

1. はじめに

今般、港湾の施設の技術上の基準・同解説（以後、技術基準）が改訂されようとしており¹⁾、設計体系は仕様規定から性能規定へ移行しようとしている。性能規定型の設計体系の下では、構造物は要求される性能を満たすように設計することが必要となり、岸壁の耐震性能については具体的に残留変形量の許容値を設定し、入力地震動の作用に対して残留変形量がそれを上回らないことを確認する照査体系の導入が必要となる。控え直杭式矢板岸壁においても性能規定型設計への移行を迫られることになり、破壊メカニズムとの調和のとれた方法に従って残留変形量を精度よく算定することが求められる。

ところで、現在の技術基準のレベル1地震動に対する控え直杭式矢板岸壁の設計法²⁾は、地震動の作用を静的荷重に置き換えた震度法による応力照査が用いられている。この現在の設計法は控え直杭式矢板岸壁を矢板と控え直杭といった部材ごとに分け、各部材の下端を固定点として部材に荷重を作用させ、応力照査を行う。しかし、実際の控え直杭式矢板岸壁の変形は矢板、控え直杭、地盤の相互作用により決定され、また矢板や控え直杭の下端は地盤の変形によって残留変形量が発生することもあり、必ずしも固定点とはならない。よって、現在の設計法は、実際の変形メカニズムを反映したものとは言えず、残留変形量の算出法としては適当ではない。

現在の精度の良い残留変形量の算出手法としては、2次元の有限要素法による地震応答解析が挙げられる。近年、2次元地震応答解析の技術は向上し、2次元地震応答解析で地震時の構造物の変形を想定できるという知見が蓄積されてきた。矢板式岸壁については、小堤ら³⁾によりまとめられているとおり、初期応力状態の評価法⁴⁾⁵⁾⁶⁾などの各種改良が行われ、被災事例の再現性が確認されている。また再現性は変形のみならず、矢板壁・控え杭の断面力の面についても認められている。この結果、最近では数値解析により、地震時における構造物と地盤の相互作用による変形メカニズムを探ることも可能になってきた。しかしながら、2次元地震応答解析は計算負荷が大きいため、設計実務の観点では、特にレベル1地震動に対する耐震設計など頻度の多い実務においては、適当な耐震性能照査法とは言い難い。

また、控え直杭式矢板岸壁については、2次元地震応答解析を用いた耐震性能に関する研究の結果、岸壁の供用上の観点からレベル1地震動に対する制限値と考えられる20cm～30cmの変形時には、控え直杭式矢板岸壁の構造部材は降伏に至っておらず断面力に余裕があり、控え

直杭式矢板岸壁の破壊メカニズムは、変形先行型であることが分かってきた⁷⁾。これは、技術基準の照査法が実際の破壊メカニズムと調和してないことを示している。

以上のことより、控え式矢板岸壁の設計法については、実際の破壊メカニズムに調和し性能規定型の設計体系に合った、精度良く残留変形量を算出できる簡易耐震性能照査法の構築が求められていると考えられるが、現在そのような手法は十分に確立されているとは言えない。

2次元地震応答解析以外の簡易な方法によって、耐震性能の評価を行う方法として、例えば、安田ら⁸⁾は地震後の液化化地盤の剛性低下率を細粒分含有率 F_c と液化化抵抗率 F_L で与え、液化化に伴って生じる地盤の流動変形を2次元有限要素法によって簡易的に評価する手法を提案しているが、この評価法は、有限要素法であるため2次元のメッシュを作成する必要があり、また地盤の液化化に伴う流動による大規模な変形が生じる状態を主に対象としている。

この他、林ら⁹⁾は、簡易な骨組みモデルと液化化時の地盤バネを液化化バネ低減率によって与えることにより、簡易耐震評価手法を提案しているが、対象としているのは地震動が大きく液化化の発生も危惧されるレベル2地震動作用時としている。

本研究は、控え直杭式矢板岸壁のレベル1地震動作用時における簡易耐震性能照査法を構築することを目的としている。研究内容としては、まず控え直杭式矢板岸壁の残留変形量に関する基礎的な知見の蓄積のため、構造諸元である矢板剛性、矢板・控え杭の根入れ長さ、矢板控え杭間の距離を変更した幾つかの断面で2次元地震応答解析を行い、変形に大きく影響を及ぼすパラメータについての検討を行った。その後、控え直杭式矢板岸壁の変形メカニズムを把握するため、2次元地震応答解析において土要素を構成する上下節点間の相対的な残留変形量をせん断と回転、左右節点間の相対的な残留変形量を圧縮と伸張によるものに分けて整理し、その変形モードについて検討を行った。最後にそれらの結果をもとに、残留変形量に影響の大きいパラメータを考慮でき、変形メカニズムに合ったモデルを簡易な骨組み解析を用いて作成し、2次元地震応答解析結果の変形をその簡易骨組みモデルで再現することを試みた。

2. 控え直杭式矢板岸壁の現行設計法

2.1. 現行設計法の概要

最初に、現行設計法³⁾による控え直杭式矢板岸壁の設計法について述べる。控え直杭式矢板岸壁設計は、永続

作用に対する照査項目として円弧すべりの検討，全ての作用に対する照査項目として矢板，タイロッド，控え杭，腹起しの応力照査，矢板，控え杭の根入れ長さの検討を行うことになっている。

現行設計においては，矢板と控え杭はそれぞれ部材ごと分けて検討され，矢板においては図-1に示すように，タイロッド取付点と海底面を支点とした仮想梁法とロウの方法により応力の照査が行なわれる。この手法は，矢板下端まで土が塑性状態と仮定する時，海底面付近でモーメントが0になる地点が存在することをTerzaghiが図式力学的に解いたこと¹⁰⁾を利用してモーメントが0の地点を海底面とし，海底面より上を単純梁と見なして断面力を算出し，ロウの方法で補正し照査する手法である。

控え杭においては杭を弾性床土上の梁と仮定し，仮想梁法で求められたタイ取付点反力をタイロッド張力とみなし外力として弾性床土上の梁の式(式(1)参照)に与えることにより応力照査を行う。

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = -pB \quad (1)$$

ここで， EI : 杭の曲げ剛性 (kN/m^2)， x : 杭頭からの深さ (m)， y : 深さ x における控え杭の変位 (m)， p : 深さ x における控え杭の単位面積当たりの地盤反力 (kN/m^2)， B : 杭幅 (m) である。 p は， N 値が深度方向に増加するS型地盤と深度方向に一定とみなせるC型地盤でそれぞれ式(2)，式(3)のように与えられ，それぞれの横抵抗定数は図-3のグラフを用いて N 値から求めることができる。

$$S \text{ 型地盤} \quad p = k_s x y^{0.5} \quad (2)$$

$$C \text{ 型地盤} \quad p = k_c y^{0.5} \quad (3)$$

k_s : S型地盤における横抵抗定数 ($\text{kN/m}^{3.5}$)， k_c : C型地盤における横抵抗定数 ($\text{kN/m}^{2.5}$)

また，矢板と控え間の距離は図-2のように海底面から引張った主動崩壊線と控え杭の $\ell_{m1}/3$ から引張った受働崩壊角がタイ材取付点を含む水面以下で交わらないように設定する。ここで， ℓ_{m1} は式(2)式(3)を用いた場合における弾性床土上の梁の式(港研式)の第一曲げモーメント0地点である。

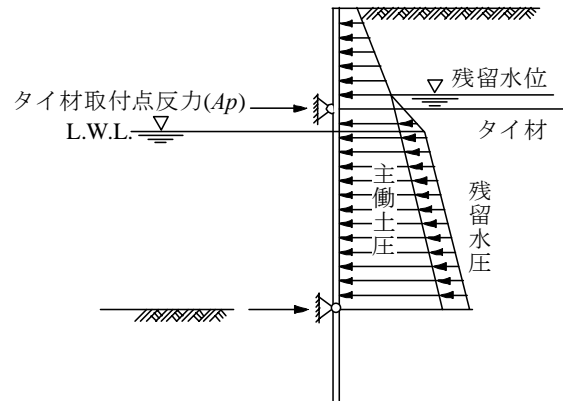


図-1 仮想梁法

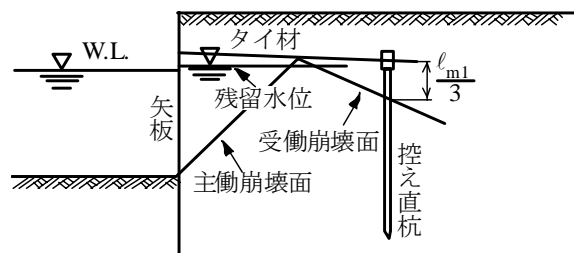


図-2 矢板控え間距離

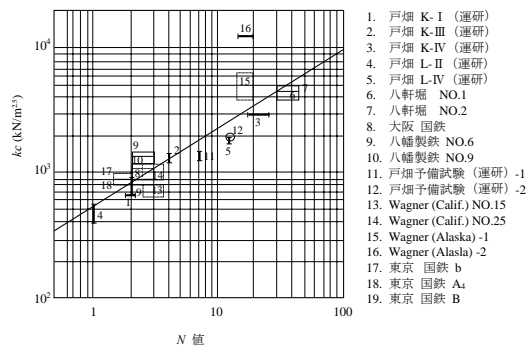
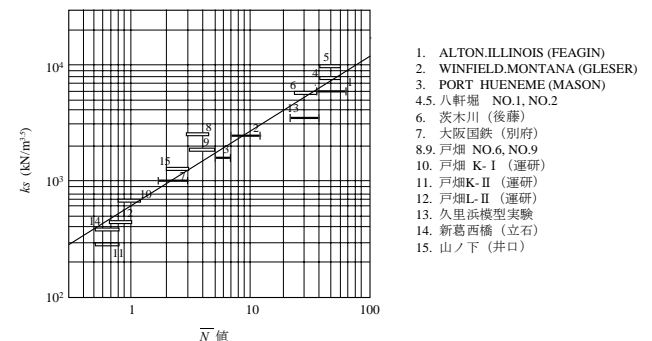


図-3 N値と横抵抗係数

3. 控え直杭式矢板岸壁の耐震性能に影響を及ぼすパラメータの検討

ここでは、まず控え直杭式矢板岸壁の残留変形量に関する基礎的な知見の蓄積のため、構造諸元のうち、残留変形量に影響を及ぼしているパラメータについて検討を行う。

このため、まず現行設計法により基本断面を決定し、その後、矢板の剛性（断面2次モーメント）、矢板・控え杭の根入れ長さ、矢板と控え工の距離というパラメータを変更した断面を設定する。そしてこれらの断面に対して、2次元地震応答解析を実施して各パラメータの残留変形量への影響を調べる。2次元地震応答解析には、解析コードFLIPを利用する。

3.1. 解析ケース

図-4に基本断面を示す。基本断面は2種類の地盤ケースについて現行設計法に基づいて決定された断面であり、水深-11m、設計震度は0.15である。地盤ケースは、控え直杭式矢板岸壁が比較的軟弱な地盤に適用される場合が多いことを考慮し、固有周期1.20s程度の比較的緩い地盤（第Ⅲ種地盤相当）であるケース1と固有周期0.80s程度のやや締まった地盤（第Ⅱ種地盤相当）であるケース2を想定することとした。図-4に示す数値は地盤ケース1の諸元であり（）に含まれる値が地盤ケース2での諸元である。FLIPに使用した各地盤ケースのパラメータを表-1に示す。これは現在FLIPにおいて、標準的に用いられている設定方法¹⁾に従って設定したものである。ここで、 G_{ma} ：基準せん断剛性、 σ_{ma} ：基準拘束圧、 ρ ：質量密度である。

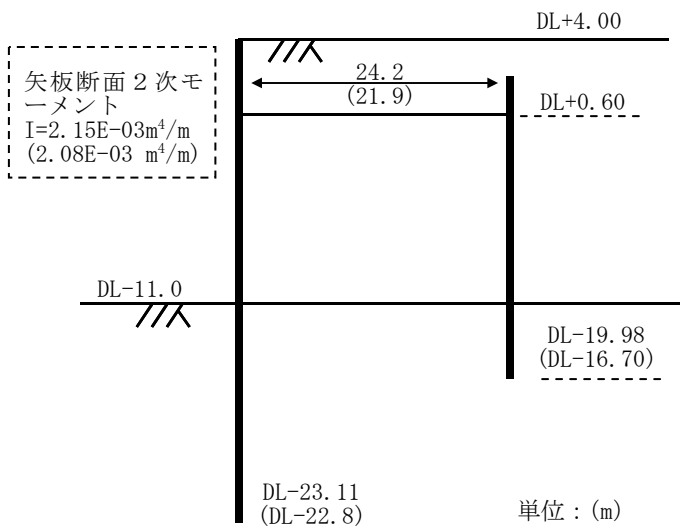


図-4 基本断面

これら基本断面に対して、矢板断面2次モーメントを変更したケース $yg1 \sim yg3$ 、矢板根入れ長を変更したケース $yy1 \sim yy2$ 、矢板控え間距離を変更したケース $hx1 \sim hx3$ 、控え根入れ長を変更したケース $hy1 \sim hy2$ を設定し、これらを解析することにより変形に影響を及ぼすパラメータを調べることとした。表-2に変更したパラメータとその内容を示す。パラメータのうち根入れ長・控え間距離の変更値は、設計実務を考慮した時、これらの値を危険側に変更するケースは考え難いと判断し、安全側（値を大きくする方向）に変更している。矢板断面2次モーメントについては、1はじめに述べた通り、既往の研究で控え直杭型矢板岸壁の破壊モードは変形先行型であり断面力が耐力に対し余裕があるという報告もあるため、基本断面よりも小さい値も設定している。

表-1 地盤ケース

(a) 地盤ケース1 固有周期 $T_{gb} = 1.17s$ (第Ⅲ種地盤相当)		ρ (t/m^3)	G_{ma} (kN/m^2)	σ_{ma} (kN/m^2)	ν	ϕ (deg)	h_{max}	m_g
標高(m)								
4 ~ 0.6	1.8	25920	89.8	0.33	37	0.24	0.5	
0.6 ~ -11	2							
-11 ~ -32.5	2	45000	239.8	0.33	38	0.24	0.5	

