

ISSN 0386—5878

土木研究所資料第3292号

003

土 木 研 究 所 資 料

ダム用ゲートにおける P C アンカ方式アンカレージの応力解析

平成6年8月

建設省土木研究所
ダム部ダム構造研究室

Copyright © (1994) by P.W.R.I

All right reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複製は、土木研究所所長の文書による承認を得ずしてこれを行なってはならない。

ダム用ゲートにおける P C アンカ方式アンカレージの応力解析

ダム構造研究室 室 長 永 山 功
研 究 員 片 平 博

要 旨

高圧ラジアルゲートのアンカレージの形式としてP C アンカ方式がある。P C アンカを用いたゲートの支持方式の設計法は既に体系化されているが、P C アンカがダム堤体の応力状態に及ぼす影響とその補強方法についてはいまだ体系化された手法がない。本報文は、P C アンカ方式を用いたゲートアンカレージ周辺の堤体の応力状態を解析し、その特性について整理したものである。

キーワード：ダム，放流設備，ゲート，アンカレージ，P C アンカ，プレストレストコンクリート，有限要素法

ま え が き

コンクリートダム の 堤体内には、洪水処理を目的とした流量調節用ゲートが設けられる。ゲートの形式には種々のものがあるが、大容量の洪水調節用ゲートでは、設置上の制約がある場合を除き、ラジアルゲートを採用する事例が多い。このラジアルゲートは、扉体に作用する水圧荷重を脚柱を介してトラニオンピンで受け、トラニオンピンに集中した荷重を堤体コンクリートに伝達する構造となっている。このゲート荷重を堤体に確実に伝達させるための支持方式をアンカレッジといい、このアンカレッジの方式としては支圧ガード方式、テンションビーム方式、PCアンカ方式などの方式があり、各ダムにおいて、ゲートの規模や設置条件、またダムの形式や施工法等を考慮して最も適切な方式を採用している。

これらのアンカレッジの設計では、ゲートに作用する水圧荷重をダムの堤体に確実に伝達するための設計がなされているが、アンカレッジを介して堤体に伝達された荷重が、堤体内の応力分布に及ぼす影響については不明な点も多い。

本報文は、Mダムの洪水調節用ゲートを例に、PCアンカ方式のアンカレッジの挙動特性と堤体内の応力分布に与える影響について検討を行った結果をとりまとめたものである。

目 次

まえがき

1. 解析モデルの設定	1
2. PCアンカと堤体コンクリートの変形についての概略検討	3
3. 有限要素法による解析方法	5
3.1 解析モデル	5
3.2 解析条件と解析ケース	9
4. 有限要素法による解析結果	15
4.1 ダム全体モデルの解析結果	15
4.1.1 PC緊結荷重に対する挙動	15
4.1.2 ゲート水圧荷重に対する挙動	18
4.1.3 PC緊結荷重とゲート水圧荷重に対する挙動	21
4.1.4 堤体自重と堤体上流面水圧に対する挙動	24
4.2 アンカレイジ周辺の詳細モデルの解析結果	29
4.2.1 詳細モデルの境界条件の設定方法	29
4.2.2 PC緊結荷重に対する挙動	31
4.2.3 ゲート水圧荷重に対する挙動	37
4.2.4 PC緊結荷重とゲート水圧荷重に対する挙動	43
4.2.5 堤体自重と堤体上流面水圧を考慮した応力状態	51
5. まとめと考察	55

1. 解析モデルの設定

検討を行うゲートは、設計最大水深115.29mの高圧ラジアルゲートで、ゲートの扉体寸法は幅3.0m、高さ3.04mである。このゲートは、RCD工法における施工性を考えて、図-1に示すような全管路型放流管（I型放流管）の下流端に配置され、ゲートの下流側には荷重を伝達するために十分なコンクリートの厚みがなく、アンカレージの方式としてPCアンカ方式が採用されている。

扉体に作用する水圧荷重（以下、ゲート水圧荷重という）は1,038tfであり、荷重は脚柱、トラニオンピンを介してガーダで支持され、さらにガーダの端部からPCアンカによって上流側の堤体コンクリート内に伝達される構造となっている。PCアンカは図-2に示すような構造を有している。すなわち、ガーダの両側にそれぞれPC鋼より線を使用した8本のPCアンカを配置し、1本あたり95tf（ガーダ片側あたり760tf）のプレストレス力（以下、PC緊結荷重という）を作用させることによって、堤体コンクリートの剛性を利用してゲート水圧荷重に抵抗する構造となっている。

本報文は、図-2に示すPCアンカ方式のアンカレージをモデルケースとして、2次元有限要素法により、ガーダの変形と堤体コンクリートの応力分布について検討を行ったものである。

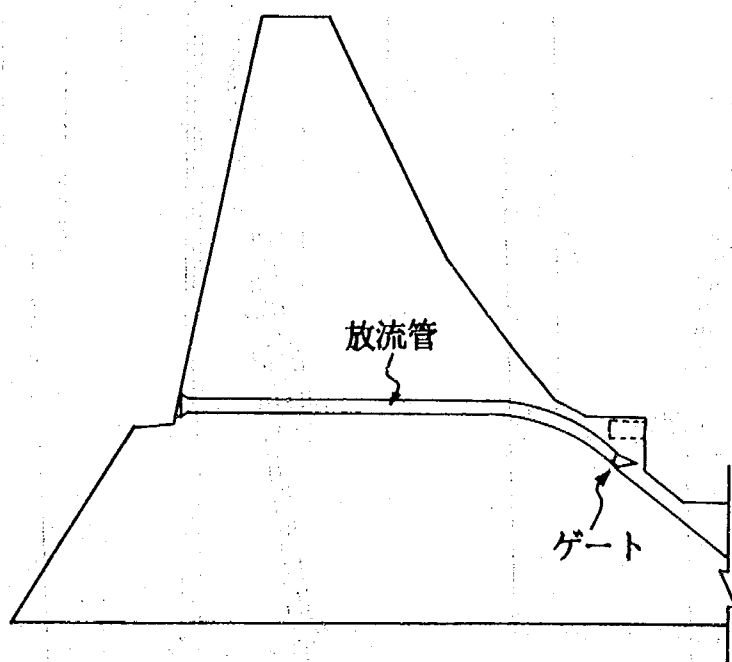


図-1 ゲートの配置位置

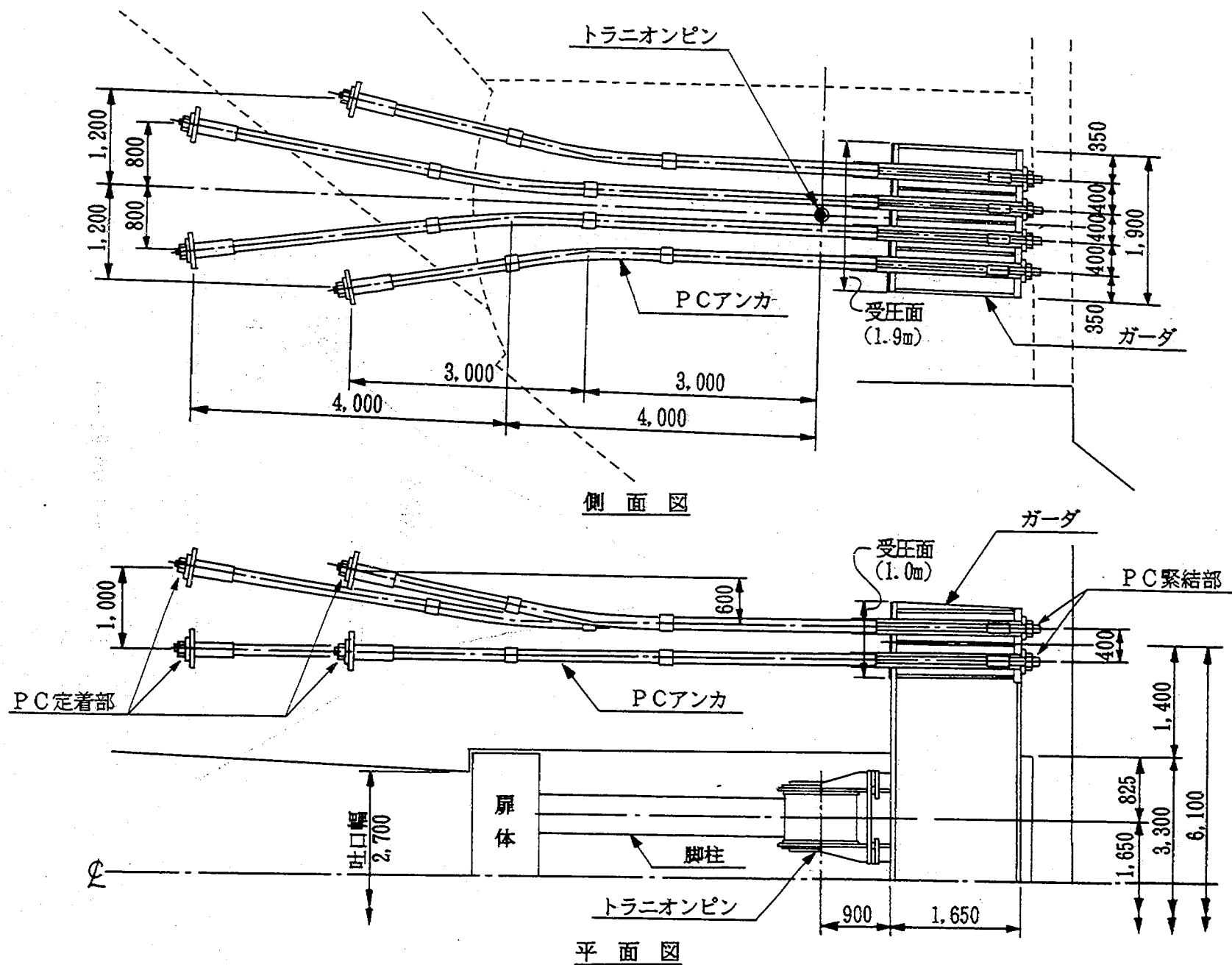


図-2 PCアンカー方式アンカレッジの構造図

2. PCアンカと堤体コンクリートの変形についての概略検討

有限要素法を用いた詳細な検討を行う前に、PCアンカの構造特性を明かにするため、PCアンカによってPC緊結荷重を導入した状態、およびゲート水圧荷重が作用した状態に対して、PCアンカと堤体コンクリートの変形について概略的な検討を行った。解析モデルの概要を図-3に示す。

まず荷重条件として、PC緊結荷重は1本あたり95tfで、ガーダ片側あたり8本のPCアンカによる総荷重は760tfである。また、ゲート水圧荷重は1,038tfでガーダ片側あたり519tfである。

次に部材寸法として、PCアンカ1本あたりの断面積は 18.755cm^2 で8本の合計は 150cm^2 である。また、堤体コンクリートについては、実際の荷重の分散を考慮するとかなり広い断面積が期待できるが、ここでは安全側の判断として、ガーダを支持するコンクリートの受圧面の面積（幅 $1.0\text{m} \times$ 高さ 1.9m ）を仮定した。また、荷重を支持するコンクリートの長さはPCアンカの平均長さとして8mとした。なお、弾性係数はPCアンカが $2,100,000\text{kgf/cm}^2$ 、コンクリートが $250,000\text{kgf/cm}^2$ とした。

以上の設定条件から、PC緊結荷重を導入した時とゲート水圧荷重が作用した時のPCアンカとコンクリートの変形量および応力を計算すると表-1に示すようになる。すなわち、PCアンカを緊張してPC緊結荷重を導入すると、PCアンカは 19.3mm 伸びて $5,067\text{kgf/cm}^2$ の引張応力を生じ、コンクリートは 1.29mm 収縮して 40.3kgf/cm^2 の圧縮応力を生じる。この場合、PCアンカの変形量および応力はコンクリートの変形量および応力に比べて極めて大きくなっている。

次に、この状態でさらにゲート水圧荷重が作用すると、PC緊結荷重によってPCアンカとコンクリートが一体となって荷重に抵抗するため、PCアンカとコンクリートの変形量はともに 0.82mm の伸びとなる。また、このとき生じる応力増分はPCアンカで引張側に 216.3kgf/cm^2 、コンクリートで引張側に 25.8kgf/cm^2 となる。これを分担荷重で表せば、ゲート水圧荷重 519tf に対してPCアンカの分担荷重が 32.5tf 、コンクリートの分担荷重が 486.5tf となる。このようにゲート水圧荷重について考えると、PCアンカの荷重分担率はわずか 6.3% （ $=32.5/519$ ）に過ぎず、また、ゲート水圧荷重によってPCアンカに生じる応力増分はPC緊張荷重による応力のわずか 4.3% （ $=216.3/5,067$ ）に過ぎない。また、ここでは堤体コンクリート中での応力分散はないものと仮定しているが、実際の堤体コンクリートでは3次元的な応力分散が生じてコンクリートの剛性はさらに大きくなり、PCアンカの荷重分担はさらに小さくなると考えられる。

このようなことから、ゲート水圧荷重が作用した際のPCアンカ周辺の堤体コンクリートの変形および応力特性を検討する場合、PCアンカの荷重分担、PCアンカの応力増分は極めて小さく、解析上PCアンカの剛性は無視することができると考えられる。そこで、以下の検討では、PCアンカの剛性は無視して堤体コンクリートのみをモデル化した解析を行うものとした。

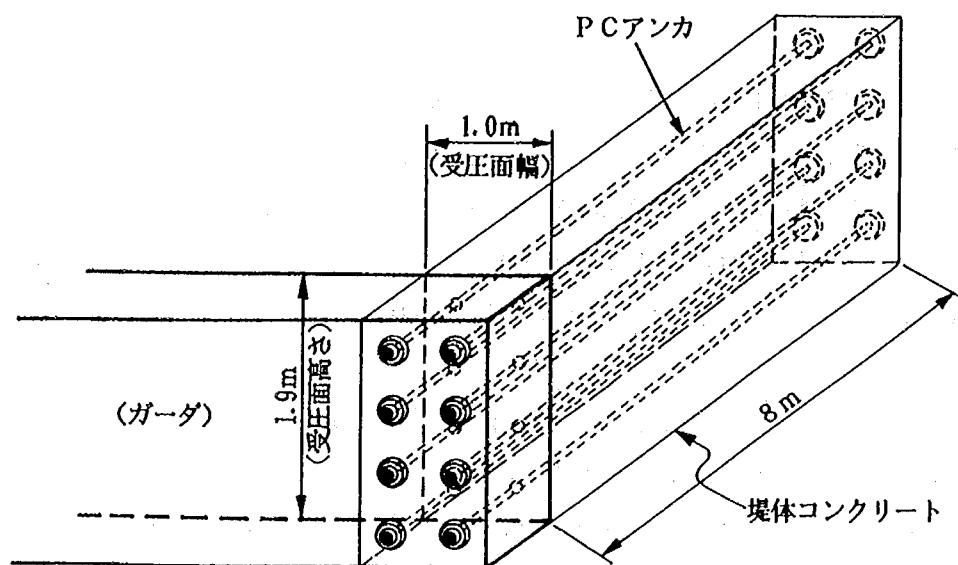


図-3 概略検討を行ったモデル形状

表-1 PCアンカと堤体コンクリートの変形量および応力（概略検討）

		PCアンカ	堤体コンクリート
部 材 条 件	断面積 A_i (cm ²)	150	18,850
	長さ ℓ_i (cm)	800	800
	弾性係数 E_i (kgf/cm ²)	2,100,000	250,000
荷 重	P	荷重 $P=760,000\text{kgf}$	
	緊C	分担荷重 P_i (kgf)	760,000
	結	応力 $\sigma_i = P_i / A_i$ (kgf/cm ²)	5,067
	荷	ひずみ $\epsilon_i = \sigma_i / E_i$	0.002412
	重	変形量 $d_i = \epsilon_i \ell_i$ (cm)	1.93
	ゲ	荷重 $P=519,000\text{kgf}$	
	水	分担荷重 P_i (kgf)*1	32,500
	圧	応力 $\sigma_i = P_i / A_i$ (kgf/cm ²)	216.3
	ト	ひずみ $\epsilon_i = \sigma_i / E_i$	0.000103
重	荷	変形量 $d_i = \epsilon_i \ell_i$ (cm)	0.082
	ゲ	分担荷重 P_i (kgf)	792,500
	ト	応力 $\sigma_i = P_i / A_i$ (kgf/cm ²)	5,283
	水	ひずみ $\epsilon_i = \sigma_i / E_i$	0.002515
	圧	変形量 $d_i = \epsilon_i \ell_i$ (cm)	2.01
	荷		
	重		
	+		

*1: ゲート水压荷重作用時の分担荷重の大きさは、その和が519,000kgfで、それぞれの部材に生じるひずみが相等しくなる条件から求められる。

3. 有限要素法による解析方法

3.1 解析モデル

アンカレッジ周辺の堤体コンクリートの応力解析を精度良く行うためには、本来ならば3次元応力解析を行うべきであるが、3次元有限要素法で高い精度の解析結果を得るためには、要素数が膨大なものとなり、それに係る労力や費用を考えると必ずしも最良な方法とは考え難い。また、応力分布や変形特性の傾向をつかむための計算であれば、2次元解析でも十分な精度の結果を得ることが可能である。このようなことから、今回は2次元有限要素法による解析を実施した。

解析を行う断面形状としては、図-4に示すダムの「全体モデル」と図-5に示すアンカレッジ周辺の詳細モデル（鉛直断面詳細モデル、水平断面詳細モデル）を設定した。なお、モデル化にあたっては、前述の検討結果に基いてPCアンカはモデル化せず、「全体モデル」については堤体コンクリートのみ、「詳細モデル」についてはコンクリートとガーダのみをモデル化した。また、「詳細モデル」では対称性を考慮してモデルとして半断面を採用した。

次に、モデルに作用させる荷重は、PC緊結荷重とゲート水圧荷重とし、このほかに「全体モデル」ではダム堤体の自重とダム上流面に作用する水圧荷重（以下「上流面水圧荷重」という）を考慮した。なお、PC緊結荷重とゲート水圧荷重は、実際のコンクリート内では3次元的に分散されるが、2次元解析ではモデルの奥行き方向への荷重の分散が考慮できない。したがって、今回の解析では、図-2に示すガーダの受圧面の寸法に基づき鉛直断面詳細モデルでは奥行き1.0m、水平断面詳細モデルでは奥行き1.9mの厚さを考え、この部分で全荷重を支持するものとした。したがって、今回の解析結果は発生応力を実際よりも大き目に評価していることになる。

