

土木研究所資料 第471号
関門橋設計施工調査報告書

下部構造に関する調査

昭和44年3月

建設省 土木研究所

目 次

1. 目 的 1
2. 技 術 指 導 内 容 1
3. 下 部 構 造 の 内 部 応 力 の 検 討 3
4. 下 部 構 造 に 関 す る 調 査 結 果 の ま と め 7

1. 目 的

本報告書は昭和43年5月より昭和44年3月まで、日本道路公団福岡支社より建設省土木研究所に委託された関門橋設計施工調査のうち、下部構造に関する調査結果についての報告書である。

関門橋の下部構造の調査・設計に関しては、以前より架橋地点の地盤調査方法、地盤調査結果の整理、地盤定数の決定、概略設計の方針などについて技術指導をし土木研究所の判断を示してきたが、このたびの委託の主な目的は調査設計および実施設計についての設計実務作業に関して技術指導を行ない、関門橋の下部構造の設計に関して工事事務所より提出された種々の問題点について土木研究所の見解を示し、判断の根拠を与えたことである。

それらの主な点は、大きく別けると、

- (1) 関門橋の設計指針を作成するため、設計方針を決定し、問題点を摘出し解決した。
- (2) 耐震設計を具体的にどのように行なうか検討し、方針を示した。
- (3) 細部設計についてその設計内容を種々の点から検討し方針を示した。特に下部構造のコンクリートの内部応力およびその分布については、有限要素法を利用して下部構造物全体をひとつの系として解いて各部の応力を求め、部分的に応力関数によつて求めた方法と対比し、吟味した。この場合自重による応力も考慮に入れた。

以下にこれらの内容について報告する。

昭和44年3月

建設省土木研究所

基礎研究室

吉 田 幾

足 立 義 雄

2. 技術指導内容

- (1) 設計指針の問題点の洗い出し

関門橋の下部構造としては、門司側と下関側に橋台、橋脚を2基ずつ設計しなければならないが、下部構造の寸法、根入れ長さおよび概略設計における計算などから判断して、門司側橋脚はケーソン基礎として設計し、他は直接基礎と考えて設計することを決定した。その場合の設計方針としては、道路橋下部構造設計指針・調査および設計一般篇、直接基礎の設計篇、ケーソンの設計篇(案)を準用することとし、関門橋に適用する場合の問題点として、次の項目を摘出し、土木研究所の判断を提示した。

- (i) 地盤の許容支持力などの決定方法
- (ii) 安定条件
- (iii) 浮力の取扱い
- (iv) 地盤荷重と耐震設計法
- (v) 地盤反力係数の推定
- (vi) 下部構造に作用する土圧に対する粘着力の取扱い
- (vii) 下部構造の内部応力の計算と配筋

(viii) 下部構造の細部設計

(2) 耐震設計

耐震設計法としては、震度法、応答を考慮した修正震度法などがあるが、後者の場合には、2 自由度系としての応答量がまとまっていなかった。そのため、2 自由度系の運動方程式を規準座標を用いて表わし、各次数毎にこれを解いて、その解を合成するモーダルアナリシスによって最大応答量を求め、計算の便宜上、2 次モード以下を無視して処理する方法で検討を行なってもよいことを示した。

(3) 細部設計

下部構造各部の細部設計としては次の各点について検討を行わねばならないことを指摘し、その方針を示した。

(I) 門司側橋脚について

- (i) 作業室天井版のような高さの高い版、梁ではせん断力の影響が大きいため無視できない。
- (ii) ケーソンの隅角部や桁と壁の接合部における設計曲げモーメントは応力集中が大きいため最大値を考える。
- (iii) 吊桁と天井版の接合部は曲げモーメントと引張力を同時に受けるので、その配筋を十分に考慮しなければならない。
- (iv) 作業室側壁の設計は刃口部が浮上って曲げモーメントのみが作用する場合の他、刃口下端に生ずる地盤反力が軸力として作用する場合も検討しなければならない。
- (v) 側壁および隔壁の設計には外水圧と内水圧を相殺しているが、シャフトを除去する場合に内水圧が低下するので、その場合についても検討しなければならない。
- (vi) 主塔より作用する外力により、頂版内部に引張力が生ずるが、それについて検討し、十分に配筋することが必要である。
- (vii) 頂版と壁の間のせん断について検討するのが望しい。

(II) 下関側橋脚について

- (i) 施工時に岩盤を掘削した結果、基礎底面を浅くできる場合があるので、設計変更が可能ならうにしておく。
- (ii) 隔壁には通水孔を設けて、水の流通をはかる。
- (iii) 埋め戻しは岩盤を掘削したのであるから、固定度を確保するためにも貧配合のコンクリートを用いる。

(III) 橋台について

- (i) アンカーブロックの応力計算には、底面が弾性支承されるという影響は小さいので、剛体として取扱う。
- (ii) ケーブルより作用する引張力によって生ずるアンカーフレームとコンクリートの間のせん断について検討を要する。
- (iii) アイバー、ピンの材質について再検討しなければならない(厚さ65mmのSM50)。
- (iv) アイバーのセッティングエラーの調整について検討し、それによるコンクリートへの支圧力に

対して補強する。

- (V) サドルのフリクションや架設誤差により、サドルベントに生ずるモーメントについて検討しなければならない。
- (vi) 温度変化によりケーブルの引張力の角度が変化するが、そのコンクリート応力に対して十分に配筋を行なう。
- (vii) ケーブル架設時のアンカーブロックについても断面の検討を行なわねばならない。

[IV] 下部構造全般

- (i) 細部設計などの計算書の体裁を整える。また、設計に際しては、上部構造の設計条件、施工条件、上下部構造の接合部などについて十分に把握する。
- (ii) 施工管理に必要な計器を埋設する。
- (iii) コンクリート打設時のクーリングについては十分に、かつ施工の難易を考慮して配管する。
- (iv) 施工経目における鉄筋は施工の難易を考慮に入れなければならない。

(4) その他の問題点

- (i) 地盤の支持力については、既往の地盤調査結果を総合して地盤定数を決め、道路橋下部構造設計指針により許容支持力を決定し、地盤の傾斜の影響についてはすべり面を仮定し、安定計算を行なって、最小のすべり線を求め、支持力の減少を計算しなければならない。
- (ii) 安定条件は、道路橋下部構造設計指針の安全率による。
- (iii) 浮力は本州四国連絡橋耐震設計指針により100%考慮するが、水の影響のないと見られる門司側橋台では浮力を考慮しなくてよいという判断を示した。
- (iv) 地震荷重はボスフォラス橋耐震設計指針と同じものを用いることとした。
- (v) 地盤反力係数については、地盤が一様な橋成でないので、その場合の取扱い方法を示し、更にそれに伴って生ずる下部構造の回転中心のずれを求めたが、比較的少量のため無視することとした。
- (vi) 下部構造に作用する土圧については粘着力を考慮に入れるが、施工時の乱れ域を想定して土圧を計算することとした。

3. 下部構造の内部応力の検討

下部構造の内部応力については、計算を簡易化するために、各部について Airy の応力関数, Boussinesq の半無限弾性体に作用する荷重に対する解、弾性床上の梁の理論を用いて計算を行なった。しかし、自重による応力が計算しにくいこと、簡易化することにより細部の応力集中や応力の方向が計算しにくいこと、全体としての応力のつながりに誤差を生ずることなどにより、下部構造全体としての系として内部応力を計算する必要が生じ、有限要素法により内部応力を求めた。有限要素法のプログラムとしてはダム構造研究室が開発したものをを用いることとした。

(1) 有限要素法の概要

有限要素法は構造物を個々の独立した要素に分割し、それらの要素はそれぞれ節点のみで結合されていると考える。これらの要素の節点における力と変形の関係を求めることにより解くものである。

個々の要素の応力とひずみの関係は、

$$[\sigma] = [D] [\epsilon] \dots\dots\dots(1)$$

ひずみと変位の関係は、

$$[\epsilon] = [B] [v] \dots\dots\dots(2)$$

節点に働く力と変位の関係は、

$$[S] = [K] [v] \dots\dots\dots(3)$$

次に、構造物全体について、各点の変位を合わせると、 $[r]$ を絶対変位とすると、

$$[v] = [A] [r] \dots\dots\dots(4)$$

荷重の関係より、 $[R]$ を外荷重とすると、

$$[R] = [A]^T [S] \dots\dots\dots(5)$$

以上の関係より、

$$[R] = [A]^T [K] [v] = [A]^T [K] [A] [r] = [F] [r] \dots\dots\dots(6)$$

したがって、

$$[r] = [F]^{-1} [R] \dots\dots\dots(7)$$

要するに、

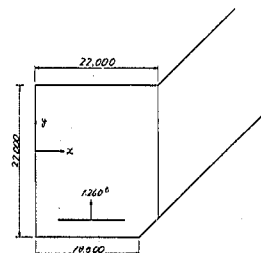
$$[F]^{-1} = \{ [A]^T [K] [A] \}^{-1} \dots\dots\dots(8)$$

を求めると、構造物全体のつり合いが解けることになる。

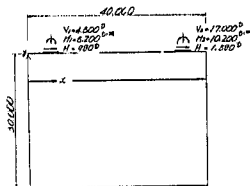
(2) 計 算 条 件

計算は図-1に示す9つの条件について行なった。すなわち、

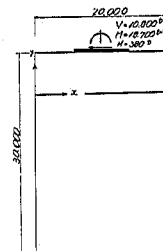
- (i) 門司側橋脚の頂版の応力計算
- (ii) 下関側橋脚のマッシュタイプの全体としての応力計算
- (iii) 門司側橋台の完成後および架設時の応力計算
- (iv) 自重の影響を調べるための橋台の一部についての応力計算である。



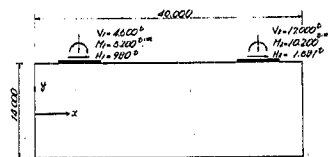
Case 1. 門司側橋台n-部分



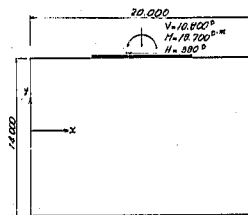
Case 2. 門司側橋脚 橋軸直交方向



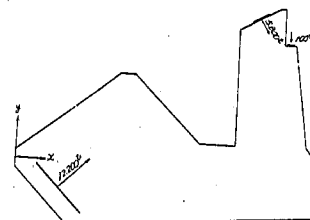
Case 3. 門司側橋脚 橋軸方向



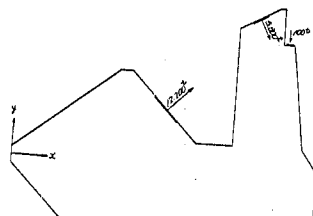
Case 4. 下河側橋脚(マシツタダ) 橋軸直交方向



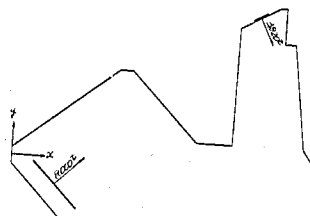
Case 5. 下河側橋脚(マシツタダ) 橋軸方向



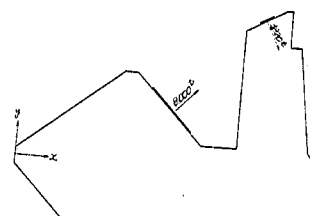
Case 6. 門司側橋台完成後(1)



Case 7. 門司側橋台完成後(2)



Case 8. 門司側橋台架設時(1)



Case 9. 門司側橋台架設時(2)

図-1. 計算条件

計算上の假定としては、

- (i) 計算はすべて2次元の有限要素法のプログラムを用いたため、荷重は単位長さ当りに換算してある。
- (ii) 下部構造物のみを考え、地盤は変位しないものとみなし、下部構造物の底面を固定した。
- (iii) コンクリートの弾性係数は300000kg/cm²、ポアソン比は0.3、単位体積重量を2.5 t/m³と仮定した。
- (iv) 自重はすべて考慮に入れる。

(3) 計算結果

以上より計算した結果を図-3～37として本報告の末尾に示した。結果として図化したものは、それぞれの節点のx方向の応力 σ_x 、y方向の応力 σ_y 、せん断力 τ_{xy} とそれぞれの要素の主応力とその方向である。

この結果より、Airyの応力関数などで計算を行なったものと大差ないことがわかったが、応力関数の方法で求まらない局部応力については配筋を修正する必要がある。しかし、この方法では次の4点について注意を要する。

- (i) 実構造物は3次元であるが、有限要素法は2次元で解いているため、3次元の応力分布とに差がある。したがって頂版下面には過大な引張応力が出ていると考えられる。
- (ii) 下部構造物の底面を固定してあるため、その付近に若干応力集中を生じている。しかし、反力図より考えて、剛体のつり合いより求めた場合とほぼ一致していると考えてよい。反力図の一例として、最も簡単な下関側橋脚(マツプタイプ)について図-2に示す。

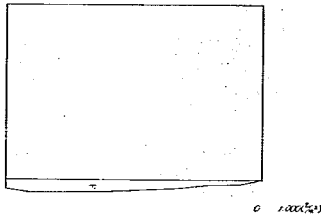


図-2 地盤反力例

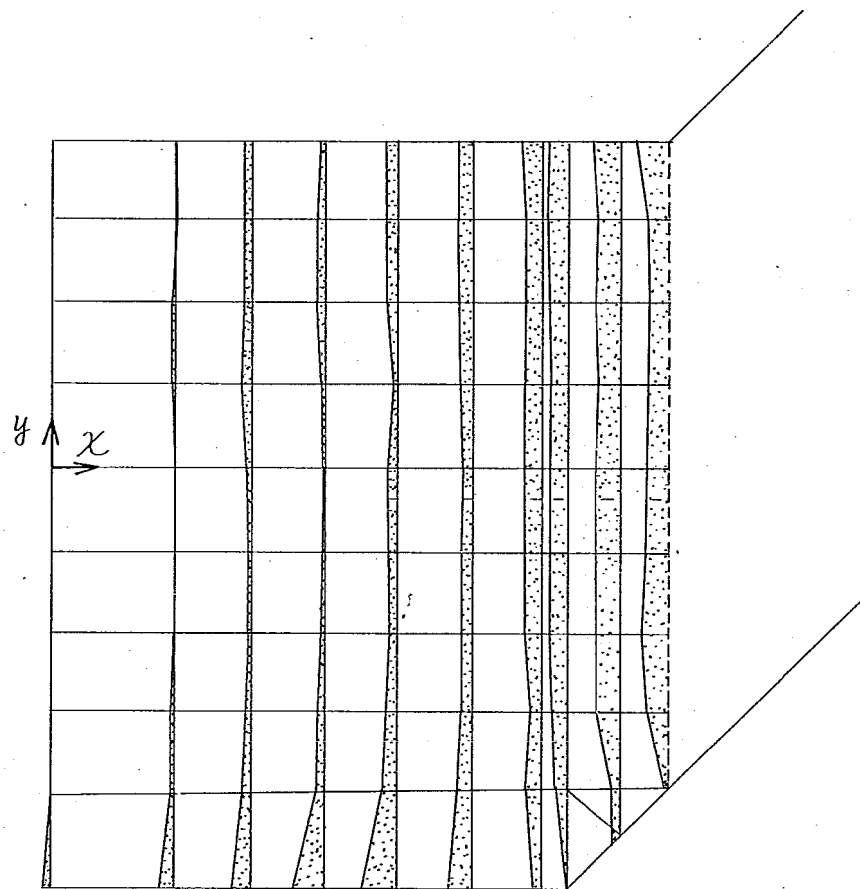
- (iii) アンカerbロック内のアンカフレームよりコンクリートに作用するケーブルの引張力は、アンカフレームの両端部で計算を行なった(図-1, case 6, 7, 8, 9)。そのケーブルの引張力の作用位置によって、応力分布にかなり差があるので、光弾性実験などにより、ケーブルの引張力の作用点を調べなければならない。実際にはアンカフレームに沿って、少しずつコンクリートに伝わりと考えられるので、応力分布は両者の中間値になる。
- (iv) 特に応力の集中する点については、さらに細かく要素を分割して、応力集中の度合を調べる必要がある。今回の計算では応力分布が不明なため、かなり一様な要素に分割してある。