(b) 地盤ケース2 固有周期 $T_{gb} = 0.80s$ (第Ⅱ種地盤相当)		ρ (t/m^3)	G_{ma} (kN/m^2)	σ_{ma} (kN/m^2)	ν	ϕ (deg)	h_{max}	m_g
標高(m)								
4 ~ 0.6	1.8	58300	89.8	0.33	38	0.24	0.5	
0.6 ~ -11	2							
-11 ~ -21.5	2	72200	198.5	0.33	38	0.24	0.5	
-21.5 ~ -32.5	2	125000	279.2	0.33	39	0.24	0.5	

表-2 各検討ケースのパラメータ

矢板断面2次モーメント変更ケース	地盤ケース1				地盤ケース2			
	$yg0$	$yg1$	$yg2$	$yg3$	$yg0$	$yg1$	$yg2$	$yg3$
DL(m)	2.15E-03	1.71E-03	1.84E-03	3.63E-03	2.08E-03	1.71E-03	1.84E-03	3.63E-03

矢板控え間距離変更ケース	地盤ケース1				地盤ケース2			
	$hx0$	$hx1$	$hx2$	$hx3$	$hx0$	$hx1$	$hx2$	$hx3$
DL(m)	24.2	29.2	34.2	39.2	21.9	26.67	31.67	36.67

矢板根入れ長変更ケース	地盤ケース1			地盤ケース2		
	$yy0$	$yy1$	$yy2$	$yy0$	$yy1$	$yy2$
DL(m)	-23.11	-27	-30.67	-22.8	-27	-30.67

控え根入れ長変更ケース	地盤ケース1			地盤ケース2		
	$hy0$	$hy1$	$hy2$	$hy0$	$hy1$	$hy2$
DL(m)	-19.98	-23.33	-27	-16.7	-19.75	-23.33

※ $yg0, yy0, hx0, hy0$ は基本断面であり同一断面である。

FLIPにおける矢板の解析手法は、地盤各部の初期応力状態がより実際に近い状態を再現するように、岸壁の施工過程を踏まえ自重解析を3段階に分けて行った後で動

的解析を実施する手法を用いる。同解析法により岡ら⁶⁾は日本海中部地震の際に被害を受けた控え式矢板岸壁と無被害だった控え式矢板岸壁の再現解析で実際の状況と整合する結果を得ており、同解析法の妥当性を確認している。図 - 5 ~ 図 - 8 に各段階の概略を示す。

1 段階目

矢板と海底面以下の地盤で自重解析を行う。これにより岸壁建設前の原地盤の応力状態を模擬する。

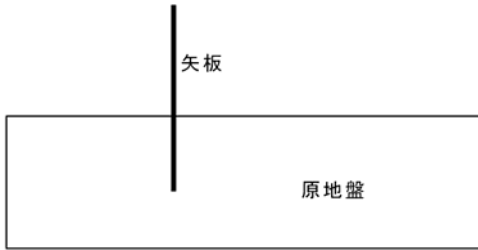


図 - 5 1 段階目

2 段階目

矢板のタイロッド取り付け点の X 方向変位を拘束し、海底面より上の地盤を加えて自重解析を行う。これにより、矢板背後地盤は概ね静止土圧係数 $K_0 \approx 0.5$ の状態で圧密される。建設工事の際には、まず控え工周辺に土盛りすると思われるが、このステップでは控え工周辺の土の応力状態を近似的に表現している。

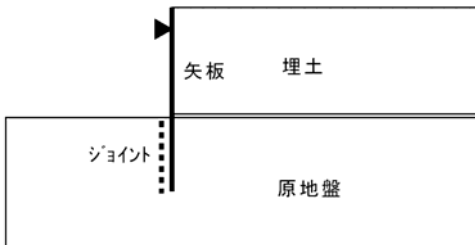


図 - 6 2 段階目

3 段階目

2 段階目に矢板のタイロッド取り付け点で生じた反力を打ち消すような力を同箇所に加え、矢板、タイロッド、控え杭に応力を与える。また、この時、控え杭とその主動側地盤を切り離し主動側地盤が前方に引かれることを防ぐ。これにより控え杭と主動側埋土には等大逆方向の水平方向外力が自動的に作用し埋土の K_0 を保ち、控え杭にも第 2 段階で得られた土圧が作用することになる。

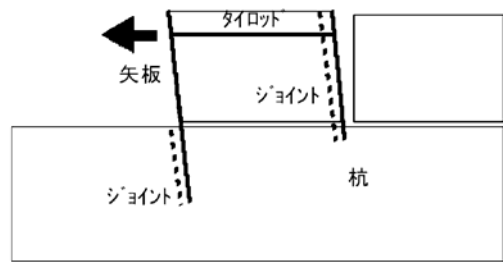


図 - 7 3 段階目

4 段階目

動解析を行う。このとき控え杭前後の同一レベルの土接点の上下方向変位を等しく置いて土の連続性を表す。

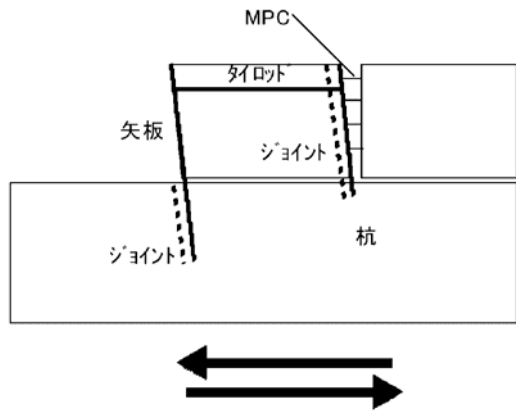


図 - 8 4 段階目

入力加速度波形は図 - 9 に示す正弦波とし、基盤より 2E 波として入射した。加速度波形の最大振幅は 20Gal と 45Gal の 2 種類とし、周波数は 0.8Hz、継続時間は 40 秒である。

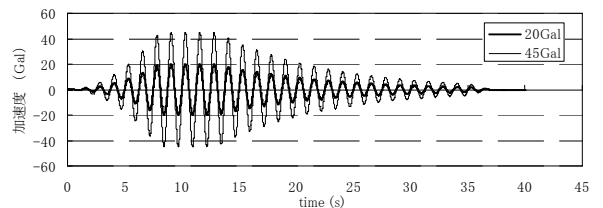
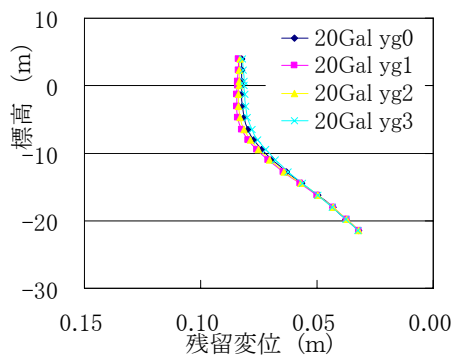


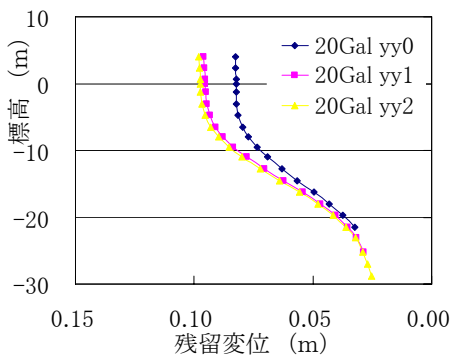
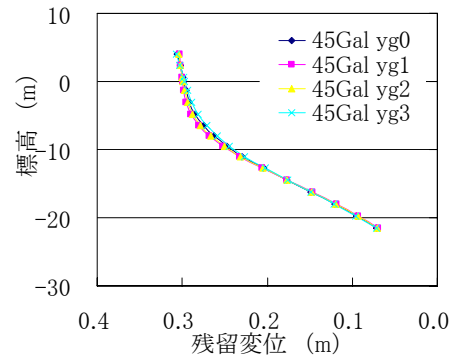
図 - 9 入力加速度波形

3.2. 解析結果

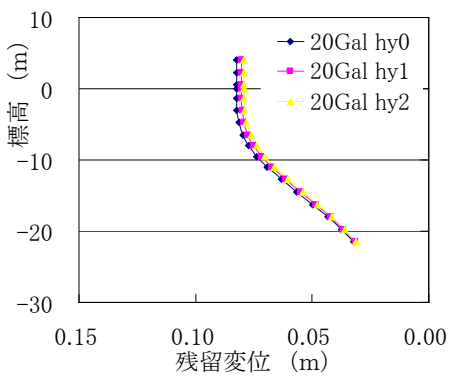
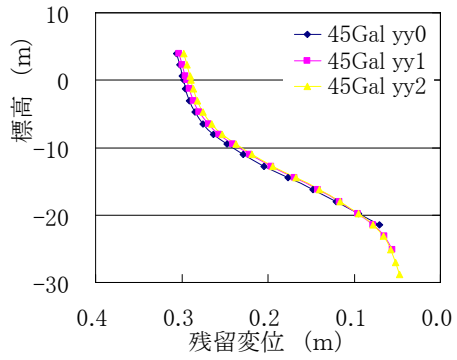
地盤ケース 1 における各検討ケースの矢板残留変形量を図 - 10、矢板残留曲げモーメントを図 - 11 に示す。地盤ケース 2 における各検討ケースの矢板残留変形量を図 - 12、矢板残留曲げモーメントを図 - 13 に示す。ここで、変位は海側に向かう方向をプラス、曲げモーメントは海側に凸のたわみを生じさせる断面力をマイナスとしてい



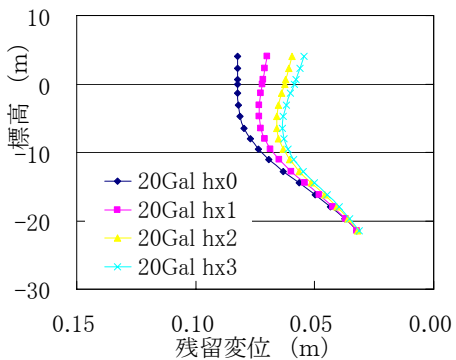
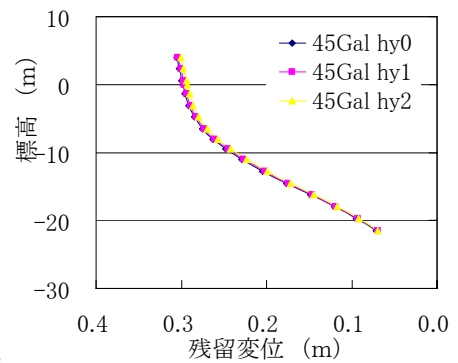
(a) 矢板剛性変更時



(b) 矢板根入れ長変更時

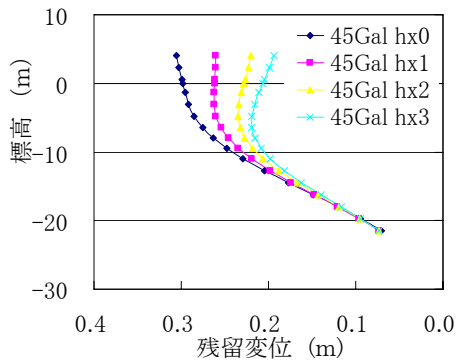


(c) 控え杭根入れ長変更時



(i) 20Gal

(d) 矢板控え間距離変更時



(ii) 45Gal

図-10 各検討ケースの残留変形量 (地盤ケース1)

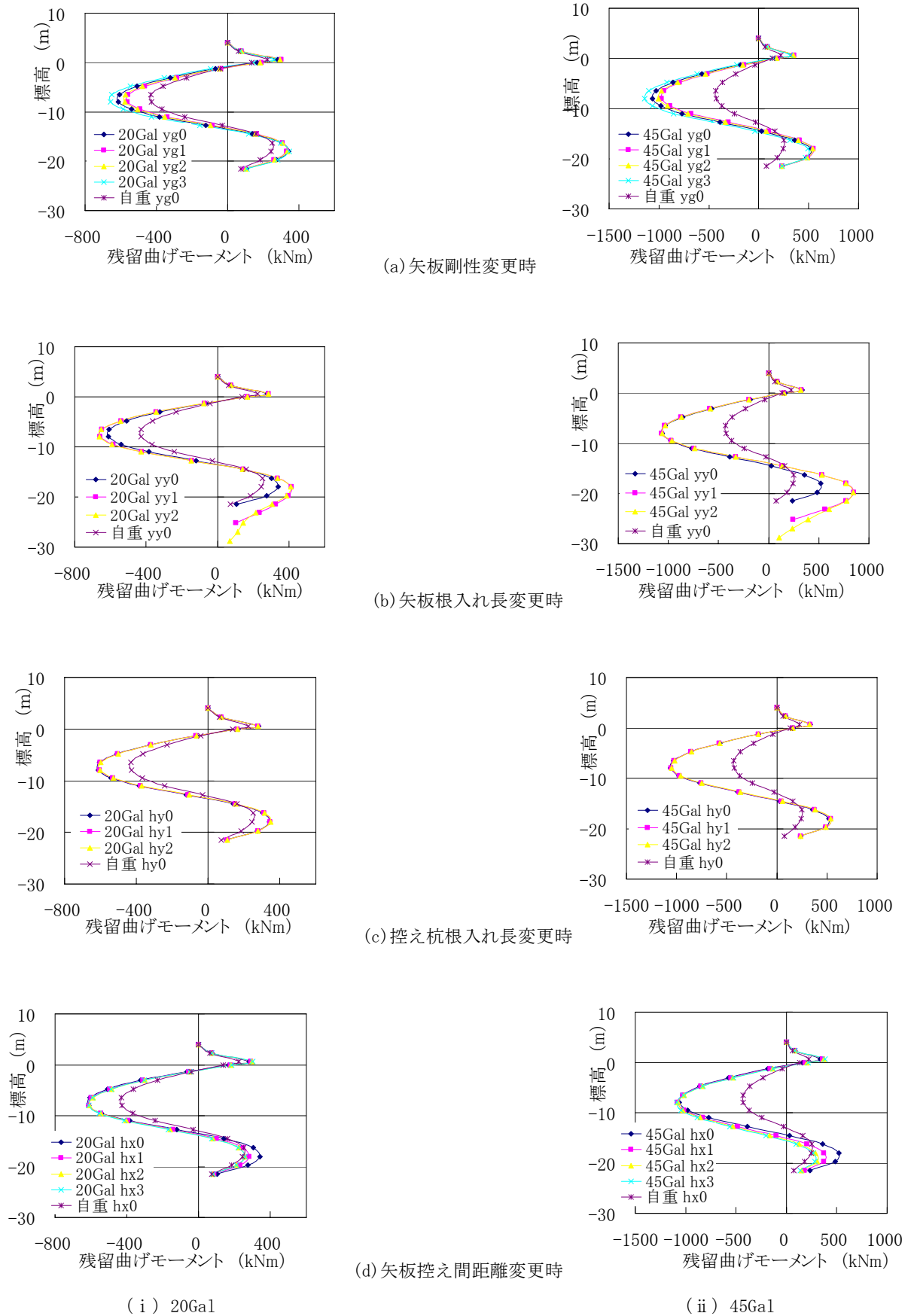


図- 11 各検討ケースの残留曲げモーメント (地盤ケース 1)

