

4. 基礎實驗

水道システムの物理的被害と
復旧速度に関する研究

平成 12 年 3 月

(財) 災害科学研究所

神戸大学工学部 高田至郎

1. はじめに

兵庫県南部地震においては水道システムの送水・配水の各管路システムは物理的な被害により断水が長期化した。そのため、管路の破損をいかに迅速に修繕するか、また、いかに管路を地震に備え改良するかといった点が重要となってくる。

1995年の阪神・淡路大震災における、神戸市、尼崎市、芦屋市、西宮市などの物理的被害と給水の関係、すなわちハード被害とソフト被害の関係を把握し、被災箇所と給水システムの関係、被災箇所と復旧の関係を明らかにする。また、管網解析により被害と給水の一般的な関係を導きだし、今後の水道ネットワークの構築に役立てることを目的とする。

2. 阪神・淡路大震災における管路の物理的被災と復旧に関する分析

(1)神戸市の水道施設

神戸市の水道は明治33年(1900年)4月に日本で7番目の近代水道として誕生し、以来95年間にわたり水の供給を続けて来た。しかし、山と海に囲まれ美しい地形を誇っている神戸の街も、坂が多く東西に細長い地形、少ない自己水源など、一方で水道事業にとっては大変不利な条件にもなっている。

神戸の水道は、3箇所の貯水池と8箇所の取水場を自己水源としている。また、地形の影響から、数多くの浄水場、ポンプ場、配水池が点在しており、このことが被害と給水の関係の一般化を困難にしていると思われる。神戸市は大きな河川もなく、水源に恵まれていないため、現在の供給能力の約4分の3を淀川水系に依存しており、残りの約4分の1を自己水源で賄うほか、ごく一部を兵庫県水道用水供給事業からの供給で補っている。

神戸市は、六甲山麓の南側に広がる市街地と、その北部に広がる丘陵地域とで構成されている。六甲山麓の南側に広がる市街地は、東西に細長く、海拔0mから300mを超える高台まで家が建ち並んでおり、北側の西北神地域は広大な土地に農村地帯と住宅団地が点在しており、それらを東西に五つの地域に分割し、それぞれの区域を東部配水管理事務所および東部営業所、中部センター、北センター、西部センター、垂水センターが受け持っている。このような地形的・地理的特徴を考慮して、119箇所の配水池、46箇所の層別配水システムを採用している。

(2)復旧の経過

今回の地震では、配水管、給水管における被害がとりわけ甚大であり、想像を超える漏水箇所が生じた。そのため管内の水圧が失われ、地中に浸透したり、破損したり下水管路内へ流入したりする地下漏水も多く、漏水箇所の特定が困難になるなど、応急復旧に時間を要する結果となった。

漏水事故が広域に分散して同時に発生したため、配水管の水圧が短時間で低下・消

失し、初期段階から漏水発見が困難となった。そのままでは、被災場所の特定ができないため、漏水覚悟で配水管の通水を余儀なくされた。一方では、水源量に制約があったため、通水区域を急激に拡大することもできなかった。よって、当面は被害箇所の特定制が困難であるにもかかわらず、目視による地上からの被害箇所調査に限られた。これが対応を難しくした大きな原因である。

1月18日、阪神水道企業団からの送水が序々に回復するのに併せて復旧作業に入り、作業を①配水池への貯留②試験通水および漏水箇所探知③配水管および給水管の修繕、という手順で進めていった。区域を限り、試験通水、漏水調査、修繕という作業を繰り返す、その状況の中でとくに漏水調査の徹底により、水量を確保し、通水区域を広げていった。

そして、1月22日から道路修繕に、25日からは宅地内修繕に取りかかった。月末には①倒壊・焼失家屋の多い地域②地滑り・道路崩壊などの地域③液状化や陥没のある臨海部の一部といった復旧条件の整わない地域を除いて、仮復旧を終了。3月末には陥没等のひどい一部臨海部を除く住宅地全域で仮復旧が完了し、4月17日に神戸市全域での応急復旧を終えた。

当初、通水する配水区域の順序については①被災地や医療機関を多く含み、給水人口が比較的多い配水区域②配水管の破裂・漏水被害が比較的小さいと思われる配水区域③地滑り、土砂崩れなどの危険性の少ない地域とした。その後、配水管の被災箇所が想像以上に多いことが判明したため、各配水区域内の通水の手順は①配水幹線の通水・修繕②小ブロックごとの通水・修繕としていったり。