4 下部構造に関する調査結果のまとめ

昭和43年の関門橋設計施工調査・下部構造に関する調査の成果をまとめると次のようである。

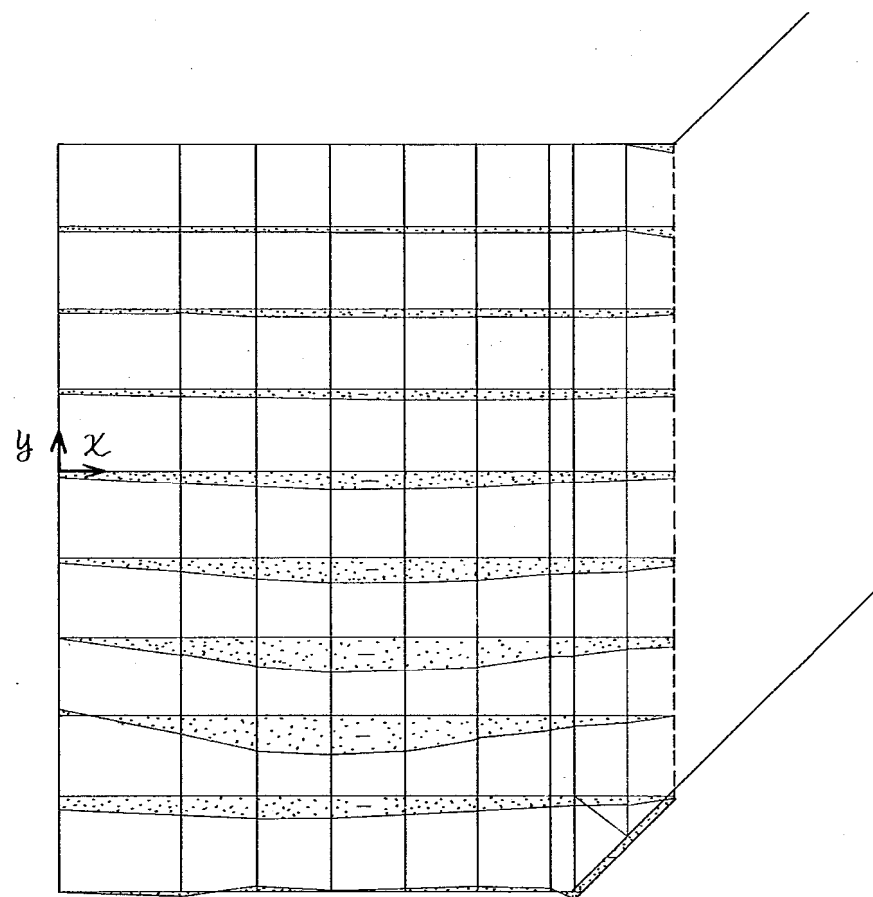
- (1) 工事々務所は技術指導の内容を考慮に入れて、調査設計を行ない、更に施工に先立って詳細設計を行なうため、関門橋下部構造設計示方書および設計要綱を作成した。
- (2) 耐震設計は上部構造より決まる最小寸法を基本として、応答を考慮した修正震度法で実施し、さらに震度法、2自由度系としても取扱い、安定条件が満足されていることを確認するように、耐震設計方針を決めるのが望ましい。
- (3) 細部設計については、指摘した各点について設計方針を決め、それが実際の設計作業に反映された。
- (4) 有限要素法により下部構造物の内部応力を計算した結果、各部分部分で計算した方法と対比して吟味でき、これの妥当性を証明し、またこれを用いて細部の配筋を修正することができた。その際特に自重の影響を明確に把握することができた。今後、Airyの応力関数などで解く方法で下部構造の内部応力を計算してもよいが、局部に応力集中の恐れがある場合には有限要素法を利用するのが望ましい。

以 上



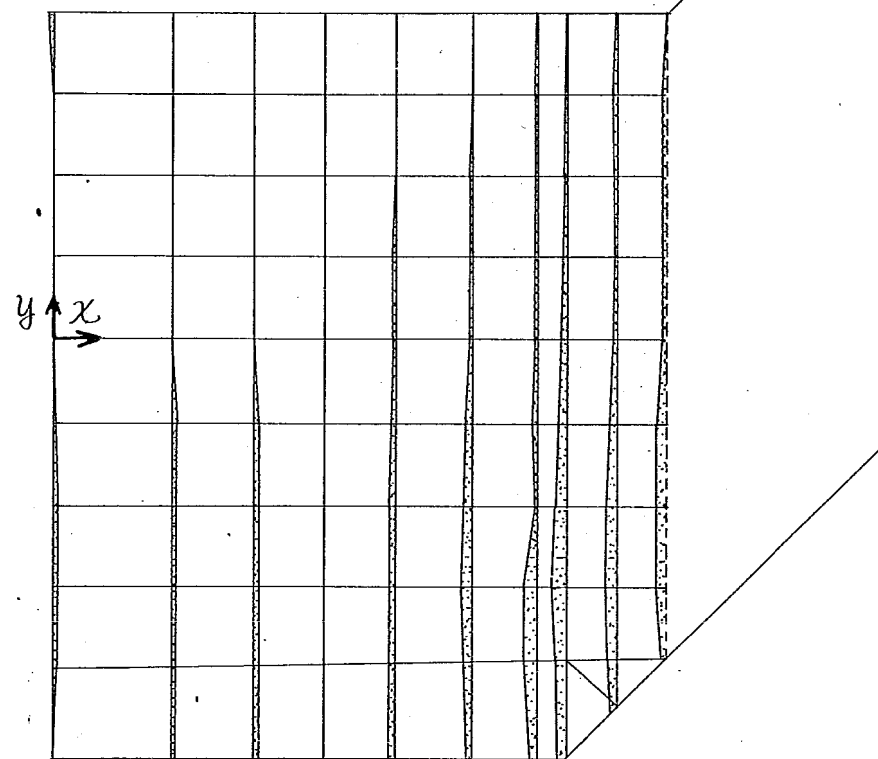
Comp Ten
-20 -10 -5 0 5 10 20 (Kg/cm²)

関門橋設計施工調査	
下部構造の内部応力計算	
図-3	門司側橋台の一部
λ方向の応力σ _λ	昭和44年3月7日
建設省土木研究所	



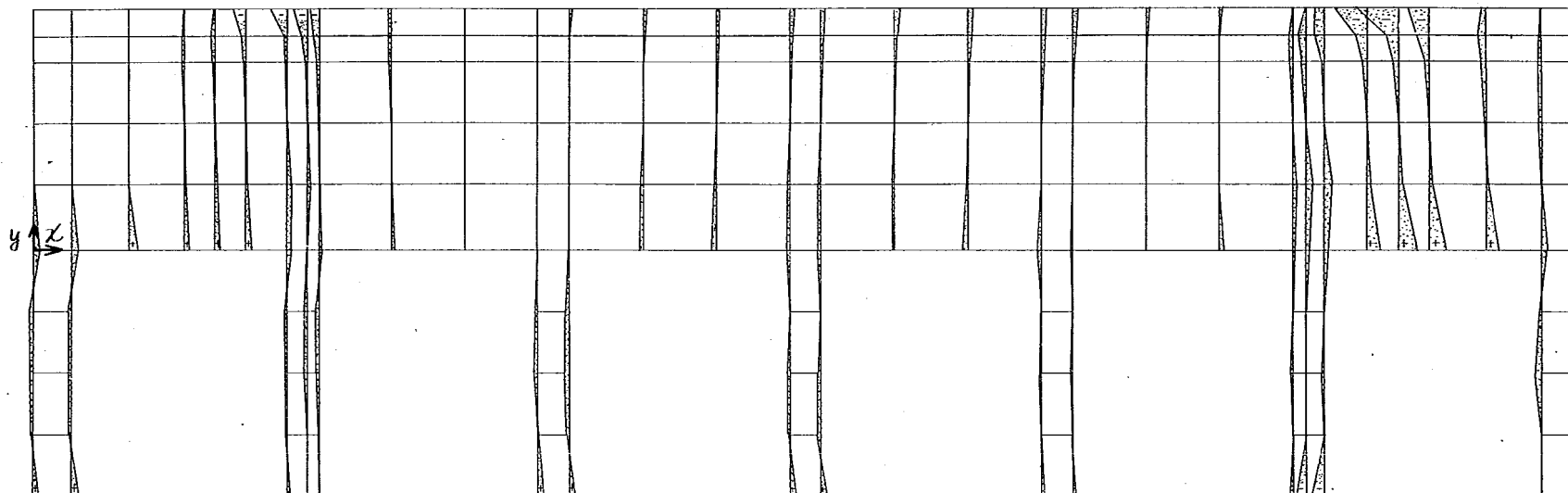
Comp Ten
 -20 -10 -5 0 5 10 20 (kg/cm²)

関門橋設計施工調査	
下部構造の内部応力計算	
図-4	門司側橋台の一部
y方向の応力 σ_y	昭和44年3月17日
建設省土木研究所	



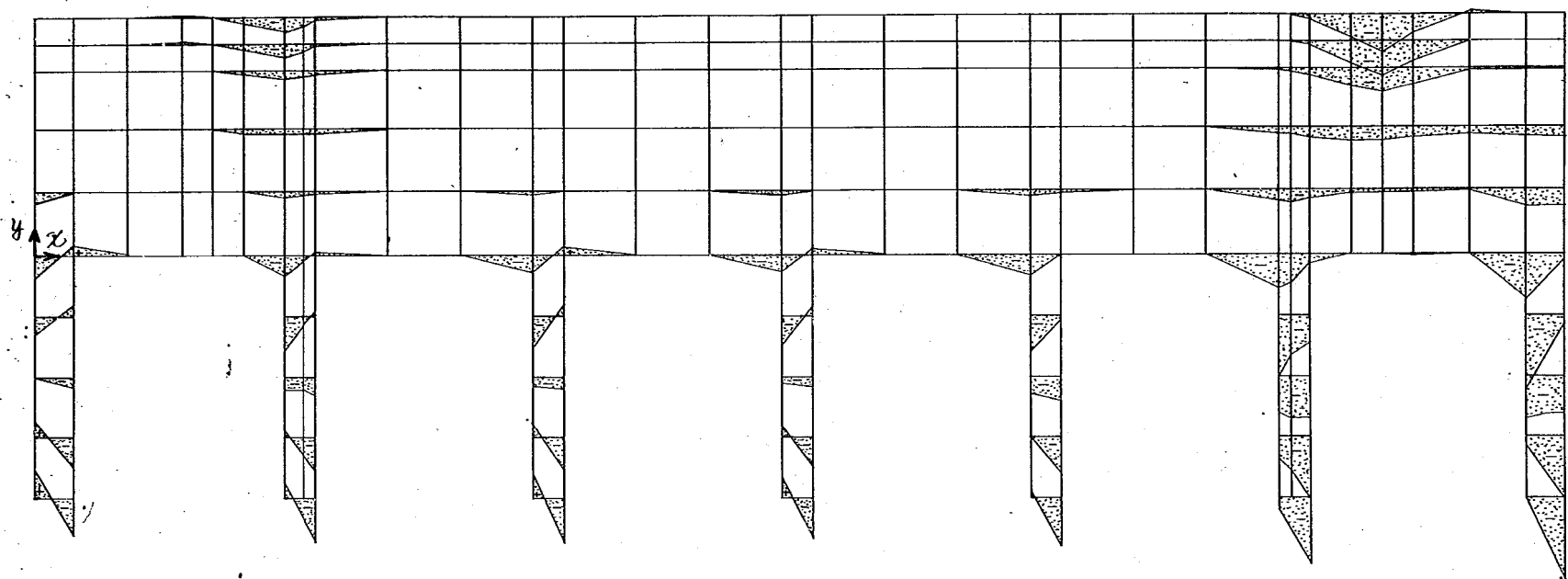
Comp ten
-20 -10 -5 0 5 10 20 (kg/cm²)

関門橋設計施工調査	
下部構造の内部応力計算	
図-5	門司側橋台の一部
せん断応力 τ_{xy}	昭和44年3月17日
建設省土木研究所	



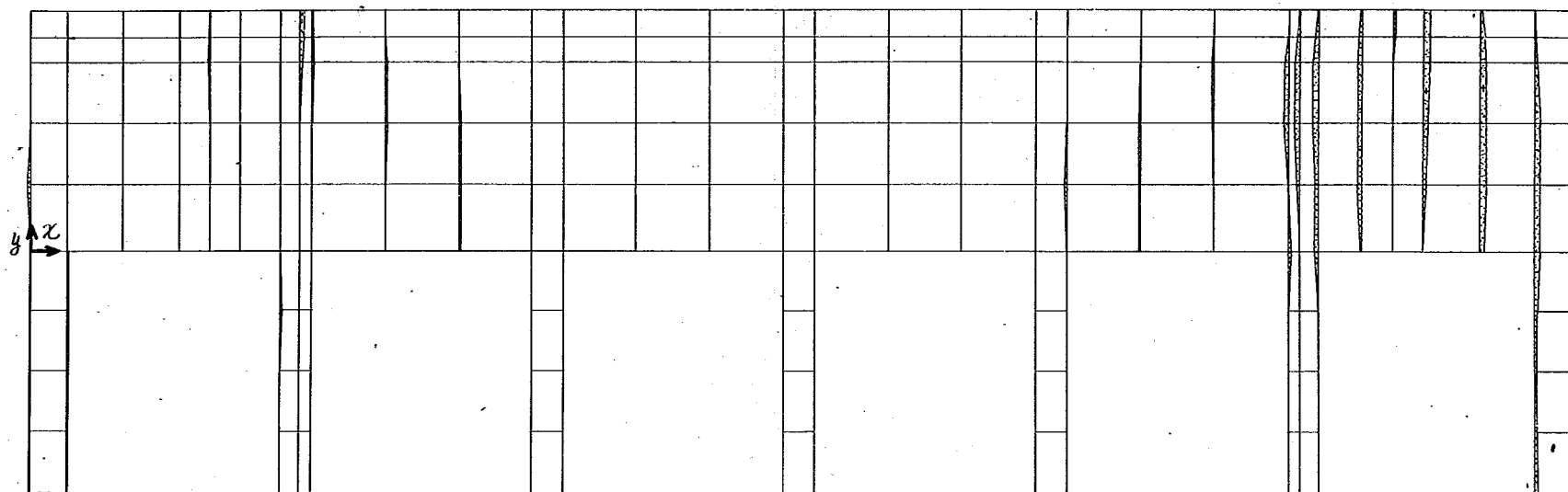
Comp Ten
200 100 50 30 10 200 (kg/cm²)

関門橋設計施工調査	
下部構造の内部応力計算	
図-6	門司側橋脚橋軸直角方向
λ方向の応力 (kg/cm ²)	昭和44年3月17日
建設省土木研究所	



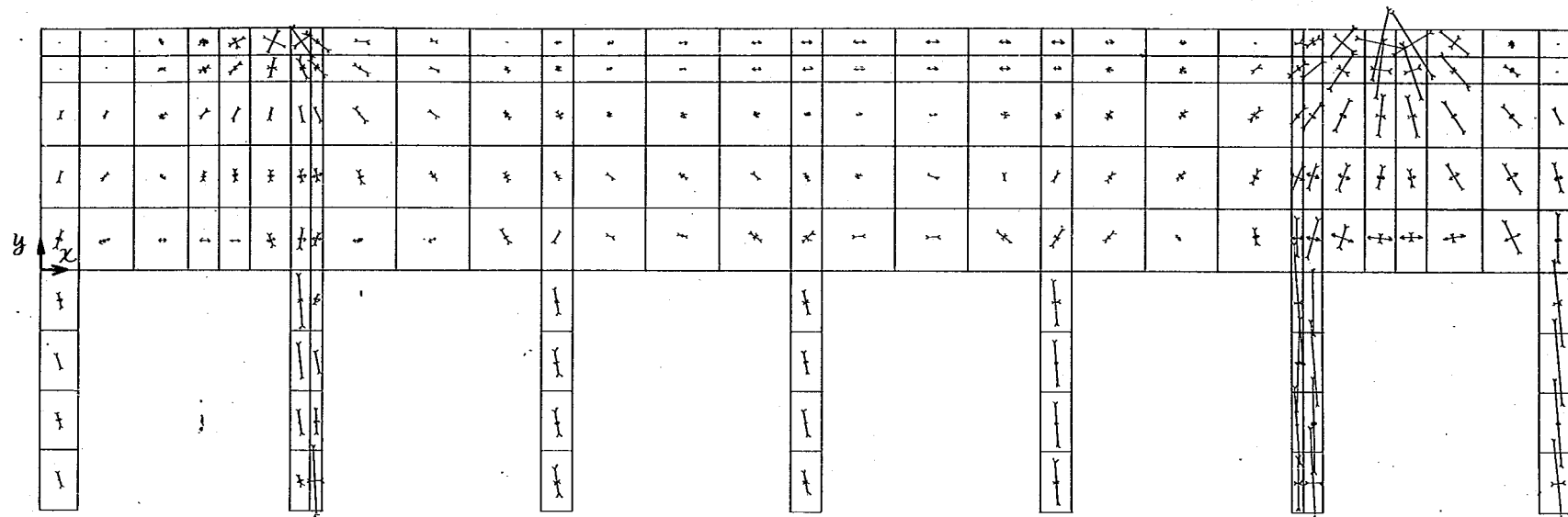
Comp
-200 -100 -50 0 50 100 200 (kg/cm²)

関門橋設計施工調査	
下部構造の内部応力計算	
図-7 門司側橋脚橋軸直角方向	
y方向の応力 σ_y	昭和44年3月17日
建設省土木研究所	



Comp 200 100 50 0 50 100 200 (kg/cm²)

関門橋設計施工調査	
下部構造の内部応力計算	
図-8	門司側橋脚橋軸直角方向
せん断応力 τ_{xy}	昭和44年3月17日
建設省土木研究所	



$\longleftrightarrow$ Ten
 $\rangle \langle$ Comp

0 50 100 200 (kg/cm²)