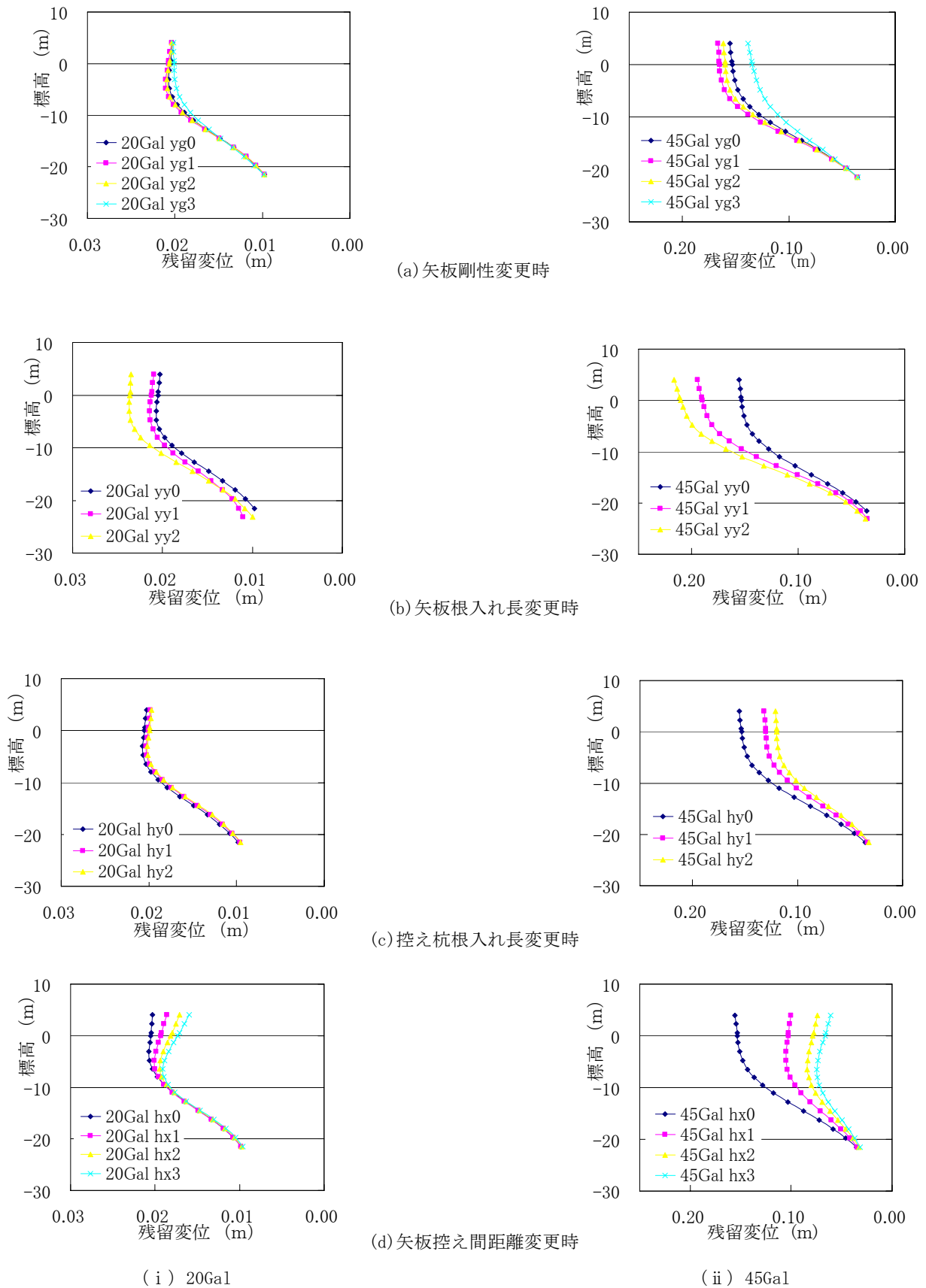


図- 12 各検討ケースの残留変形量 (地盤ケース 2)

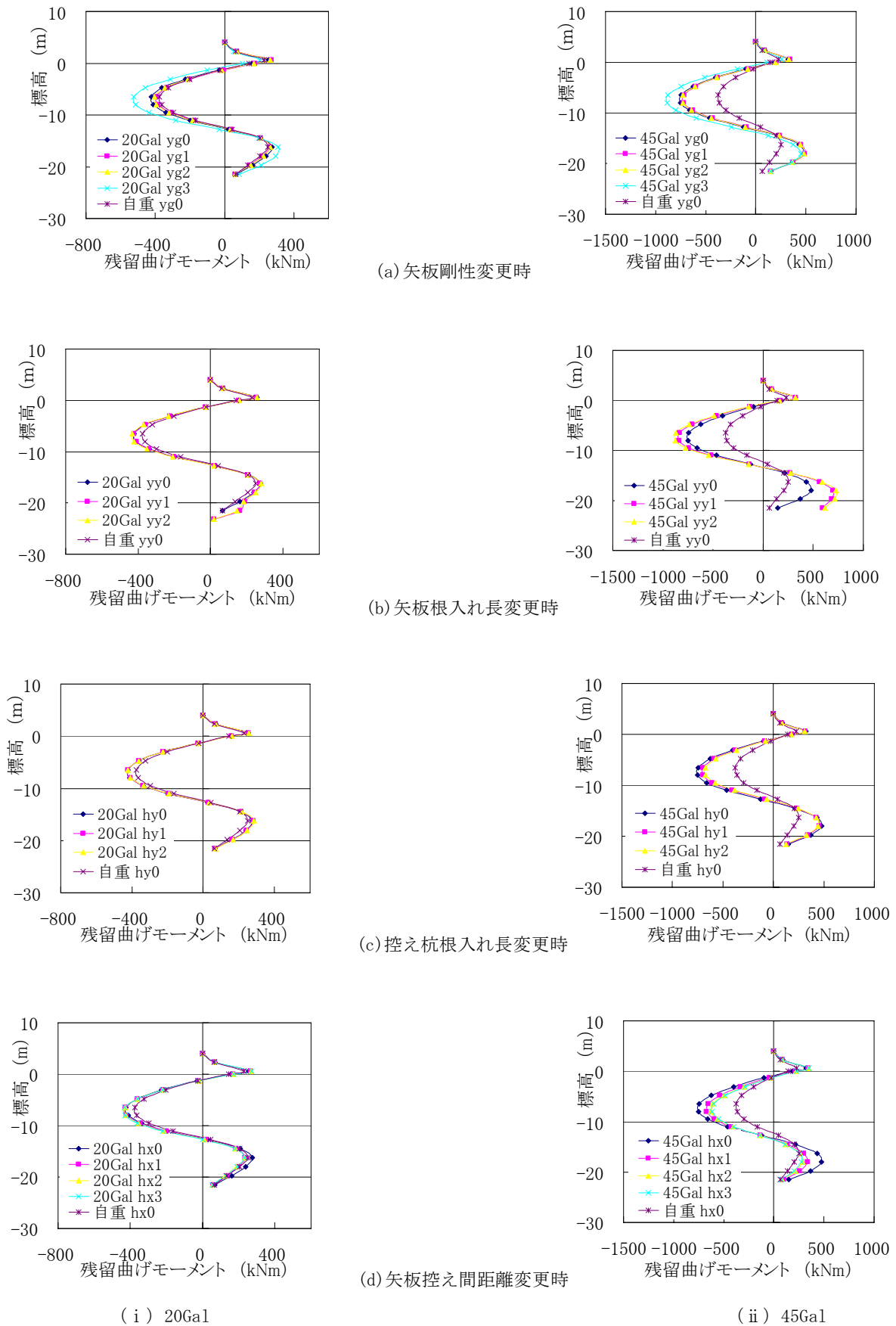
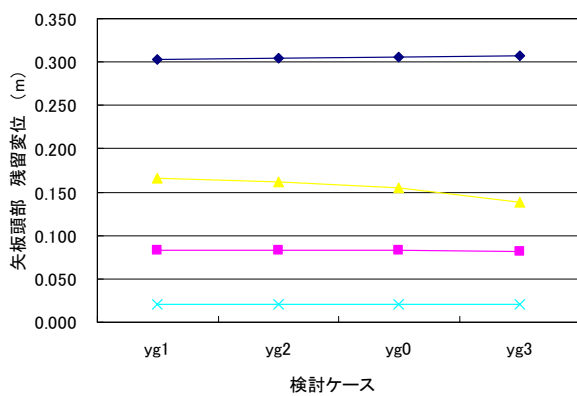


図-13 各検討ケースの残留曲げモーメント (地盤ケース2)

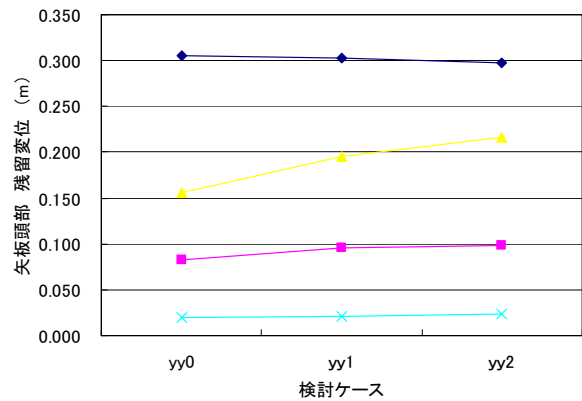
表- 3 矢板頭部の残留変形量

単位：m

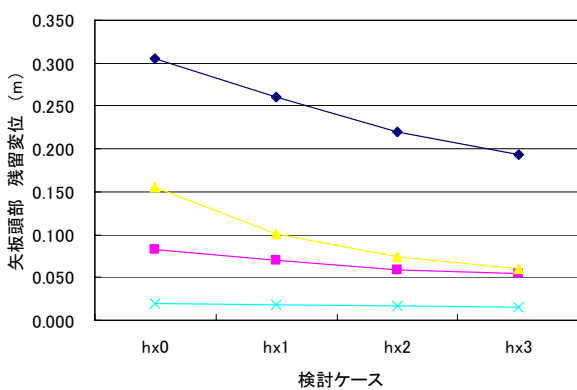
変更パラメータ	地盤ケース1				地盤ケース2			
矢板剛性	yg0	yg1	yg2	yg3	yg0	yg1	yg2	yg3
45Gal	0.306	0.304	0.304	0.307	0.156	0.166	0.162	0.139
20Gal	0.083	0.084	0.083	0.082	0.020	0.020	0.020	0.020
矢板根入れ長	yy0	yy1	yy2		yy0	yy1	yy2	
45Gal	0.306	0.303	0.298		0.156	0.195	0.217	
20Gal	0.083	0.096	0.098		0.020	0.021	0.024	
矢板控え間距離	hx0	hx1	hx2	hx3	hx0	hx1	hx2	hx3
45Gal	0.306	0.260	0.220	0.193	0.156	0.100	0.074	0.061
20Gal	0.083	0.070	0.059	0.054	0.020	0.019	0.017	0.016
控え根入れ長	hy0	hy1	hy2		hy0	hy1	hy2	
45Gal	0.306	0.304	0.301		0.156	0.132	0.121	
20Gal	0.083	0.080	0.079		0.020	0.020	0.020	



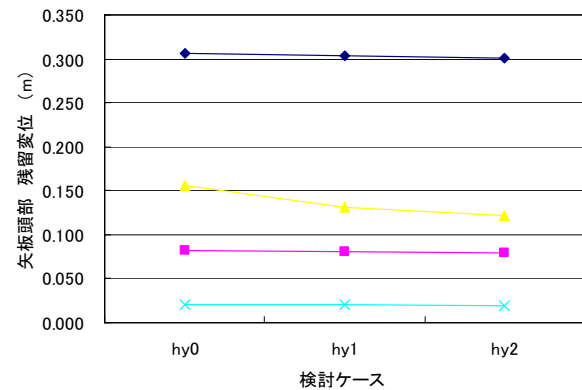
(a) 矢板剛性変更時



(b) 矢板根入れ長変更時



(c) 矢板控え間距離変更時



(d) 控え杭根入れ長変更時

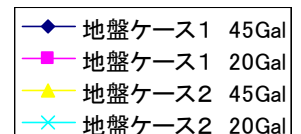
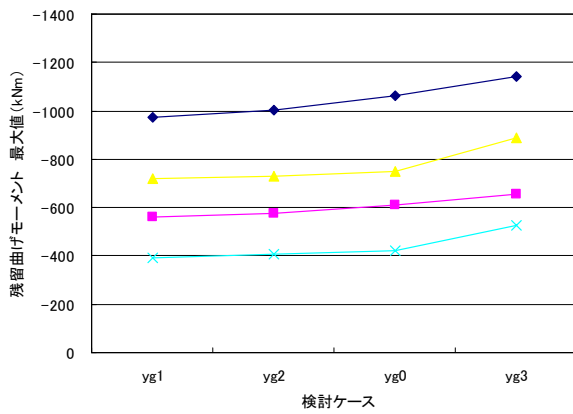