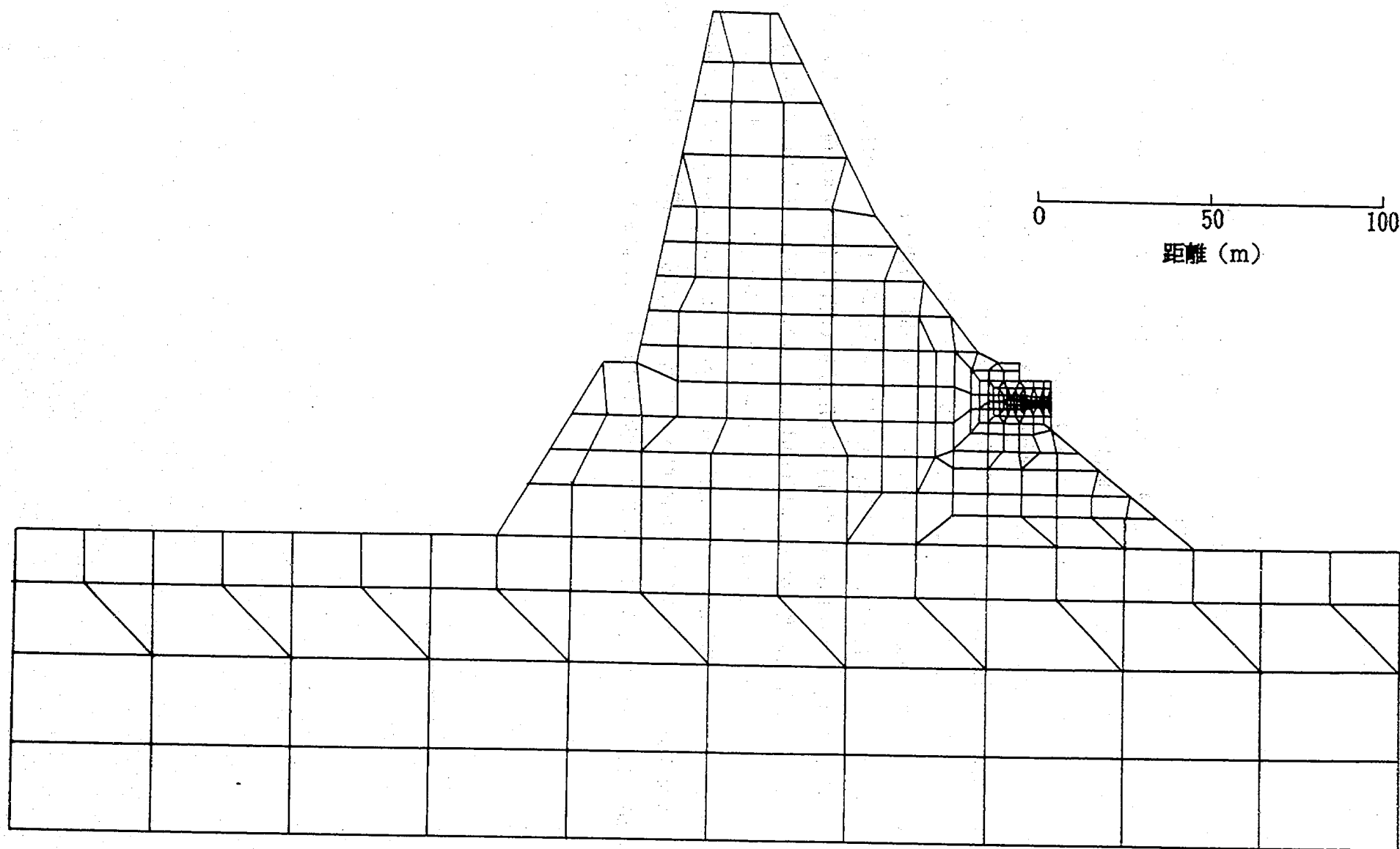


図-4 ダムの全体モデル

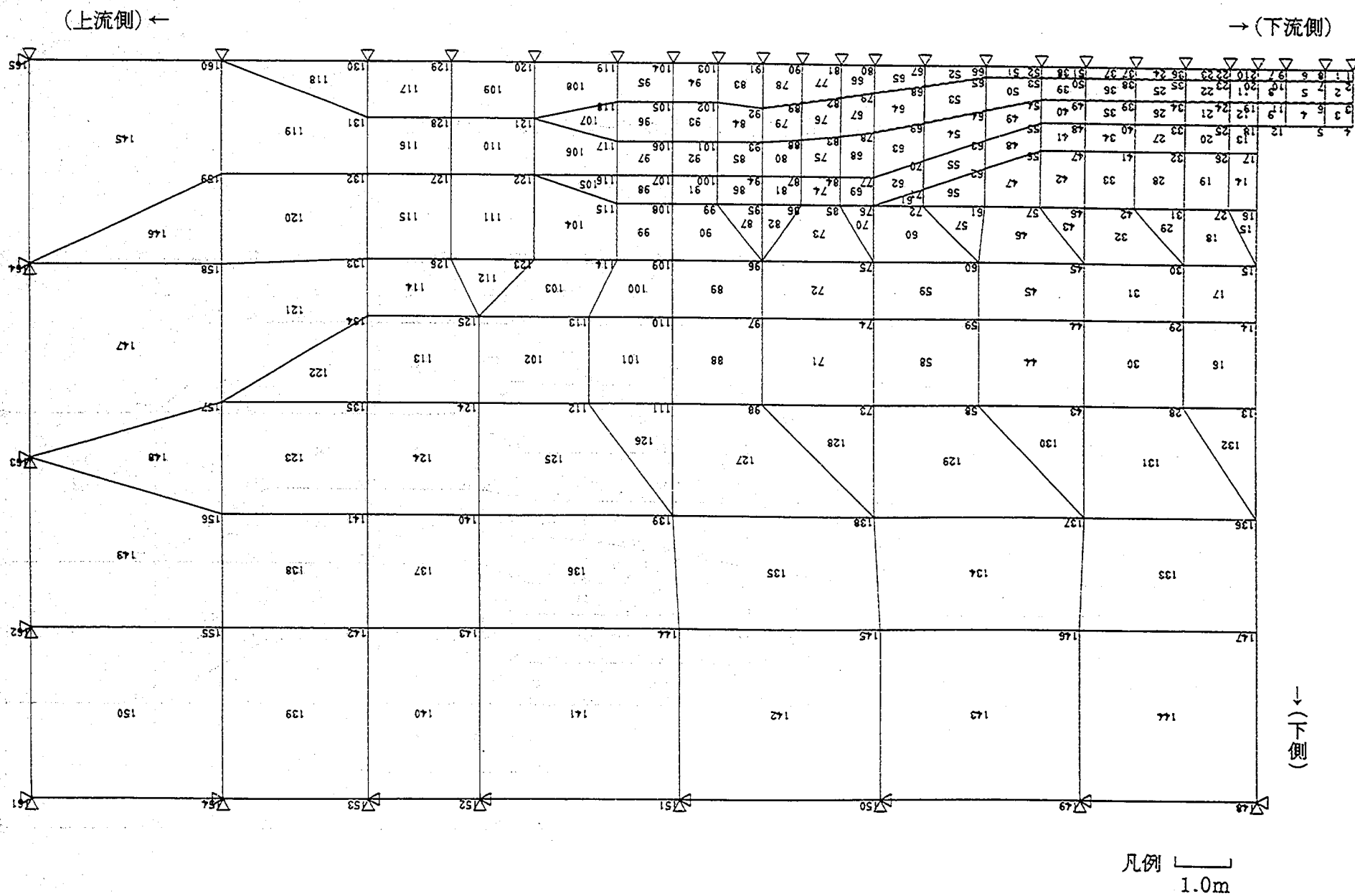


図-5(1) アンカレッジ周辺の鉛直断面詳細モデル

(上流側) ←

→ (下流側)

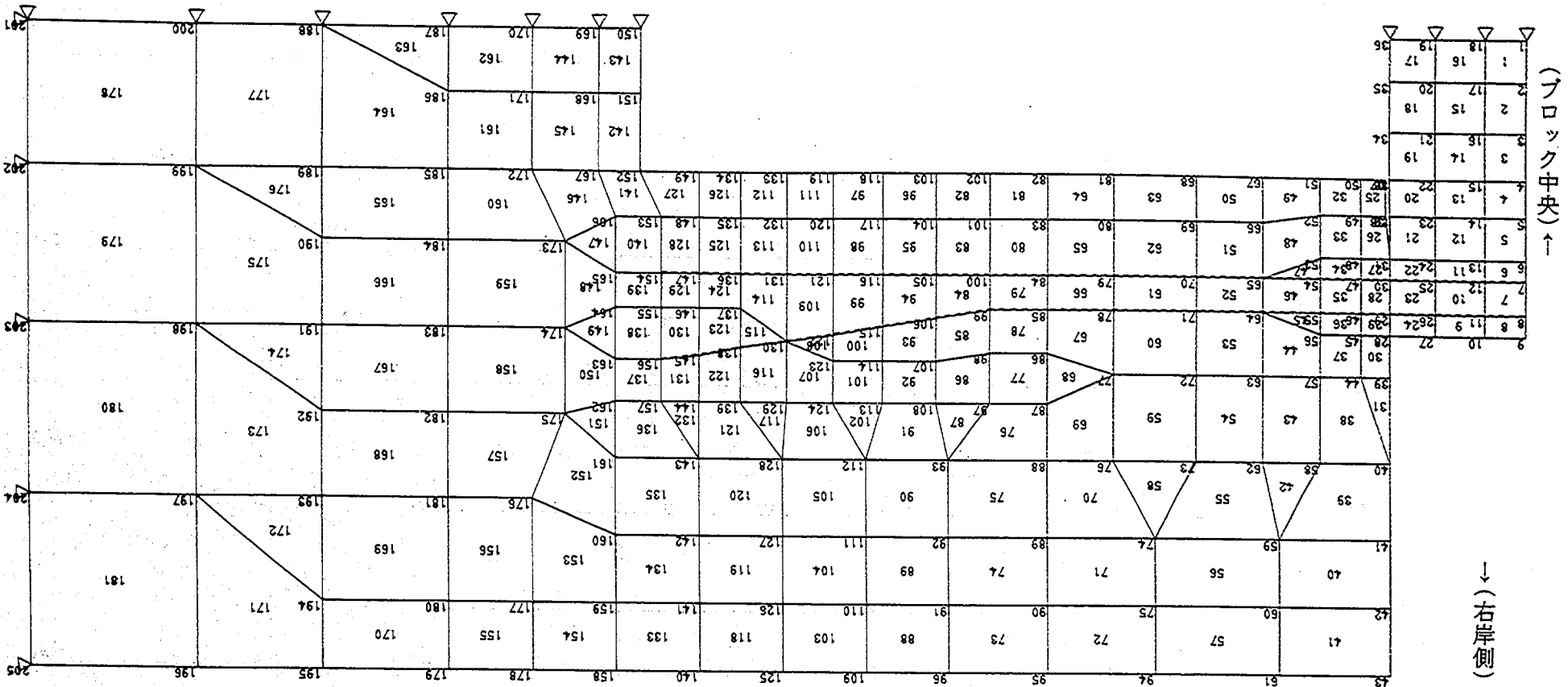


図-5(2) アンカレッジ周辺の水平断面詳細モデル(1)

3.2 解析条件と解析ケース

解析で考慮する荷重は、

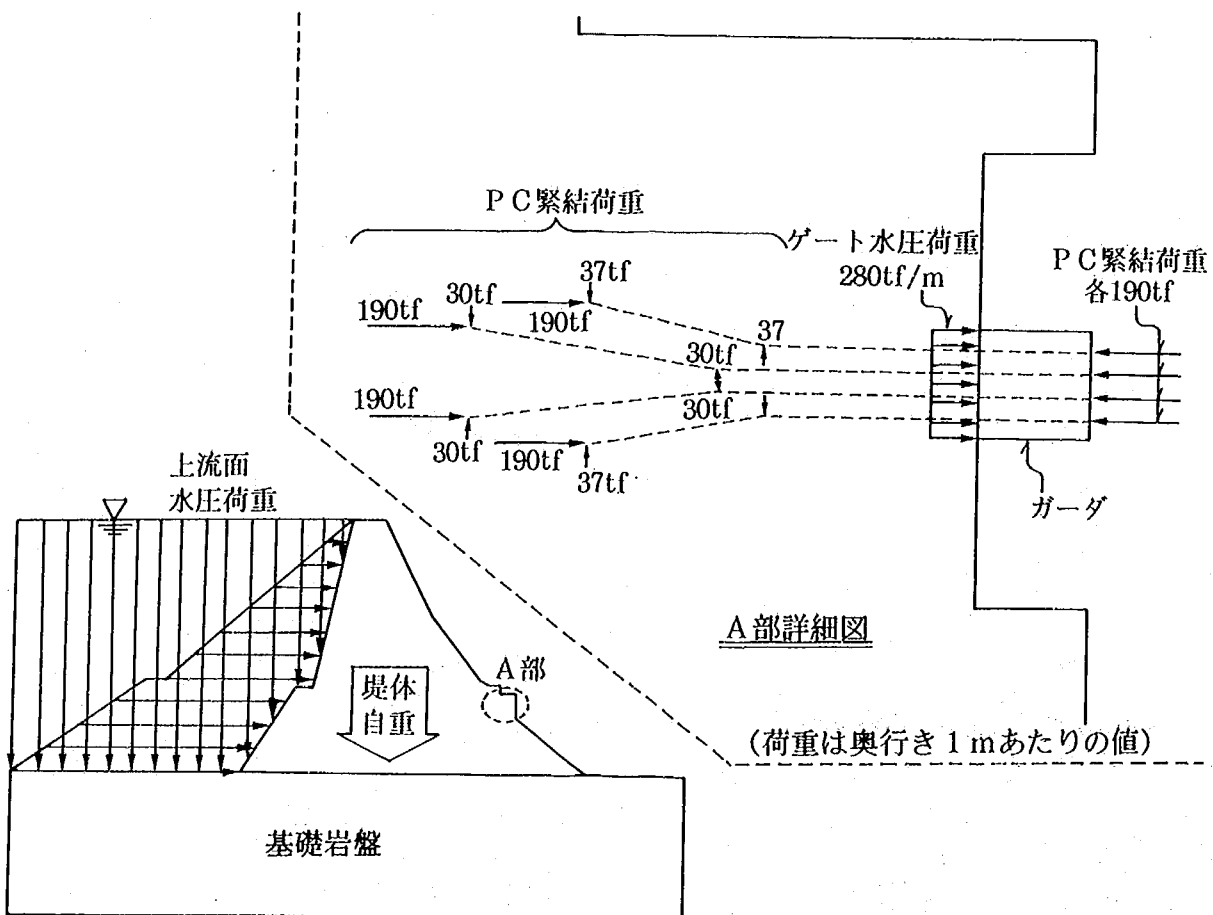
- ① PC緊結荷重：設計有効荷重として、760tf
- ② ゲート水圧荷重：常時満水位の条件として、519tf
- ③ 堤体自重：ダム堤体の自重
- ④ 上流面水圧荷重：ダムの上流面に作用する静水圧

とし、このうち③堤体自重と④上流面水圧荷重は全体モデルについてのみ考慮した。

各解析モデルに対する荷重の載荷条件を表-2(1)~(3)に示す。ここで、PC緊結荷重については、PCアンカの埋設区間ではPC鋼線とコンクリートとはシース管によって絶縁されていることから、直線部での荷重の伝達は無く、定着部と緊結部にそれぞれ緊結力を作用させた。ただし、PC鋼線の折れ曲がり部にはPC鋼線が真直ぐになるようとするための分力が発生することから、この分力を考慮することとし、この荷重の大きさはPC鋼線に作用する力の方向がPC鋼線の方
向と一致するという条件から求めた。また、ゲート水圧荷重については、ゲートの脚柱がガーダに接続する部分に作用するものとした。

表-2(1) 荷重の載荷方法 (全体モデル)

モデルの条件		・ガーダの有効幅1mで荷重を分担すると仮定する。
荷重の 条件	堤体自重	・ $\rho_c = 2.35 \text{ t/m}^3$ でダム堤体全体に作用させる。
	上流面水圧荷重	・ $\rho_w = 1.0 \text{ t/m}^3$ で堤体上流面および上流の岩盤面に作用させる。
	P C 緊結荷重	・ P C アンカは4段2列に配置されている。奥行き1mあたりのP C 緊結荷重は1段あたり $95 \times 2 / 1 = 190 \text{ tf/m}$ ・ P C アンカに作用する力の方向はアンカの方と一致するから、P C アンカの折曲り点に作用する荷重は、 上・下側のP C アンカでは $190 \times \tan 9^\circ = 30 \text{ tf/m}$ 中央側のP C アンカでは $190 \times \tan 11^\circ = 37 \text{ tf/m}$
	ゲート水圧荷重	・ ゲート水圧荷重は片側当り519tfで、これが受圧面に均等に作用すると仮定して、単位面積あたりの荷重を求めると、 $519 \div 1.9 = 273 \text{ tf/m}^2 \approx 280 \text{ tf/m}^2$



表－ 2 (2) 荷重の載荷方法（鉛直断面詳細モデル）

モデルの 条件	・ アンカレージの構造が上下対称なので、下側半断面の計算を行う。 ・ ガーダの受圧面の有効幅 1 m で全荷重を分担すると仮定する。	
荷重の 条件	P C 緊結荷重	・ 半断面のため P C アンカは 2 段 2 列に配置されている。奥行き 1 m あたりの P C 緊結荷重は 1 段あたり $95 \times 2 / 1 = 190 \text{ tf/m}$ ・ P C アンカに作用する力の方向はアンカの方と一致するから、P C アンカの折曲り点に作用する荷重は 上側の P C アンカでは $190 \times \tan 9^\circ = 30 \text{ tf/m}$ 下側の P C アンカでは $190 \times \tan 11^\circ = 37 \text{ tf/m}$
	ゲート水圧荷重	・ ゲート水圧荷重は片側当り 519 tf で、これが受圧面に均等に作用すると仮定して、単位面積当りの荷重を求めると、 $519 \div 1.9 = 273 \text{ tf/m}^2 \approx 280 \text{ tf/m}^2$

(荷重は奥行き 1 m あたりの値)

表-2(3) 荷重の載荷方法 (水平断面詳細モデル)

モデルの条件	・ゲート、アンカレージの構造は左右対称なので、半断面の計算を行う。 ・ガーダの高さ1.9mで全荷重を分担すると仮定する。	
荷重の条件	P C 緊 結 荷 重	・ P C アンカは 4 段 2 列に配置されている。奥行き1.0mあたりの P C 緊結荷重は 1 列あたり $95 \times 4 / 1.9 = 200 \text{tf/m}$ ・ P C アンカに作用する力の方向はアンカの方法に一致するから、P C アンカの折曲り部に作用する荷重は $200 \times \tan 8.5^\circ = 30 \text{tf/m}$
	ゲート水圧荷重	・ゲート水圧荷重は片側当り519tfで、これをガーダの高さ1.9mで負担するから、 $519 \div 1.9 = 273 \text{tf/m} \approx 280 \text{tf/m}$ これをゲート脚柱部分に作用させる。

(荷重は奥行き 1 m あたりの値)

次に解析ケースを表-3に示す。まず、全体モデルについて①P C 緊結荷重、②ゲート水圧荷重、③堤体自重、④上流面水圧荷重がそれぞれ作用した場合の検討を実施し、次に鉛直断面詳細モデルと水平断面詳細モデルについて、①P C 緊結荷重、②ゲート水圧荷重がそれぞれ作用した場合の詳細な検討を実施した。なお、水平断面詳細モデルの解析では、ゲート水圧荷重をかけた時にガーダの受圧面がコンクリート表面から部分的に離れる（離間する）ことが確認されたので、離間状態を再現した計算（詳細は後述）を行ってその応力状態を求めた。

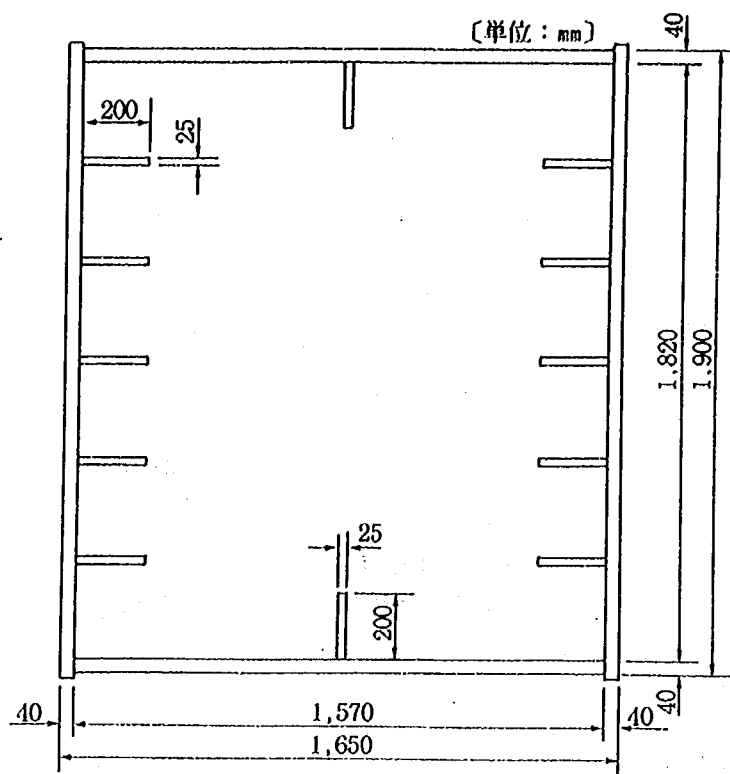
表-3 有限要素法による解析ケース

ケース名	モデル形状	荷重条件	備考
D-P	全体モデル	P C 緊結荷重	
D-G	〃	ゲート水圧荷重	
D-PG	〃	P C 緊結荷重+ゲート水圧荷重	
D-V	〃	堤体自重	
D-S	〃	上流面水圧荷重	
D-VS	〃	堤体自重+上流面水圧荷重	
V-P	鉛直断面詳細モデル	P C 緊結荷重	
V-G	〃	ゲート水圧荷重	
V-PG	〃	P C 緊結荷重+ゲート水圧荷重	
H-P	水平断面詳細モデル(1)	P C 緊結荷重	ガーダの離間の計算
H-G	〃 (5)	ゲート水圧荷重	
H-PG1	〃 (1)	P C 緊結荷重+ゲート水圧荷重	
H-PG2	〃 (2)	〃	
H-PG3	〃 (3)	〃	
H-PG4	〃 (4)	〃	
H-PG5	〃 (5)	〃	

次に、解析に用いた材料物性は表-4のとおりである。ここで、ガーダの物性は詳細モデルについてのみ解析に取り込んだが、実際には図-6に示すような断面形状を有するガーダに対して表-5に示すような方法でみかけの弾性係数に算出した。すなわち、今回の解析では、コンクリート内の応力分布とガーダの変形性に重点を置いた解析を行うことから、ゲート水圧荷重が作用した時のガーダの変形量は実際のものと一致することが必要である。ゲート水圧荷重が作用した時のガーダの変形量は（弾性係数）×（断面二次モーメント）の大きさで決まる。そこで、この値が実際のガーダと一致するようにガーダ部分のみかけの弾性係数を決定した。

