他の2者とは異なっている。

4. 地盤-堤防系の振動機構

ここに取上げている3記録をみる限り、基盤部とそれ以浅の場所における加速度記録の間には、何等かの有意な因果関係があると想像される。この因果関係を直接的に評価するためには、未知な振動系を同定するという課題が生ずる。この目的のためには、大別し、何等かの振動モデルを仮想し、そのパラメータを決定する方法と、振動モデルを想定せず、入力と応答の関係を最も良く表現し得る系を決定する方法とがある。⁽²⁾ ここでは、後者の方法に属する、Ragget D⁽³⁾の方法を用い、地盤-堤体のモード応答の可能性を評価しようとした。この方法によれば、時刻歴に含まれている任意モードの、固有振動数、減衰率、モード寄与率等が同定できる。

一对の測定された入力と応答の対を $e(t)$, $U(t)$ とする。この時入力 $e(t)$ に対する線形応答の推定値を $u(t)$ とすると、 $u(t)$ は次のように書ける。

$$u(t) = a_1 u_1(t) + a_2 u_2(t) + a_3 u_3(t) \dots \dots \dots (1)$$

ここに $u_1 \sim u_3$ は次の3つの方程式の解である。

$$\ddot{u}_1(t) + 2\xi\omega\dot{u}_1(t) + \omega^2 u_1(t) = -\ddot{e}(t) \dots \dots \dots (2)$$

$$u_1(0) = 0, \quad \dot{u}_1(0) = 0$$

$$\ddot{u}_2(t) + 2\xi\omega\dot{u}_2(t) + \omega^2 u_2(t) = 0 \dots \dots \dots (3)$$

$$u_2(0) = 1, \quad \dot{u}_2(0) = 0$$

$$\ddot{u}_3(t) + 2\xi\omega\dot{u}_3(t) + \omega^2 u_3(t) = 0 \dots \dots \dots (4)$$

$$u_3(0) = 0, \quad \dot{u}_3(0) = 1$$

そして $a_1 \sim a_3$ は未知のモード応答係数である。 $u(t)$ が与えられた ω , ξ の下で最良な推定であるためには、次式の右辺で示される2乗誤差が最小にならねばならない。

$$E = \int_T (U(t) - u(t))^2 dt \dots \dots \dots (5)$$

よって

$$\frac{\partial E}{\partial a_1} = 0; \quad \frac{\partial E}{\partial a_2} = 0; \quad \frac{\partial E}{\partial a_3} = 0 \dots \dots \dots (6)$$

この3条件式から $a_1 \sim a_3$ が定まり、従って E が評価できる。これ等の諸関係を用いて最良の固有振動数、 ω と、減衰率、 ξ を同定する手順は次の通りである。

1) 測定された入力と応答の対を $\ddot{e}(t)$, $\dot{x}(t)$ とすると、 $\dot{x}(t)$ は何個かのモード $\dot{q}_i(t)$ の和であり、

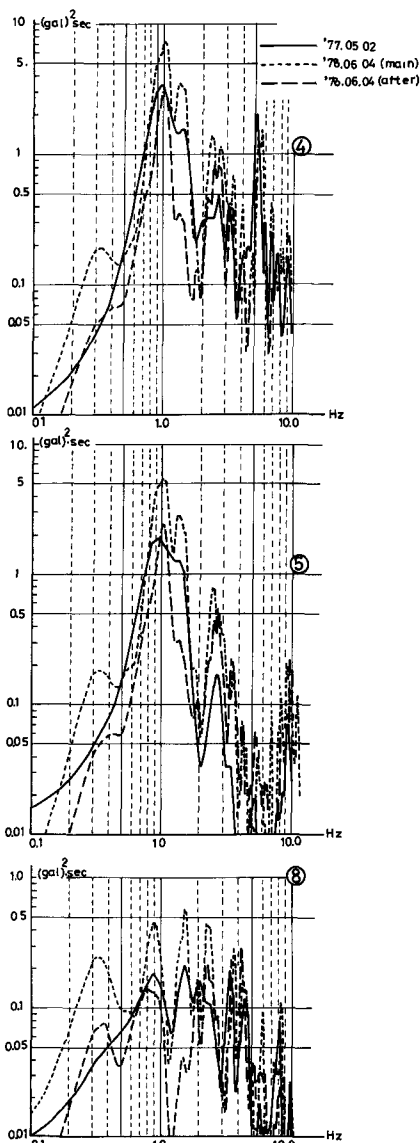


図. 3 3点のパワースペクトル

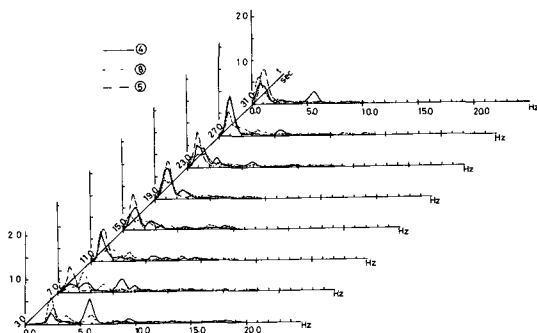


図. 4 '78年本震の水平動スペクトルの時間変化

かつ絶対量である。

$$\ddot{x}(t) = \sum_i \ddot{q}_i(t)$$

ii) スペクトル解析等の予備解析によって注目する第1次モードの固有振動数、 ω の存在範囲、 $f_l < \omega < f_u$ を決定する。

iii) $\ddot{x}(t)$ を $f_l \sim f_u$ 間で位相差のないバンドパスフィルターに通じて $\ddot{q}_i(t)$ を得る。又 $\dot{e}(t)$ を f_l より大きい周波数で位相差のないハイパスフィルターに通じ、 $\dot{e}'(t)$ を得る。第1次の測定相対応答は、 $\ddot{U}(t) = \ddot{q}_1(t) - \dot{e}'(t)$ である。