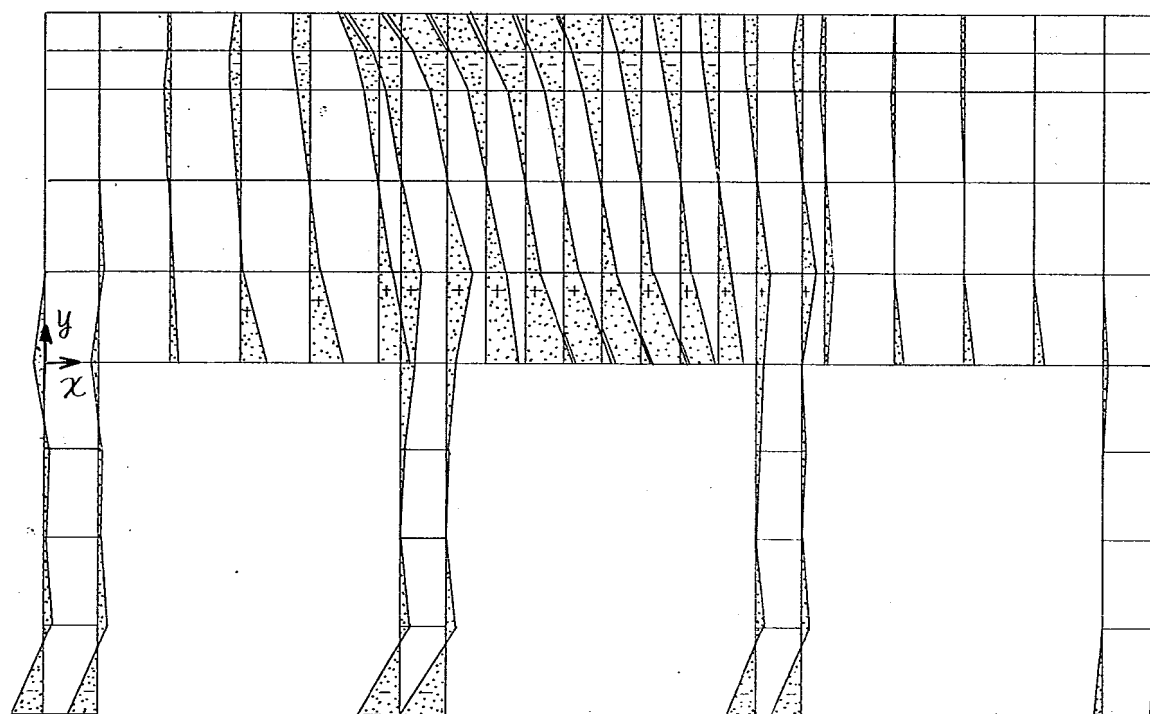
関門橋設計施工調査

下部構造の内部応力計算

図 - 9 門司側橋脚橋軸直角方向

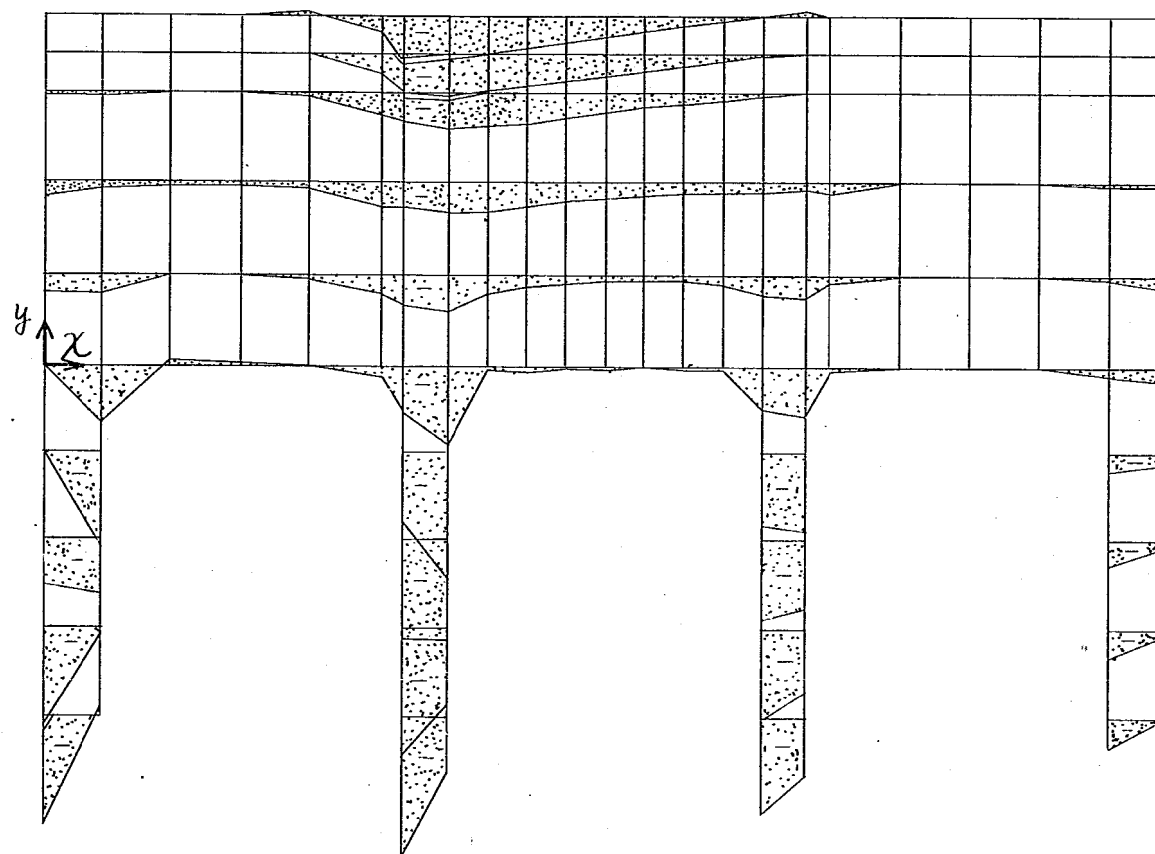
主 応 力 昭和44年3月7日

建設省土木研究所



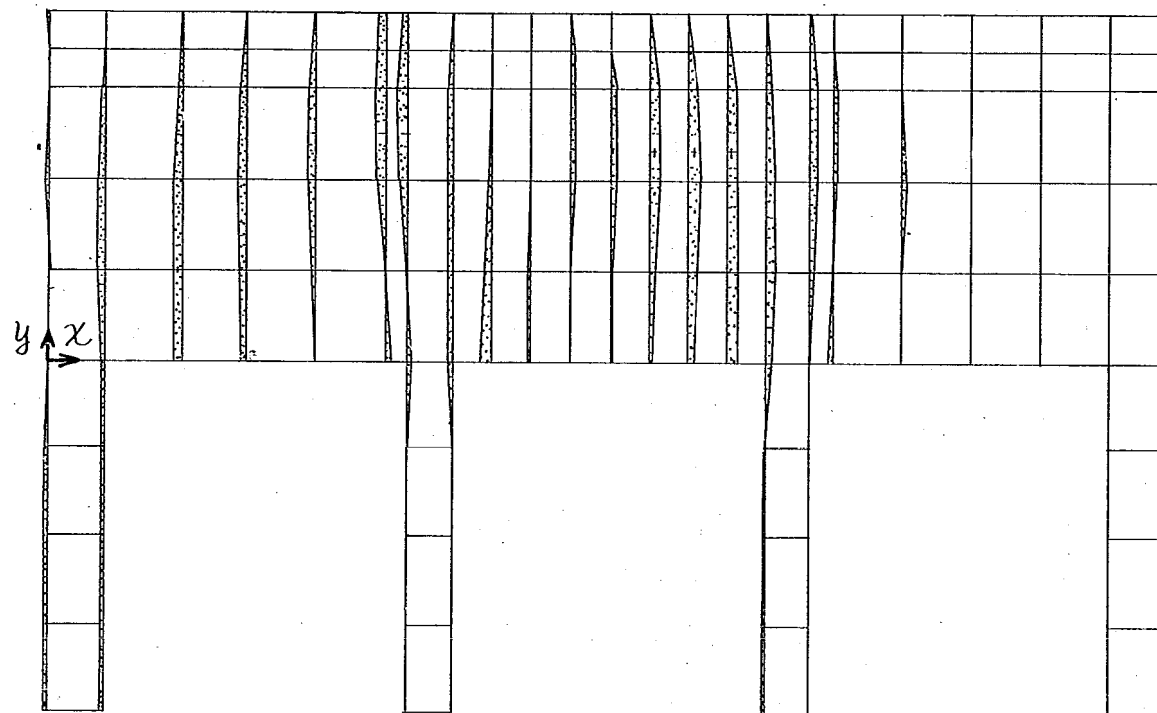
Comp Ten
 200 100 50 0 50 100 200 (kg/cm²)

関門橋設計施工調査	
下部構造の内部応力計算	
図-10	門司側橋脚橋軸方向
χ方向の応力 σ_χ	昭和44年3月17日
建設省土木研究所	



Comp Ten
-200 -100 -50 0 50 100 200 (Kg/cm²)

関門橋設計施工調査	
下部構造の内部応力計算	
図-11	門司側橋脚橋軸方向
y方向の応力 σ_y	昭和44年3月17日
建設省土木研究所	



Comp Ten
200 100 50 0 50 100 200 (kg/cm²)

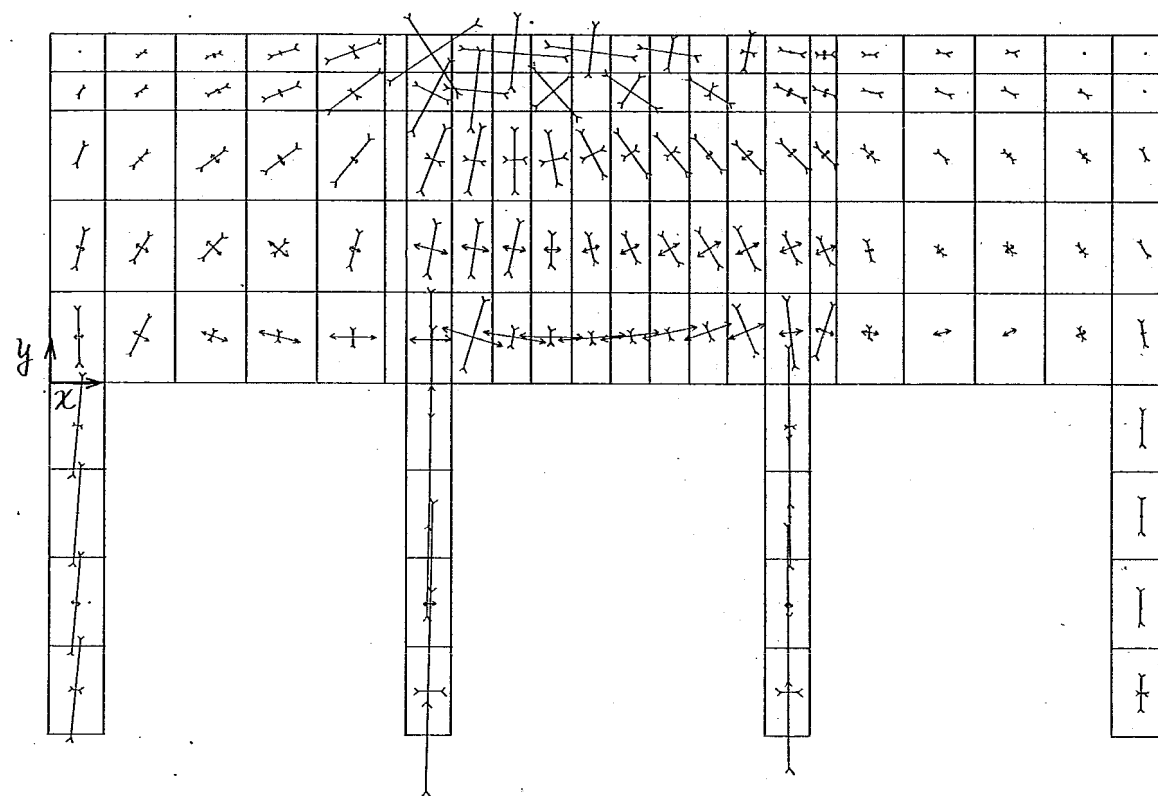
関門橋設計施工調査

下部構造の内部応力計算

図-12 門司側橋脚橋軸方向

せん断応力 τ_{xy} 昭和44年3月17日

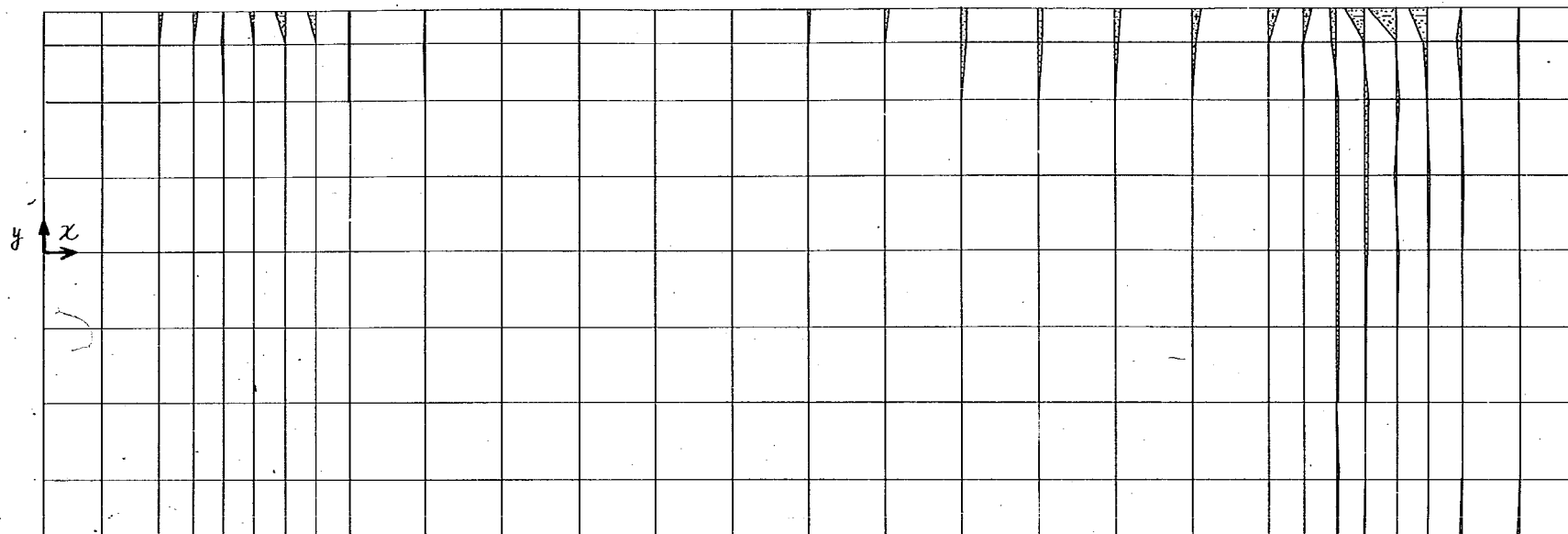
建設省土木研究所



$\longleftrightarrow$ ten
 $\rightarrow$ comp

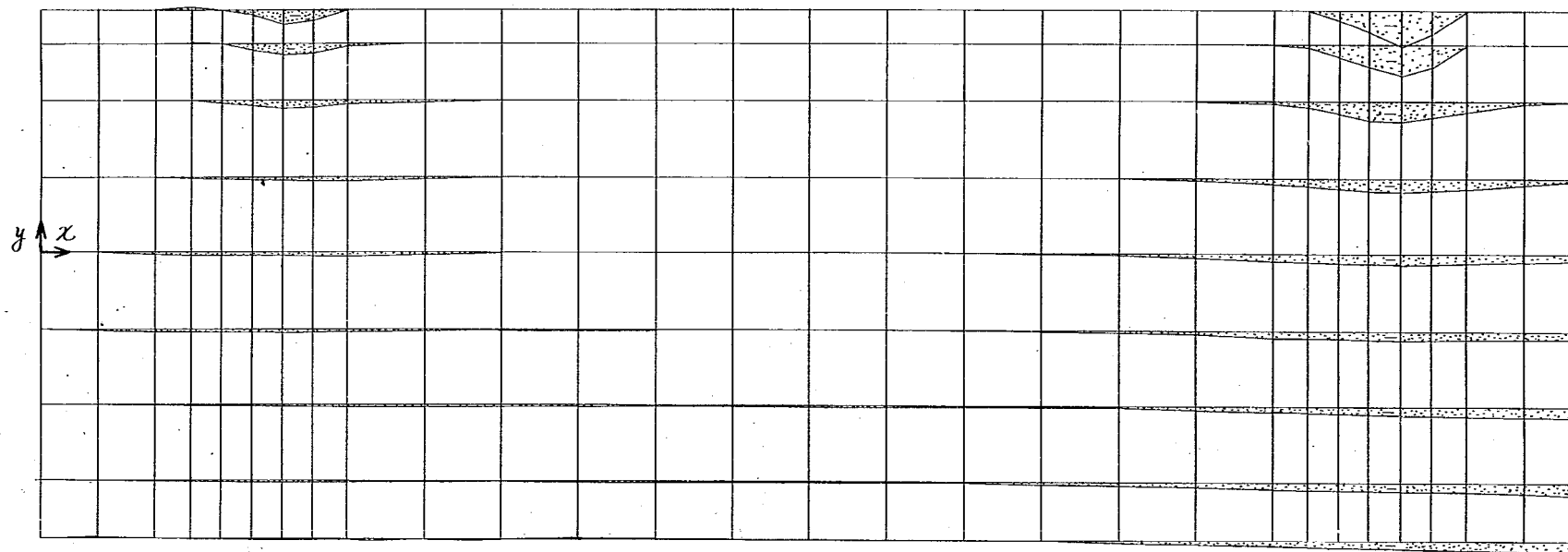
0 50 100 200 (kg/cm²)