表-4 材料物性

堤体コンクリート	弾性係数	2,500,000tf/m ²
	ポアソン比	0.2
	単位体積質量	2.35t/m ³
ガーダ	弾性係数	5,000,000tf/m ²
	ポアソン比	0.3
	単位体積質量	0.0t/m ³
貯留水	単位体積質量	1.0t/m ³



図－6 ガーダの断面形状

表－5 ガータのみかけの弾性係数の算出

	実際のガータ	解析モデル
断面 2 次モーメント I (cm ⁴)	14,950,000	$190 \times 165^3 / 12$ = 71,130,000
弾性係数 E (kgf/cm ²)	21,000,000	441,000 ※
E ・ I (kgf ・ cm ²)	3.14×10^{13}	3.14×10^{13}

※解析ではこの値をまるめて500,000kgf/cm²とした。

4. 有限要素法による解析結果

4.1 ダム全体モデルの解析結果

4.1.1 P C緊結荷重に対する挙動（ケースD－P）

P C緊結荷重が作用した状態でのアンカレッジ周辺の変位図を図－7に、主応力図を図－8に示す。また、ガーダとP C定着部間のコンクリートの変形量について、有限要素法と前述の概略検討とを比較した結果を表－7に示す。有限要素法より得られる変形量は収縮側に0.45mmで、概略検討で得られた1.29mmの1/3程度の値であった。これは、堤体コンクリート内で生じる荷重の分散の効果と考えられる。

一方、堤体コンクリートの応力については、圧縮応力はガーダ付近で大きく、その最大値は25kgf/cm²である。なお、この値は概略検討で得られた40.3kgf/cm²の62%に過ぎないが、これは解析モデルの要素分割の粗さに起因する誤差と考えられる。次に、引張応力はP C定着部の上流側とP Cアンカの折れ曲がり部付近に発生しており、その最大値はP C定着部の上流側で6kgf/cm²程度、P Cアンカの折れ曲がり部で4 kgf/cm²程度である。

ここで、これらの引張応力の発生理由を説明すると次のようになる。まず、P Cアンカの折れ曲がり部に引張応力が生じるのは、P C鋼線が真っ直ぐになろうとして折れ曲がり部の外側のコンクリートを押しつける結果、内側のコンクリートが外側に引っ張られるためである。また、P C定着部に引張応力が生じるのは、概略検討のような一次元モデルではガーダ側のP C緊結荷重と定着側のP C緊結荷重が釣合うため、P C定着部の上流側には応力が発生しないが、ここで示したダム全体モデルでは堤体コンクリート内での荷重の分散があるため、ガーダ側のP C緊結荷重によってP C定着部に生じる圧縮応力が小さくなり、定着側のP C緊結荷重によってP C定着部の上流側に生じる引張応力が打ち消されずに残るためである。なお、このような引張応力の大きさを減じるには、P Cアンカの本数を多くして定着部の分散を図ればよいが、これについてここでは深く触れないことにする。

表－7 ガーダとP C定着部間のコンクリートの変形量の比較

	概略検討	全体モデル	詳 細 モ デ ル	
			鉛直断面	水平断面
P C緊結荷重	－1.29	－0.45	－0.48	－0.48
ゲート水压荷重	＋0.82	＋0.28	＋0.28	＋0.28
P C緊結荷重＋ ゲート水压荷重	－0.46	－0.17	－0.20	－0.20

(単位：mm ＋：伸び、－：縮み)

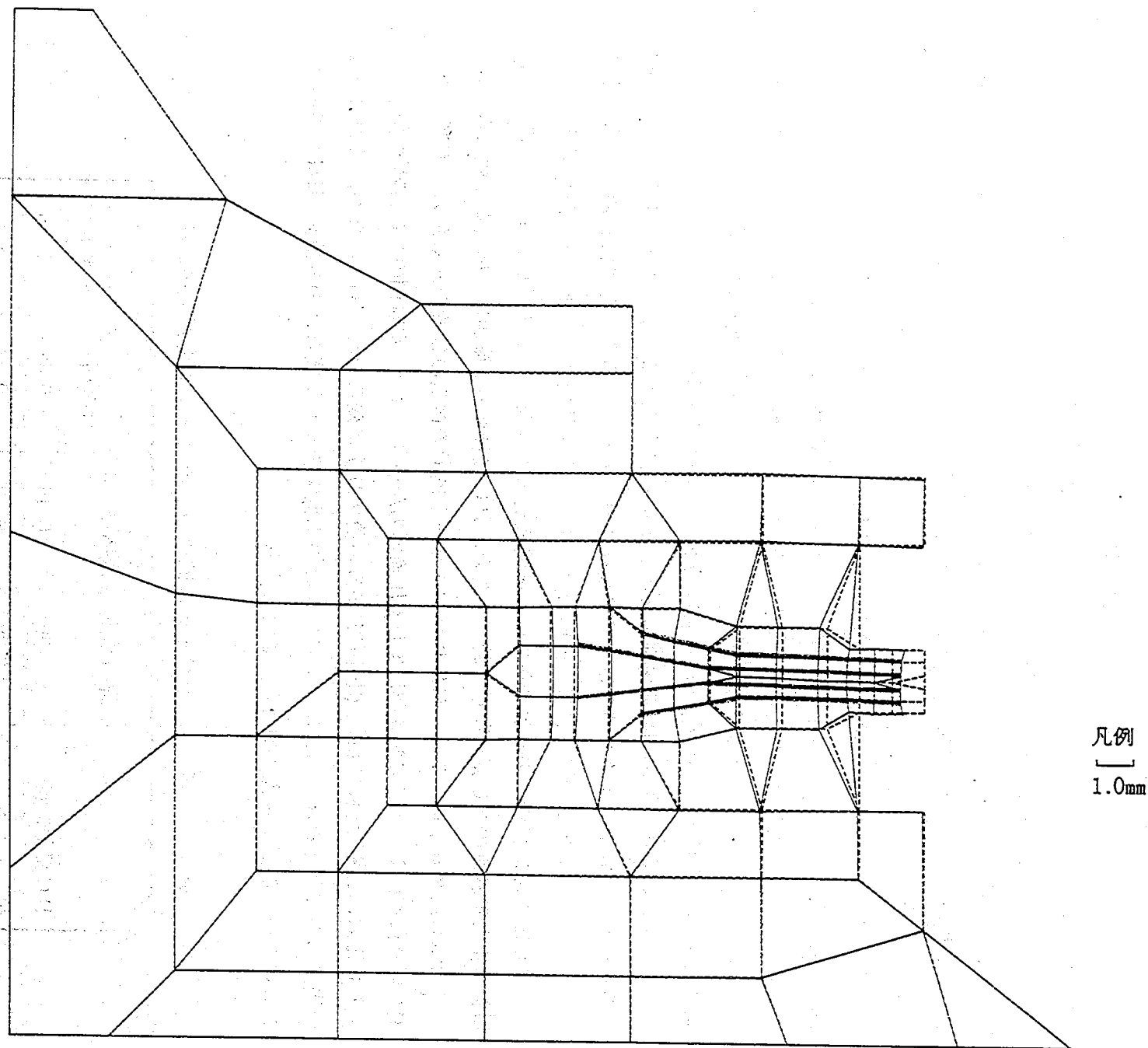


図-7 PC緊結荷重によるアンカレッジ周辺の変位（全体モデル，ケースD-P）

凡 例

— 壓縮応力
— 引張応力
— 200tf/m²

4.1.2 ゲート水圧荷重に対する挙動（ケースD-G）

現実的な荷重状態ではないが、P C緊結荷重がなく、ゲート水圧荷重のみが作用した状態でのアンカレッジ周辺の変位図を図-9に、主応力図を図-10に示す。

この荷重状態は堤体コンクリートにプレストレス力を導入せずにゲート水圧荷重を堤体コンクリートで直接支持した場合に相当している。この場合、アンカレッジ周辺の堤体コンクリートはゲート水圧荷重によって下流側に最大で1.6mm程度変位している。また、ガーダとP C定着部間のコンクリートの変形量は、表-7に示すように伸び側に0.28mmで、概略検討で得られた0.82mmの1/3程度の値である。これは、堤体コンクリート内に生じる荷重の分散の効果と考えられる。

一方、堤体コンクリート内の応力については全面的に引張応力となっており、特にガーダ付近では21kgf/cm²程度の引張応力が発生している。この引張応力は上流にいくにしたがって減衰し、P C定着部付近では3 kgf/cm²程度となっている。

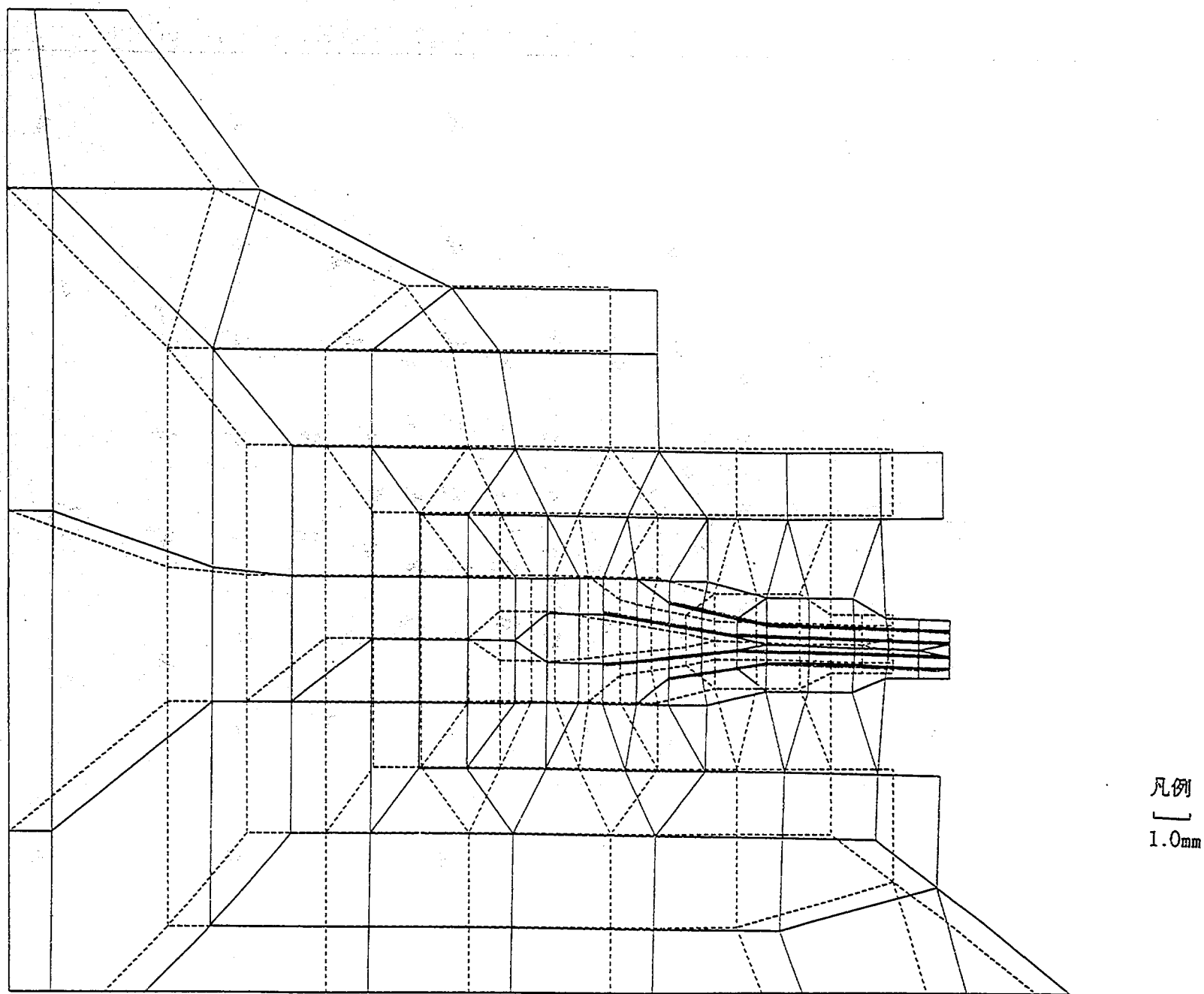


図-9 ゲート水圧荷重によるアンカレッジ周辺の変位（全体モデル，ケースD-G）

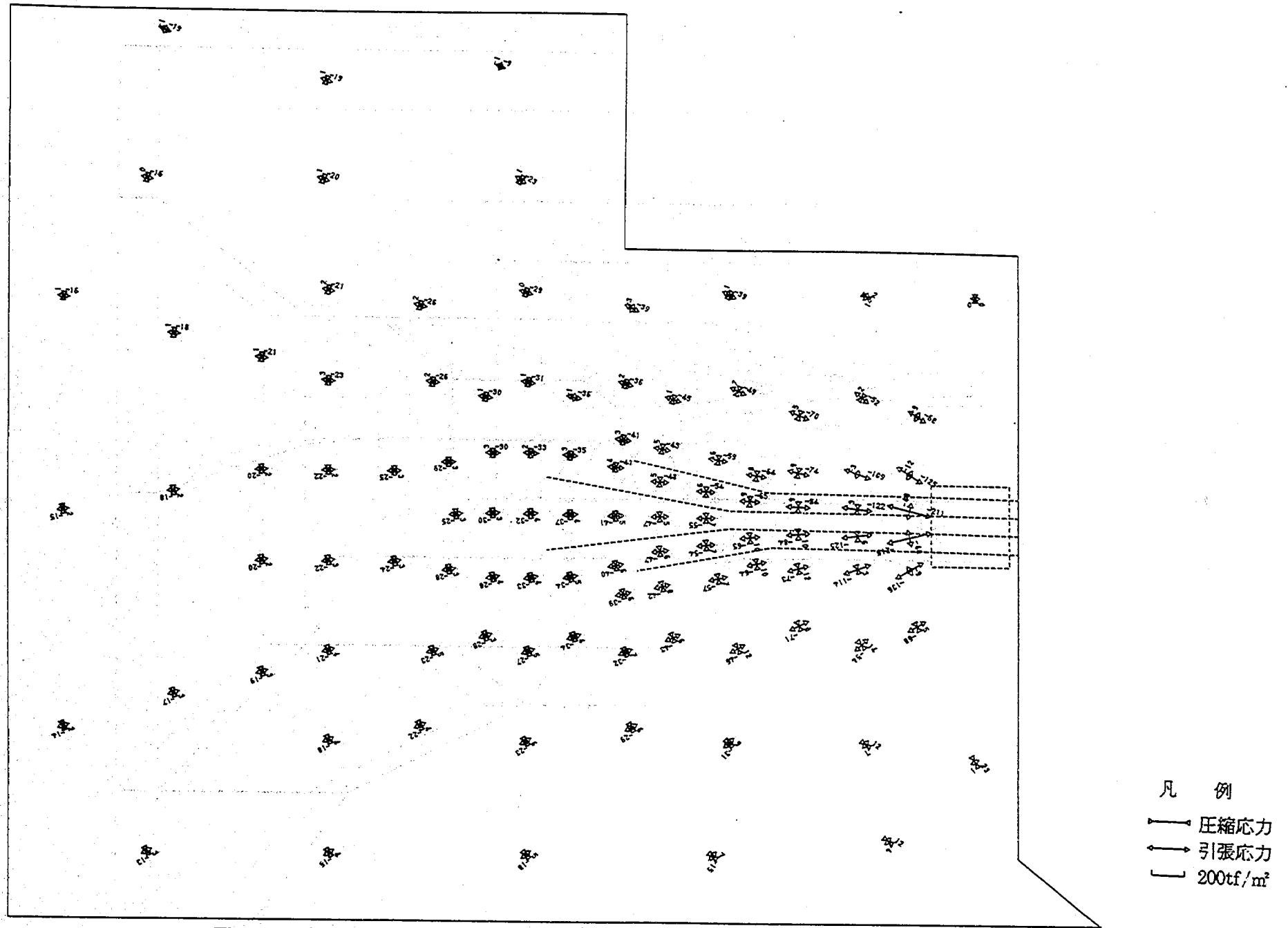


図-10 ゲート水圧荷重によるアンカレッジ周辺の応力（全体モデル，ケースD-G）

4.1.3 PC緊結荷重とゲート水圧荷重に対する挙動（ケースD-PG）

PC緊結荷重とゲート水圧荷重を同時に作用させた状態でのアンカレッジ周辺の変位図を図-11に、主応力図を図-12に示す。

この場合、アンカレッジ周辺の堤体コンクリートは下流側に1.2mm程度変位している。また、ガーダとPC定着部間の変形量は表-7に示すように収縮側に0.17mmで、概略検討で得られた0.46mmの1/3程度の値である。これは堤体コンクリート内で生じる荷重の分散の効果と考えられる。

次に、堤体コンクリート内の応力分布について、ゲート水圧荷重のみが作用したケースD-Gの結果（図-10）と比較すると、ガーダ付近に発生していた引張応力はPC緊結荷重によって圧縮側に転じていることが分かる。このように、PCアンカ方式の構造的な効果は、プレストレスを導入することによってガーダ付近に発生する引張応力を解消し、引張応力の発生領域を応力分散が期待できる堤体内部のPC定着部に置き換えることにある。すなわち、本解析ケースにおけるPC定着部の引張応力は約10kgf/cm²で、これはゲート水圧荷重のみが作用したケースD-Gにおけるガーダ付近の最大引張応力21kgf/cm²の約1/2となっている。

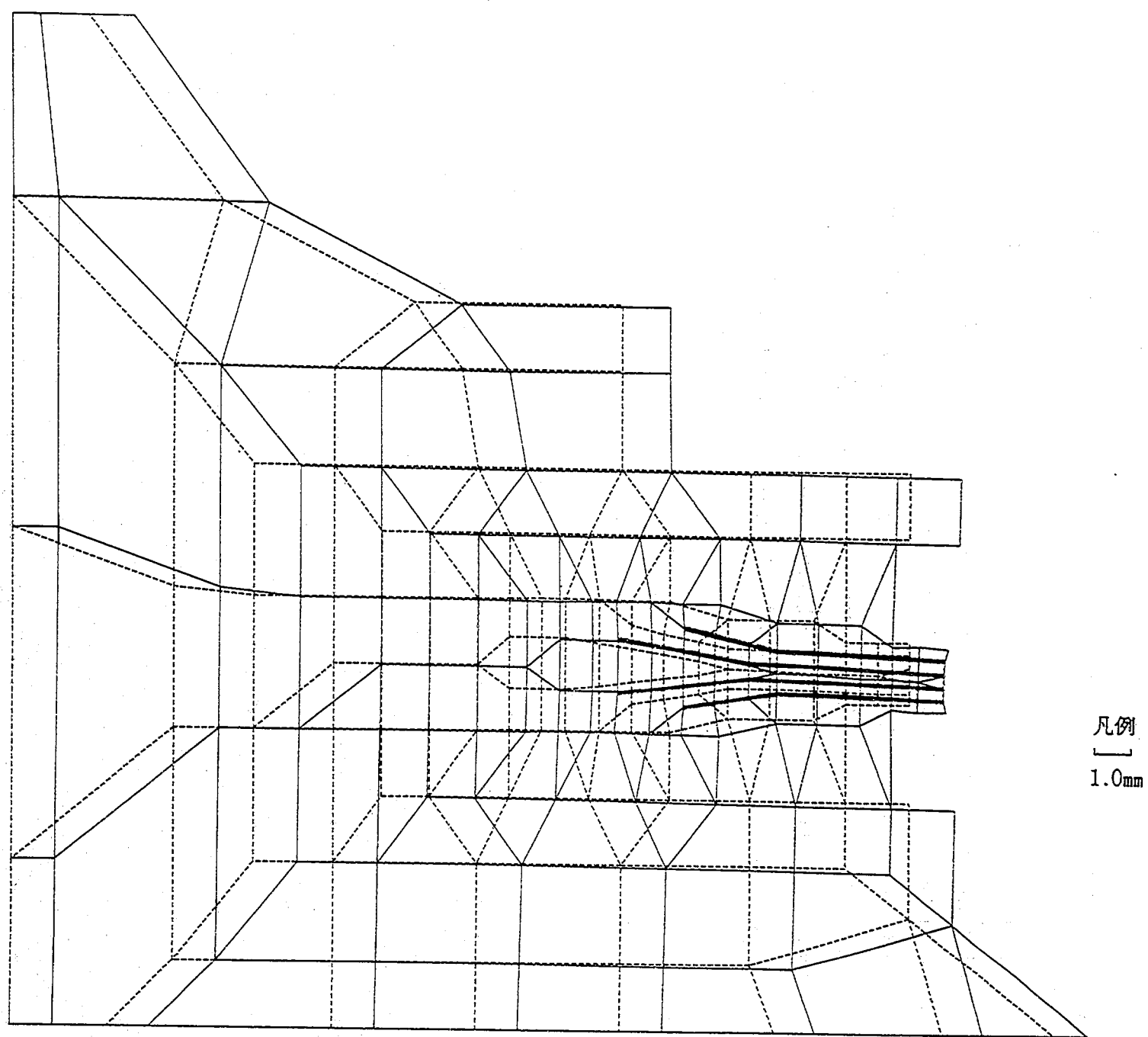
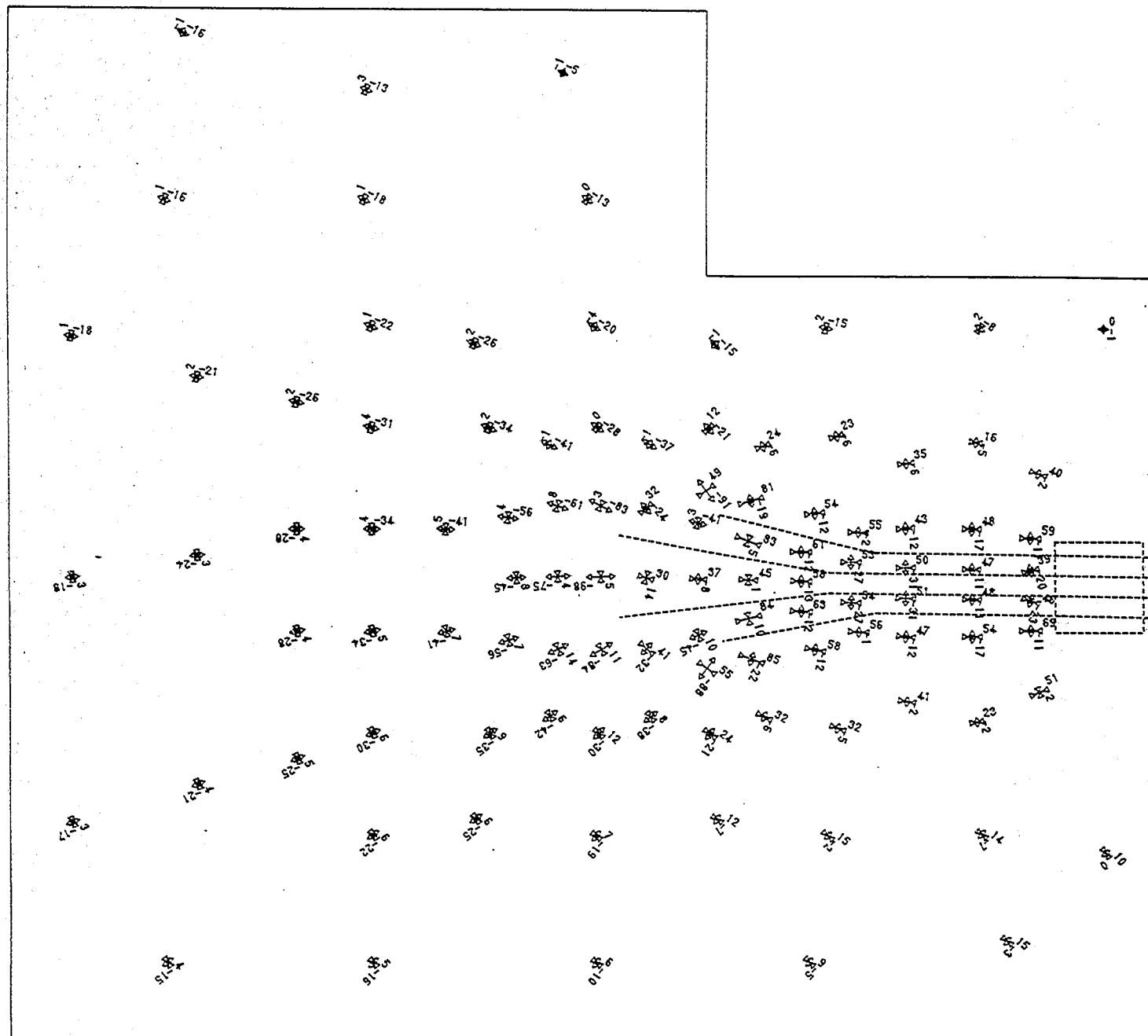