図- 14 矢板頭部の残留変形量

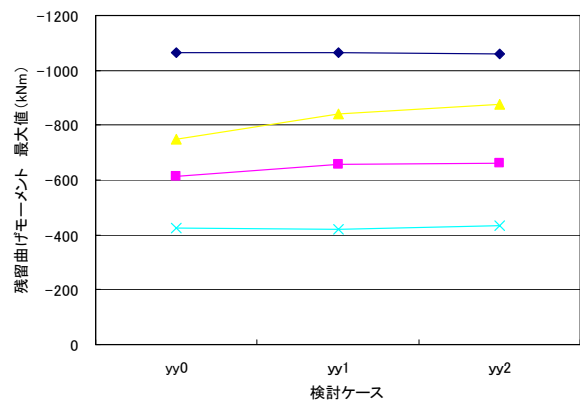
表- 4 矢板残留曲げモーメントの最大値

単位：kNm

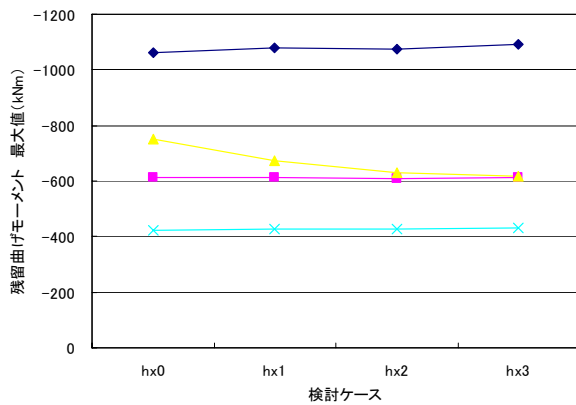
変更パラメータ	地盤ケース1				地盤ケース2			
	yg0	yg1	yg2	yg3	yg0	yg1	yg2	yg3
矢板剛性								
45Gal	-1063	-975	-1002	-1143	-751	-721	-730	-887
20Gal	-612	-563	-577	-658	-424	-394	-405	-524
矢板根入れ長								
45Gal	-1063	-1065	-1059		-751	-843	-877	
20Gal	-612	-657	-662		-424	-422	-432	
矢板控え間距離								
45Gal	-1063	-1080	-1076	-1090	-751	-671	-632	-618
20Gal	-612	-612	-607	-613	-424	-427	-429	-431
控え根入れ長								
45Gal	-1063	-1058	-1049		-751	-697	-671	
20Gal	-612	-606	-602		-424	-422	-421	



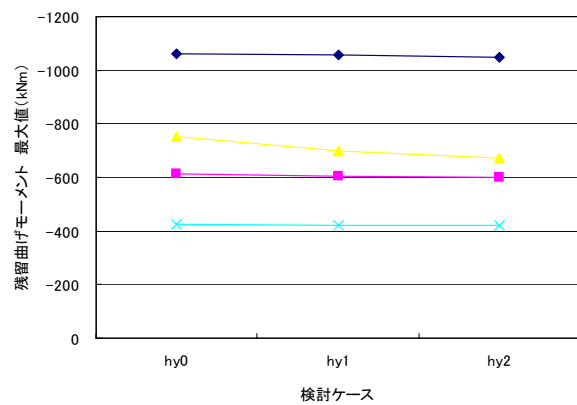
(a) 矢板剛性変更時



(b) 矢板根入れ長変更時



(c) 矢板控え間距離変更時



(d) 控え杭根入れ長変更時

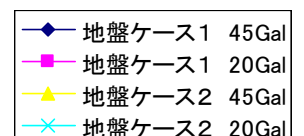


図- 15 矢板残留曲げモーメントの最大値

る。また、表- 3、図- 14 に矢板頭部の残留変位についてまとめた結果を、表- 4、図- 15 に矢板残留曲げモーメントの最大値についてまとめた結果を示す。これらの結果より、以下のことが分かる。

①矢板剛性は地盤ケース 2 45Gal 以外、残留変形量への影響が小さかった。地盤ケース 2 45Gal については、矢板剛性が大きくなるにつれて、残留変形量は小さい結果となった。矢板の剛性により残留変形量を抑制した結果と考えられる。残留曲げモーメントは、矢板剛性が大きいほど大きい結果となっている。

②矢板の根入れ長は、根入れ長が長い程、残留変形量が大きくなる傾向が見られた。しかし、地盤の剛性が小さいほどその影響は小さく、地震後最も地盤剛性が小さくなると考えられる地盤ケース 1 45Gal では根入れ長が長い程残留変形量が小さいという逆の傾向が見られた。残留曲げモーメントについても同様の傾向が見られ、根入れ長が長い程、残留曲げモーメントの値は大きくなったが、地盤ケース 1 45Gal では、根入れ長が長いほど、残留曲げモーメントが小さいという逆の傾向が見られた。

③控え杭の根入れ長は、根入れ長が長い程、残留変形量、残留曲げモーメントともに小さいという傾向が得られたが、地盤ケース 2 45Gal 以外では残留変形量の差はわずかであり、地盤ケース 1 45Gal ではほとんど差が見られなかった。

④矢板控え間距離は、残留変形量への影響が最も大きく、全てのケースで矢板控え間距離が長いほど残留変形量が小さいという傾向が見られた。残留曲げモーメントについては、矢板控え間距離の影響はあまり見られなかったが、地盤ケース 2 45Gal では、矢板控え間距離が長い程、残留曲げモーメントは小さくなっていった。矢板控え間距離が最も残留変形量に影響を与えているパラメータと考えられる。また、図- 16 は地盤ケース 1 45Gal における hx0~hx3 の残留変形量鉛直分布の断面方向への変化を示した図であり、実線は各断面方向位置の残留変形量の鉛直分布、破線は上から矢板設置位置(X=0m)における海底面(Y=-11m)での残留変形量の等残留変形量線、矢板設置位置(X=0m)における矢板下端(Y=-21.5m)での残留変形量の等残留変形量線を示す。この結果から、等残留変形量線の控え杭設置位置における標高は、hx0 でそれぞれ Y=-1.3m, Y=-9.5m あたりであるのが、hx3 では Y=4.0m, Y=-4.8m あたりと矢板控え間距離が長くなるほど上昇しているのが分かる。つまり、矢板控え間距離が長くなる程、同標高での矢板残留変形量に対する控え杭の残留変形量の割合が小さくなっており、矢板の変形に対し控え杭が変形し難くなっているのが分かる。この

ため、地震動作用時には、矢板控え杭間距離が長いほど、控え杭の変形の応答は小さくなると考えられ、その結果地盤の剛性の低下も減り、残留変形量が小さくなると考えられる。

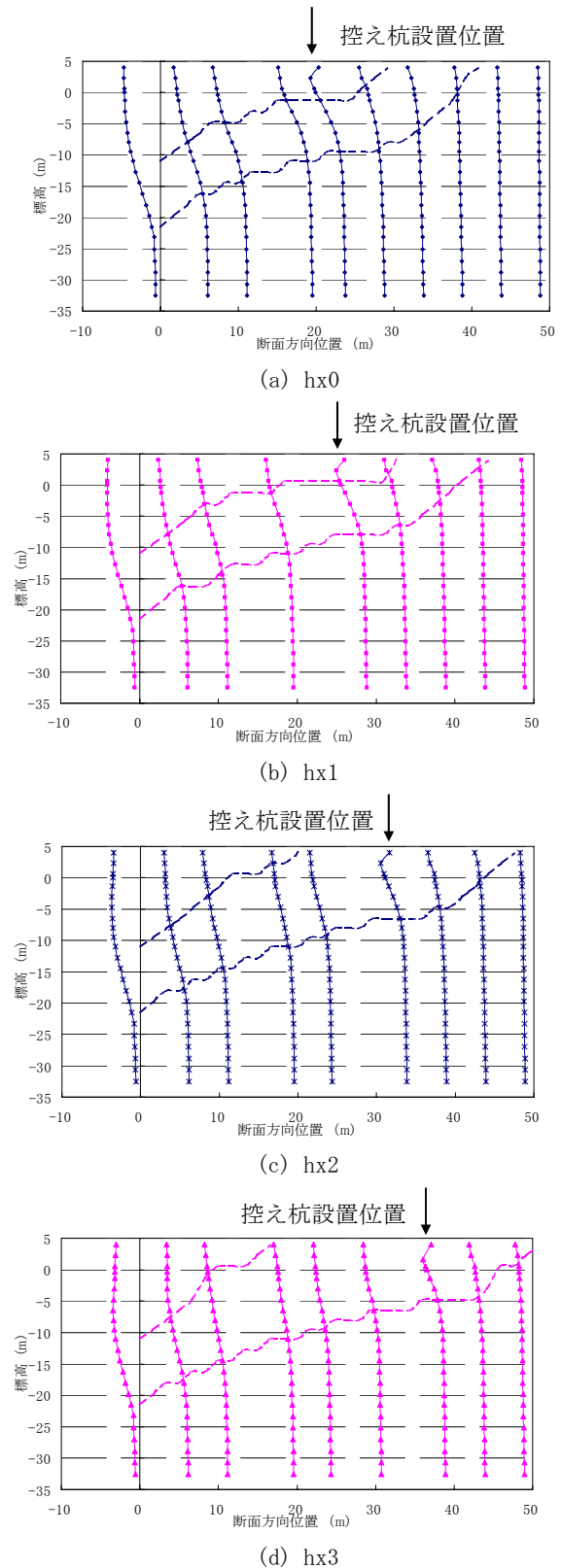


図- 16 残留変形量鉛直分布の断面方向変化

3.3. 残留変形量と矢板控え杭間距離の関係

3.2 までの検討より、矢板控え杭間距離が最も残留変形量に影響を与えているパラメータであることが分かった。本研究では、4 変形モードの検討で控え直杭式矢板岸壁の変形モードについて整理し、7 簡易耐震性能照査方法で、その変形メカニズムに合った簡易耐震性能照査モデルの構築について検討するが、ここでは、FLIPにより得られた矢板控え杭間距離と残留変形量データを重回帰分析によって整理し、矢板控え間距離による残留変形量推定式を作成する。この推定式は、矢板控え間距離と残留変形量の相関関係により得られた式であり、実際の変形メカニズムを反映したものではないため、この推定式で精度良い残留変形量を求めることはできないが、矢板控え杭間距離の影響を推測するだけならば十分有益であると考えられる。例えば、実務において2次元地震応答解析により耐震性能を照査した結果、所要の性能を満たしていない場合、断面を変更するなど残留変形量を減らす何らかの対策を施し、所要の性能を満たすまで繰り返し照査を行う必要がある。ここで、本研究で明らかになったように矢板控え杭間距離を長くすることにより残留変形量を減らすことができるが、この時、この推定式によりどの程度矢板控え杭間距離を長くすれば良いかの目安を付ければ、断面決定に必要な2次元地震応答解析による繰り返し照査回数を減らすことができると考えられる。

1) 使用データ

推定式作成に使用する矢板控え杭間距離と残留変形量などのデータは、既存の研究¹²⁾で得られたデータを用いる。この既存の研究で、検討されたケースは、水深-7.5m、-11m、-13m、-16.0mの4ケースに対して、表-5のように水深ごとに設計震度を用意し、さらに3つの地盤条件、固有周期 1.2s (Ⅲ種地盤相当)、0.8s (Ⅱ種地盤相当)、0.6s (Ⅰ種地盤相当)を設定して、技術基準²⁾に従い設計された断面であり、合計24ケースである。

表-5 検討ケース (既存の研究)

		水深			
		-7.5m	-11.0m	-14.5m	-16.0m
設計震度	0.10	○	○		
	0.15	○	○		
	0.20		○	○	
	0.25			○	○

過去の論文¹²⁾における検討では、これら各検討ケースに対し、実地震波9ケース(表-6)を振幅調整し、残留

変形量が5cm, 10cm, 15cm, 20cmとなる補正地表面加速度 α_c (Gal)をまとめており、本検討ではこれらのデータを利用する。ここで、 α_c とは地震波の周波数特性や継続時間など、構造物の水平残留変形量に影響のある因子で補正した地震動の最大加速度である¹²⁾。

表-6 実地震波概要 (既存の論文)

No.	地震波名	卓越周波数 (Hz)	継続時間 (s)
No.1	宮崎波	4.55	80
No.2	美都波	0.37	161
No.3	JR波	1.34	40
No.4	Dip波	0.68	29.1
No.5	八戸波	0.39	19
No.6	神戸波	2.88	20
No.7	大船渡波	2.34	19
No.8	Strike波	1.66	29.1
No.9	Subduction波	0.67	40

2) 使用データ整理

残留変形量を設計震度と補正地表面加速度 α_c (Gal)で整理したグラフを図-17に示す。ここで直線は、各設計震度において残留変形量を α_c (Gal)で回帰したものである。また、同様に残留変形量を矢板控え杭間距離 X を壁高 H で除した X/H と補正地表面加速度 α_c (Gal)で整理したグラフを図-18に示す。ここで直線は、各 X/H において残留変形量を α_c (Gal)で回帰したものである。

3.2 までの検討で、残留変形量に大きく影響を及ぼしているパラメータが矢板控え杭間距離であることが明らかになったが、図-17において同残留変形量で見た時に設計震度が増すと α_c が増すように、図-18で α_c が増すと α_c が増すのが読み取れ、既存の論文のデータにおいても、残留変形量が矢板控え杭間距離に大きく影響されているのが分かる。ただし、本検討で矢板控え杭間距離は水深の違いを考慮し、 X/H にてまとめている。

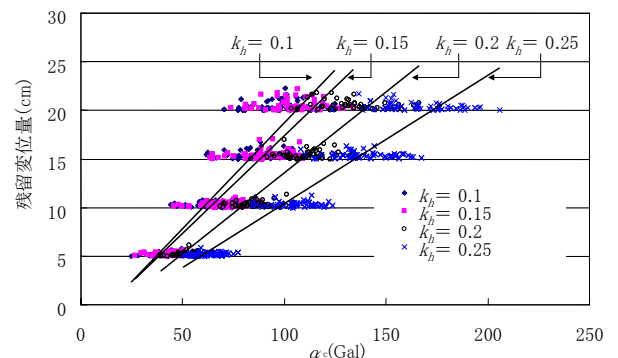


図-17 設計震度と α_c の関係

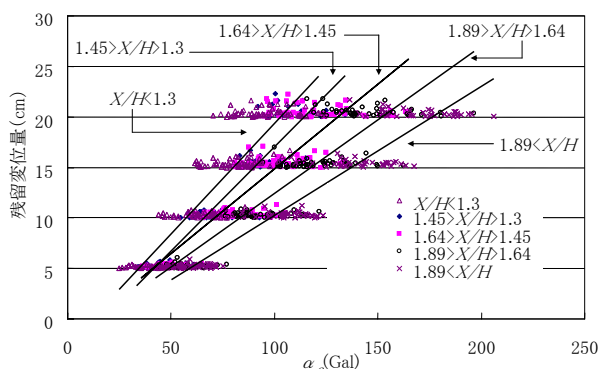


図-18 X/Hと α_c の関係

3) 推定式作成

残留変形量のデータを目的変数、 α_c とX/Hを説明変数として重回帰分析を行い、 α_c 、X/Hによる残留変形量推定式を作成した(式(4)参照)。用いた全データ数は863である。この推定式によりX/Hの変更前と変更後の推定残留変形量を算出し、矢板控え杭間距離の影響を推測して、所要の性能を満たすのに必要な矢板控え杭間距離の目安をつけることができる。

$$d_{est} = 0.072\alpha_c^{1.27}(X/H)^{-1.32} \quad (4)$$

この推定式の精度を調べるため、推定式により求められる残留変形量値 d_{est} (cm)とFLIPによる残留変形量の値の比較を行った。結果を図-19に示す。 d_{est} (cm)はFLIP結果に対して-8.9~9.5cm程度の誤差があることが分かる。