関門橋設計施工調査	
下部構造の内部応力計算	
図一/3	関司側橋脚橋軸方向
主 応 力	昭和44年3月17日
建設省土木研究所	



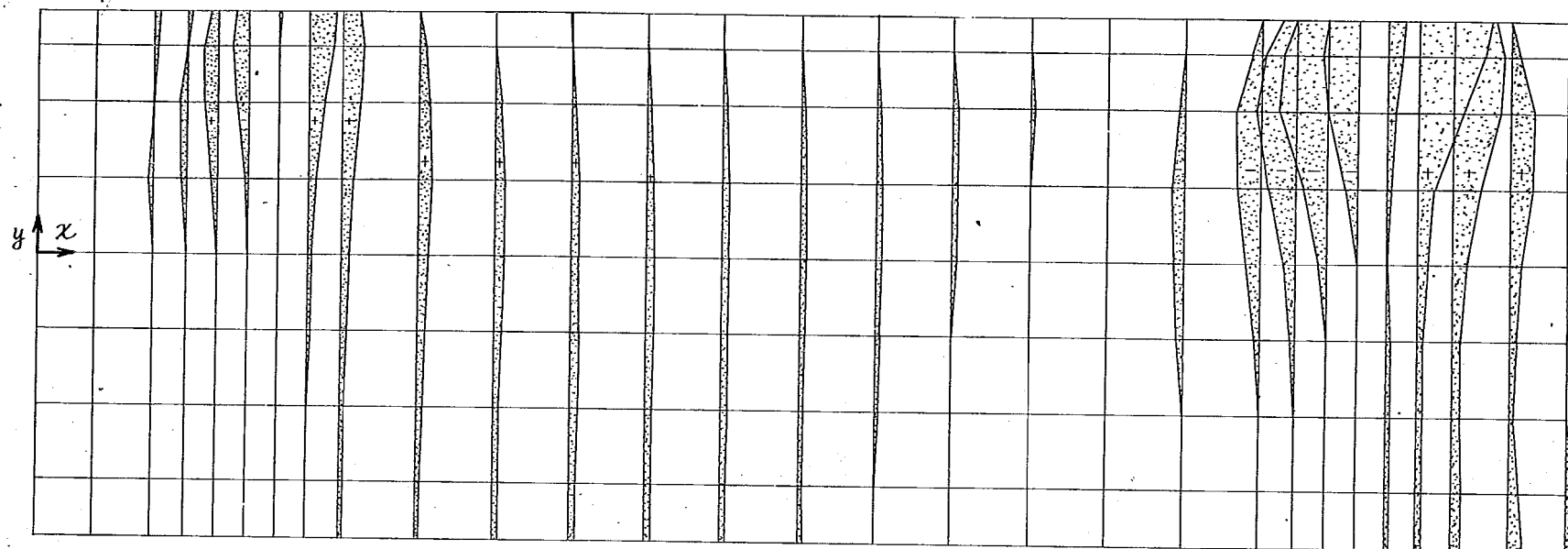
Comp ten
 -200 0 50 0 50 100 200 (kg/cm²)

関門橋設計施工調査	
下部構造の内部応力計算	
図 一 14	下関側橋脚(マッシュタイ)橋軸直角方向
又方向の応力 σ_x	昭和44年3月17日
建設省土木研究所	



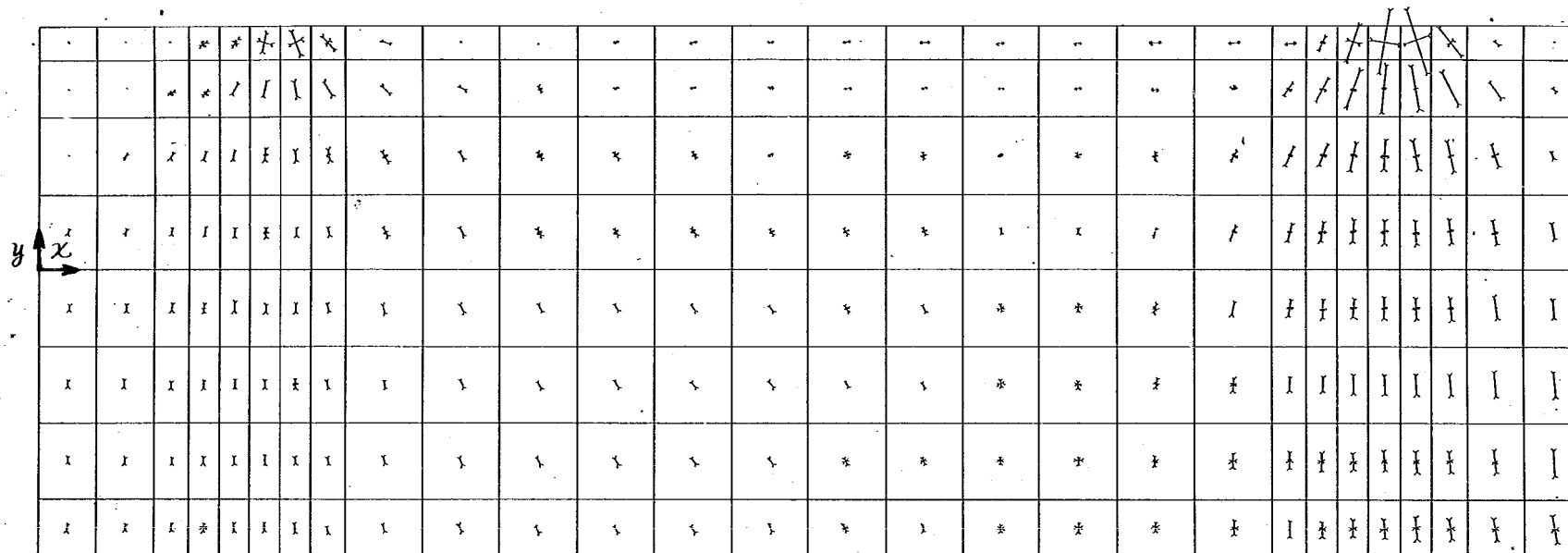
Comp
200 100 50 0 50 100 200
ten

関門橋設計施工調査	
下部構造の内部応力計算	
図一ノ	下関側橋脚(マシブタイプ)橋軸直角方向
y方向の応力 σ_y	昭和44年3月17日
建設省土木研究所	



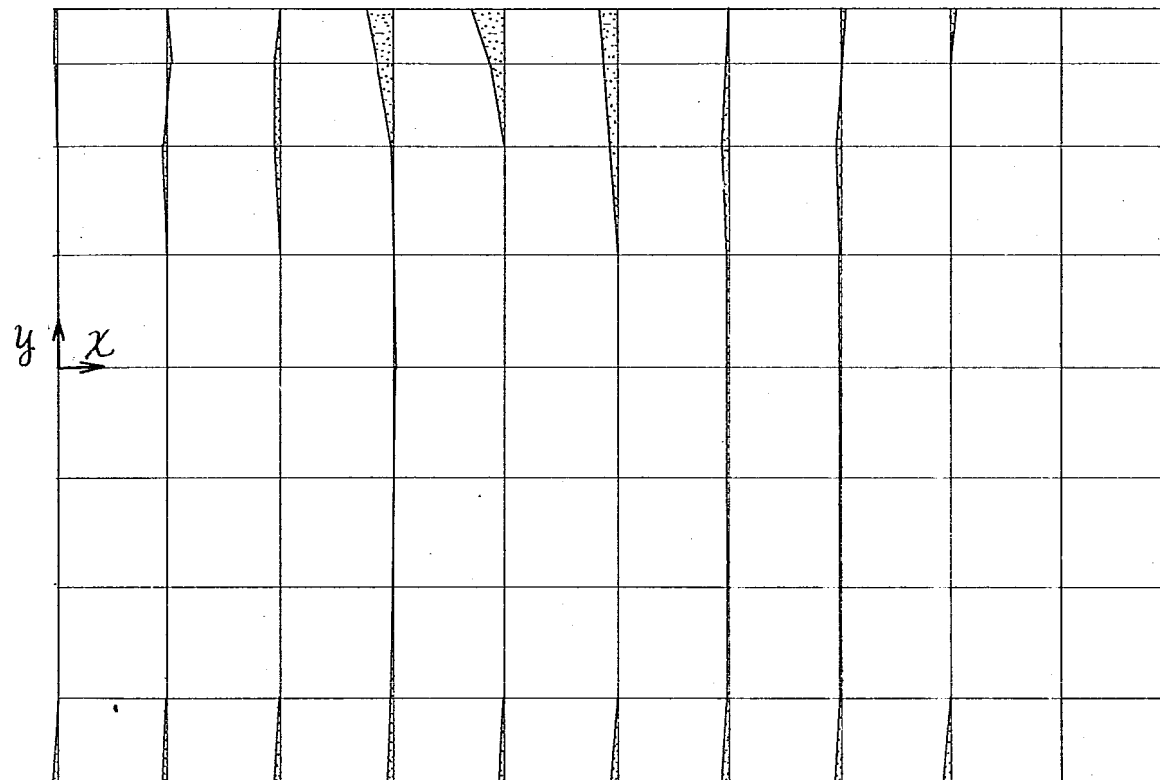
Comp Ten
-20 -10 -5 0 5 10 20 (kg/cm²)

関門橋設計施工調査	
下部構造の内部応力計算	
図-16	下関側橋脚(マシタイ)橋軸直角方向
せん断応力 τ_{xy}	昭和44年3月17日
建設省土木研究所	



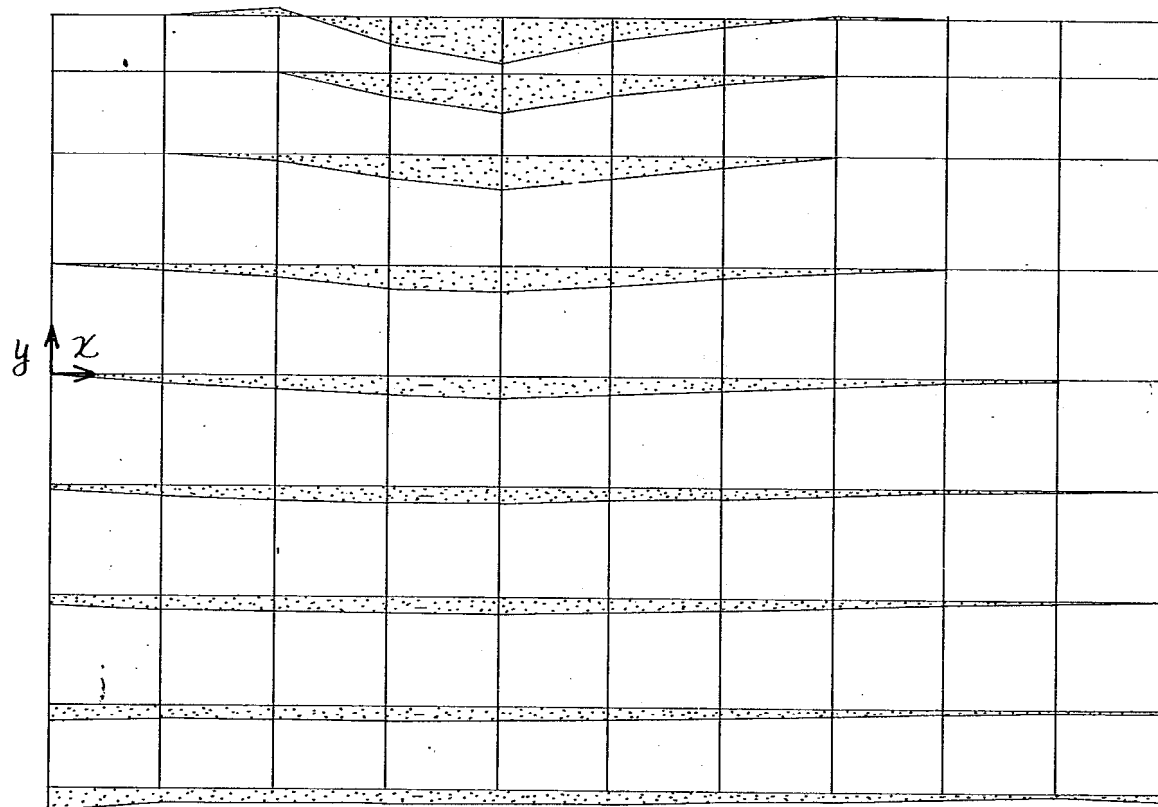
$\longleftrightarrow$ Ten
 $\longrightarrow$ Comp
 0 50 100 200 (kg/cm²)

関門橋設計施工調査	
下部構造の内部応力計算	
図-17	下関側橋脚(マシンガワ橋軸直角方向)
主 応 力	昭和44年3月7日
建設省土木研究所	



Comp Tan
-200 -100 -50 0 50 100 200 (kg/cm²)

関門橋設計施工調査	
下部構造の内部応力計算	
図-18	下関側橋脚(マッシュタイフ橋軸方向)
ス方向の応力 σ_x	昭和44年3月7日
建設省土木研究所	



Comp Ten
-200 -100 50 100 200 (kg/cm²)