図-11 P C 緊結荷重とゲート水圧荷重によるアンカレッジ周辺の変位 (全体モデル, ケースD-P G)



凡 例
 ○— 圧縮応力
 ○— 引張応力
 — 200tf/m²

図-12 PC緊結荷重とゲート水圧荷重によるアンカレッジ周辺の応力(全体モデル, ケースD-PG)

4.1.4 堤体自重と上流面水圧に対する挙動（ケースD-V, D-V S）

堤体自重のみが作用した状態での主応力図を図-13に、また、堤体自重に加えて上流面水圧荷重が作用した状態での主応力図を図-14に示す。なお、本解析ケースではP C緊結荷重、ゲート水圧荷重は作用させていない。

P Cアンカ周辺の主応力の方向は、堤体自重のみの場合も、堤体自重に加えて上流面水圧荷重が作用した場合も概ね同一で、ダム堤体下流面にはほぼ平行な方向に圧縮応力が発生している。なお、主応力の大きさはP C定着部付近から下流にいくにしたがって徐々に小さくなる傾向を示している。P C定着部付近の主応力の大きさは堤体自重のみの場合で 16kgf/cm^2 程度、堤体自重に加えて上流面水圧荷重が作用した場合で 23kgf/cm^2 程度である。このように、P C緊結荷重やゲート水圧荷重の計算では引張応力を示したP C定着部の上流側部分の応力は、堤体自重、上流面水圧荷重に対する計算では圧縮応力となっており、これらの組み合わせみによって引張応力が軽減される可能性がある。この点については4.2.5項で詳しく考察する。

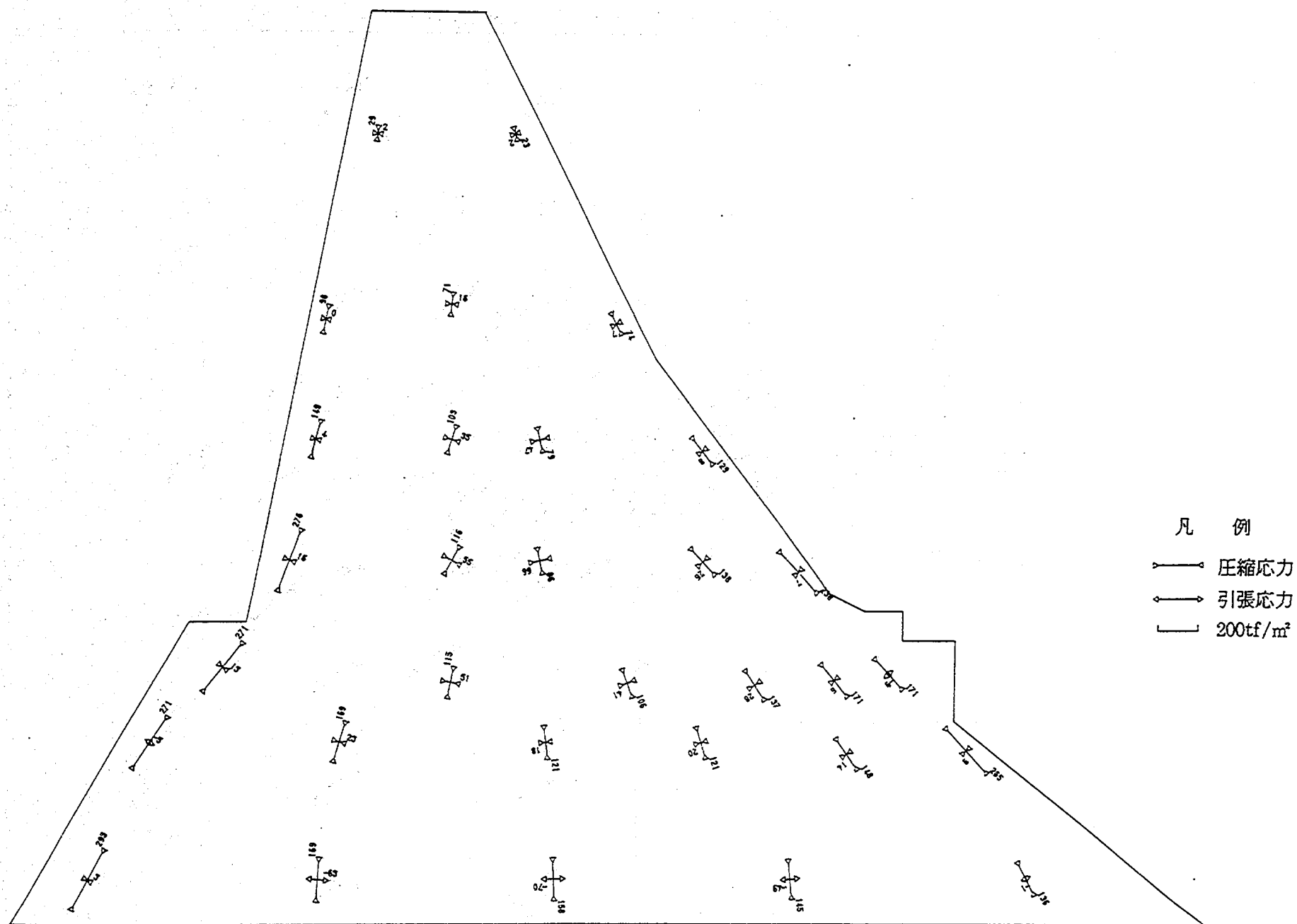


図-13(1) 堤体自重による応力（全体モデル，ケースD-V）

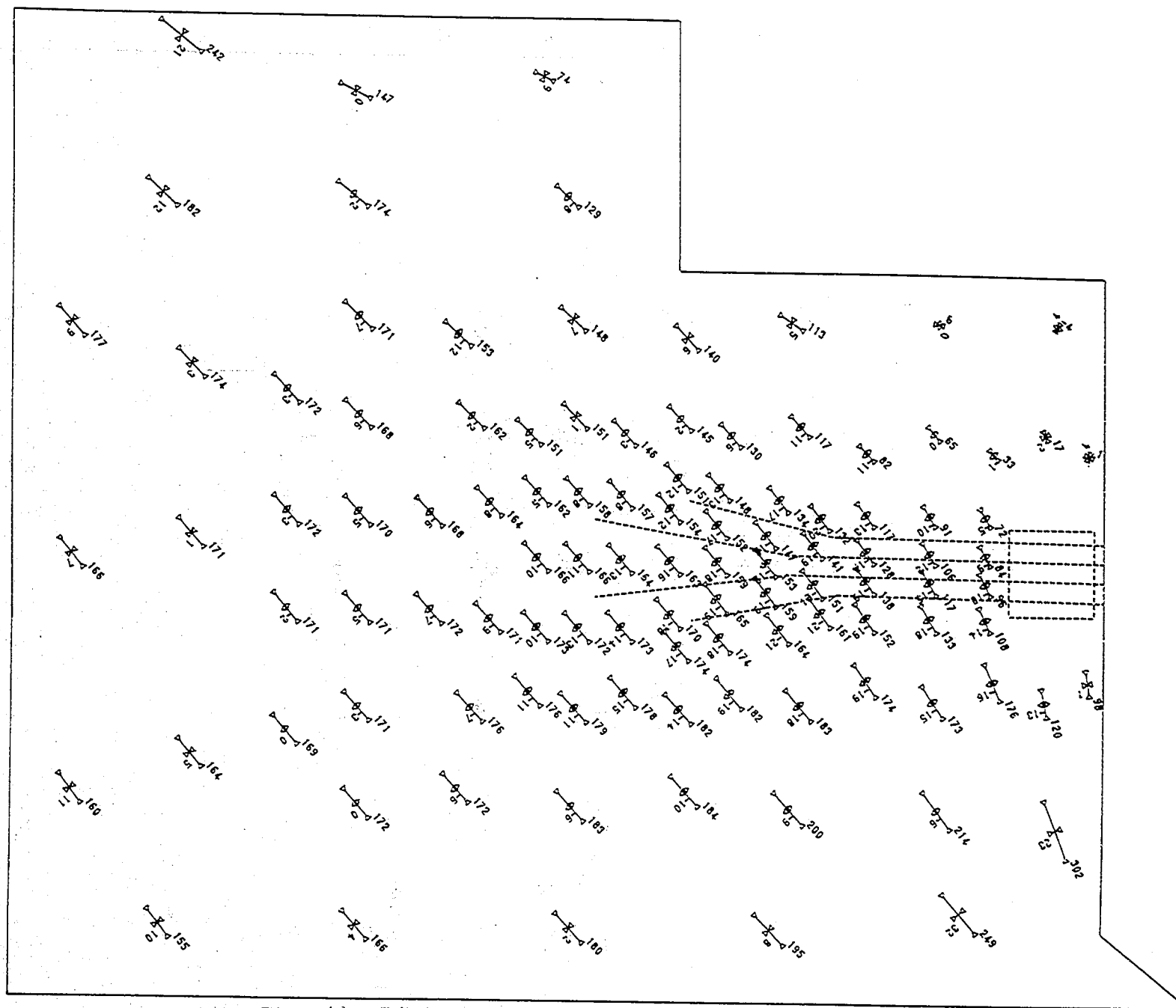


図-13(2) 堤体自重によるアンカレッジ周辺の応力 (全体モデル, ケースD-V)

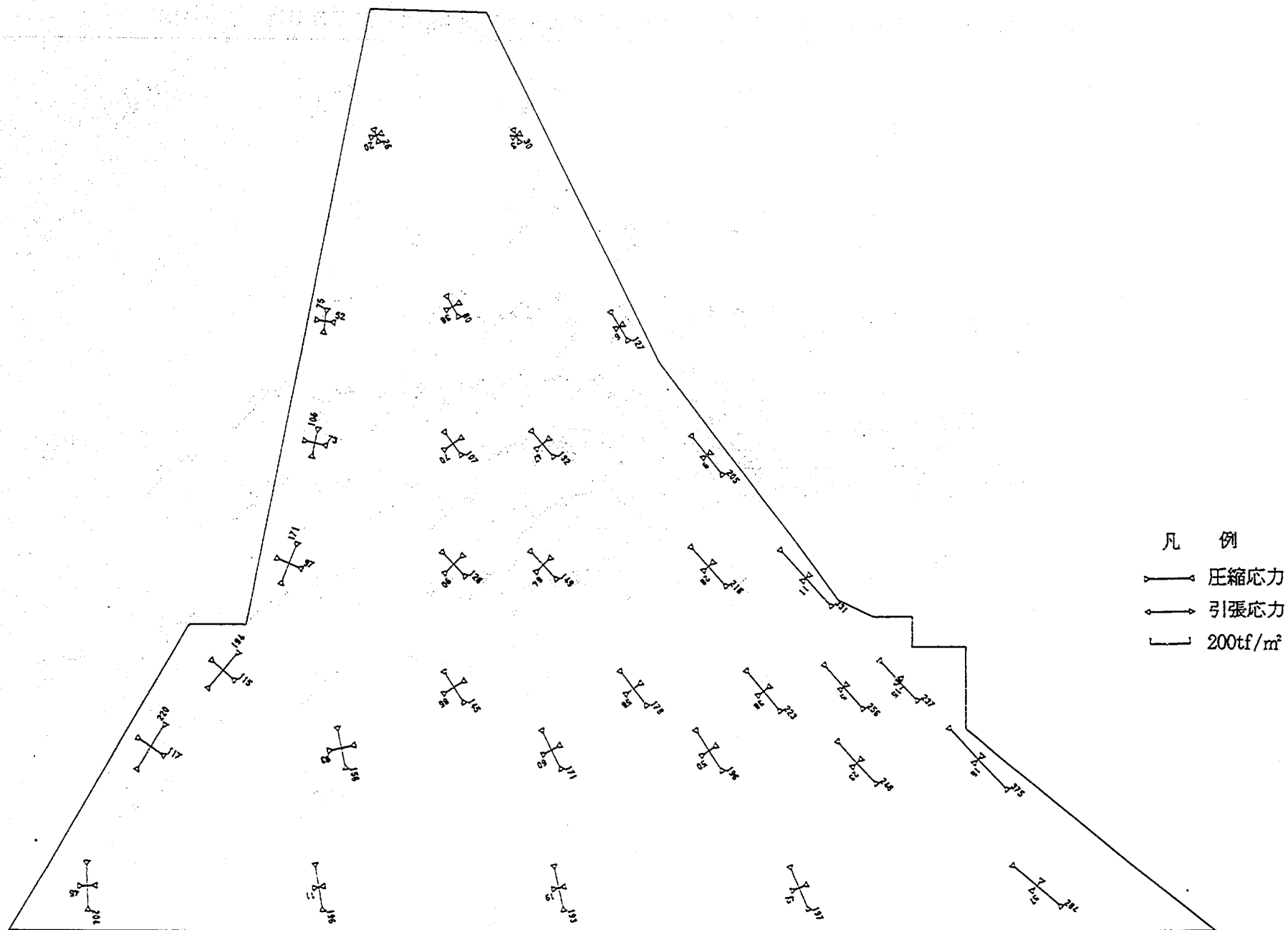


図-14(1) 堤体自重と上流面水圧による応力（全体モデル，ケースD-V S）

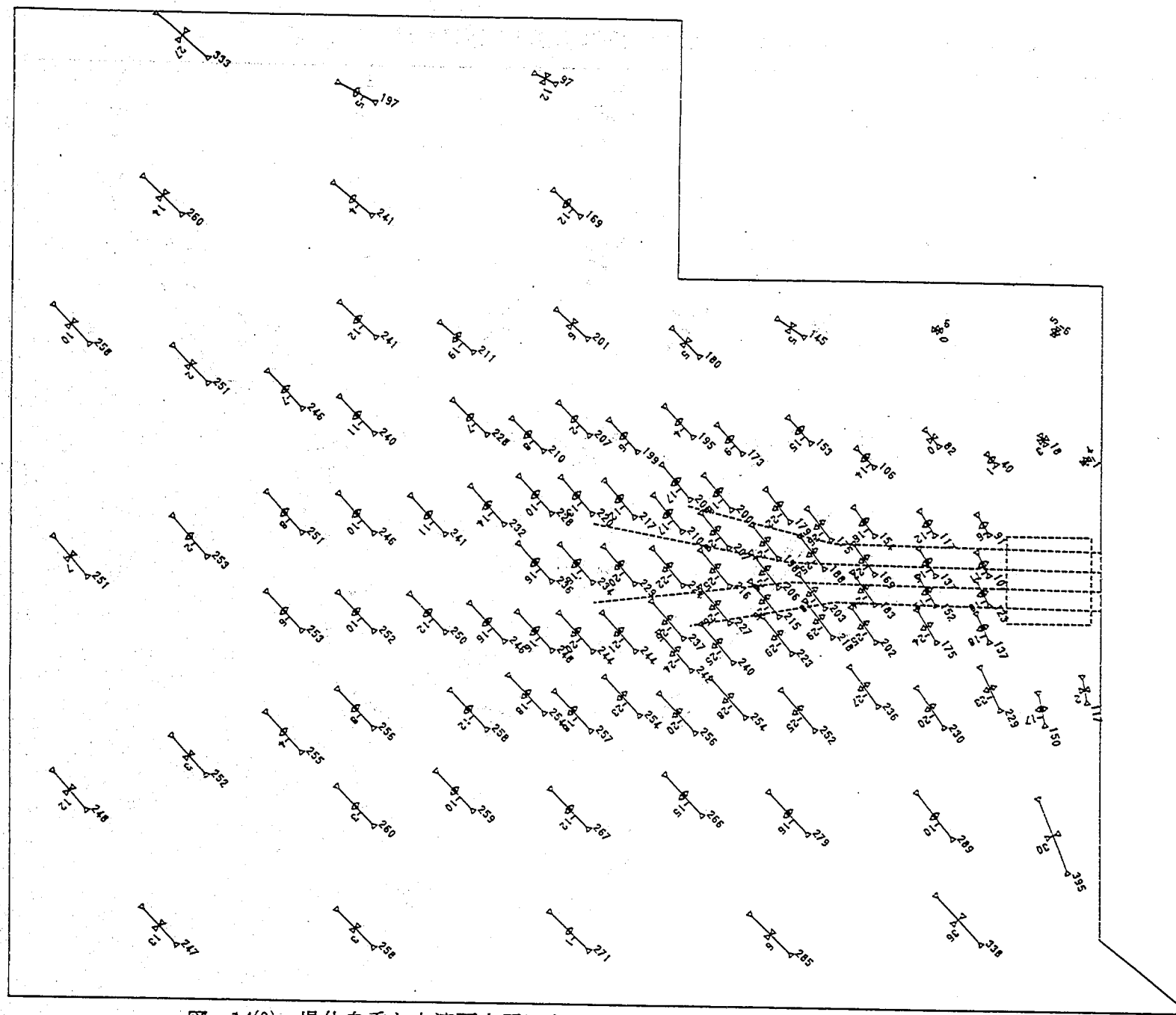


図-14(2) 堤体自重と上流面水圧によるアンカレッジ周辺の応力 (全体モデル, ケースD-V S)

4.2 アンカレッジ周辺の詳細モデルの解析結果

4.2.1 詳細モデルの境界条件の設定方法

詳細モデルは、アンカレッジ周辺の構造を抽出してその応力状態を詳細に検討するためのモデルである。しかし、このような抽出モデルではその境界条件の設定方法が問題となる。すなわち、ダムに作用する荷重は最終的に基礎岩盤で支持されるが、詳細モデルでは堤体の内部に解析上の境界を設定するため、その境界は便宜的な境界であり、境界条件をどのように設定するかによって解析結果が左右されることになる。