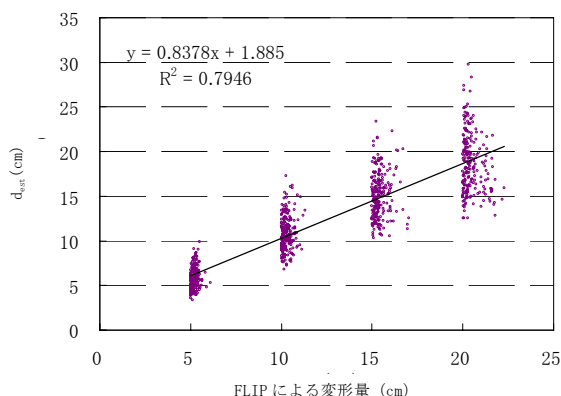


図-19 推定式とFLIP結果の比較

4. 変形モードの検討

ここでは控え直杭式矢板岸壁の変形メカニズムを把握

するため、変形モードについての検討を行う。有限要素法において、土要素の上下節点間の相対変位は図-20のように要素の回転による変位とせん断による変位に分けられる。また、左右節点間の相対変位は図-21のように要素の圧縮による変位と伸張による変位に分けられる。ここでは、控え直杭式矢板岸壁の断面を構成する各土要素について、上下節点間の相対的な残留変形量をせん断と回転、左右節点間の相対的な残留変形量を圧縮と伸張によるものに分けて整理し、その変形モードについて検討を行う。検討を行う断面は、残留変形量に最も影響が大きいパラメータである矢板控え杭間距離が異なる $hx_0 \sim hx_3$ を使用し、地盤条件は地盤ケース1とした。動的解析後の変形モードについては、正弦波45Galを入力地震動とした時の残留変形量を利用した

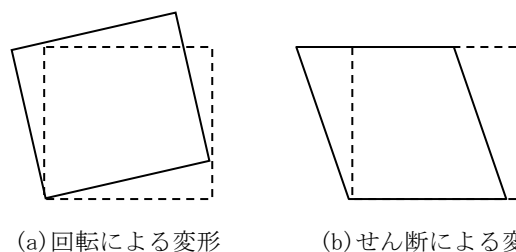


図-20 土要素の上下節点間の変形モードの違い

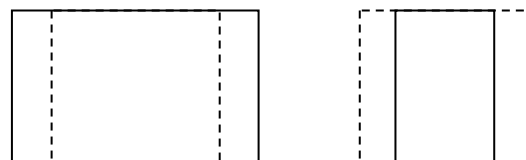


図-21 土要素の左右節点間の変形モードの違い

4.1. 上下節点間の変形モードの検討

上下節点間の相対的な残留変形量をせん断残留変形量 δ_s と回転残留変形量 δ_r に分けて整理し、 δ_r/δ_s の断面分布を調べ、変形モードについて検討する。せん断による残留変形量はせん断ひずみと要素高さの積で求められ、回転による残留変形量は全残留変形量からせん断による残留変形量を引いた値として、式(5)及び式(6)により求める。

$$\delta_s = \gamma_{xy} \times \Delta Y \quad (5)$$

$$\delta_r = \delta - \delta_s \quad (6)$$

ここで、 δ :全残留変形量、 γ_{xy} :せん断ひずみ、 ΔY :要素高さである。

1) 自重解析後上下節点間の変形モード検討結果

地盤ケース1における hx0~hx3 についての自重解析後の δ_r/δ_s の断面分布を図-22 に示す。ここで、 $\delta_r/\delta_s > 1$ を色付けしている。また、図-23 に海底面から天端間の各累積残留変形量の断面方向分布を示す。ここで、X軸は控え杭の位置を1とした時の矢板からの相対的位置、Y軸は残留変形量で海側への変位をプラスとしている。これらのことより以下のことが分かる。

図-22 より矢板背後、控え杭前面の海底面より上の土要素では、せん断残留変形量よりも回転残留変形量の方が大きい。

図-23 より各検討ケースとも、せん断残留変形量は杭前面の $X=0.6\sim 1.0$ の範囲で $+0.01\text{m}$ あたりを推移しているが、回転残留変形量は、hx0 が $+0.05\text{m}$ 、hx3 が $+0.02\text{m}$ あたりを推移しており、矢板控え間距離が長いケースになるにつれて、値が大きくなっているのが見られる。矢板控え間距離が長くなるに連れて、回転しにくい断面になっているのが分かる。

2) 動的解析後上下節点間の変形モード検討結果

地盤ケース1の hx0~hx3 についての動的解析後の δ_r/δ_s の断面分布を図-24 に示す。ここで、 $\delta_r/\delta_s > 1$ を色付けしている。図-25 に海底面から天端間の各累積残留変形量の断面方向分布を示す。ここで、X軸は控え杭の位置を1とした時の矢板からの相対的位置、Y軸は残留変形量で海側への変位をプラスとしている。また、図-26~図-29 には正弦波 45Gal の入力地震動に対する γ_{xy} 、 ε_x のひずみ時刻歴結果及び τ_{xy} 、 σ_x の応力時刻歴結果を示す。これらのことより以下のことが分かる。

図-24 より矢板背後では自重解析後同様、回転による残留変形量の影響が大きい。控え杭前面ではせん断残留変形量の影響が大きい。図-26~図-29 よりひずみ時刻歴結果を見ても、矢板背後では地震時の作用に対し ε_x の応答、控え杭前面では γ_{xy} の応答が大きく、このことが伺える。

図-23 及び図-25 より、自重解析後と動的解析後の累積残留変形量を比較すると、例えば hx0 では杭前面の $0.6\sim 1.0$ の範囲で回転残留変形量、せん断残留変形量がそれぞれ $+0.05\text{m}$ から $+0.12\text{m}$ 程度、 $+0.01\text{m}$ から $+0.15\text{m}$ 程度と変化しており、回転・せん断残留変形量ともに増加していることが分かる。また、その累積残留変形量は回転残留変形量、せん断残留変形量ともに矢板控え杭間距離が長いほど小さい。

図-26~図-29 より、同標高の時刻歴結果を比較する

と、例えば hx0 では着目点 0-1 と f-1 において、 τ_{xy} の振幅は同程度の大きさであるが、 γ_{xy} の波形の中心線は、着目点 f-1 においてほぼ横ばいに変化が無いのに対し、着目点 0-1 では経過時間 10 秒辺りから、急激にマイナス側へ変化している。これは、着目点 f-1 は水平地盤部であるため初期せん断応力=0 であるのに対し、着目点 0-1 は矢板前面部で地盤の変形に伴い初期せん断応力 $\neq 0$ となるため、同程度の応力増加量でも、初期せん断応力が異なるとひずみ増加量は大きく異なるためだと考えられる。また、着目点 0-5 と f-4 では、 τ_{xy} の振幅は同程度であるのに対し、着目点 0-3、0-4、f-3 では控え杭に近い着目点 0-4 で τ_{xy} の振幅が大きい。着目点 0-3 と f-3 で τ_{xy} の振幅は同程度である。これは、着目点 0-4 が控え杭に近く、標高が控え杭の変形が大きいタイロッド取付点付近であるため、控え杭からの荷重の影響を大きく受けるためだと考えられる。着目点 0-4 では、この結果と初期応力の存在により、 γ_{xy} の波形の中心線が 10 秒辺りから、マイナス側へ大きく変化している。

4.2. 左右節点間の変形モードの検討

左右節点間の相対的な残留変形量を圧縮と伸張によるものに分けて整理し、その変形モードについて検討を行う。FLIP において土要素における ε_x の正負は、それぞれ水平方向に対する伸張・圧縮に対応する。 ε_x の正負を調べ、土要素の伸張・圧縮の断面分布状況を整理する。

1) 自重解析後左右節点間の変形モード検討結果

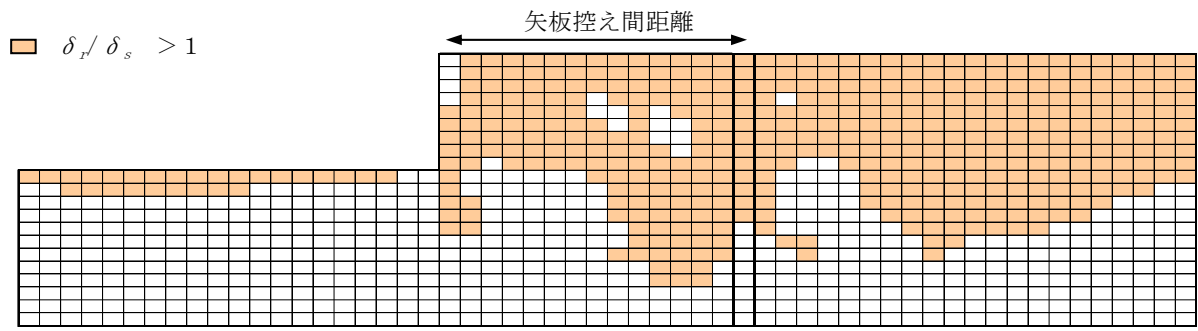
図-30 に地盤ケース1における hx0~hx3 についての自重解析後の ε_x の断面分布状況を示す。ここで、 $\varepsilon_x < 0$ 、つまり圧縮土要素を色付けしている。これらのことより以下のことが分かる。

矢板前面においては圧縮している土要素がほとんどであるが、矢板控え杭間においては控え杭頭部以外ではほとんどの土要素が伸張の状態にあることが分かる。これは、矢板背後地盤の土圧により矢板が海側へ押し出され、土要素が水平方向に広がるよう挙動するためだと考えられる。

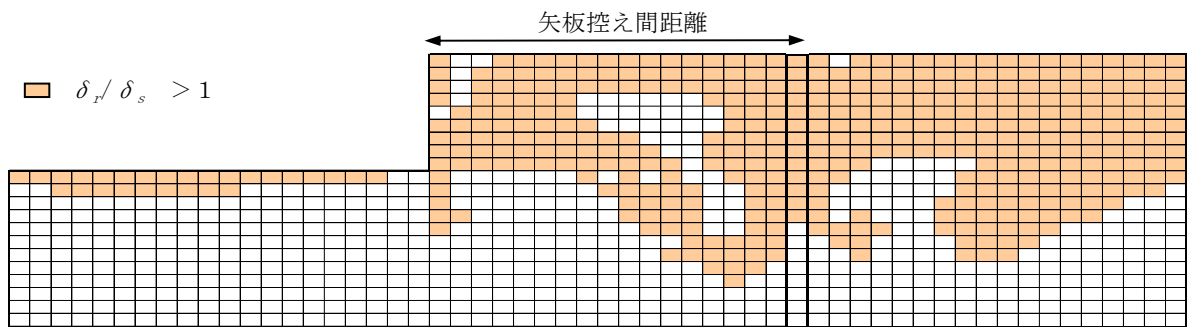
2) 動的解析後左右節点間の変形モード検討結果

図-31 に地盤ケース1における hx0~hx3 についての動的解析後の ε_x の断面分布状況を示す。ここで、 $\varepsilon_x < 0$ 、つまり圧縮土要素を色付けしている。この結果より、以下のことが分かる。

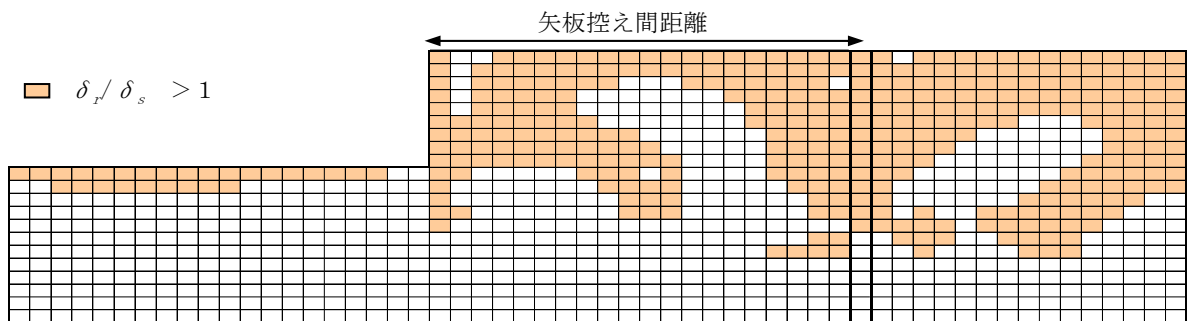
自重解析後同様、矢板前面においては圧縮している土要素がほとんどであり、控え杭前面においては控え杭頭