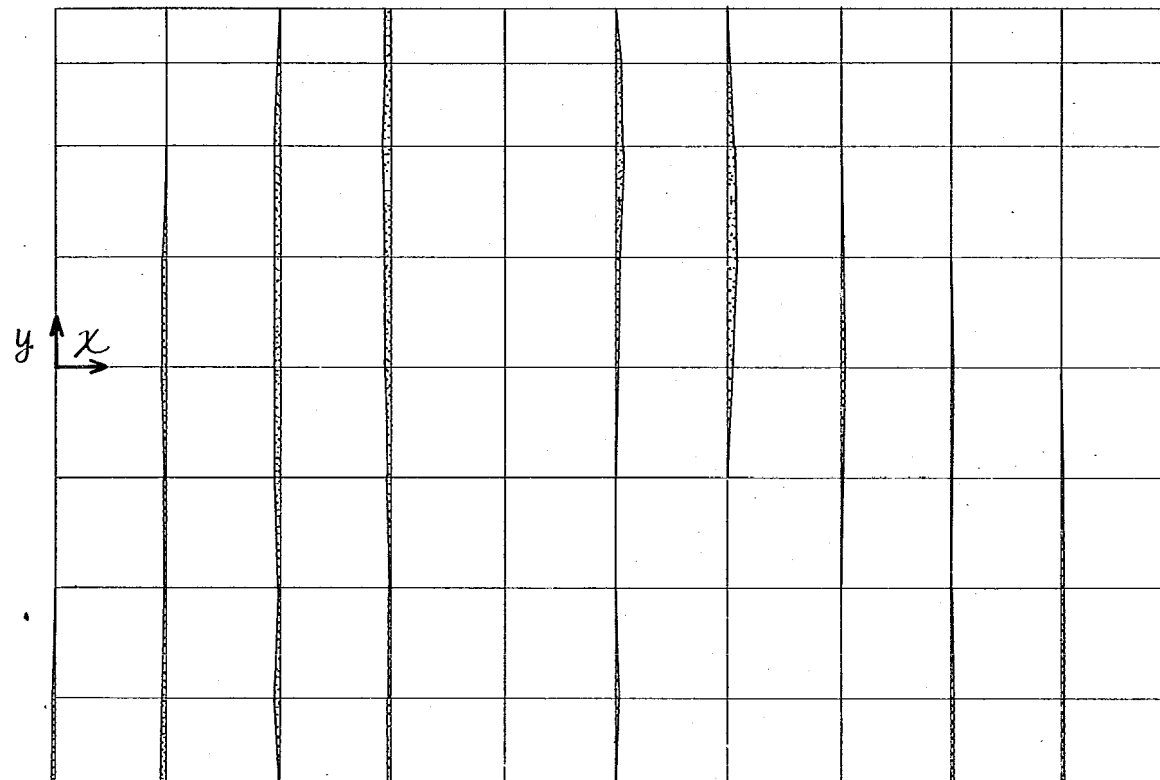
関門橋設計施工調査

下部構造の内部応力計算

図-19 下関側橋脚(マッシュタイア)橋軸方向

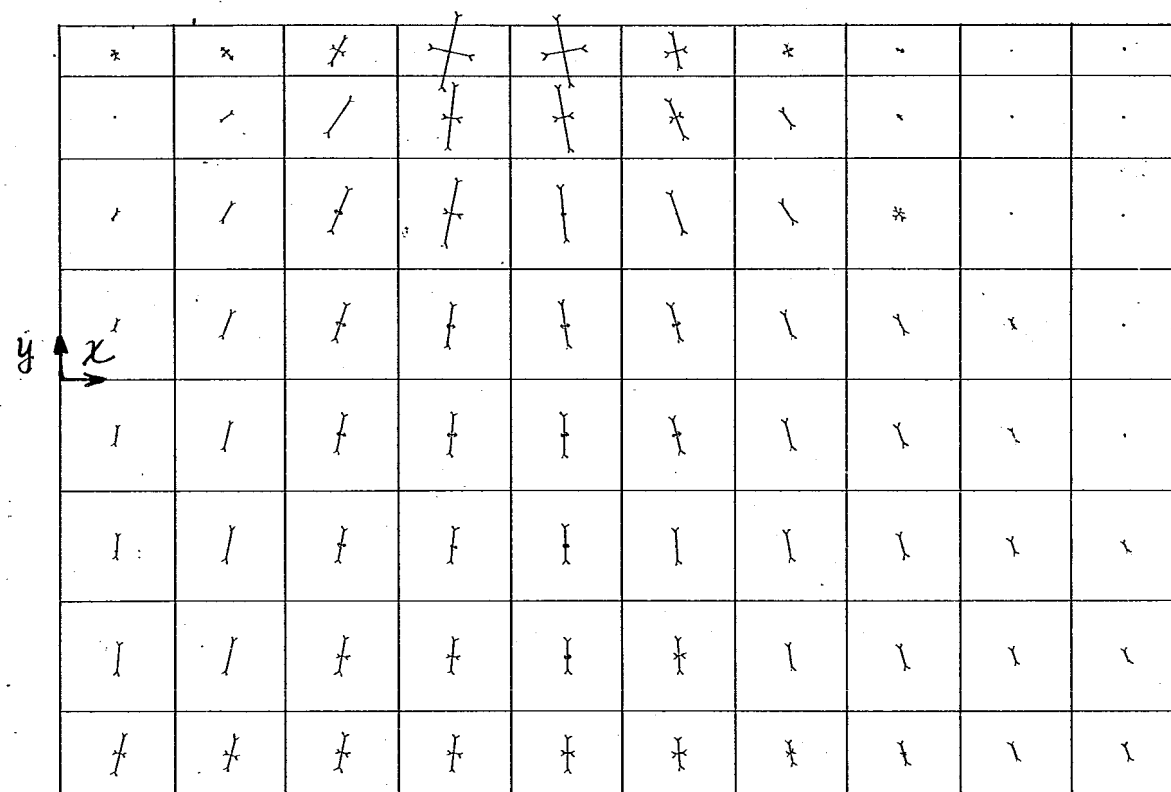
y方向の応力 σ_y 昭和44年3月17日

建設省土木研究所



200 100 50.0 50.100 200 (kg/cm²)

関門橋設計施工調査	
下部構造の内部応力計算	
図 - 20	下関側橋脚(マッシュタイプ)橋軸方向
せん断応力 τ_{xy}	昭和44年3月17日
建設省土木研究所	

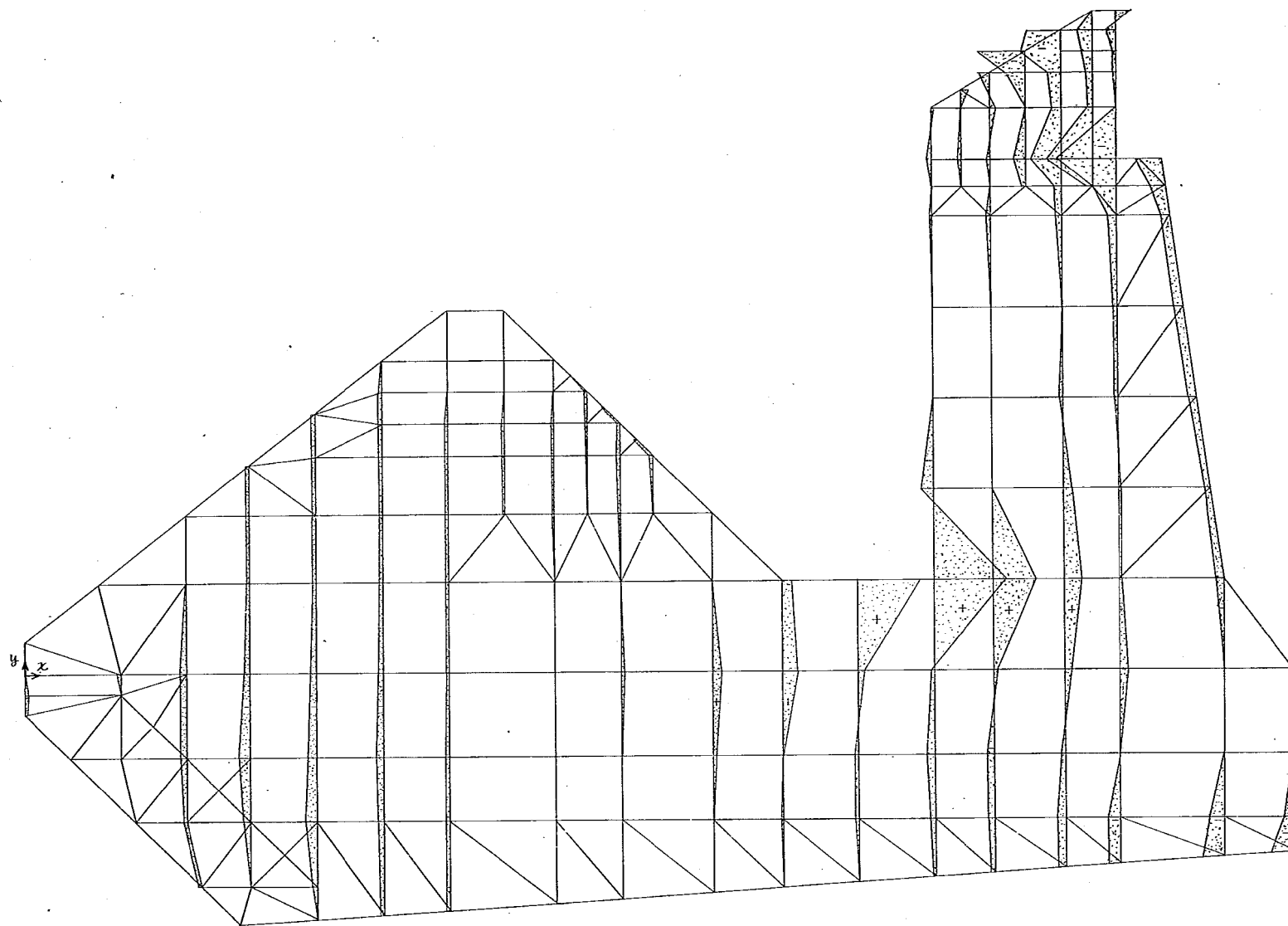


↔ *ten*

↗ ↘ *Comp*

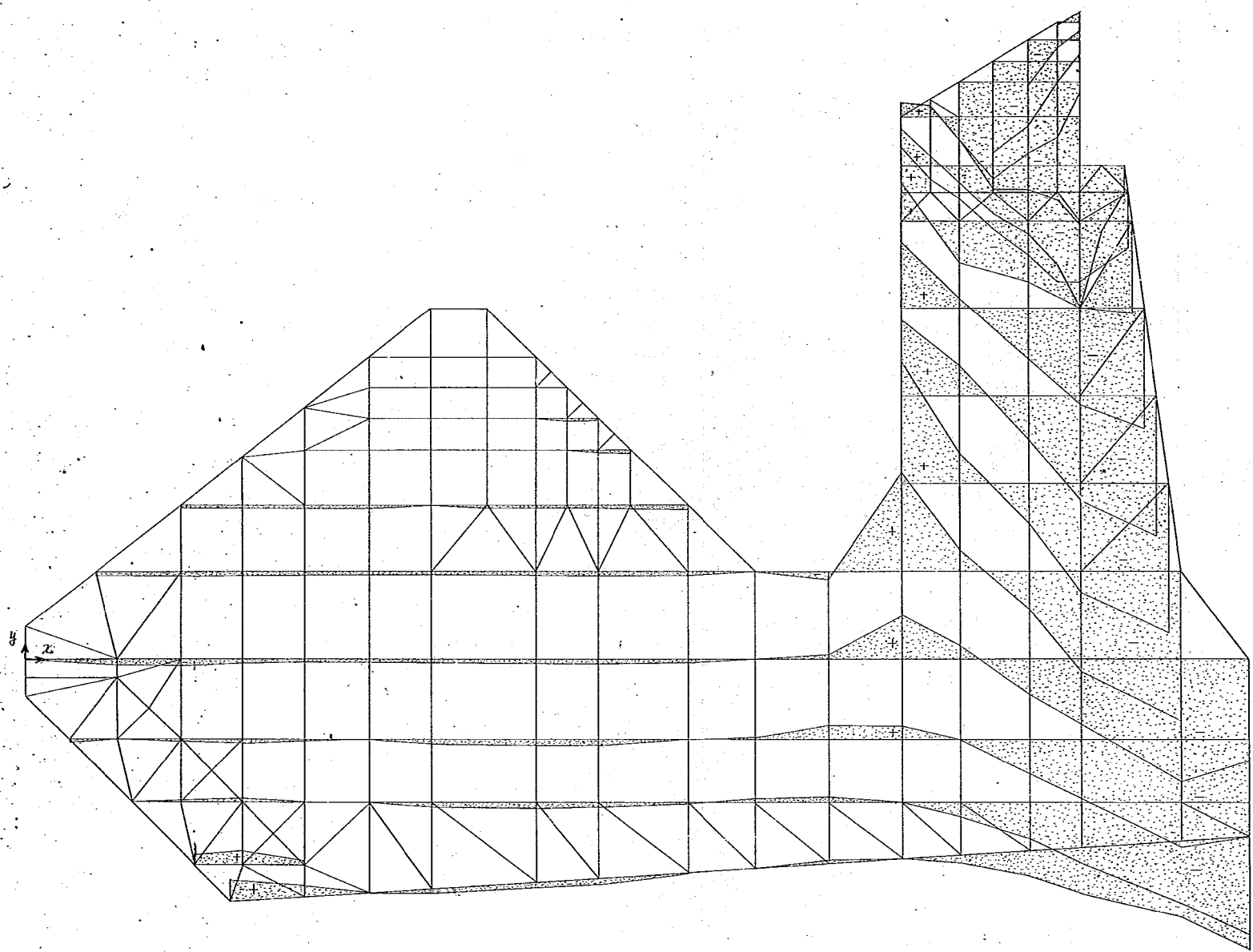
0 50 100 200 (kg/cm²)

関門橋設計施工調査	
下部構造の内部応力計算	
図— 2/	下関側橋脚(マッシュタイプ)橋軸方向
主 応 力	昭和44年3月17日
建設省土木研究所	



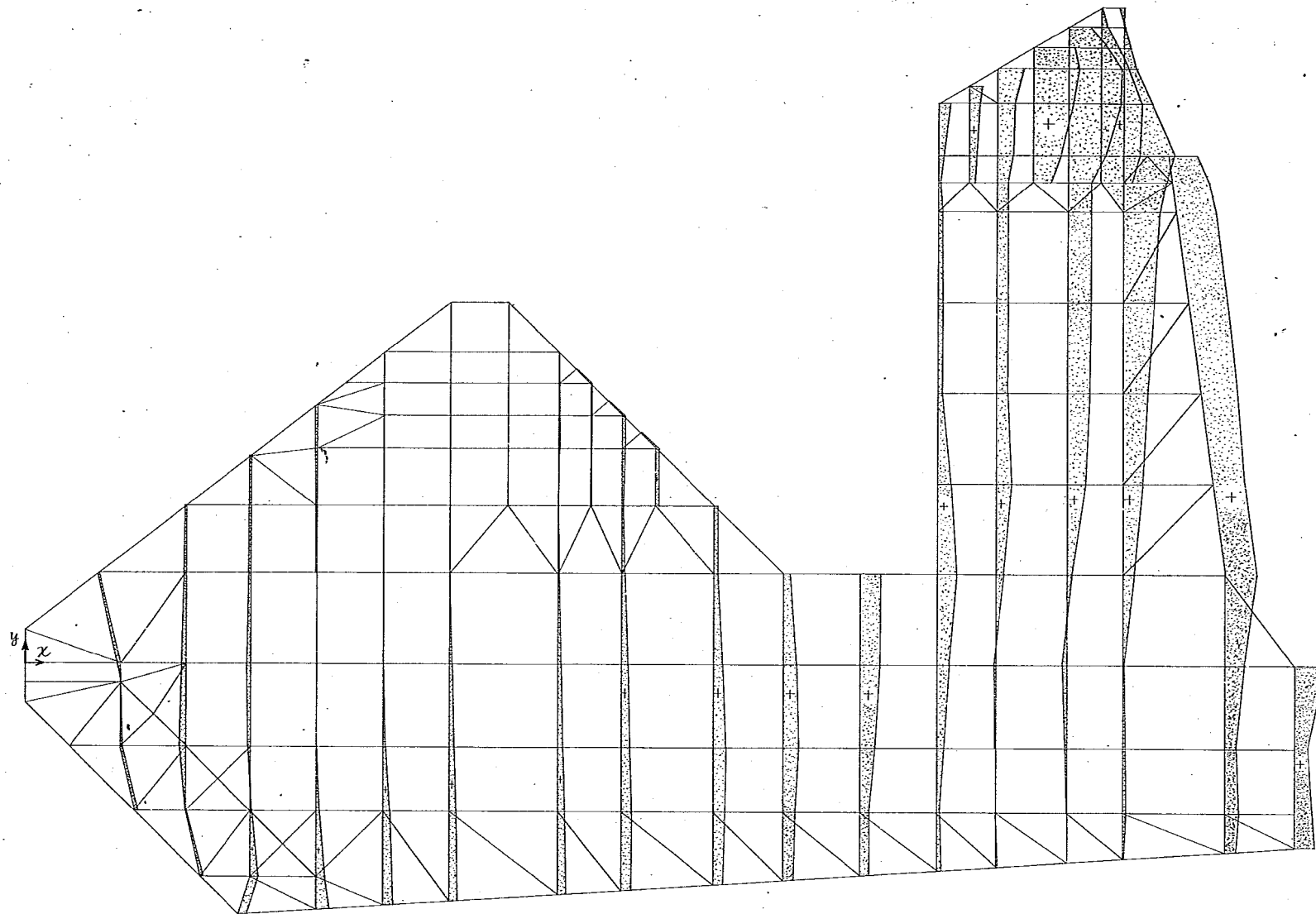
Comp
20 10 50 5 10 20
1 1 1 1 1

閘門橋設計施工調査	
下部構造の内部応力の計算	
図-77 門司側橋台完成後 (1)	
X方向の応力 (1/2)	昭和44年3月14日
建設省土木研究所	



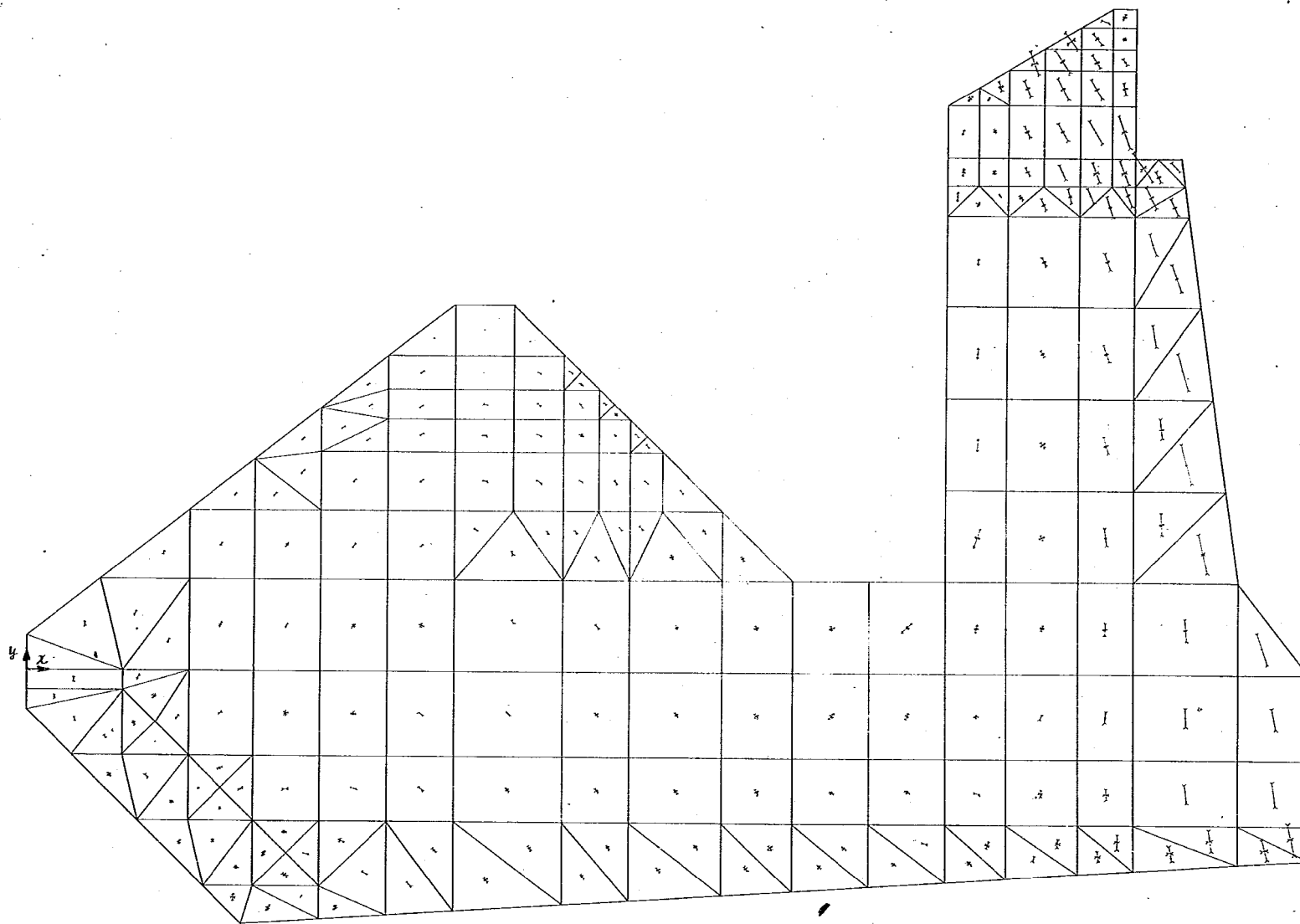
Comp Len
20 10.5 0.5 20 (kg/cm²)