図-5(1)は鉛直断面詳細モデルである。この場合、解析モデルの範囲はP Cアンカの定着部から上流側および上下方向にそれぞれP C鋼線の長さ(10m)程度の範囲をとっている。ただし、解析領域は上下対称であるから(境界条件まで考えると必ずしも上下対称ではないが、ここでは便宜上境界条件も上下対称と仮定した)、モデル化は下半分のみとなっている。この場合、作用荷重は実際の状態でも上流側境界と下側境界を通して基礎岩盤に伝達されること、また、上流側境界と下側境界をある程度遠方に採れば2次元的な応力分散によって境界条件の影響が小さくなることから、このような解析モデルでも実用上十分な精度の応力解が得られるはずである(これは応力についてのみいえる結論であって、固定点の位置によって影響される絶対変位の大きさは当然ながら一致しない)。これを実際に確認した結果が図-15であるが、全体モデルの応力分布と鉛直断面詳細モデルの応力分布はよく一致している。したがって、鉛直断面詳細モデルについては境界条件の設定方法に大きな特別な問題点はないと考えられる。

一方、図-5(2)は水平断面詳細モデルである。この場合、解析モデルは放流管の中心に対して左右対称であるから、モデル化は右岸側半分のみとなっている。ここで、下流側と横継目の存在する右岸側は自由端であり、境界条件として問題となるのは上流側境界のみである。ここで、上流側境界を遠方に延ばすと堤体の上流面とぶつかり、上流側境界も自由端となるが、これでは、固定点がなくなって解析が不可能となってしまふ。しかし、上流側境界を固定すると、下流側境界と左右側境界が自由端であるため、作用荷重が分散せずに上流端の境界に伝達されてしまうことになる。したがって、内力として互いに打消し合う荷重(ここではP C緊結荷重)は別として、その他の荷重については荷重の作用点の近傍以外の応力は解析上の精度を有さないことになる。このため、ゲート水圧荷重による応力はガーダ部の周辺のみが有効な値となる。

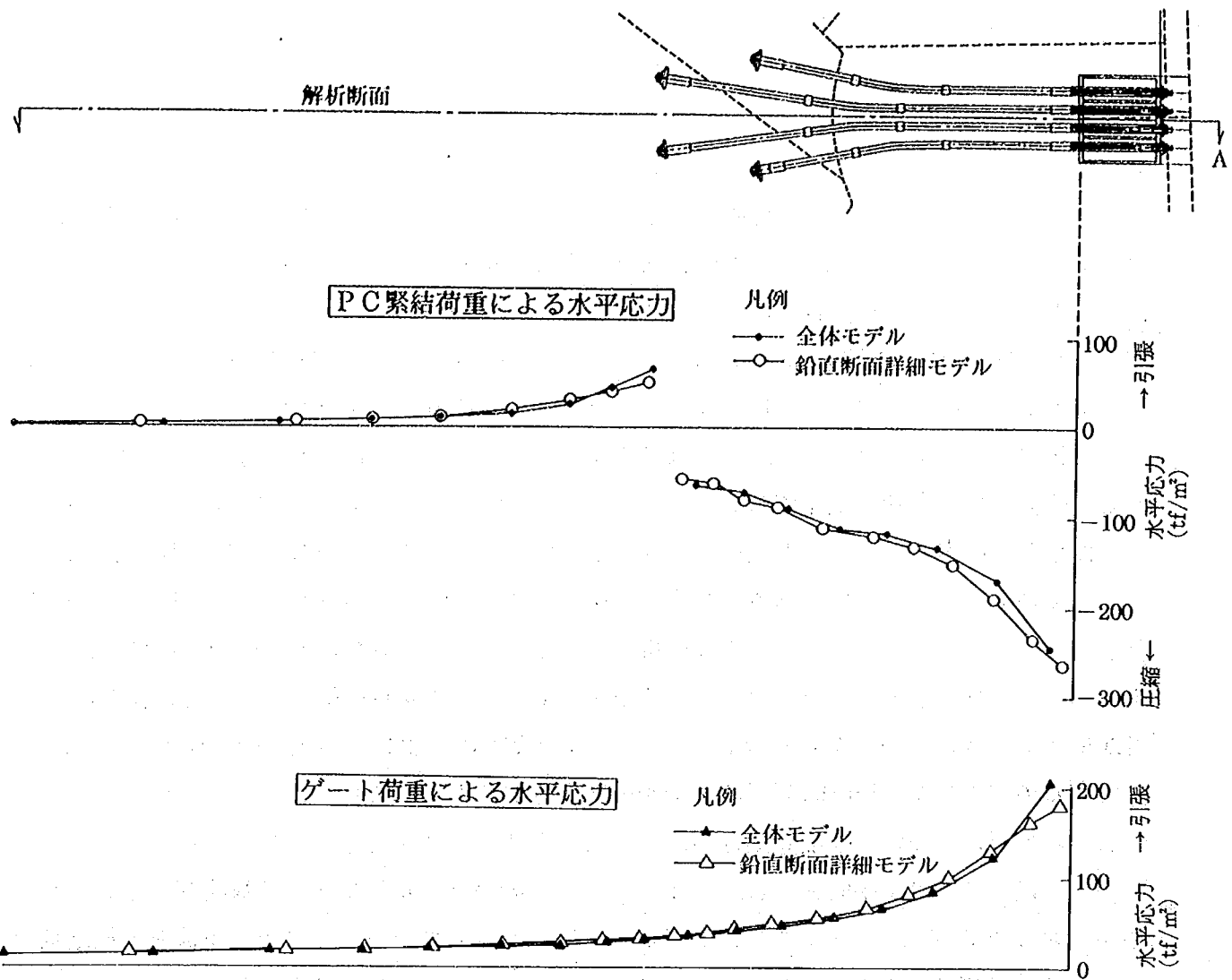


図-15 全体モデルと詳細モデルの上下流方向水平応力の比較

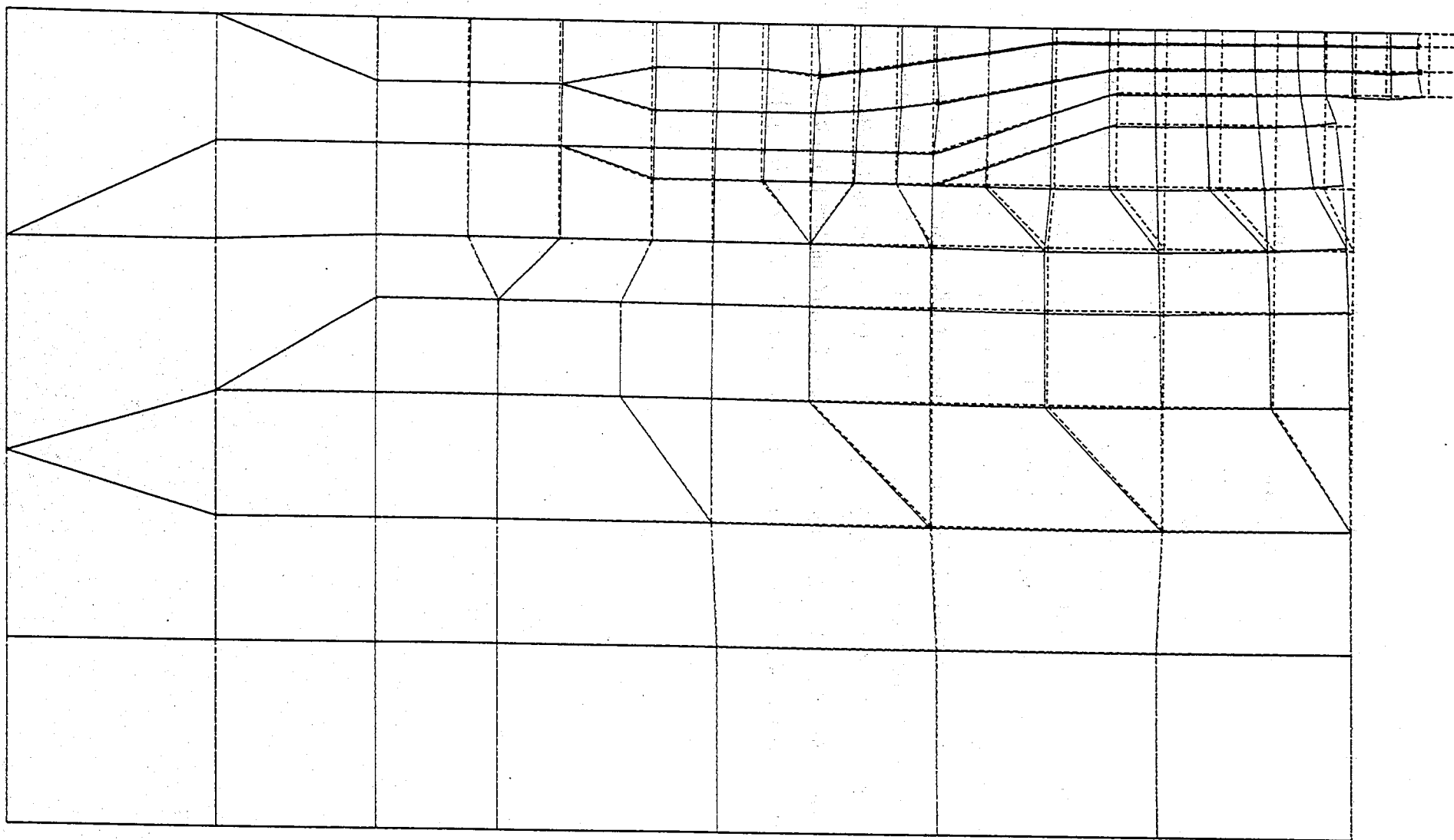
4.2.2 P C緊結荷重に対する挙動

(1) 鉛直断面詳細モデルの解析結果（ケースV－P）

P C緊結荷重が作用した場合の鉛直断面詳細モデルの変位図を図－16に、主応力図を図－17に示す。

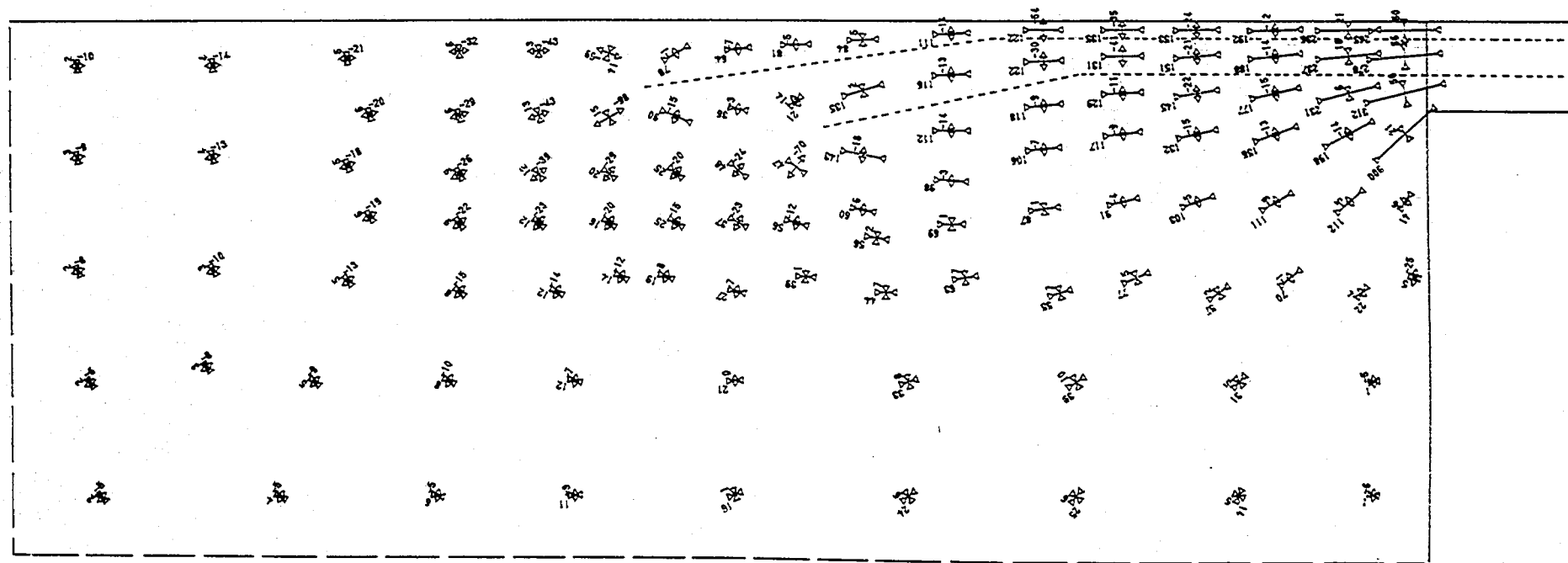
詳細モデルでは絶対的な変位量は意味を持たないが、P C緊結荷重によりガーダ付近は上流側に約0.4mm変位し、P C定着部付近は下流側に約0.1mm変位している。この傾向は全体モデルの傾向と良く一致しているが、これはP C緊結荷重がガータ部とP C定着部とで互いに打消し合う内力であることによっている。また、鉛直断面詳細モデルでのガーダとP C定着部間の変形量は表－7に示すように収縮側に0.48mmで、この値は全体モデルでの値0.45mmに近く、鉛直断面詳細モデルは全体モデルの挙動を良く表しているといえる。

一方、図－17よりコンクリート内の応力分布を見ると、圧縮応力はガーダ付近で大きく、上流側に放射状に広がっている。圧縮応力の最大値は30kgf/cm²程度である。また、引張応力については、P Cアンカの折れ曲がりの付近に5 kgf/cm²程度の値が生じている。また、P C定着部の上流部にも最大で10kgf/cm²程度の引張応力が生じている。これらの応力分布の傾向は図－8に示した全体モデルの結果と良く一致しているが、応力の最大値は鉛直断面詳細モデルのほうがやや大きい。これは全体モデルよりも鉛直断面詳細モデルのほうが要素分割が細かいことから、部分的な応力の変化を精度良く捉えているためと考えられる。



凡 例
└──┘
0.5mm

図-16 PC緊結荷重による変位（鉛直断面詳細モデル、ケースV-P）



凡 例

—— 圧縮応力

—— 引張応力

—— 200tf/m²

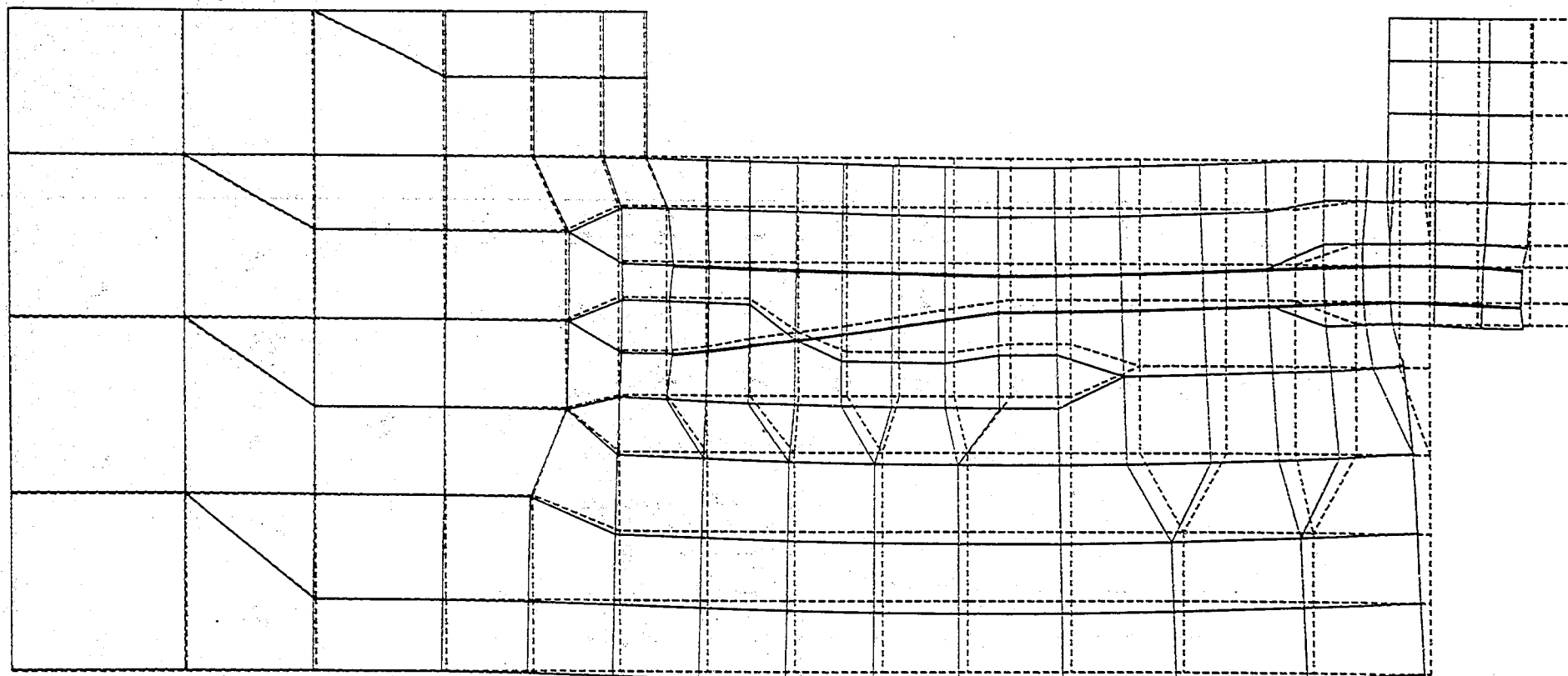
図-17 PC緊結荷重による応力（鉛直断面詳細モデル，ケースV-P）

(2) 水平断面詳細モデルの解析結果 (ケースH-P)

P C 緊結荷重が作用した場合の水平断面詳細モデルの変位図を図-18に、主応力図を図-19に示す。

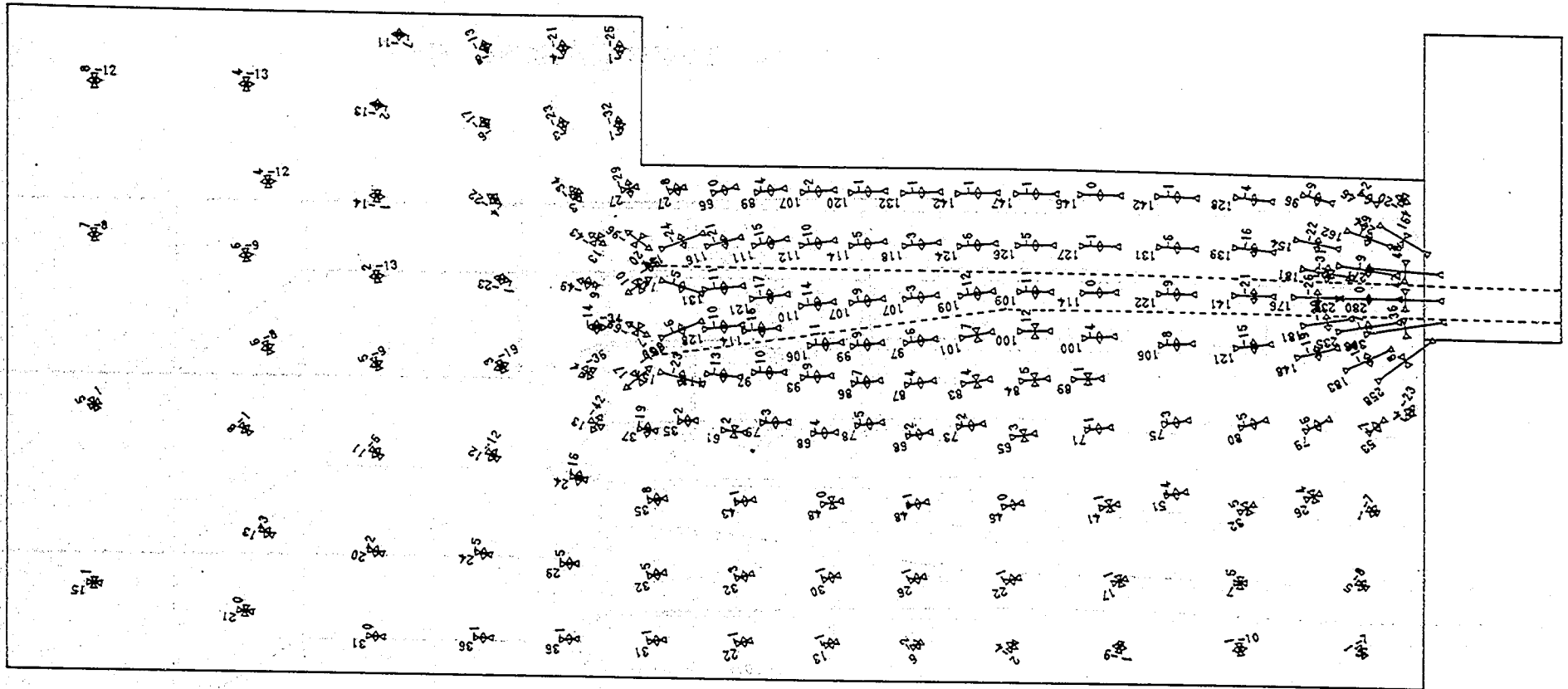
ガーダとP C 定着部間の変形量は表-7に示すように収縮側に0.48mmで鉛直断面の結果と良く一致している。