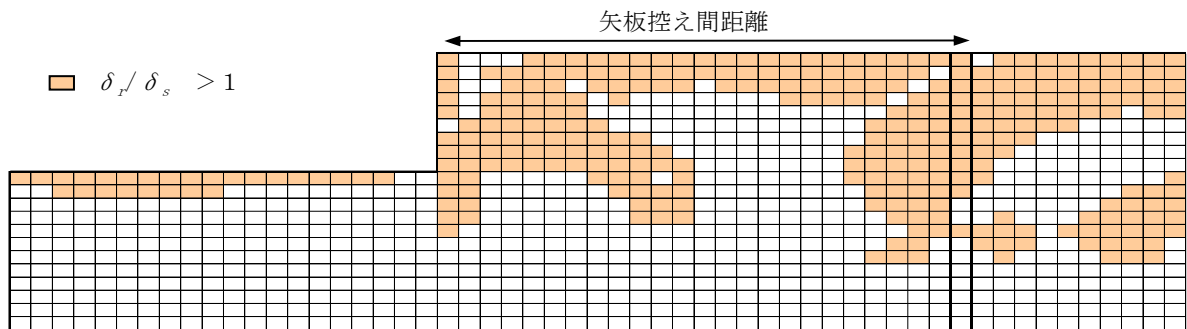
(a) hx0



(b) hx1



(c) hx2



(d) hx3

図- 22 自重解析後 δ_r / δ_s 分布

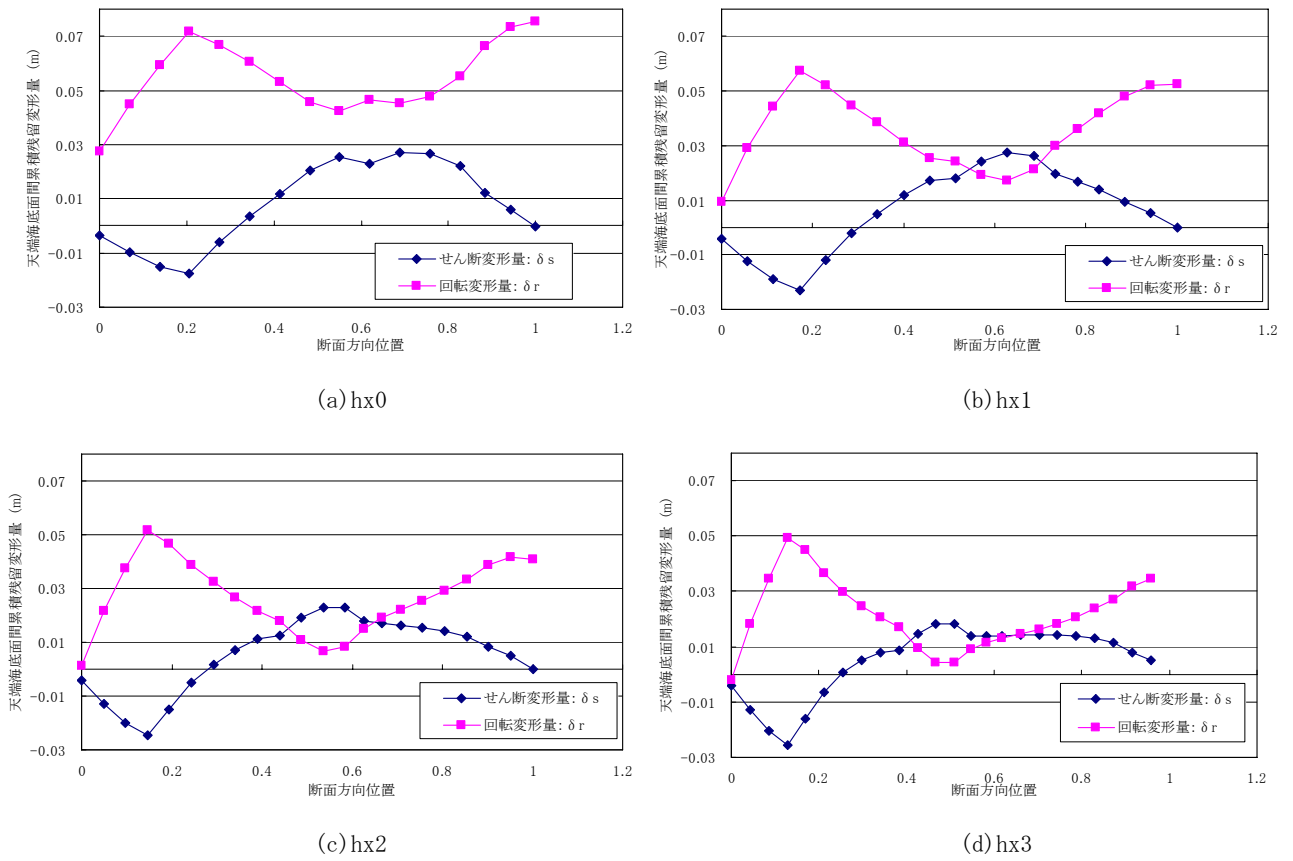


図- 23 自重解析後 海底面天端間の各累積変形量 断面方向分布

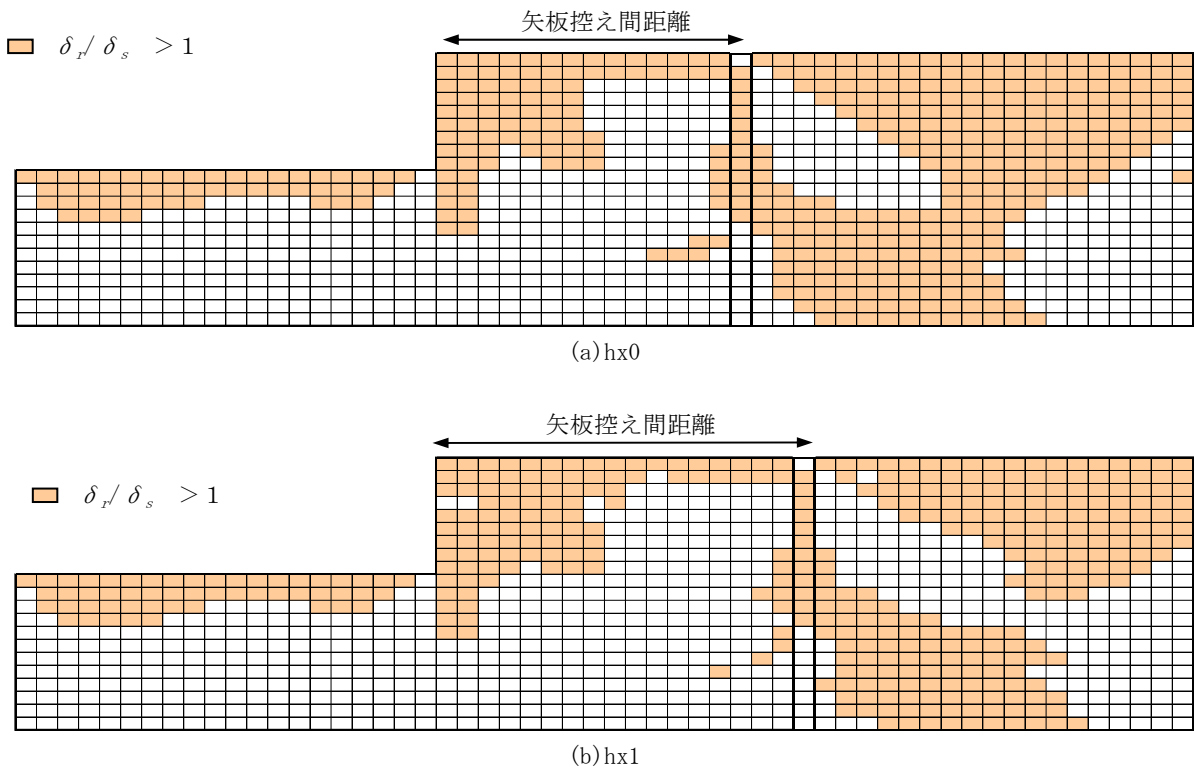
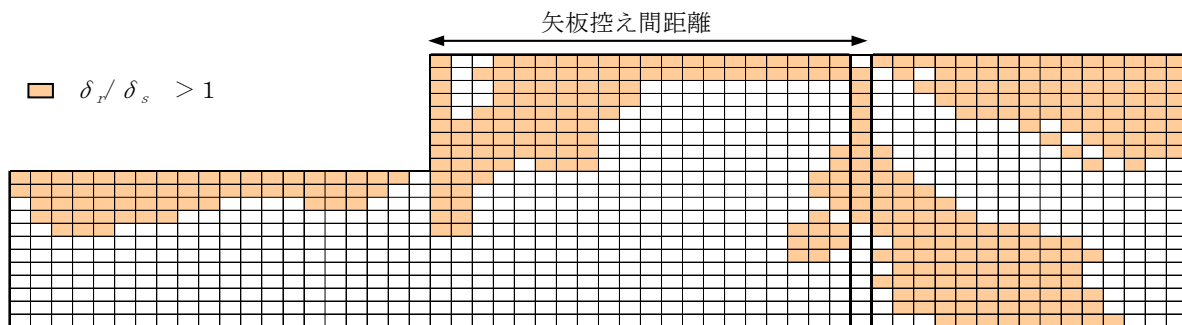
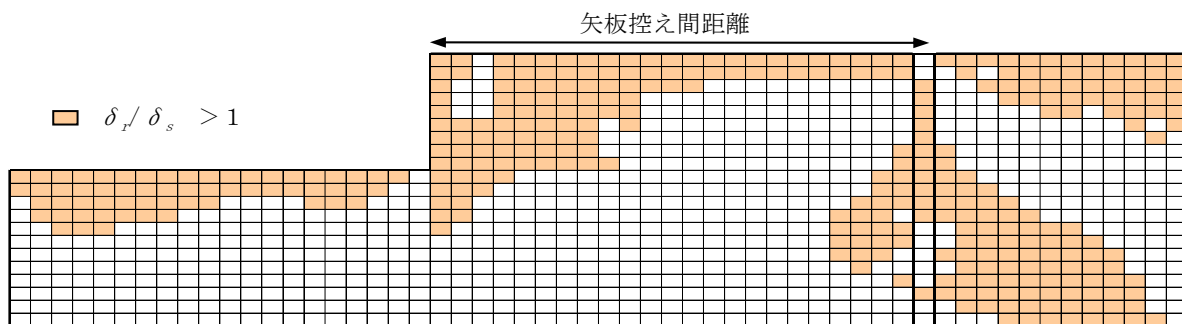


図- 24 動的解析後 δ_r/δ_s 分布

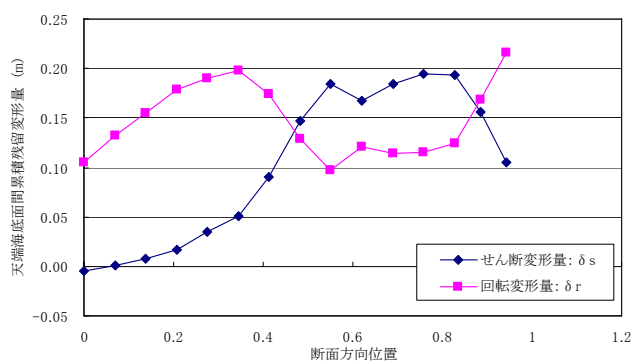


(c)hx2

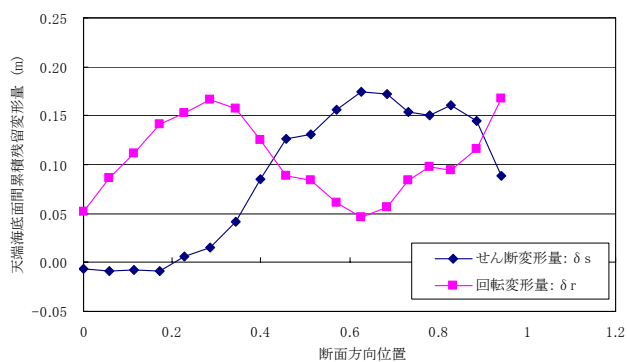


(d)hx3

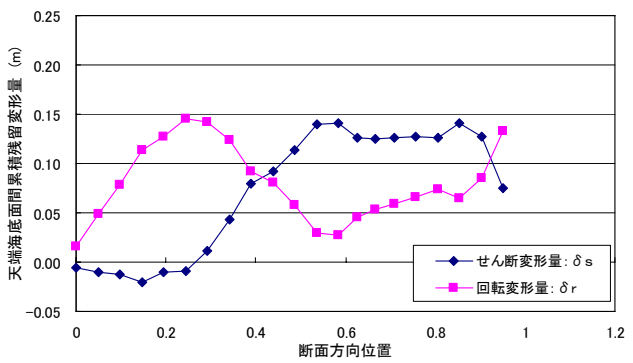
図- 24 動的解析後 δ_r / δ_s 分布 (続き)