閉門橋設計施工調査	
下部構造の内部応力計算	
図-23 門司側橋台完成後 (1)	
方向の応力 0.5	昭和44年3月17日
建設省土木研究所	



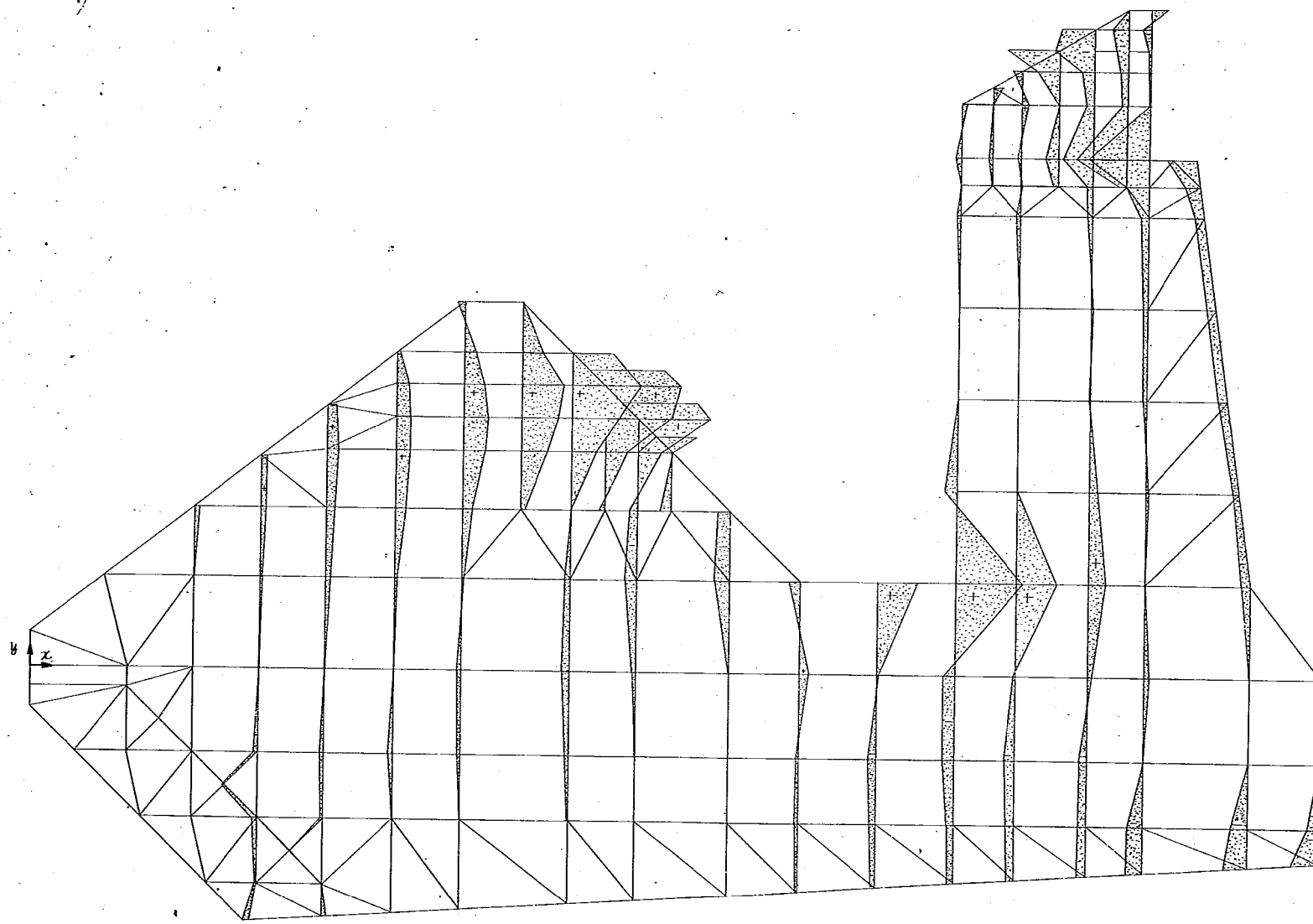
Comp Ton
20 40 50 50 20 (100/cm²)

閘門橋設計施工調査	
下部構造の内部応力計算	
図-22	門司閘橋台完成後 (1)
せん断応力Zx 昭和44年3月17日	
建設省土木研究所	



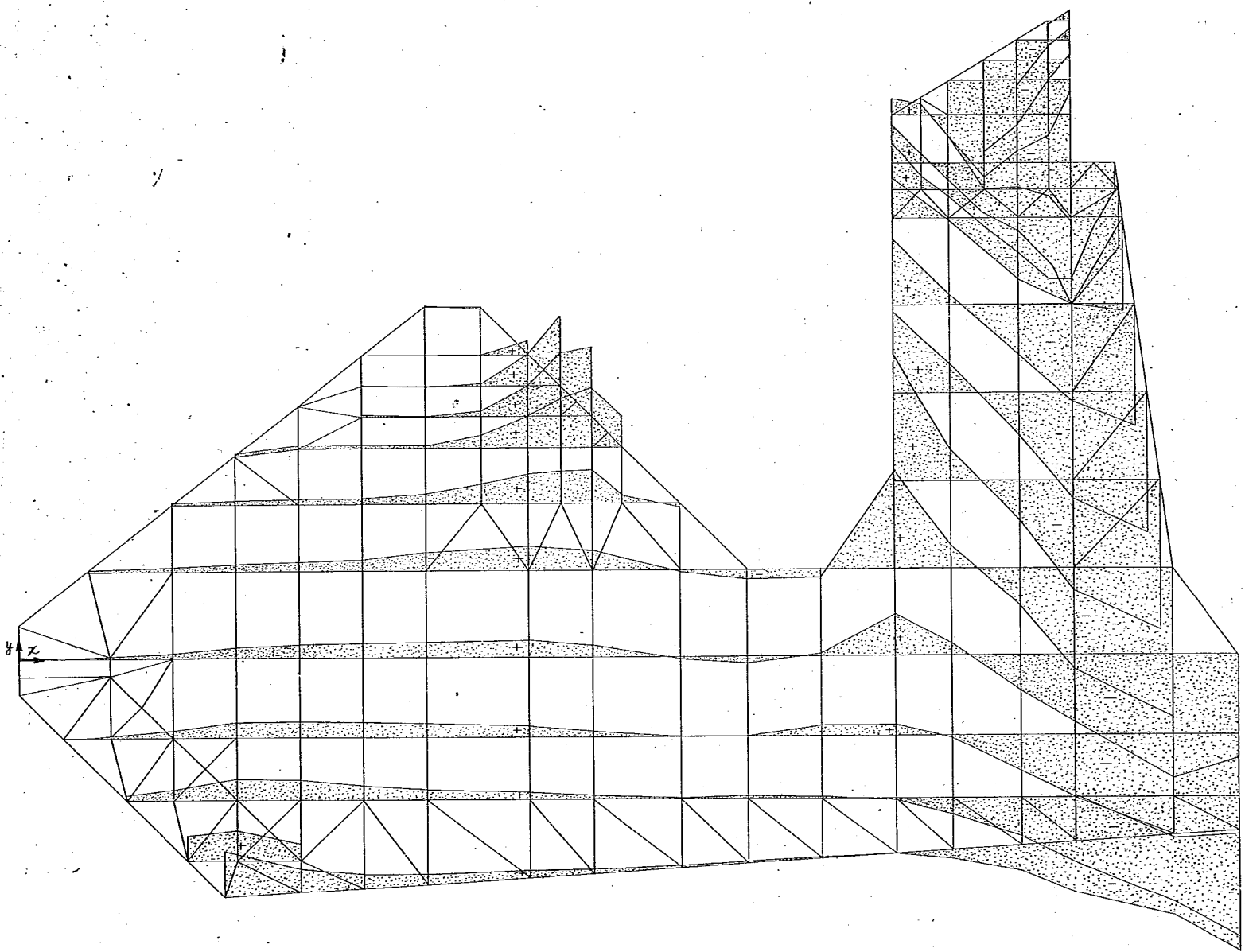
$\longleftrightarrow$ Ten
 $\rightarrow$ Comp
 0 50 100 200 (kg/cm²)

閉門橋設計施工調査	
下部構造の内部応力計算	
図-28	門司側橋台完成後 (1)
主 応 力	昭和44年3月17日
建設省土木研究所	



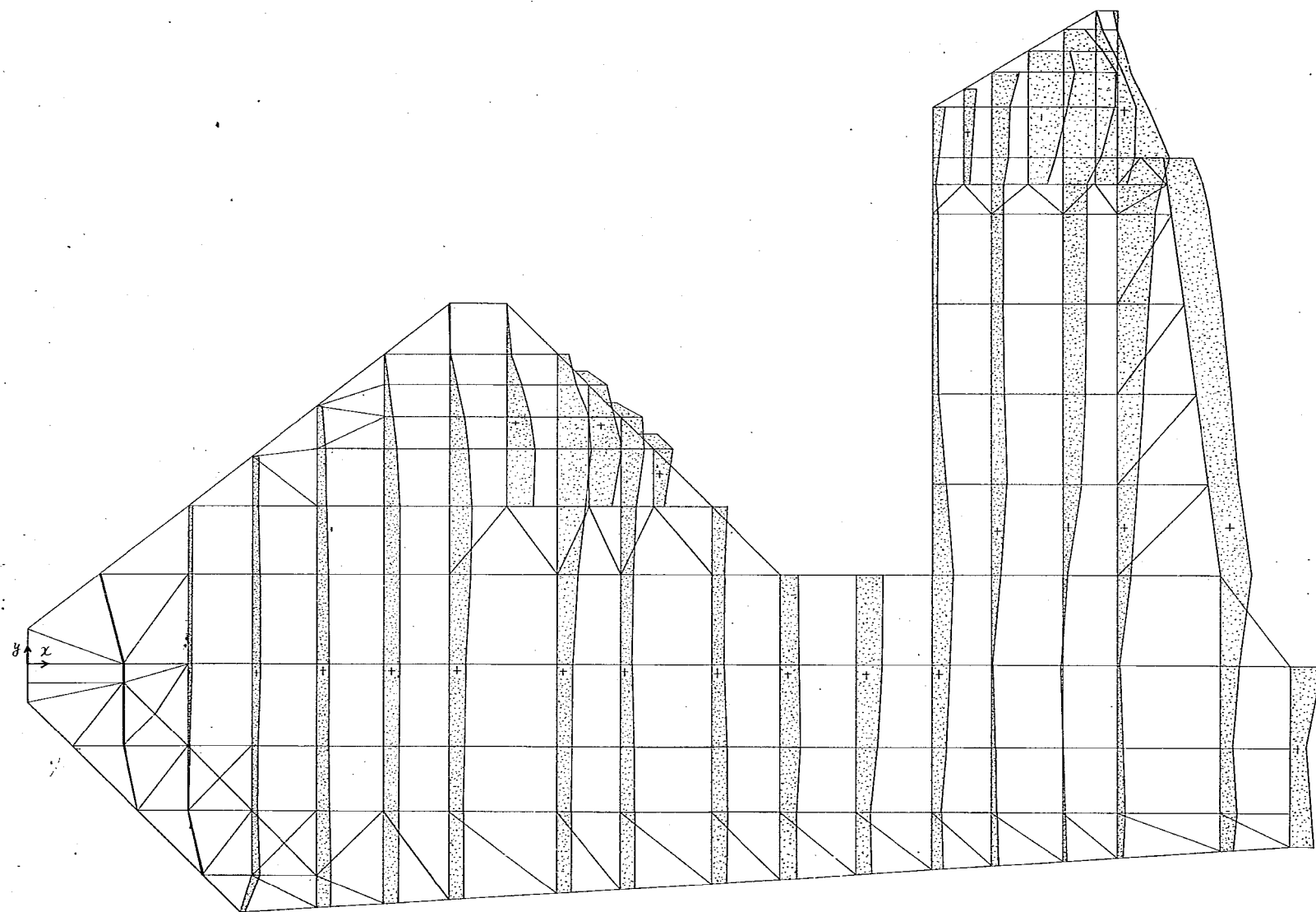
COMP 20 1050 510 20 (kg/cm²)

閘門橋設計施工調査	
下部構造の内部応力計算	
図- 26 門司側橋台完成後 (2)	
X方向の応力 σ_x	昭和44年3月17日
建設省土木研究所	



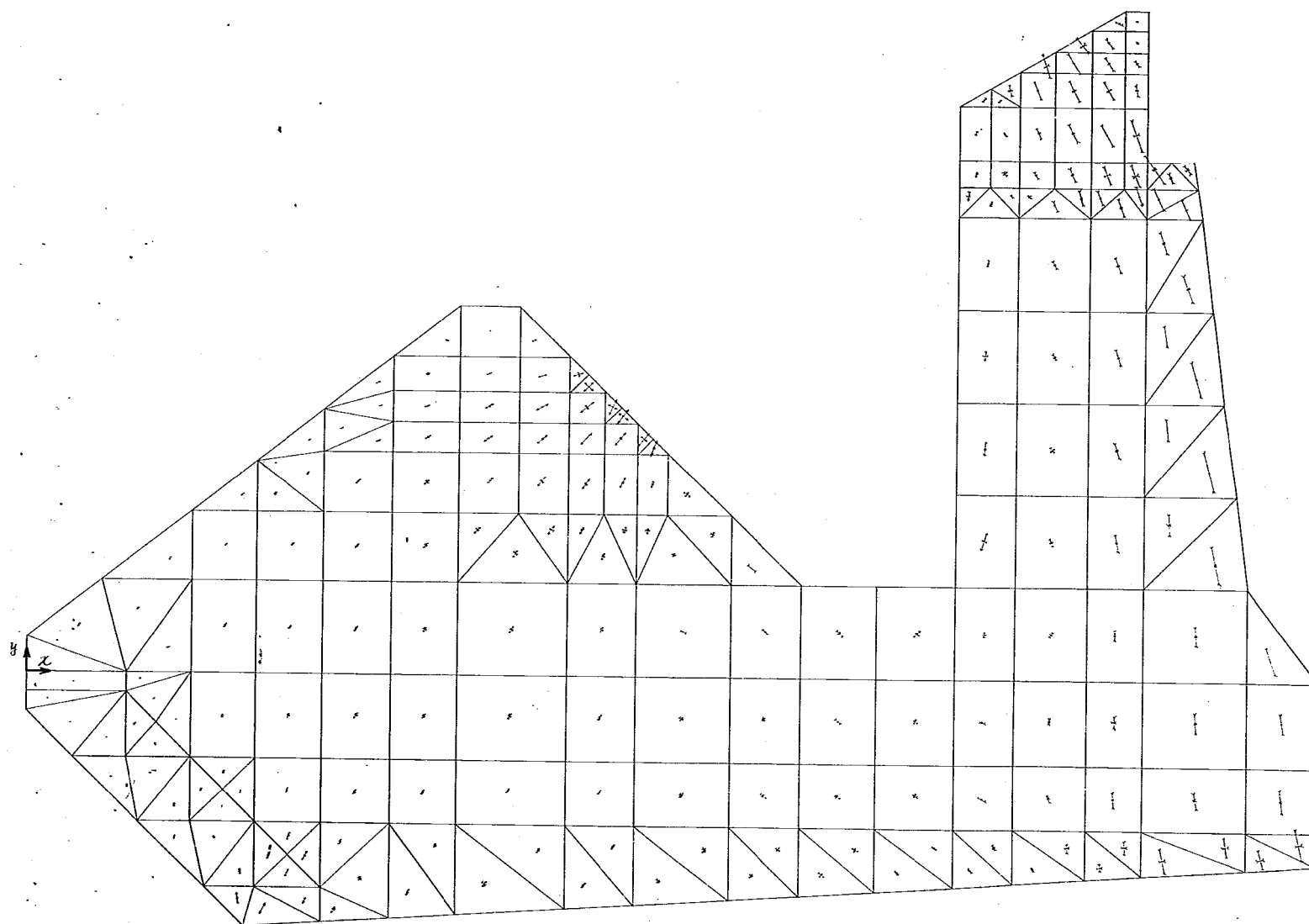
Comp 20 10 5 0 5 10 20 (Scale)