一方、コンクリート内の応力分布を見ると、P C アンカにほぼ平行して10~15kgf/cm²程度の圧縮応力が発生しており、ガーダ定着部とP C 定着部では応力集中の関係でやや大きめの応力が発生している。なお、P C アンカの内側(放流管側)と外側(横継目側)とでは内側の応力がやや大きめである。また、P C 定着部の直上流側には最大で10kgf/cm²程度の引張応力が生じている。このP C 定着部上流の引張応力は定着部から離れるにしたがって減少していくが、この傾向を図-17に示した鉛直断面詳細モデルの結果と比較すると、水平断面詳細モデルのほうが急激に減少している。これはモデルの境界条件の違いによるものと考えられる。



凡 例
└───┘
0.5mm

図-18 PC緊結荷重による変位（水平断面詳細モデル，ケースH-P）



凡 例
 —●— 圧縮応力
 —○— 引張応力
 — 200tf/m²

図-19 PC緊結荷重による応力（水平断面詳細モデル，ケースH-P）

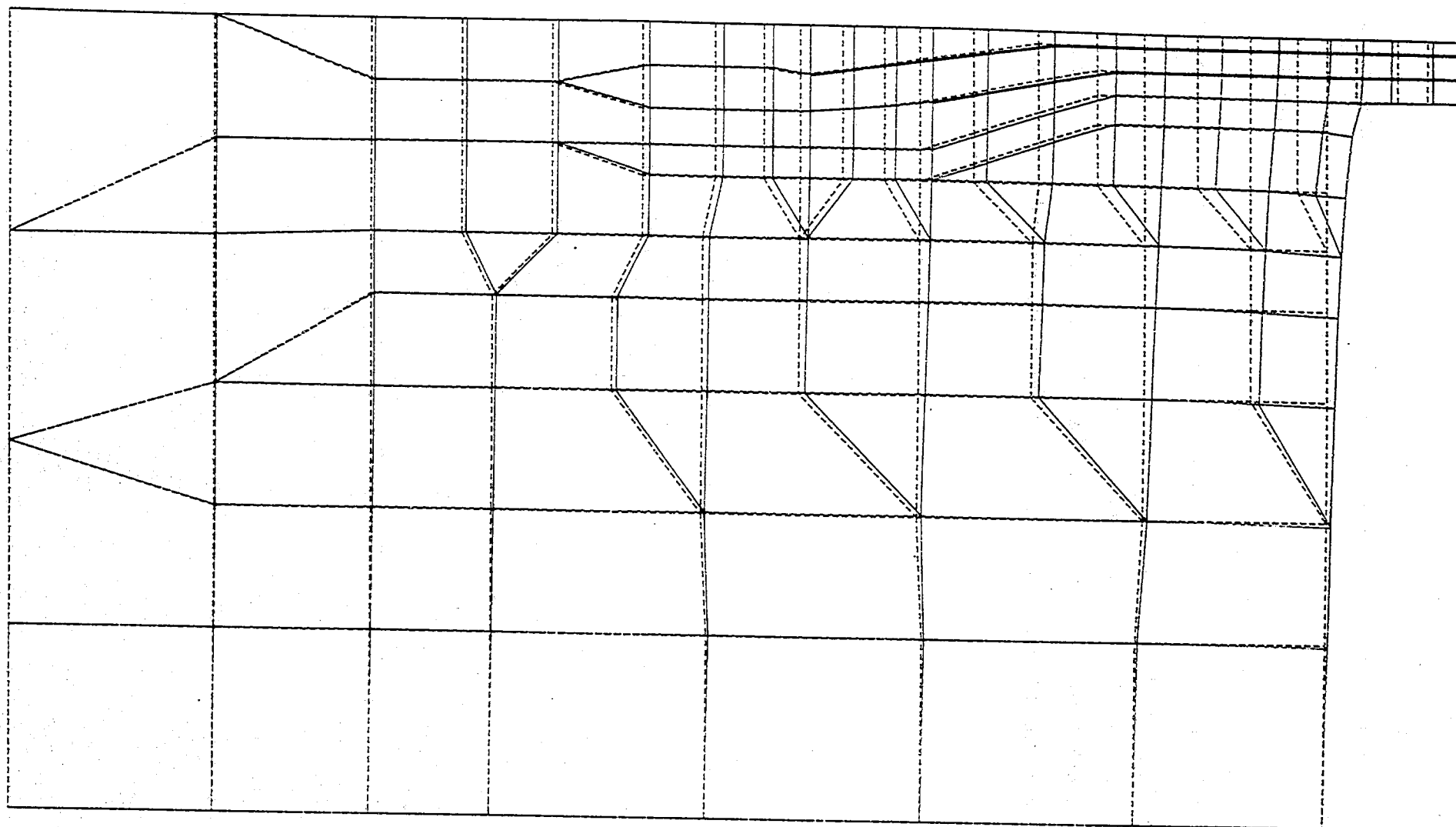
4.2.3 ゲート水圧荷重に対する挙動

(1) 鉛直断面詳細モデルの解析結果（ケースV-G）

現実的な荷重状態ではないが、P C緊結荷重がなく、ゲート水圧荷重のみが作用した状態での鉛直断面詳細モデルの変位図を図-20に、主応力図を図-21に示す。

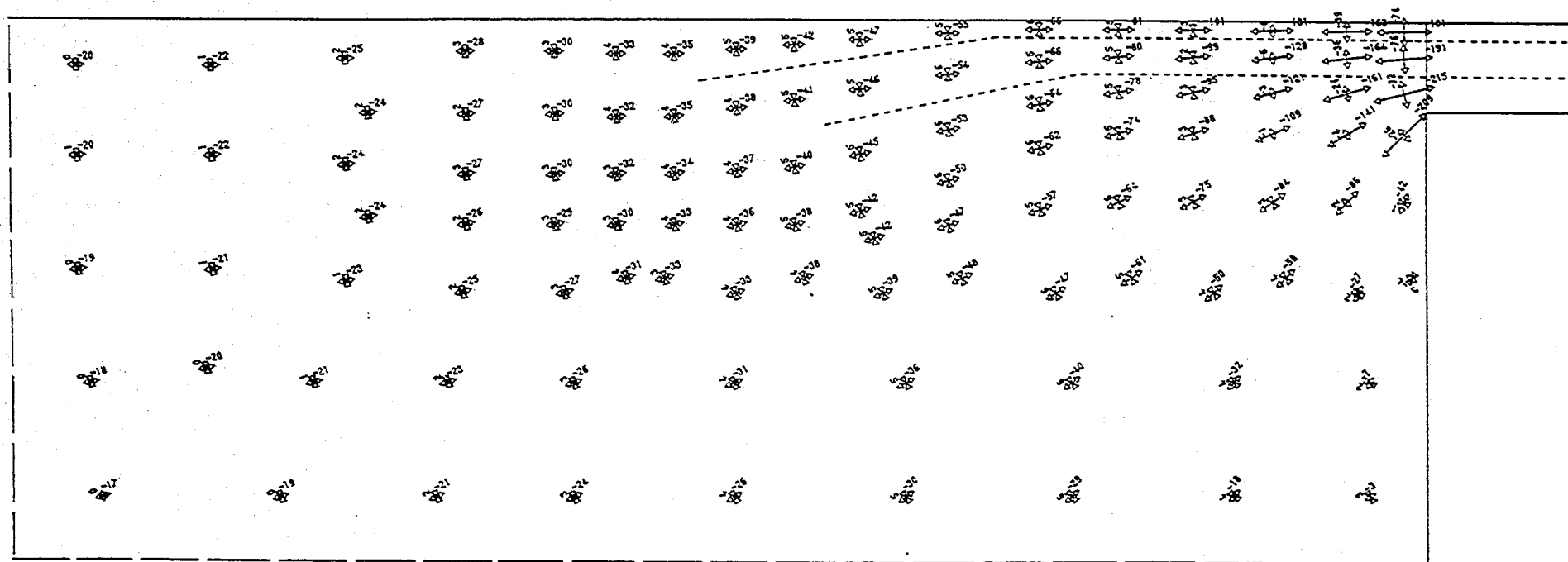
この荷重状態は堤体コンクリートにプレストレス力を導入せずにゲート水圧荷重を堤体コンクリートで直接支持した場合に相当している。まず、変形について見てみると、ガーダとP C定着部間の変形量は、表-7に示すように伸び側に0.28mmであり、この結果は全体モデルの結果と良く一致している。

一方、堤体コンクリート内の応力は全面的に引張応力となっており、特にガーダ付近では20kgf/cm²程度の引張応力が発生している。この引張応力は上流にいくにしたがって減少し、P C定着部付近では3kgf/cm²程度となっている。これらの応力分布の傾向も全体モデルと良く一致している。



凡 例
└───┘
0.5mm

図-20 ゲート水圧荷重による変位（鉛直断面詳細モデル，ケースV-G）



- 凡 例
- 圧縮応力
 - 引張応力
 - 200tf/m²

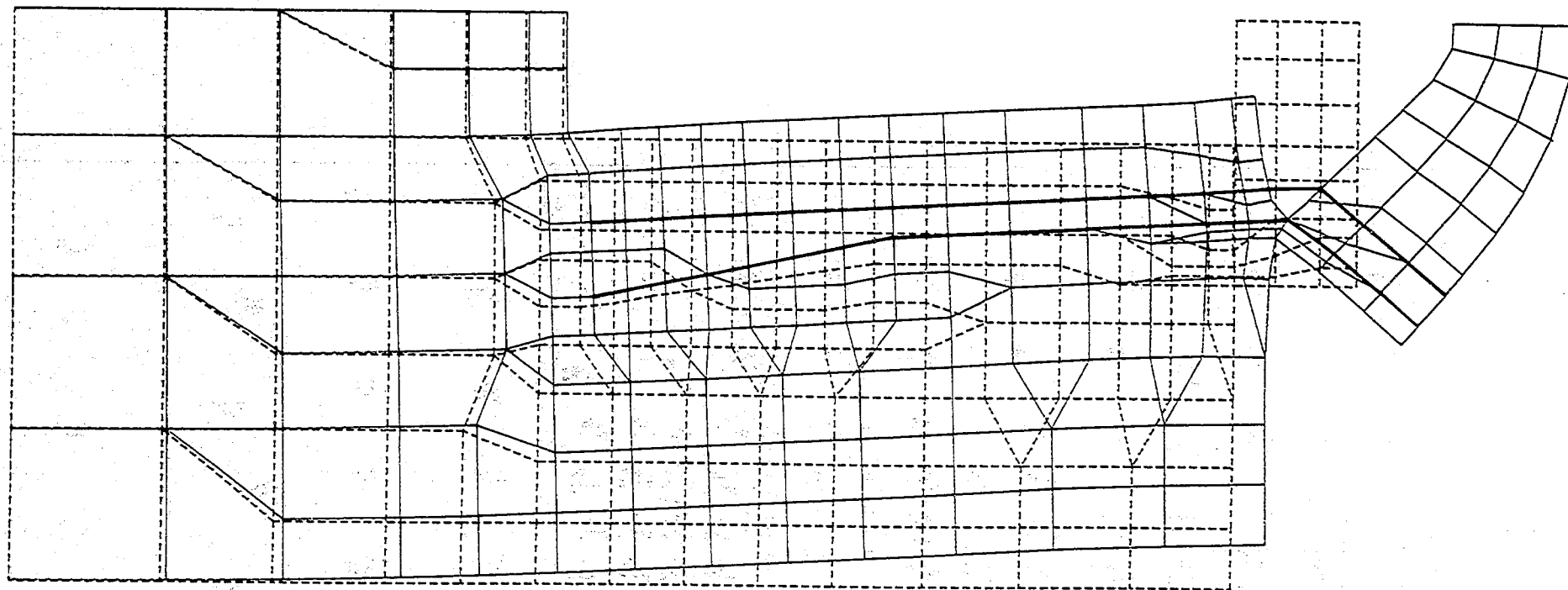
図-21 ゲート水圧荷重による応力（鉛直断面詳細モデル，ケースV-G）

(2) 水平断面詳細モデルの解析結果 (ケースH-G)

現実的な荷重状態ではないが、P C緊結荷重がなく、ゲート水圧荷重が作用した状態での水平断面詳細モデルの変位図を図-22に、主応力図を図-23に示す。なお、後述(4.2.4項)するように、ガーダにゲート水圧荷重が作用すると、受圧面の内側でガーダに離間が生じるが、ここでは便宜上4.2.4項の場合と同じ離間区間を採用した。

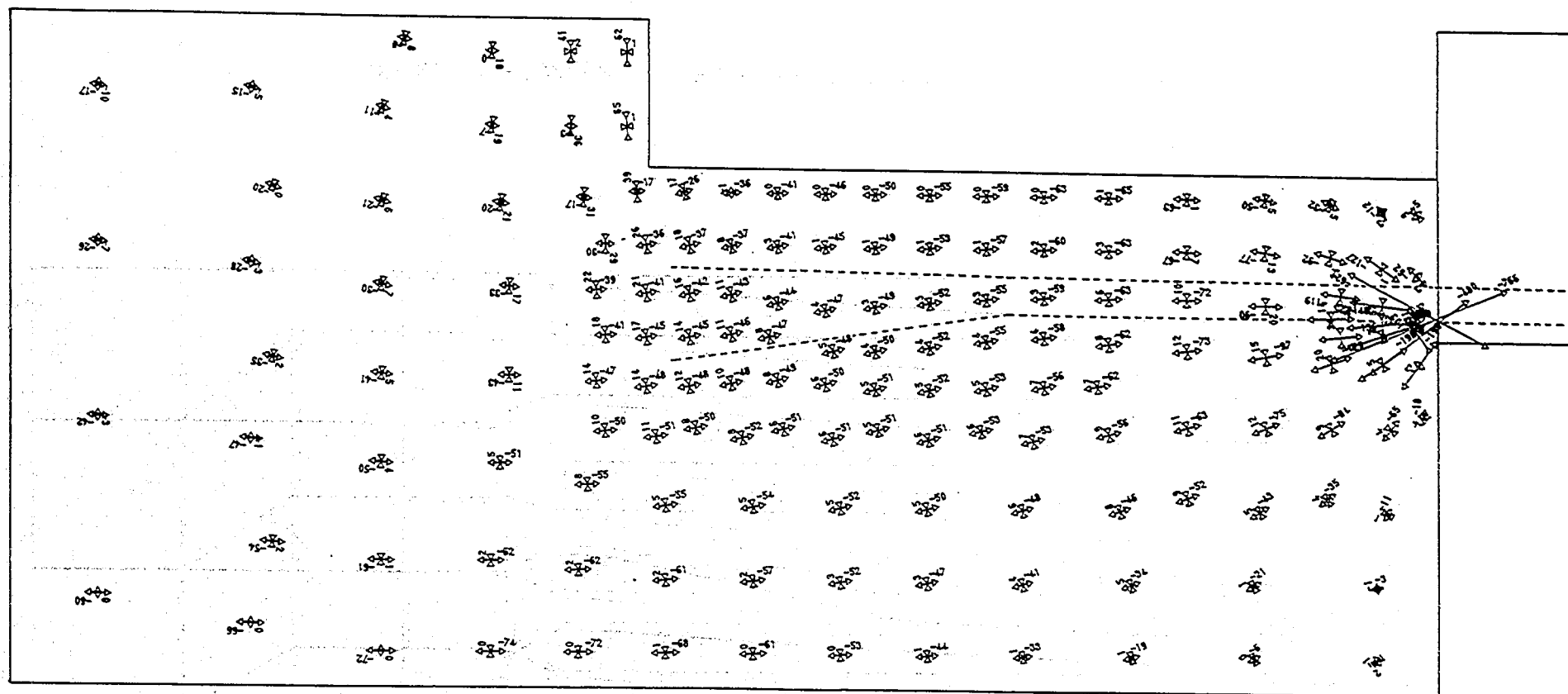
図-22を見ると、ガーダとP C定着部間の変形量(離間量を除く)は表-7に示すように伸び側に0.28mmで、この値は全体モデルや鉛直断面詳細モデルの結果と良く一致している。

一方、堤体コンクリート内の応力は全面的に引張応力となっており、特にガーダとの接触部分では離間によって接触面積が減少している関係で大きな引張応力を示している。また、P C定着部付近の引張応力は4.5kgf/cm²程度で、この値は全体モデルや鉛直断面詳細モデルに比較して大きい、これは境界条件の違いによるものと考えられる。