iv) ξ を適当な値に固定し、 $E \rightarrow \min$ となる ω を、 $f_l \sim f_u$ の範囲で見つけ、これを ω^* とする。

v) ω を ω^* に固定し、 $E \rightarrow \min$ となる ξ を見つけこれを ξ^* とする。

vi) ω^* 、 ξ^* を用いた場合の、同定の適合度を次式で定義する。

$$\text{適合度} = \int u^2(t) dt / \int U^2(t) dt$$

適合度が1.0に近いほどモード応答の可能性が大である。

⑧点の上下流方向の加速度を入力とし、他の各点の水平加速度を応答とみなした場合の同定数値は、表3に示す通りであった。(解析には始動から2.0秒区間を用いた。)④以外の点では、2次モードより高次では、有意な同定はできなかった。表3より、1次モードに関しては、同定された振動数は誤差10%程度以内であり、減衰率の値も等しい。従って1次モードでの地盤-堤防系の振動が確認される。又、1次モードの係数値からして、②、⑤、⑩の各点は、ほぼ等振幅であるが、天端ではこれ等の約2倍の振幅が生じていることが分かる。2次モードにおいても振動数の同定値は10%程以内で同定されているが、適合度は、1次モードに比べ大半の場合低下している。又、④点の応答係数値が、2次モードでは負になっており、天端の振動方向は、それ以深と逆であることが分る。又、2次モードにおいて、天端以外の3点のうち、②だけが、減衰率や、適合度、応答係数の値において、⑤、⑩と微妙に異なっている事が分かり、同一断面内においても、この部分は、他と異なる動きを示す可能性がうかがえる。

次に天端の1次モードを11個の中心時刻に対し、各5秒区間で同定した結果を表4に示す。同定振動数は5~7秒区間と、21~23秒区間で高振動数に偏移する。又9~17秒区間の適合度は、全時間帯同定の場合より改善されており、又減衰率の値も小さい事が認められる。

5. まとめ

今回解析したような規模の地震においては、堤防-地盤系は、水平上下流方向の振動では、少なくとも2次モードまではモード応答によって支配されていると言えよう。又、基盤入力 の性質は、天端部に最も良く反映されており、高次振動においては、天端部の振動性状は、それ以深の部分とは異なるものと思われる。

終りに本記録の収集に際し、終始御協力願っている農水産省、中海干拓事務所 に深く御礼申し上げます。

入力 応答	モード 次数	バンド・ パスレンジ (Hz)	同定振 動数 (Hz)	同 定 減衰率	応答係 数 a_1	適合度
⑧ ④	1	0.2~2.0	1.09	0.0	1.00	0.76
	2	2.0~4.4	2.91	0.04	-0.39	0.23
	3	4.4~6.6	5.43	0.01	0.38	0.52
⑧ ⑤	1	0.2~2.0	1.08	0.0	0.48	0.28
	2	2.5~5.0	3.20	0.05	0.23	0.18
⑧ ②	1	0.2~2.0	0.98	0.0	0.41	0.36
	2	2.5~4.0	3.00	0.20	0.45	0.31
⑧ ⑩	1	0.2~2.0	1.08	0.0	0.45	0.31
	2	2.5~4.0	3.27	0.04	0.19	0.18

表. 3 基盤を入力とした場合の各点の同定値

中央時刻(秒)	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23
振動数 (Hz)	1.13	1.35	1.23	1.11	1.09	1.13	1.13	1.10	1.13	1.23	1.16
減 衰 率	0.06	0.04	0.0	0.04	0.02	0.0	0.01	0.0	0.0	0.04	0.05
適 合 度	0.48	0.64	0.73	0.79	0.84	0.85	0.81	0.77	0.87	0.82	0.81
応答係数 a_1	0.63	0.65	0.78	1.04	1.00	1.06	0.97	1.03	1.30	0.91	1.12
rms(gal)	1.18	1.38	2.71	4.46	5.20	5.11	4.47	4.43	4.45	2.90	2.25

表. 4 ④点の5秒区間同定の時間変化

(1)後藤尚男、北浦 勝 "地震動の非定常スペクトル密度とその模式化" 土木学会論文集 Ⅱ 236 ('75)

(2)Hart G.C "System Identification in Structural Dynamics" EMDiv,ASCE Vol. 103 Ⅱ 6 ('77)

(3)Ragget J.D "Time Domain Analysis of Structural Motious" ASCE National Struct. Meeting ('74)