關門橋設計施工圖卷	
下部構造。内部応力計算	
図-27	門司瀬橋台完成後 (2)
片方向。応力図	昭和44年3月17日
建設省土木研究所	



Comp 20 10 50 50 20 (196m)

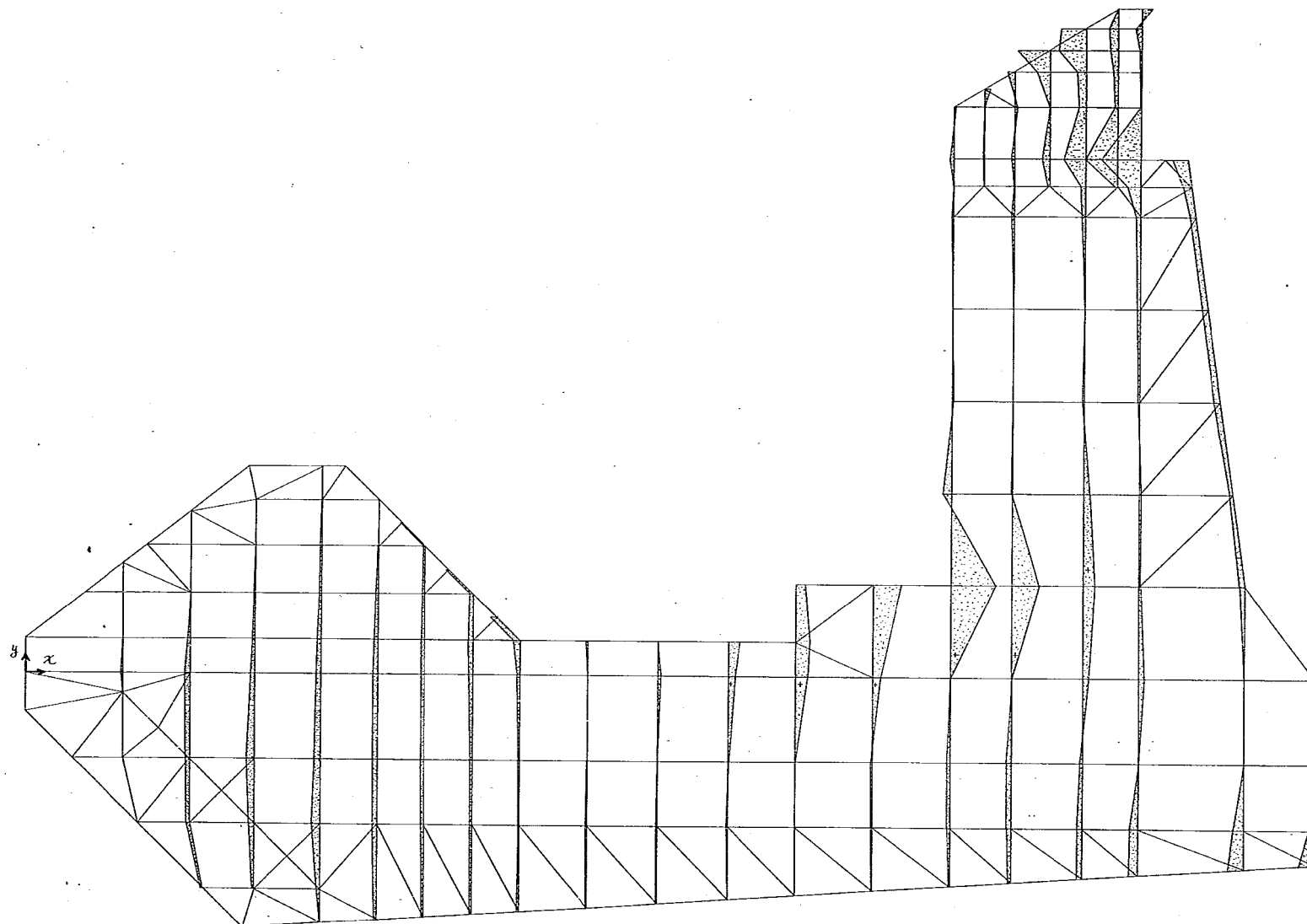
閘門橋設計施工調査	
下部構造の内部応力計算	
図-28	門司制橋台完成後 (2)
せん断応力 τ	昭和44年3月7日
建設省土木研究所	



$\longleftrightarrow$ Ten
 $\rightarrow$ Comp

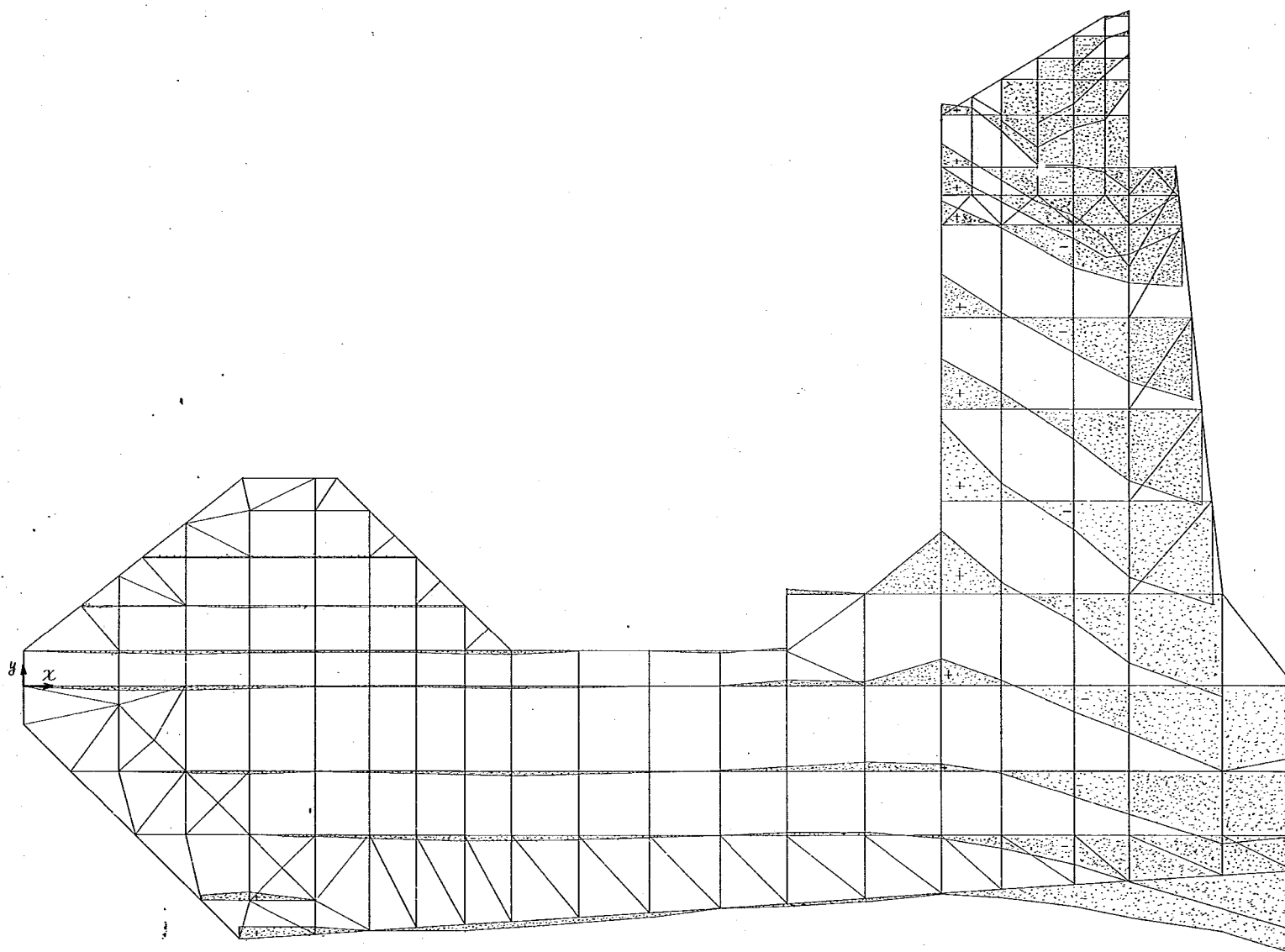
0.500 200 (kg/cm²)

閘門橋設計施工調査	
下部構造。内部応力計算	
図-29 門司側橋台完成後(2)	
主応力	昭和44年3月7日
建設省土木研究所	



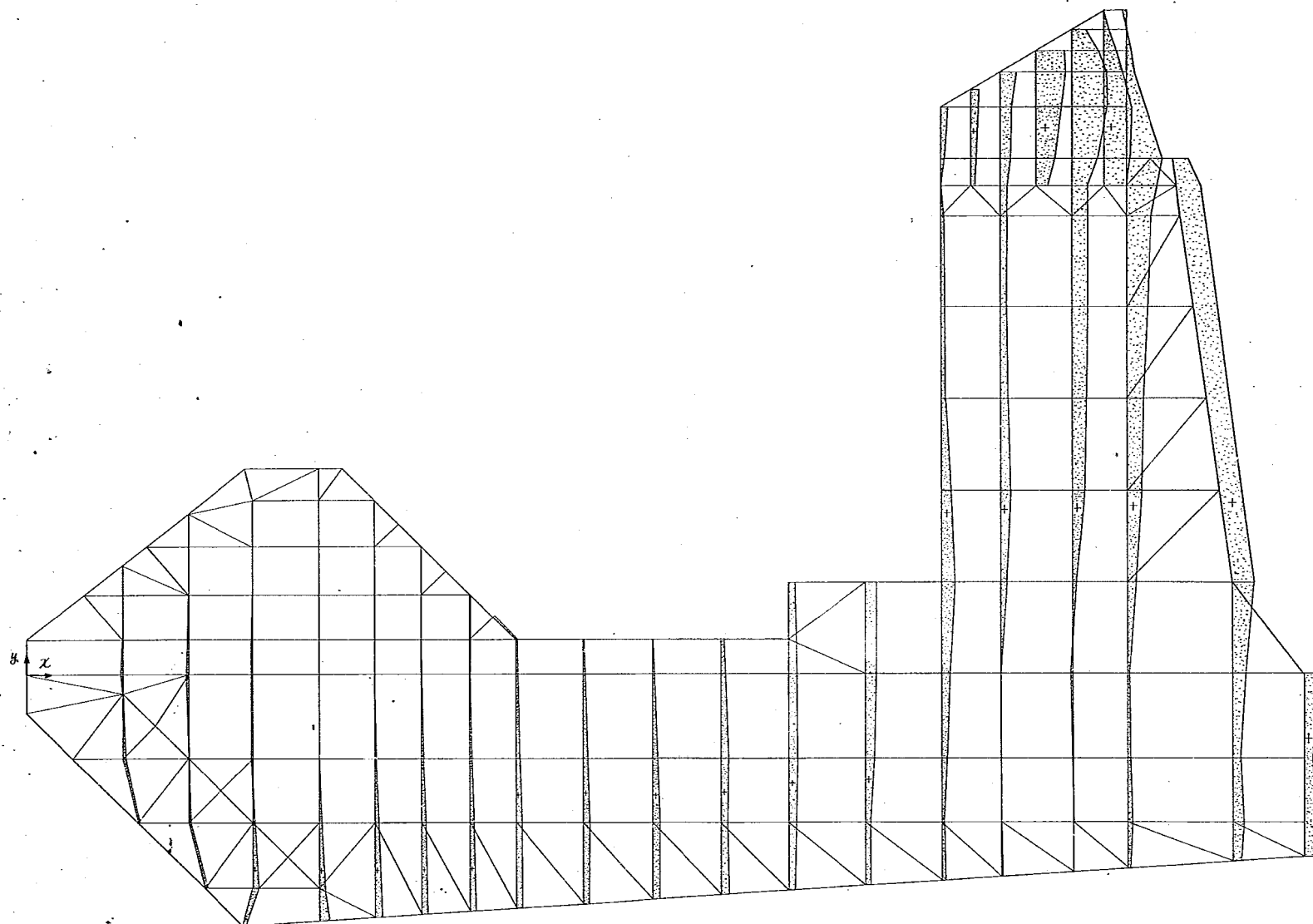
COMP 10 10 5 0 5 10 20 (m/sec)

閘門橋設計施工調査
下部構造の内部応力計算
図-30 門司側橋台架設時 (1)
又方向成分0元 昭和44年3月17日
建設省土木研究所



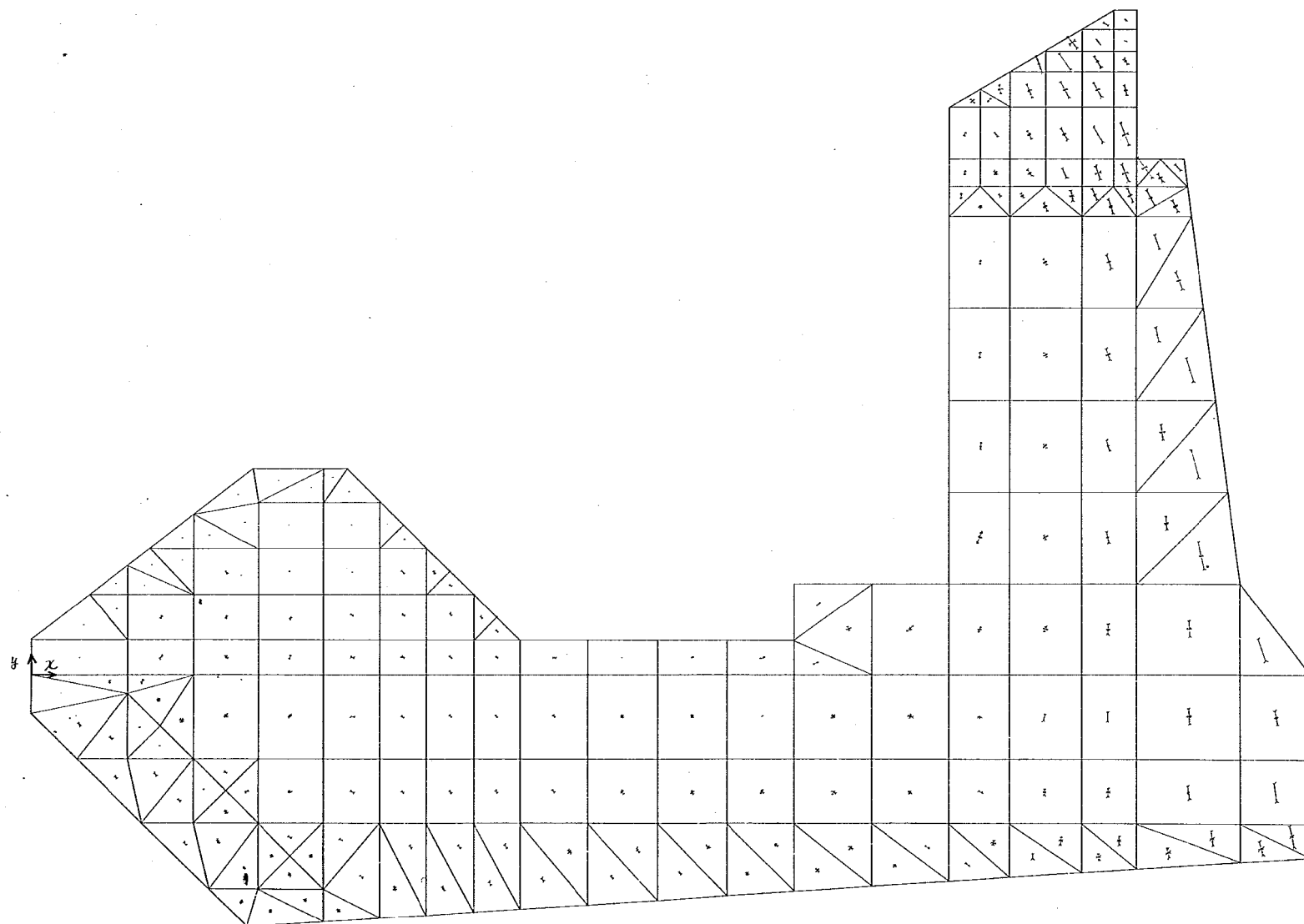
COMP 20 10 5 0 5 10 20 (kg/cm²)