凡 例
 ┌───┐
 0.5mm

図-22 ゲート水圧荷重による変位（水平断面詳細モデル，ケースH-G）



凡 例

— ⊕ — 圧縮応力

— → — 引張応力

— 200tf/m²

図-23 ゲート水圧荷重による応力（水平断面詳細モデル，ケースH-G）

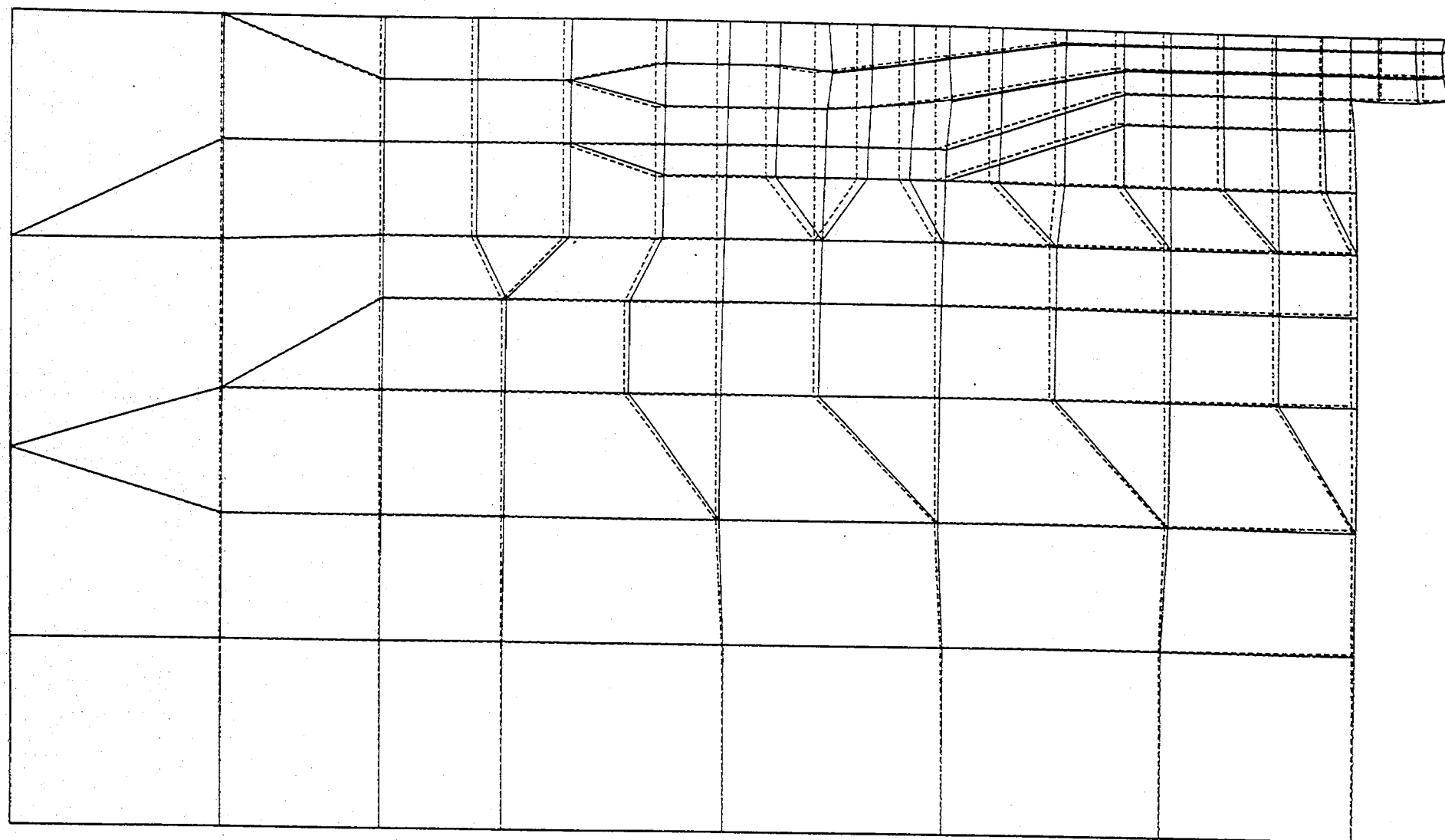
4.2.4 P C緊結荷重とゲート水圧荷重に対する挙動

(1) 鉛直断面詳細モデルの解析結果（ケースV－P G）

P C緊結荷重とゲート水圧荷重を同時に作用させた状態での鉛直断面詳細モデルの変位図を図－24に、主応力図を図－25に示す。

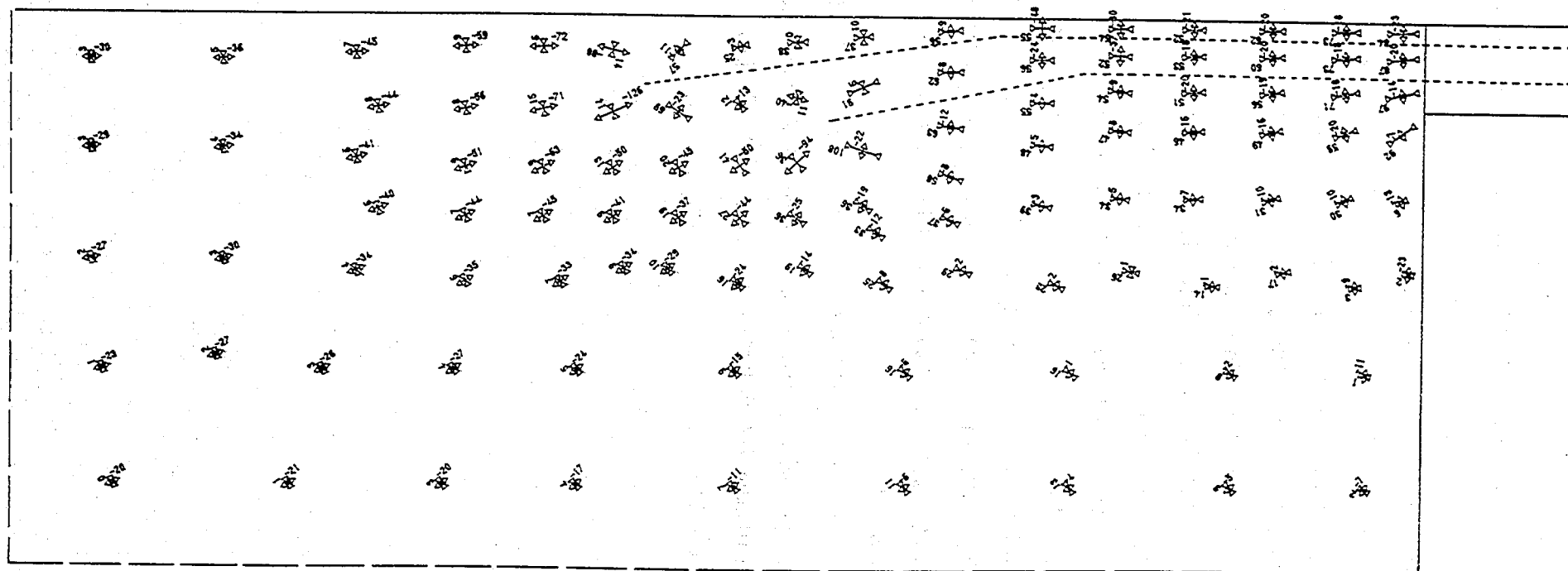
まず、変形について見ると、ガーダとP C定着部間の変形量は表－7に示すように収縮側に0.20mmで、この値は全体モデルの結果にほぼ一致している。

次に、堤体コンクリート内の応力については、ガーダ付近の応力はP C緊結荷重によって圧縮応力となり、代ってP C定着部の上流側に約13kgf/cm²の引張応力が生じている。これらの応力分布の傾向は全体モデルの結果と良く一致しているが、応力の最大値は詳細モデルのほうがやや大きい。これは全体モデルよりも詳細モデルのほうが要素分割が細かいことから、部分的な応力の変化を精度良く捉えているためと考えられる。



凡 例
 ┌──┐
 0.5mm

図-24 PC緊結荷重とゲート水圧荷重による変位（鉛直断面詳細モデル，ケースV-PG）



- 凡 例
- 圧縮応力
 - 引張応力
 - 200tf/m²

図-25 PC緊結荷重とゲート水圧荷重による応力（鉛直断面詳細モデル，ケースV-PG）

(2) 水平断面詳細モデルの解析結果 (ケースH-PG1~5)

PC緊結荷重とゲート水圧荷重を同時に作用させた状態での水平断面詳細モデルの変位図を図-26に、主応力図を図-27に示す。

図によると、ゲート水圧荷重がガーダに作用することによってガーダがS字状に変形し、ガーダとの受圧面沿いのコンクリート内の応力は、受圧面の内側(放流管側)半分で引張応力となった。しかし、実際には受圧面を介して引張応力の伝達はあり得ないので、この計算結果は現実的でない。このことから、図-28に示すように、ガーダとコンクリートとの受圧面の内側からスリットを入れて、受圧面の幅を順次狭めていき、堤体コンクリート内に引張応力が生じなくなるまでガーダの離間を許した計算を行った。その結果、受圧面に入れたスリットが1.3m(受圧全体面の面積の70%)に達した状態で、堤体コンクリートに引張応力が生じなくなった。この時の変位図を図-29に、主応力図を図-30に示す。

図-29によると、ゲート水圧荷重の作用により、ガーダはS字形に変形し、内側のPCアンカの位置で0.3mm程度の離間が生じる結果となった。ただし、このような離間が生じることによってPCアンカに生じる応力増分は80kgf/cm²程度で、この値はPC緊結荷重による応力5,067kgf/cm²の僅か1.6%に過ぎず、このような離間ではPCアンカの応力にはほとんど影響が生じないことが分かった。

次に、図-30に示すコンクリート内の応力分布については、ガーダの離間によって受圧面の内側(水圧鉄管側)の応力はほぼ0となり、反面、受圧面の外側の端部には応力集中によって、最大で30kgf/cm²程度の圧縮応力が生じている。また、PC定着部の上流側の引張応力は最大で14kgf/cm²程度となっている。

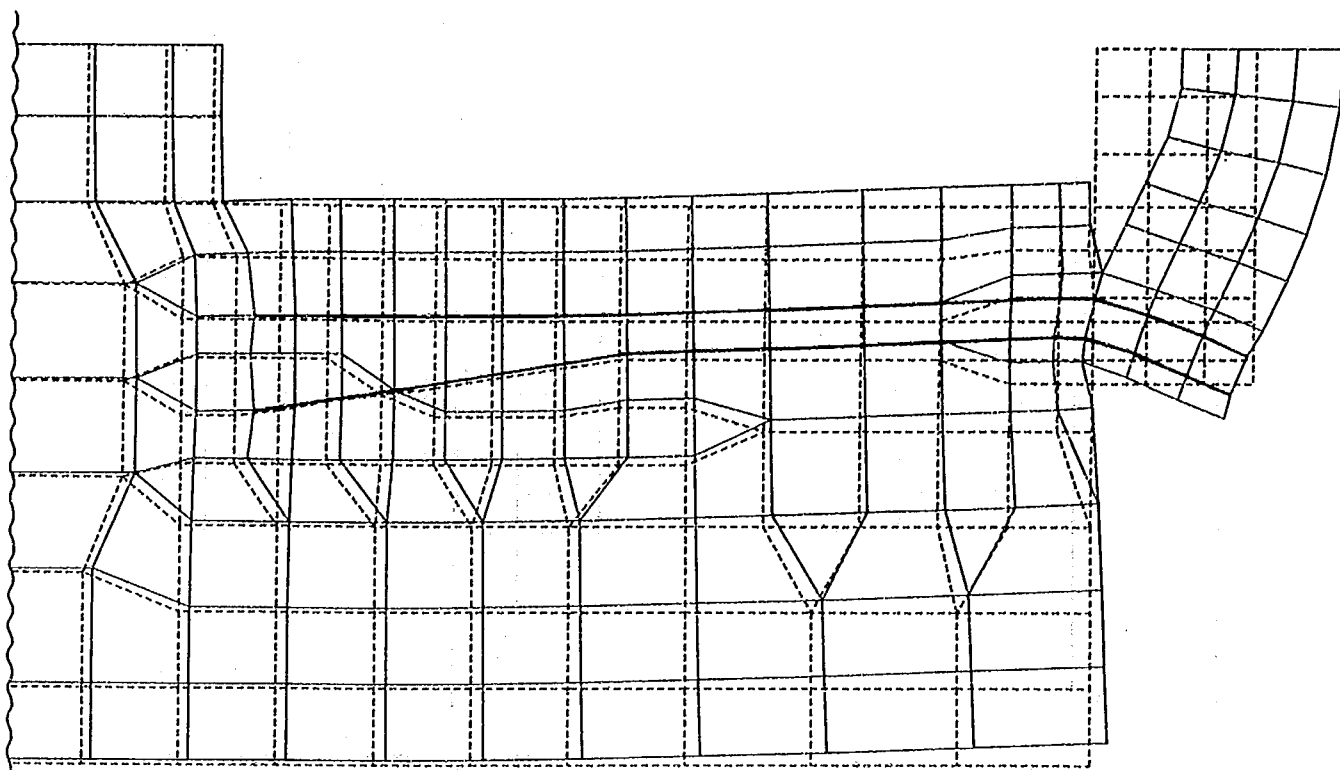


図-26 PC緊結荷重とゲート水圧荷重による変位
(水平断面詳細モデル, 離間を考慮しない場合, ケースH-PG1)

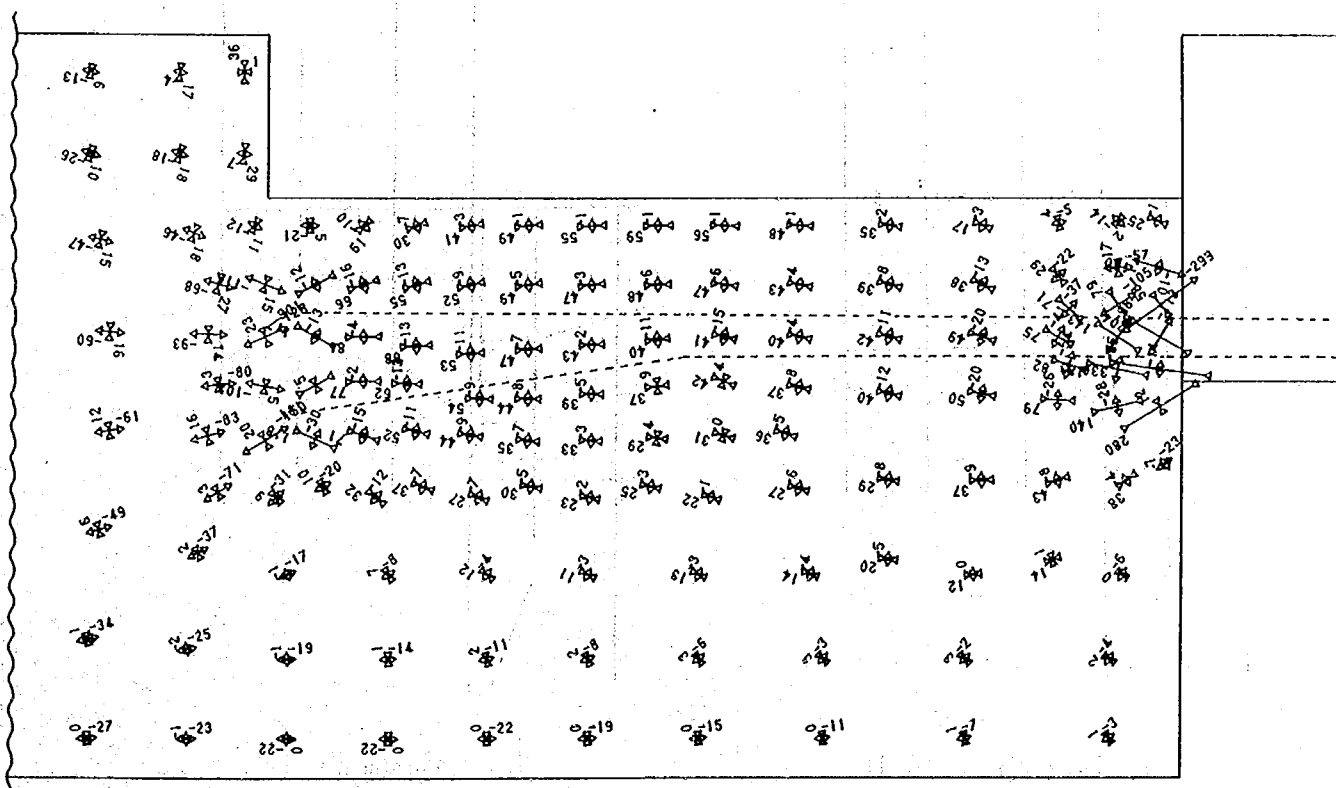
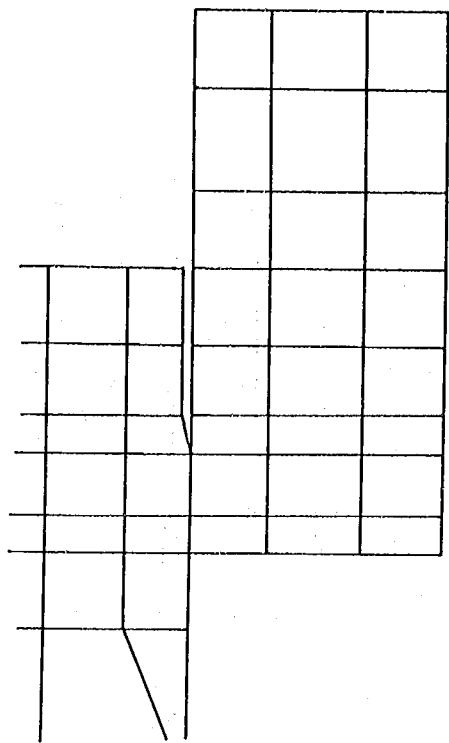
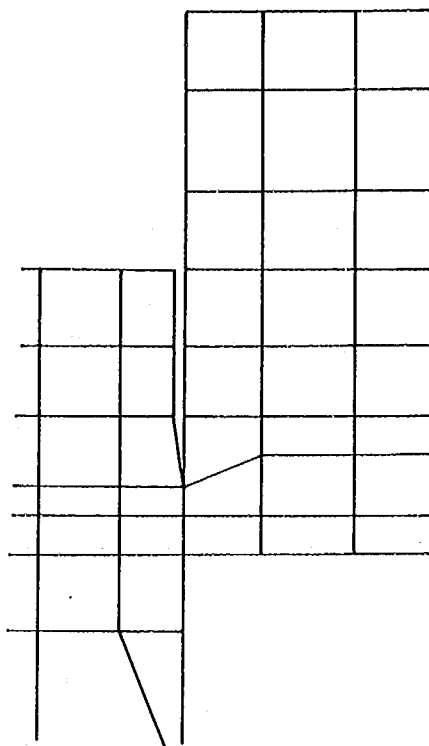


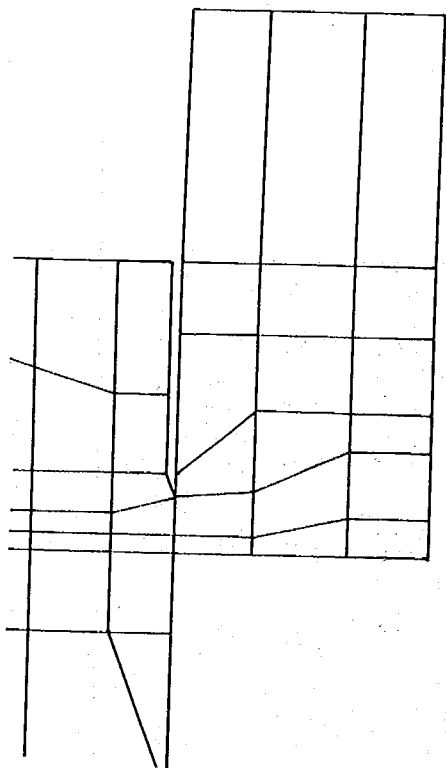
図-27 PC緊結荷重とゲート水圧荷重による応力
(水平断面詳細モデル, 離間を考慮しない場合, ケースH-PG1)



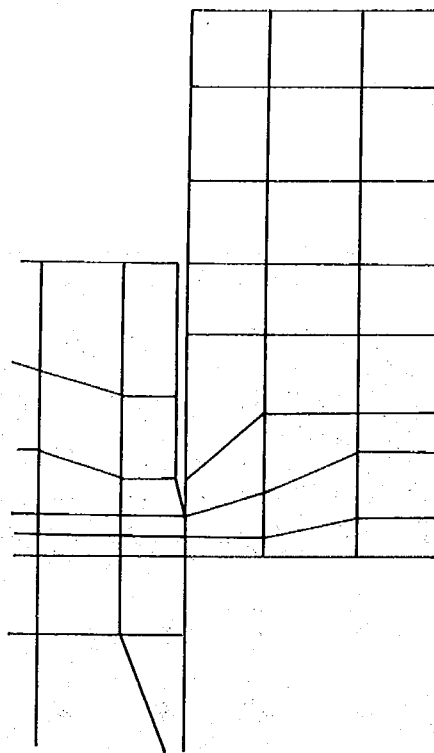
水平断面詳細モデル(2)
(スリット幅0.5m)



水平断面詳細モデル(3)
(スリット幅1.0m)



水平断面詳細モデル(4)
(スリット幅1.15m)



水平断面詳細モデル(5)
(スリット幅1.3m)

図-28 ガーダの離間を考慮したモデル (受圧面部の詳細図)