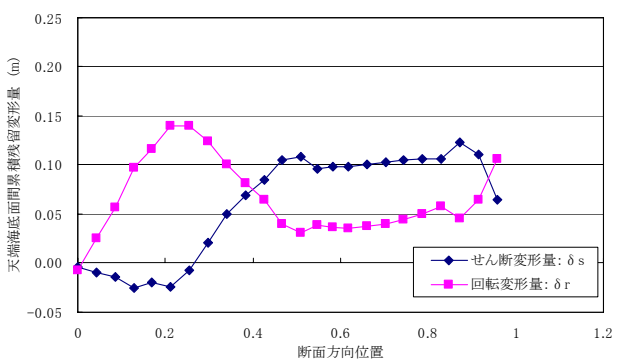
(a)hx0



(b)hx1



(c)hx2



(d)hx3

図- 25 動的解析後 海底面天端間の各累積変形量 断面方向分布

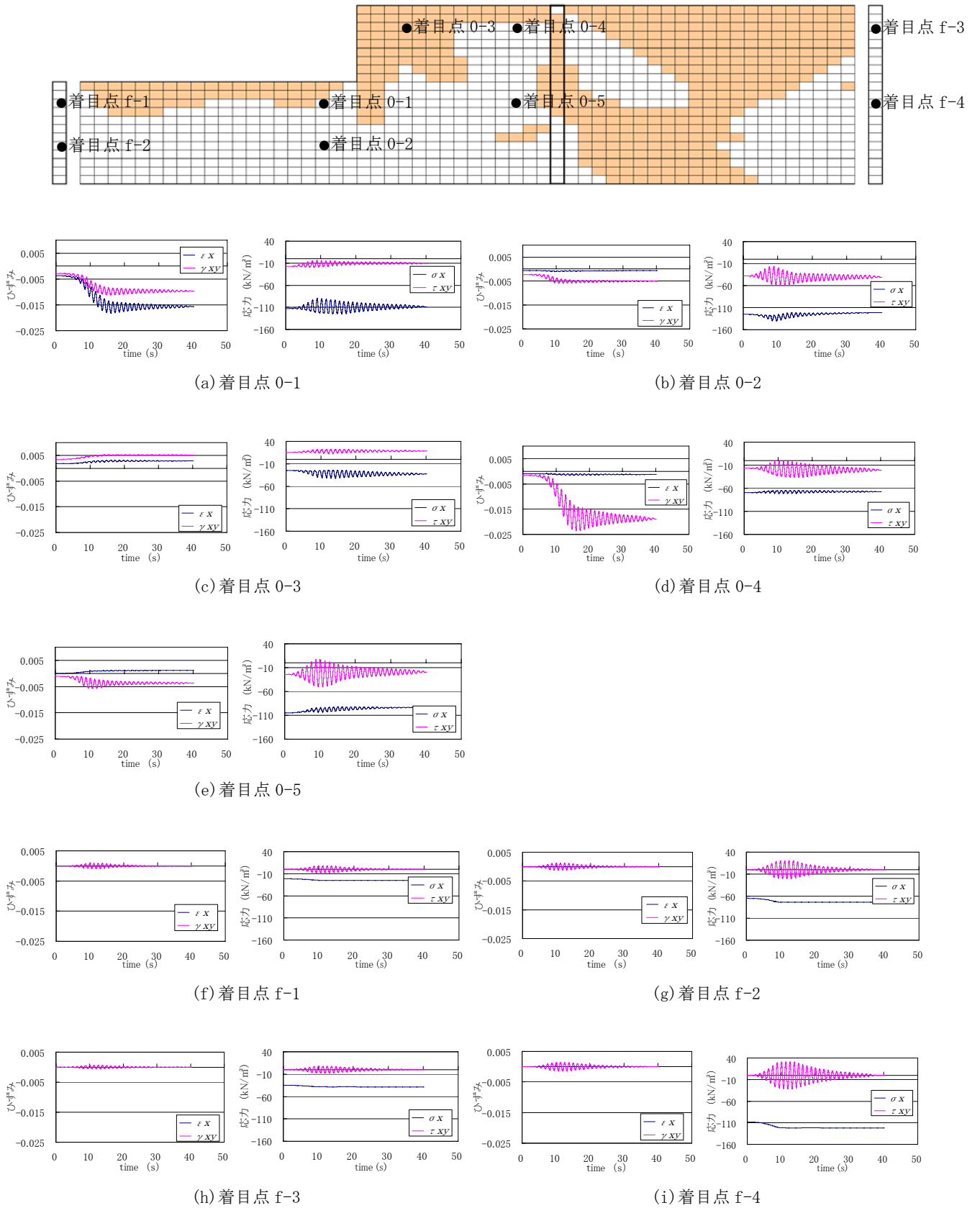


図- 26 hx0 ひずみ, 応力時刻歴

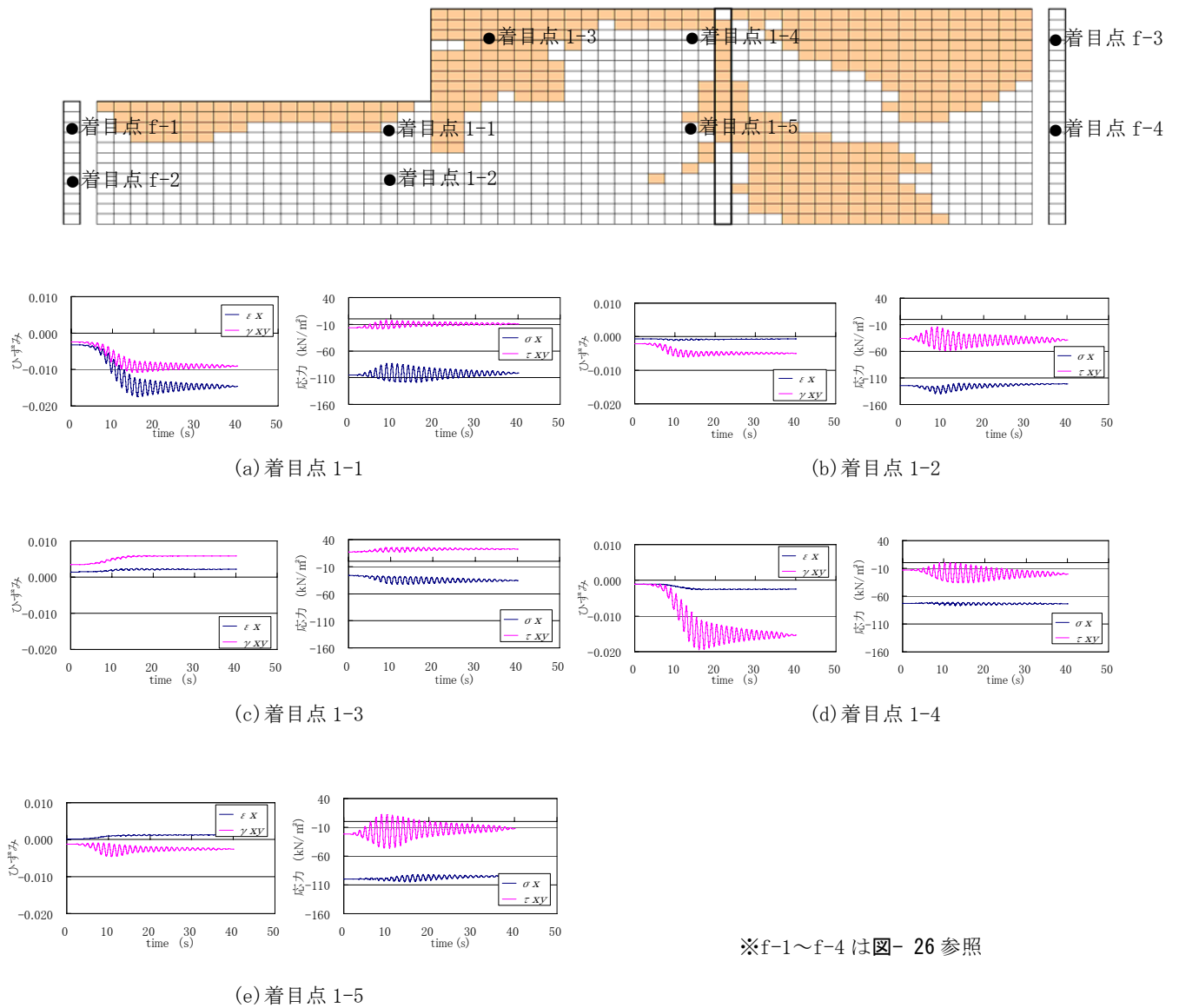


図- 27 hx1 ひずみ, 応力時刻歴

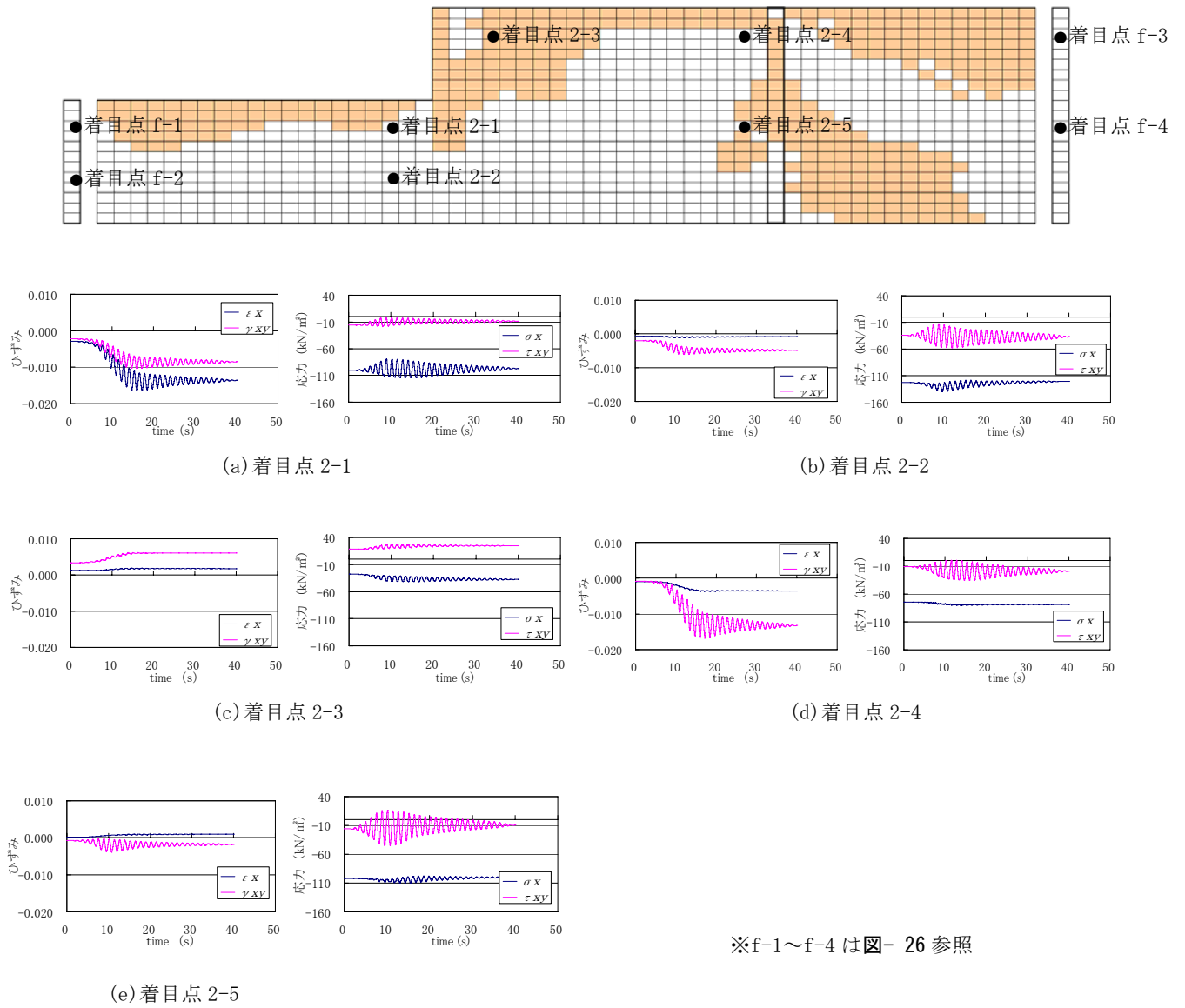
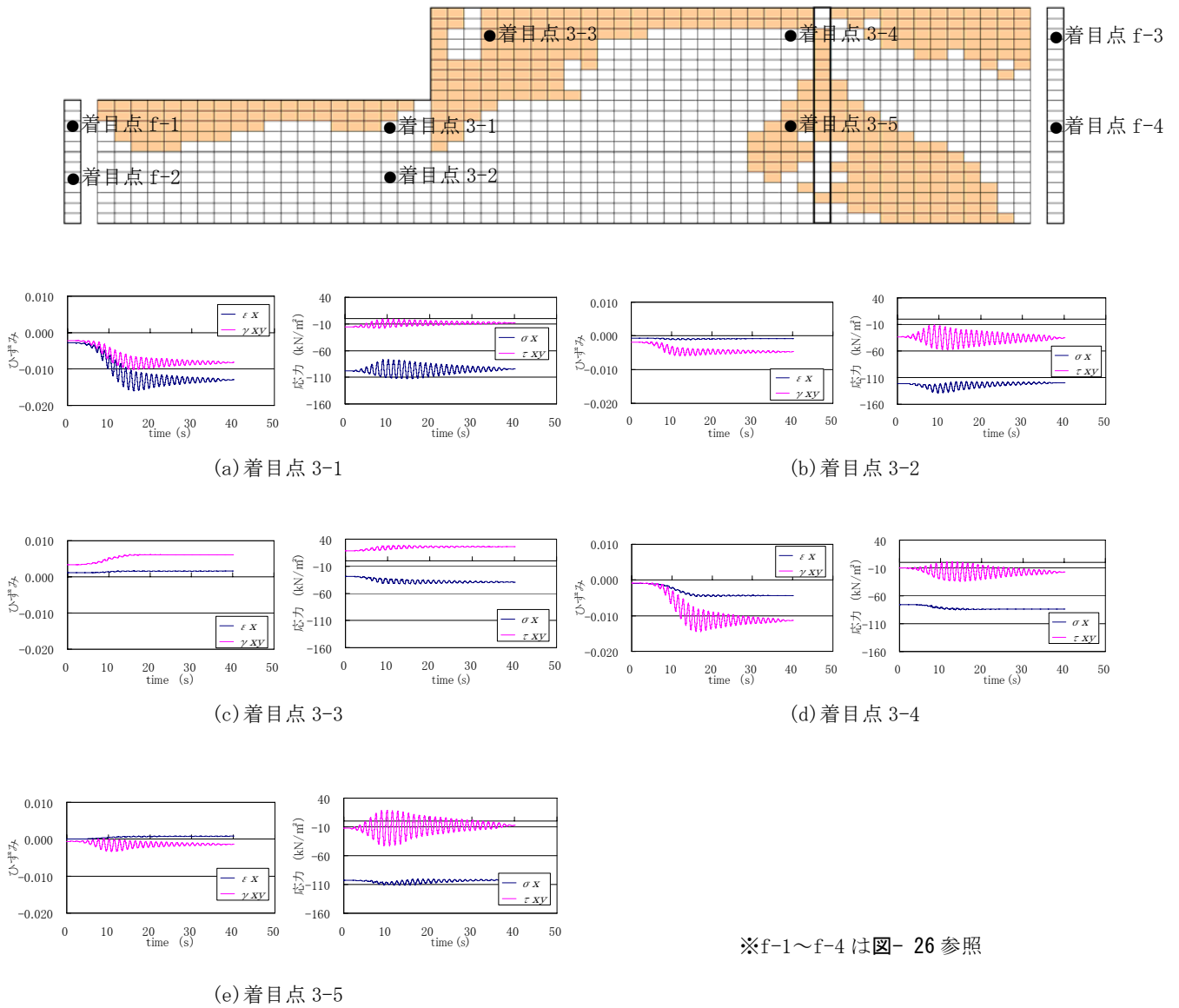
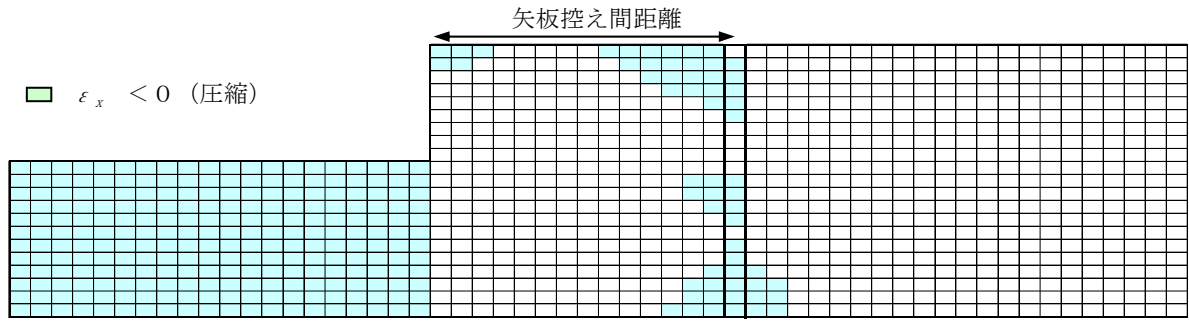