閘門橋設計施工調査	
下部構造・内部応力計算	
図-31	門司側橋台架設時(1)
4万kg/cm ²	昭和44年3月7日
建設省土木研究所	



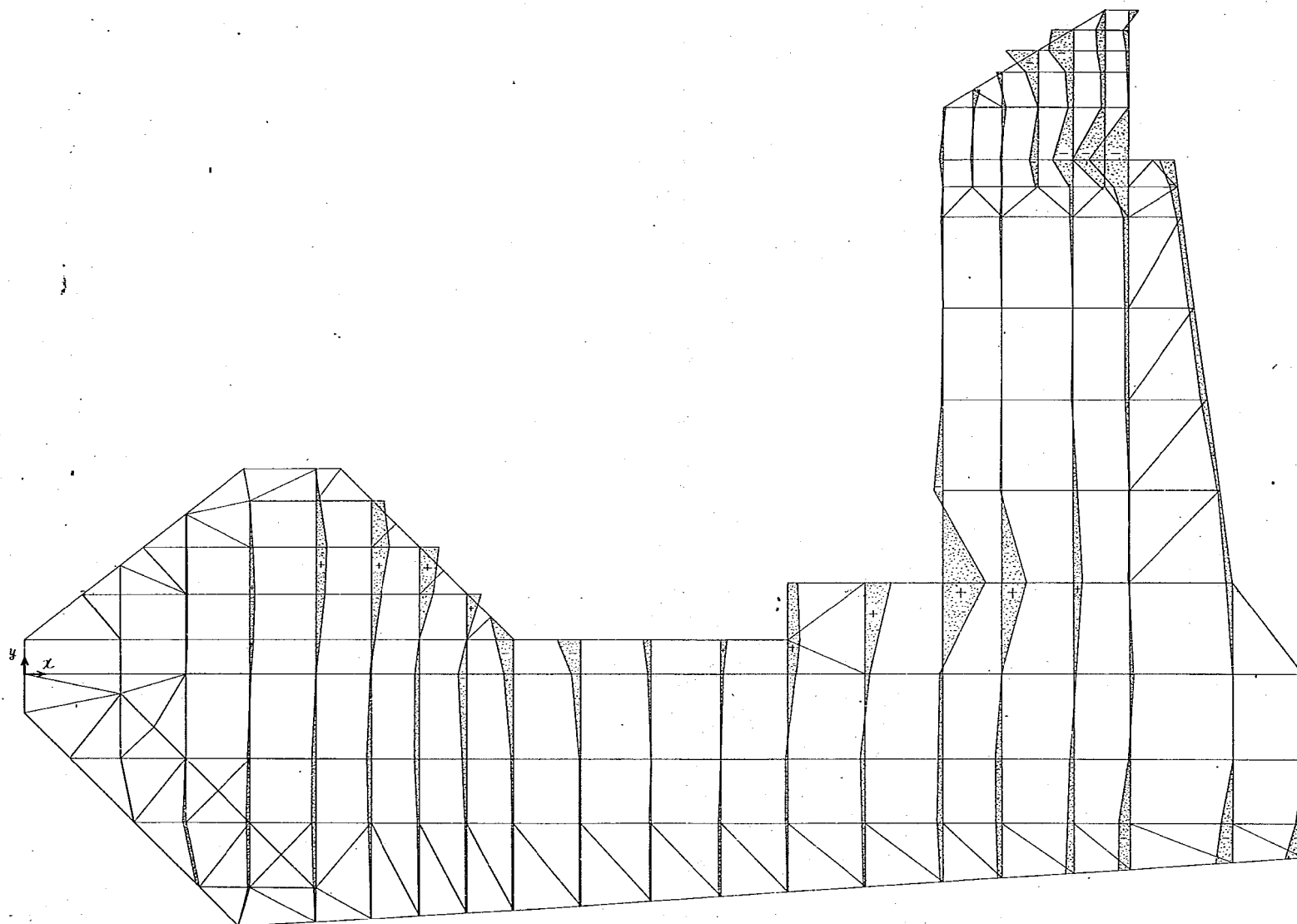
COMP 20 10.50.50 20 (kg/cm²)

閘門橋設計施工調査
下部構造の内部応力計算
図-32 門司側橋台架設時(1)
せん断応力Zxy 昭和44年3月17日
建設省土木研究所



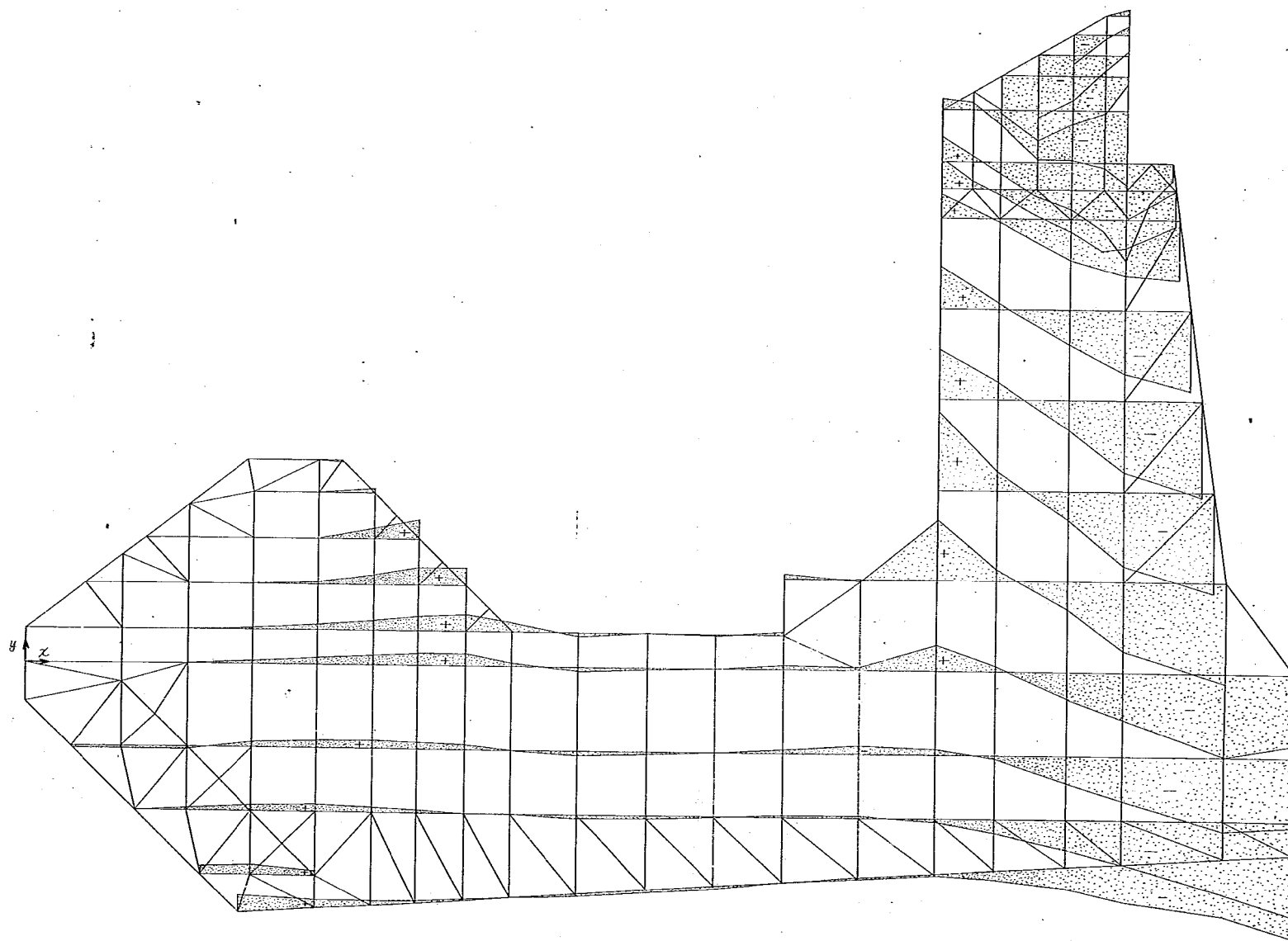
$\longleftrightarrow$ Ten
 $\rightarrow <$ Comp
 0 50 100 200 (kg/cm²)

閘門橋設計施工調査	
下部構造の内部応力計算	
図-33 門司側橋台架設時(1)	
主 尺 寸	昭和44年3月17日
建設省土木研究所	



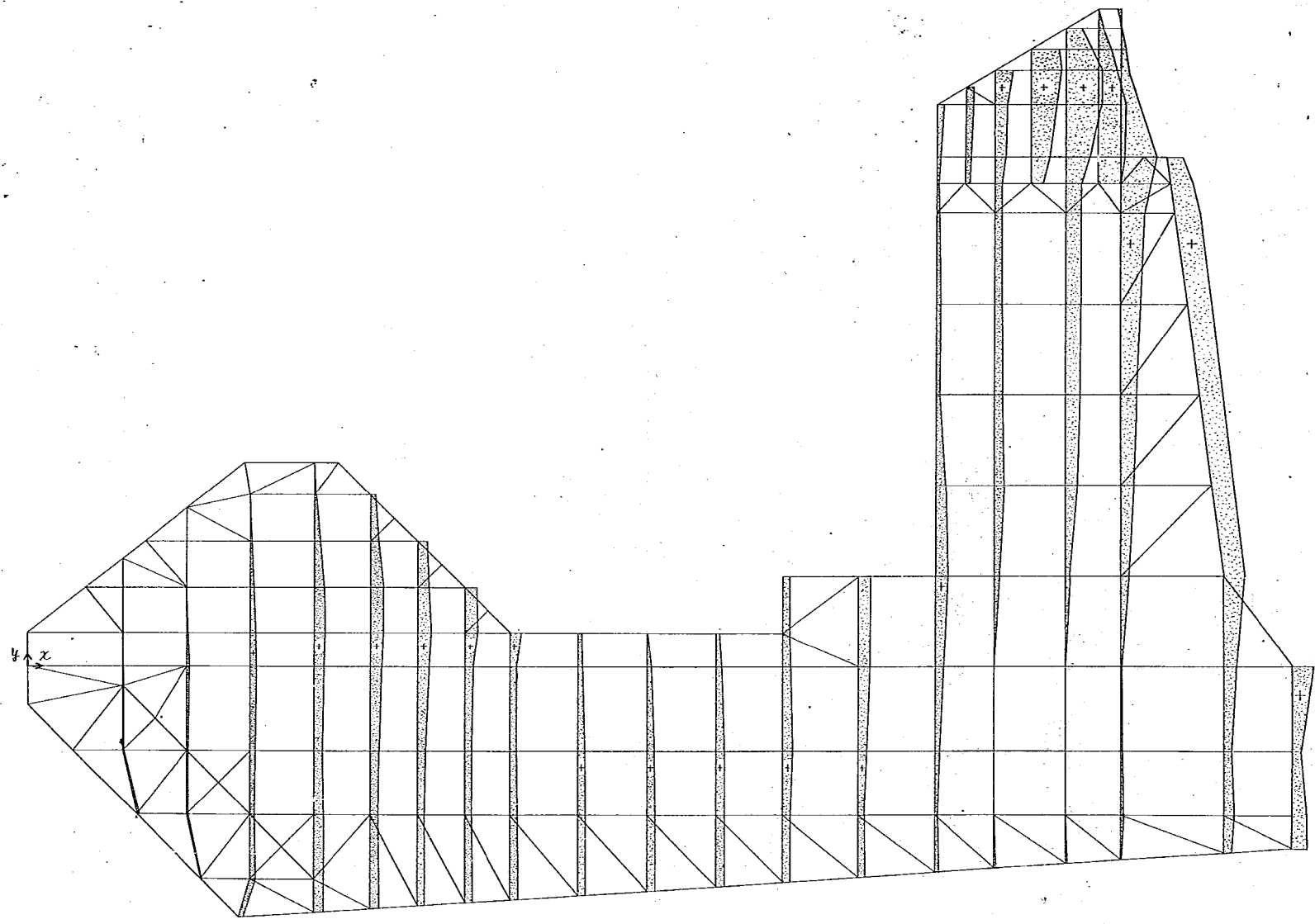
Comp. Len.
70 10 5 0 5 10 70 (cm)

関門橋設計施工調査
下部構造の内部応力計算
図-34 門司側橋台架設時(2)
X方向の応力(2) 昭和44年3月7日
建設省土木研究所



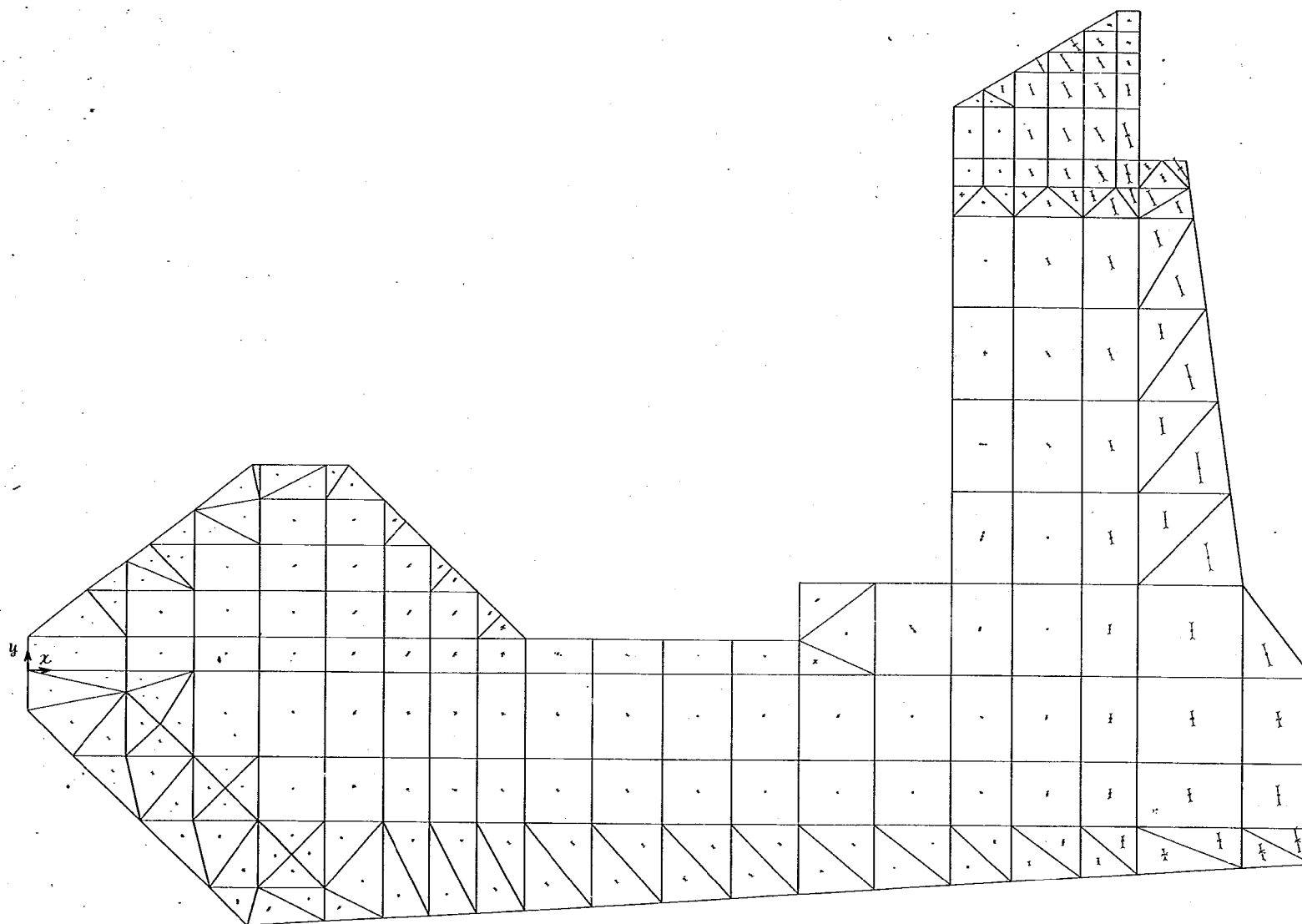
Comp 20 10 5 0 5 10 20 (M/cm)

開門橋設計施工調査	
下部構造の内部能力計算	
図-35 門司側橋台架設時(2)	
8方向の能力0.4	昭和48年3月17日
建設省土木研究所	



comp ten
20 -10 -50 510 20 (kg/cm²)

関門橋設計施工調査
下部構造の内部応力計算
図-36 門司側橋台架設時(2)
せん断応力 22t 昭和44年3月17日
建設省土木研究所



$\longleftrightarrow$ ten
 $\rightarrow$ comp
 0.50x0.200 (kg/cm²)

関門橋設計施工調査	
下部構造の内部力計算	
図-37 門司側橋台架設時(2)	
主筋力	昭和44年3月17日
建設省土木研究所	