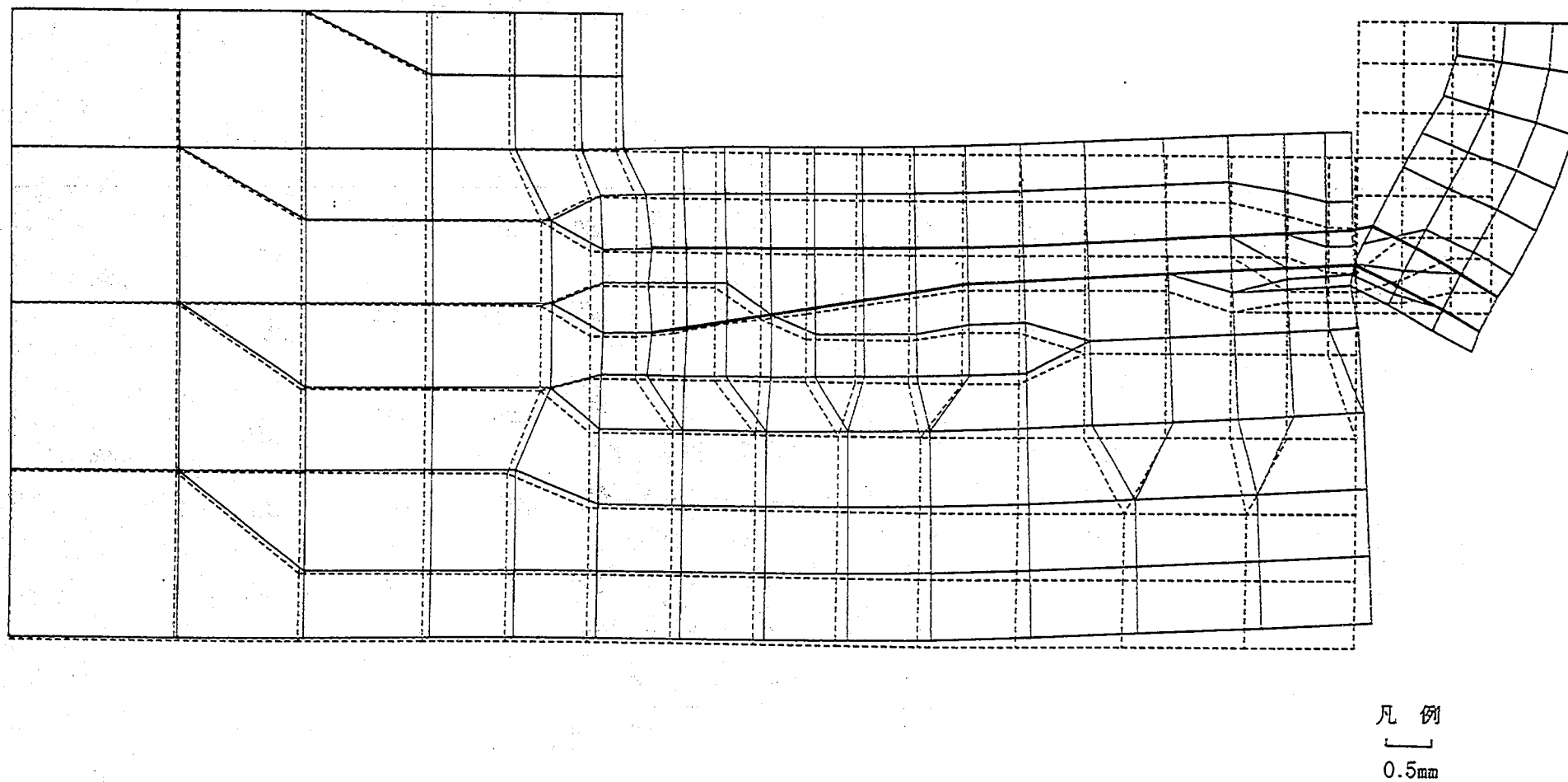
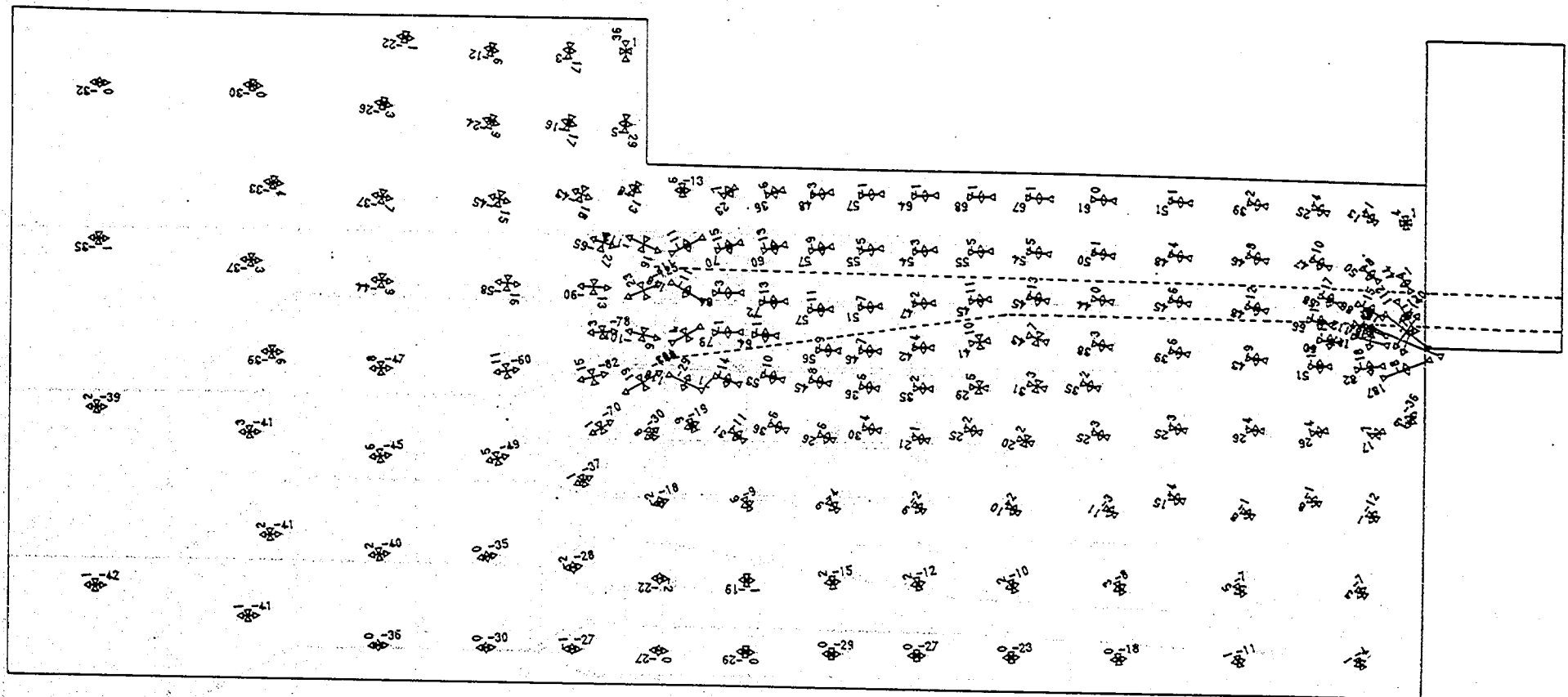


図-29 PC緊結荷重とゲート水圧荷重による変位
(水平断面詳細モデル, 離間を考慮した場合, ケースH-PG5)



凡 例

—●— 圧縮応力

—○— 引張応力

— 200tf/m²

図-30 PC緊結荷重とゲート水压荷重による応力
(水平断面詳細モデル, 離間を考慮した場合, ケースH-PG5)

4.2.5 堤体自重と堤体上流面水圧を考慮した応力状態

これまで、概略検討、全体モデルの検討、詳細モデルの検討について述べてきたが、これらの結果から、P C アンカ定着部の上流側に最大で $13\sim 14\text{kgf/cm}^2$ 程度の引張応力が発生することがわかった。しかし、4.1.4項で述べたように、堤体自重や上流面水圧荷重によって、この部分には圧縮応力が発生することが確認されており、これらの荷重の組み合わせによって応力分布がどのように変化するかを検討した。

検討位置は図-31, 32に示すように、鉛直断面ではP C アンカの内側のA-A断面と外側のB-B断面、水平断面ではP C アンカの内側のC-C断面と外側のD-D断面の計4断面として、各断面における上下流方向の水平応力（上下流方向に直交する鉛直断面に作用する直応力）について検討を行った。P C 緊結荷重、ゲート水圧荷重、堤体自重、上流面水圧荷重がそれぞれ独立して作用した場合の各断面での応力分布を図-31, 32中の(1)(2)のグラフに示す。このうち堤体自重と上流面水圧荷重による応力は全体モデルの解析から得られた値である。

次に、これらの応力分布を重ね合わせて、次に示すような実際に発生する荷重条件での応力分布を求めた。

- ① P C アンカの緊結作業が行われる段階：P C 緊結荷重のみが作用した状態。P C アンカの緊結作業は周辺コンクリートの強度が発現した段階で行われるため、この段階では堤体の打上がり高さが低く、堤体自重はほとんどないと考えてよい。
- ② ダムが完成した段階：P C 緊結荷重と堤体自重が作用した状態
- ③ ダムが湛水した段階：P C 緊結荷重、堤体自重、ゲート水圧荷重、上流面水圧荷重が作用した状態

この結果を図-31, 32中の(3)(4)のグラフに示す。

図によれば、鉛直断面ではP C アンカ緊結時にA-A断面、B-B断面ともP C 定着部の上流側に引張応力を生じているが、ダム完成時には堤体自重による圧縮応力によって引張応力の発生はなくなっている。また、湛水時にゲート水圧荷重と上流面水圧荷重が作用すると、ガーダ付近の圧縮応力は減少する方向に移行するが、その移行量は当然ながらP C 緊結荷重による圧縮応力よりも小さく、引張応力は発生しない。また、P C 定着部では、ゲート水圧荷重による引張応力と上流面水圧荷重による圧縮応力が同程度の大きさであるため、応力変化はわずかであり、引張応力の発生も見られない。

一方、水平断面ではP C アンカ緊結時にC-C断面、D-D断面ともP C 定着部の上流側に引張応力を生じているが、ダム完成時には堤体自重による圧縮応力によって引張応力の発生はなくなっている。また、湛水時にゲート水圧荷重と上流面水圧荷重が作用すると、ガーダ付近の圧縮応力は減少する方向に移行するが、その移行量はP C 緊結荷重による圧縮応力よりも小さいので、引張応力は発生していない。また、P C 定着部では、ゲート水圧荷重による引張応力と上流面水圧荷重による圧縮応力が同程度の大きさであるため、応力変化自体はわずかであるが、多少引張側に移行する結果となった。ただし、その値は極めて小さく、また、4.2.1項

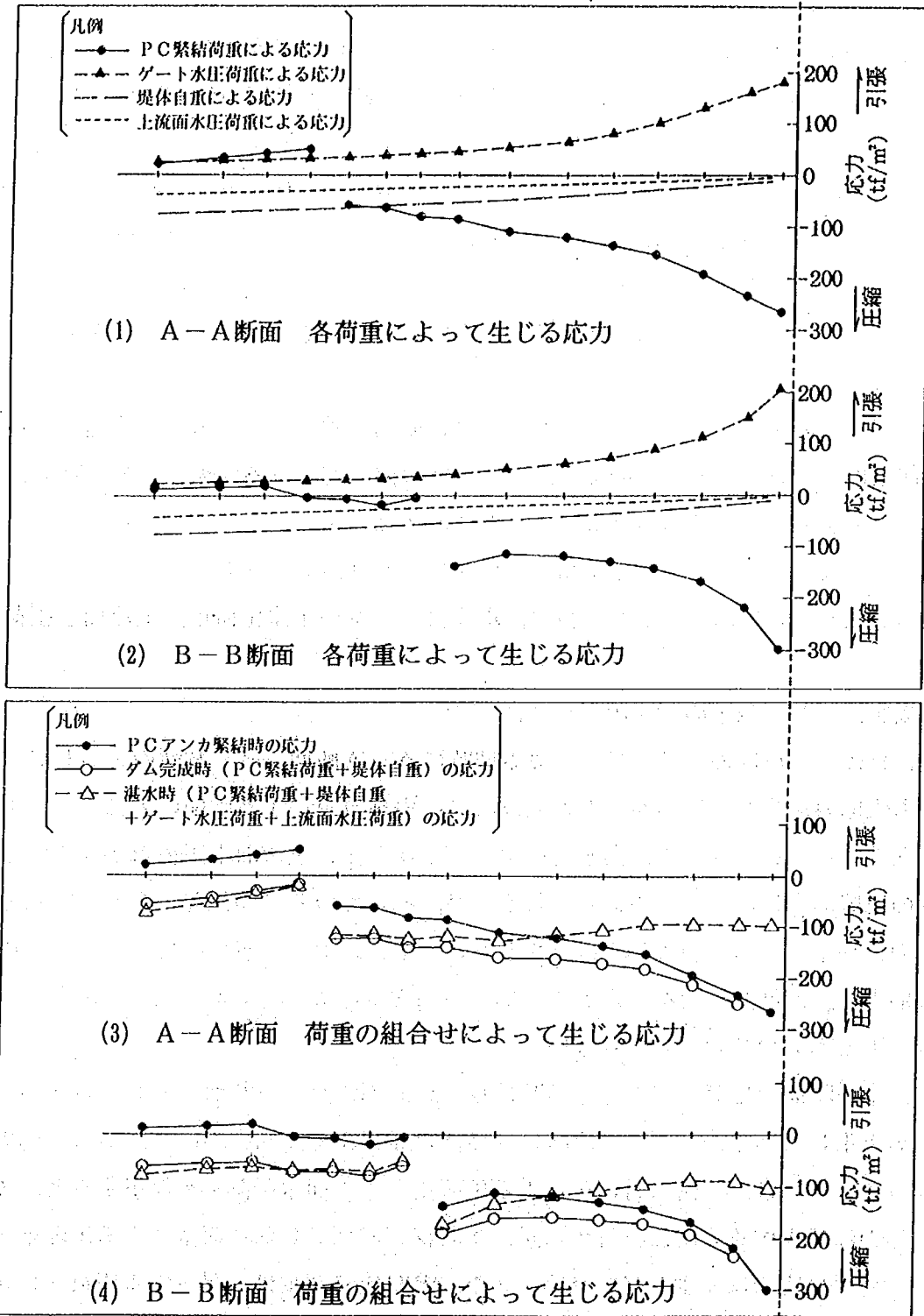
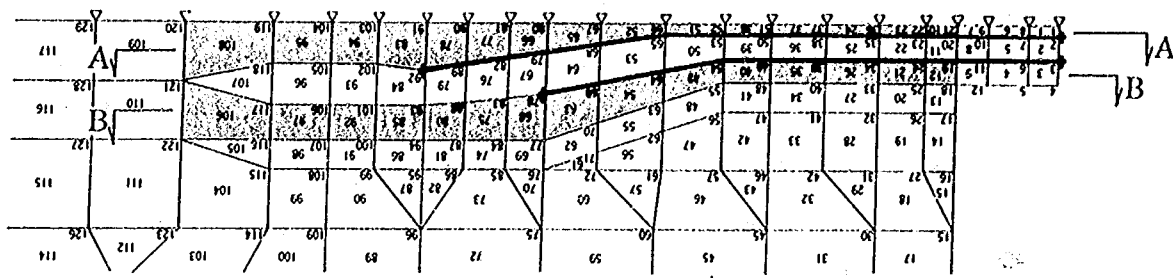


図-31 荷重の組み合わせによるアンカレッジ周辺の上下流方向水平応力の分布 (鉛直断面)

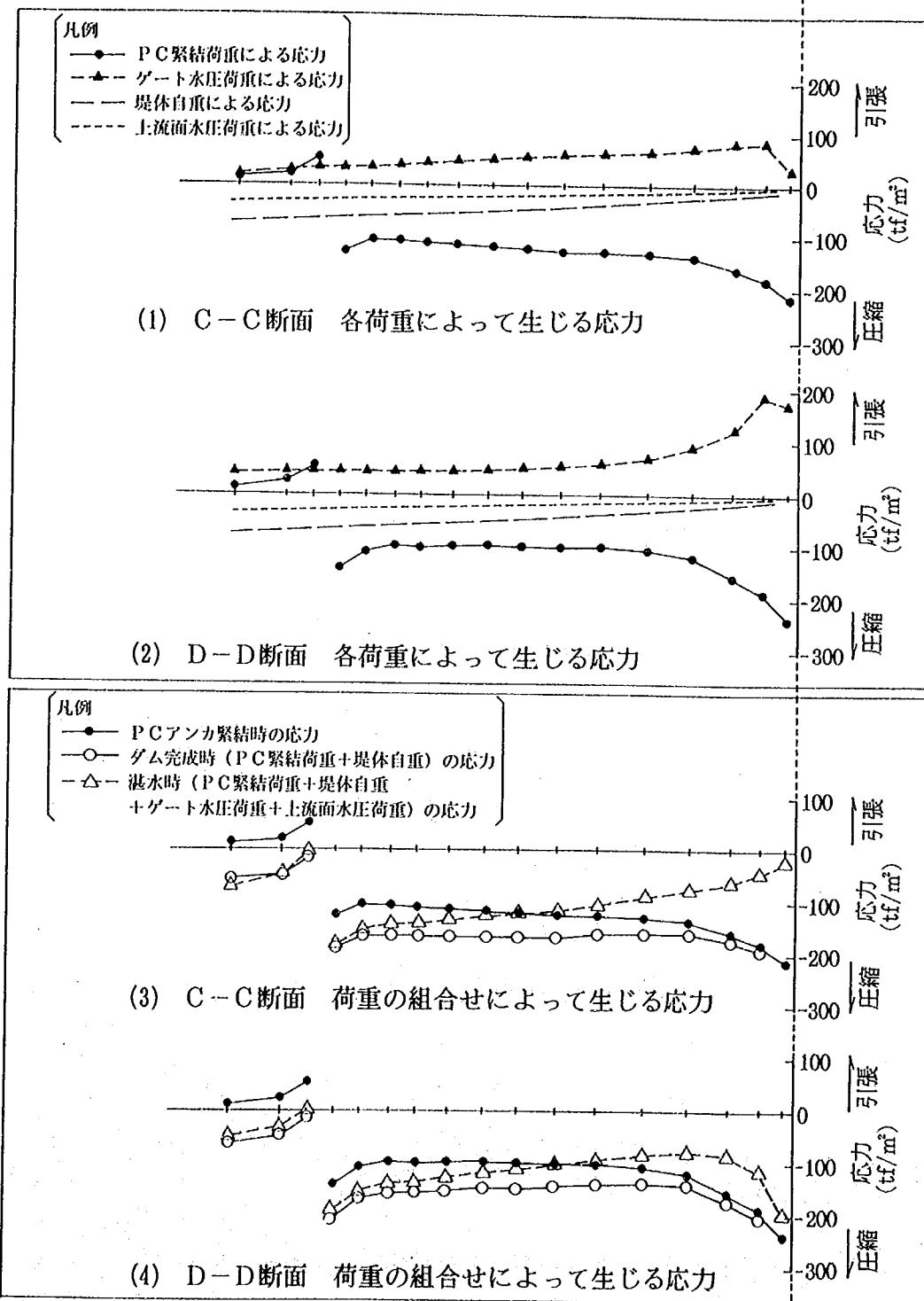
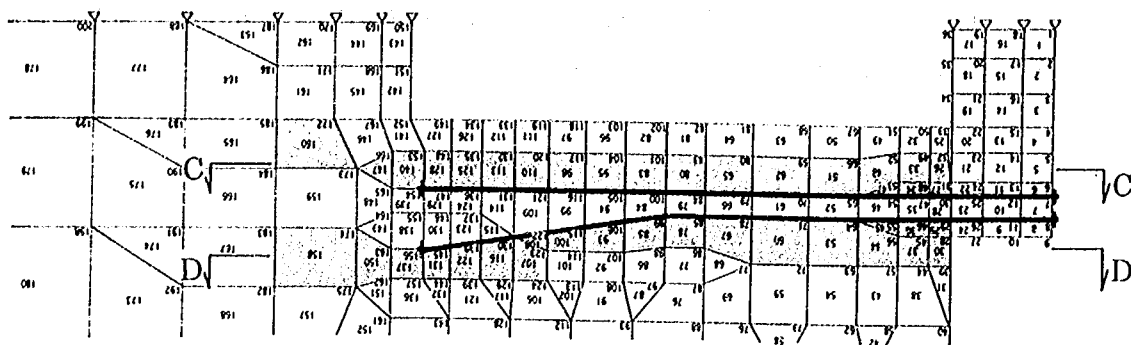


図-32 荷重の組み合わせによるアンカレッジ周辺の上下流方向水平応力の分布 (水平断面)

で述べたように水平断面の解析精度は鉛直断面の解析精度に比べて劣っているため、このような引張応力の発生は問題にならないと考えられる。

5. まとめと考察

これまで述べてきた検討結果からPC方式のアンカレージと周辺コンクリートの挙動をとりまとめると、以下ようになる。

- ① PCアンカはプレストレスを導入する時には大きな伸びを示し、大きな引張応力を生じるが、ゲートからの水圧荷重を受けた時には、堤体コンクリートの剛性によって変形量が規制されるため、PCアンカに生じる応力変化は極めてわずかである。
- ② したがって、ゲートからの水圧荷重を受ける時のアンカレージと周辺コンクリートの挙動は、実用上PCアンカの剛性を無視した解析を行ってもさしつかえない。
- ③ 2次元解析で得られるPCアンカ周辺のコンクリートの変形量は、ガーダ受圧面の面積に等しい柱を考えた1次元解析より得られる変形量の1/3程度となった。実際には3次元的な応力分散が期待できるため、コンクリートの剛性はさらに大きくなり、コンクリートの変形量はさらに小さくなるといえる。
- ④ ゲートからの水圧荷重を受けた場合の堤体コンクリートの挙動を2次元モデルによって解析するには、水平断面モデルと鉛直断面モデルの2つが考えられるが、水平断面の解析は境界条件の設定に問題があり、鉛直断面の解析がより適切である。ただし、ガーダ部周辺の応力解析については、注目する領域が荷重作用点に近いことから、水平断面で解析しても問題はない。
- ⑤ PCアンカによるプレストレスがゲートからの水圧荷重よりも大きい場合でも、ゲート水圧荷重の作用時にはガーダとコンクリート間に部分的な離間が生じる。ただし、離間が生じて受圧面が完全に開かない限りコンクリートの剛性が期待でき、PCアンカに生じる応力の増加はわずかである。
- ⑥ PCアンカの定着部の上流側にはPCアンカのプレストレスによって引張応力が作用する。引張応力の大きさはPCアンカの定着部を分散することによって減じることができるが、堤体自重による応力を利用して消すことも可能である。
- ⑦ PCアンカの定着部の上流側にはゲートからの水圧荷重によって引張応力が作用する。この値はPCアンカの定着部を堤体深部に設定することにより減じることができるが、堤体自重による応力、堤体上流面の水圧荷重による応力を利用して消すことも可能である。

なお、今回はMダムの洪水調節用ゲートとして設計されたPCアンカ方式のアンカレージを例にとって解析を行ったため、好ましいプレストレスの値、ガーダの剛性と受圧面の大きさ、PCアンカの定着部の位置などについて検討を広げるまでには至らなかった。これらの項目については、今後詳しく解析する予定である。

ダム用ゲートにおけるPC
アンカ方式アンカレージの
応力解析

I S S N 0386-5878
土木研究所資料第3292号
平成6年8月(1994)

ダム構造研究室 室 長 永 山 功
研 究 員 片 平 博

要 旨

高圧ラジアルゲートのアンカレージの形式としてPCアンカ方式がある。PCアンカを用いたゲートの支持方式の設計法は既に体系化されているが、PCアンカがダム堤体の応力状態に及ぼす影響とその補強方法についてはいまだ体系化された手法がない。本報文は、PCアンカ方式を用いたゲートアンカレージ周辺の堤体の応力状態を解析し、その特性について整理したものである。

キーワード：ダム，放流設備，ゲート，アンカレージ，PCアンカ，プレストレスト
コンクリート，有限要素法



郵便はがき

3 0 5 - □ □

五十円切手
をはって下
さい

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

ダム部ダム構造研究室 行

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所