図- 28 hx2 ひずみ, 応力時刻歴

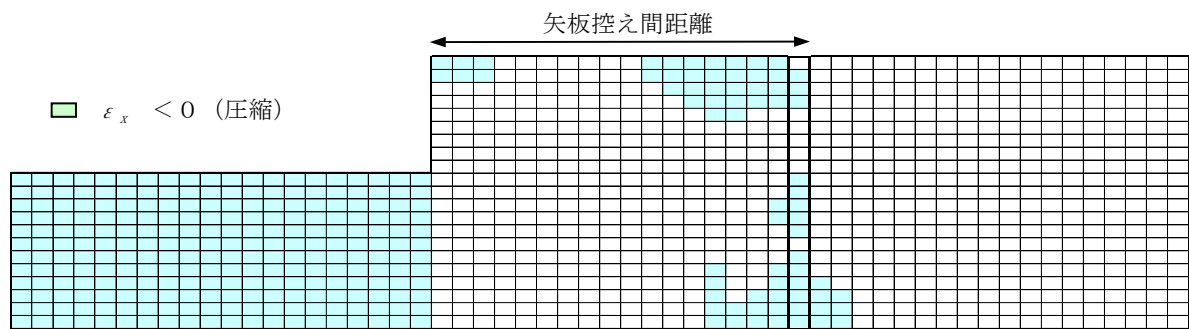


※f-1～f-4 は図- 26 参照

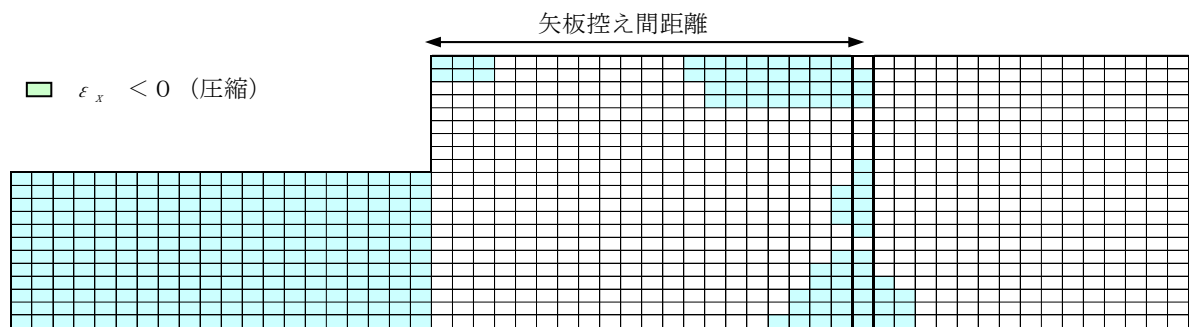
図- 29 hx3 ひずみ, 応力時刻歴



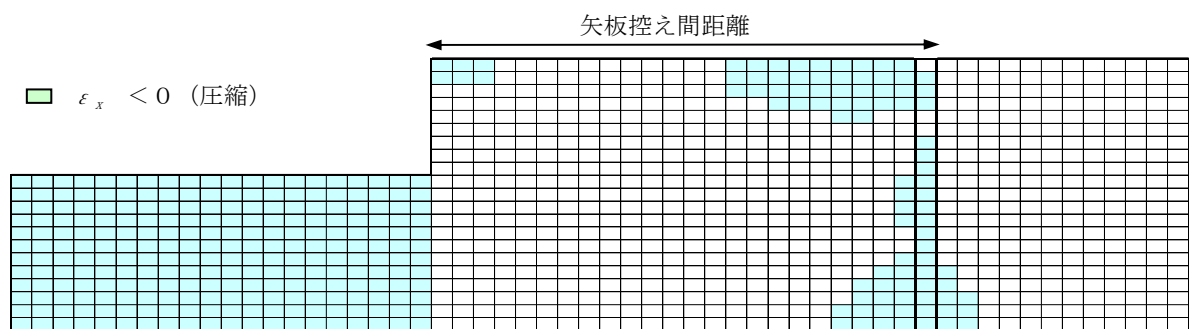
(a) hx0



(b) hx1



(c) hx2



(d) hx3

図-30 自重解析後 ϵ_x 断面分布状況

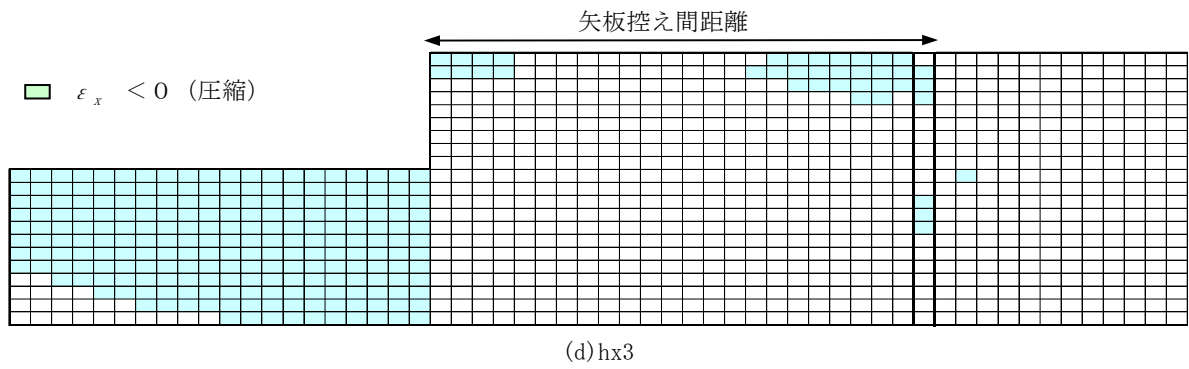
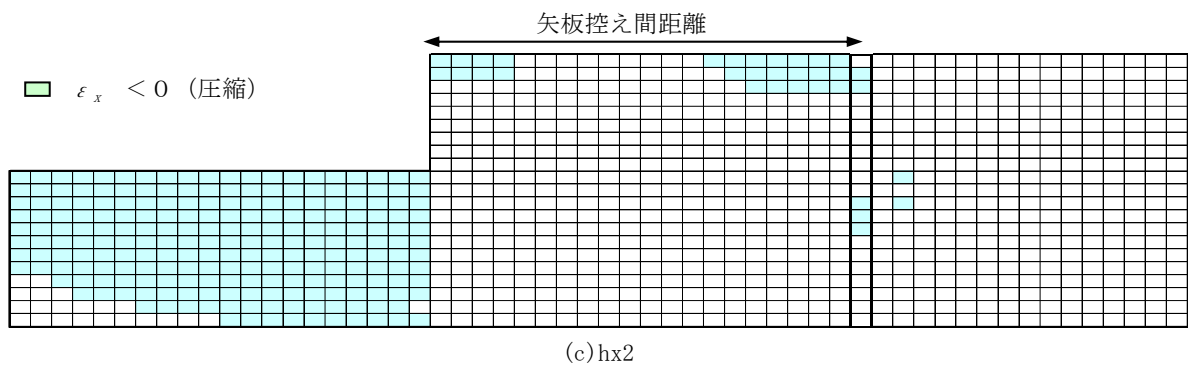
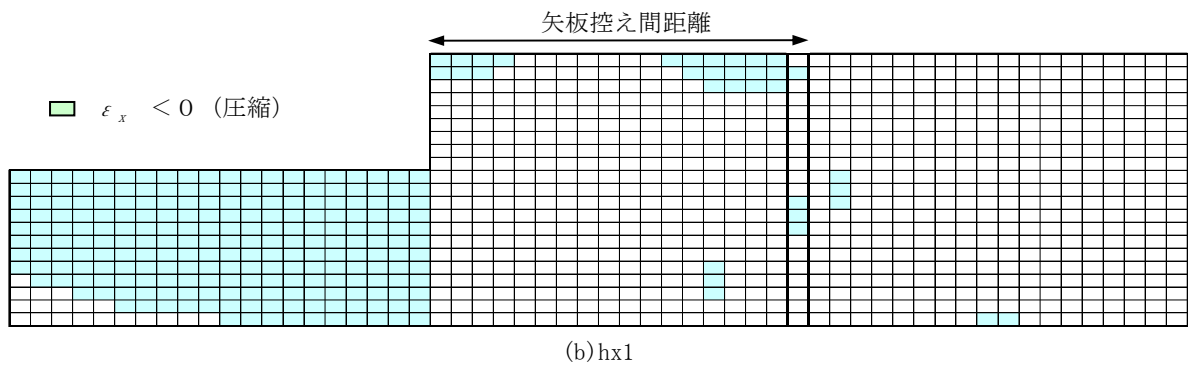
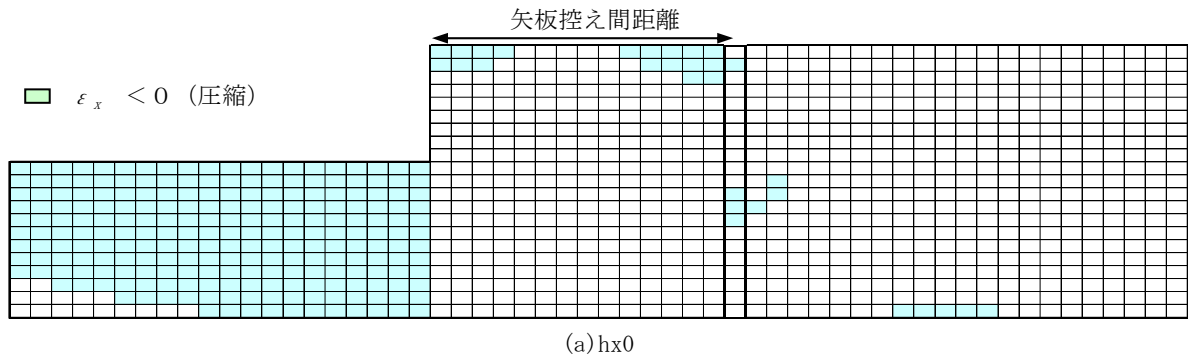


図- 31 動的解析後 ε_x 断面分布状況

部以外ではほとんどの土要素が伸張の状態にあるが、控え前面の圧縮している土要素の範囲は、自重解析後と比較すると小さくなっているのが分かる。

4.3. 検討結果まとめ

本章の主な結論は以下の通りである。

控え直杭式矢板岸壁の土要素の上下節点間の変形モードは、自重解析後では、水平方向が矢板背後から控え杭前面の間、鉛直方向が海底面から天端までの間において、せん断残留変形量よりも回転残留変形量の方が大きい。しかし、動的解析後の変形モードは、控え杭前面については、せん断残留変形量が回転残留変形量より大きくなっている。せん断残留変形量の増加の要因は、初期せん断応力の存在が考えられるが、特に、控え杭前面のタイロッド取付点の標高近くでは τ_{xy} の時刻歴波形の振幅が、同標高で水平方向の位置が異なる場所でのものより大きくなっており、杭からの荷重による τ_{xy} の増加もせん断残留変形量の増加に影響していると考えられる。

控え直杭式矢板岸壁の土要素の左右節点間の変形モードは、自重解析後・動的解析後ともに、矢板前面と控え杭の杭頭部の一部が圧縮、その外は伸張という変形モードになっており、これは矢板の海側への変形が要因と考えられる。

5. 骨組みモデルによる自重解析後変形の再現の検討

図-32のようなウィングレー型のバネを用いた簡易な骨組みモデルで、FLIPの自重解析後の変形を再現することを検討する。再現の対象となる検討ケースは、地盤ケース1のhx0~hx3とする。ここで、ウィングレー型の地盤バネとは図-33のように短冊状に切れた多数のバネで地盤を表現しようとする手法で、地盤の変位に比例した地盤反力が杭に作用することとなる。杭の設計などで一般的に用いられる手法であり、地盤バネは地盤反力係数として与えられる。

変形を再現するに当たり、骨組みモデルに作用させる土圧強度や水平地盤反力係数などが必要となるが、この簡易な骨組みモデルの適用性を見極める観点から、まずはFLIPから得られた結果を利用して、土圧強度や水平地盤反力係数を設定することとする。

5.1. 矢板に働く土圧

矢板に働く土圧強度は、FLIPから得られた矢板の曲げモーメントを2回微分することにより求めた。ただし、海底面(標高-11m)より下は受動側の土圧が働き、曲げモーメントより土圧強度を求められないため、海底面より上の有

効重量を上載荷重としたブシネスクによる弾性応力解を利用する。ブシネスクの弾性応力解は分布荷重が水平方向に無限に作用する時、載荷範囲端点では土圧係数 $K_0=0.5$ となる。図-34は海底面より上の土圧強度を矢板の曲げモーメントの2回微分、海底面より下の土圧強度を σ_x として求めたFLIP結果による土圧分布と、海底面より上の土圧を裏込め石の条件 $\phi=40^\circ$ 、 $\delta=15^\circ$ から算出されるクーロンの主働土圧係数より、海底面より下を $K_0=0.5$ で与えた土圧分布の比較であるが、海底面より下においては、 σ_x による土圧分布と $K_0=0.5$ で与えた土圧分布で大きな差が無く、 $K_0=0.5$ で与える土圧分布が妥当である事が分かる。 σ_x をFLIP上で矢板に働いている土圧強度としたのは、図-35に示すように矢板背後の τ_{xy} の値は σ_x に比べて極めて小さく、矢板に働く土圧強度は σ_x によるものと考えられるためである。海底面より上においては、矢板頭部以外は、FLIPから得られた土圧分布とクーロンの主働土圧係数より得られる土圧分布であり差が見られないことが分かる。また、hx0~hx3で土圧分布に大きな差は見られず、矢板に働く土圧強度は矢板控え間距離にあまり影響されてないことが分かる。

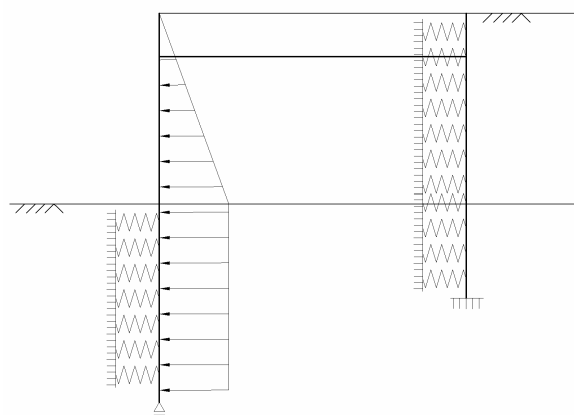


図-32 骨組みモデル

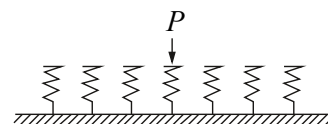


図-33 ウィングレー型の地盤バネによる地盤のモデル化

ところで、骨組みモデルに作用させる海底面下の土圧強度は、受動側から作用する土圧係数 $K_0=0.5$ の土圧強度を差し引いた値にするため、図-36のように等分布荷重とする。