(3)被害率の復旧期日への影響

水道システムの代表的な構造物は埋設管である。阪神・淡路大震災では、例えば、神戸市の配水管に約1757箇所もの膨大な数の破損が発生した。埋設管の物的被害の程度を統計的に検討する際には、破壊箇所数を管路延長で割った値、すなわち単位長さ当たりの破壊箇所数が用いられ、これを「被害率」とよんでいる。そして、過去の地震の被害統計から、地震動の激しさ（地盤最大加速度または速度）、地盤の種類、液状化の発生の有無、管の材料、管径、埋設深さなどのパラメータの関数として被害率が整理されている³⁾。

そこで、本論文では被害率

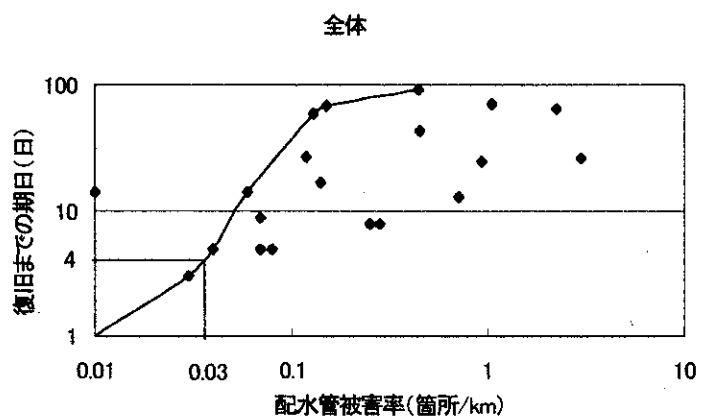


図 2.1 配水管被害率と復旧までの期日の関係

と復旧日の関係を整理する。水道管は電気などとは違い、地中に埋設されているため復旧予測を行い難い。そのため、配水管被害率から復旧日を導くことができないかと考え、兵庫県および大阪府の被害率と復旧日の関係を神戸市や淡路町など被害のあった各市町村ごとにプロットした。結果を図-2.1に示すが、本図によって配水管被害率から最長の復旧期間の予測を立てることができる。

復旧は上流から行うことにより、上流の管すなわち口径の大きな管が破壊されると復旧が大幅に遅れることになる。

実際には図-2.2にみられるように管の口径別の被害率はそれほど大きな違いはない。しかし、口径が大きくなるほど被害率が低くなることが、望ましい。また、配水システムを改善することで同じ被害率でも復旧までの期日を短くすることが可能である。

その他に復旧日数に関し、被害を端的に表す値である被害額との関係で考える。図-2.3(a)は関東大震災以降の主だった地震での被害額割合との関係である。ただし、80年あまりも前の関東大震災とは社会背景も全く違い、単純

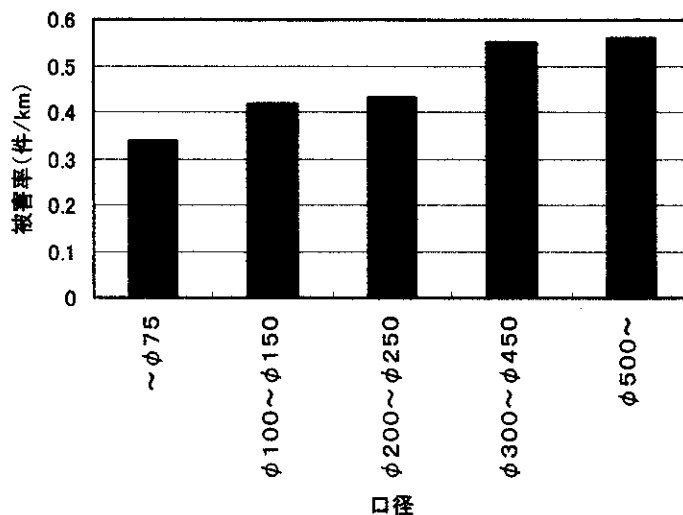
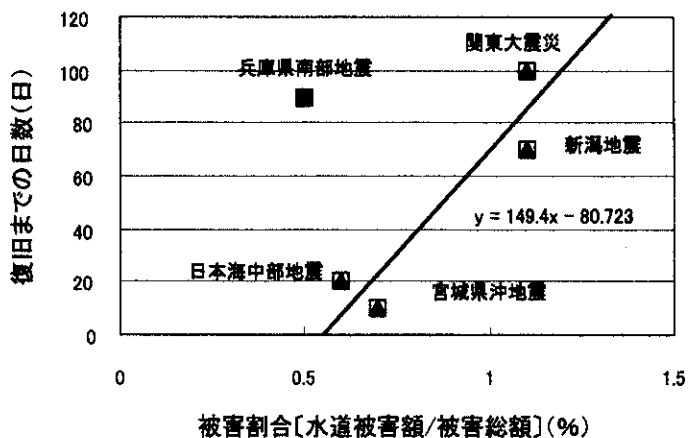
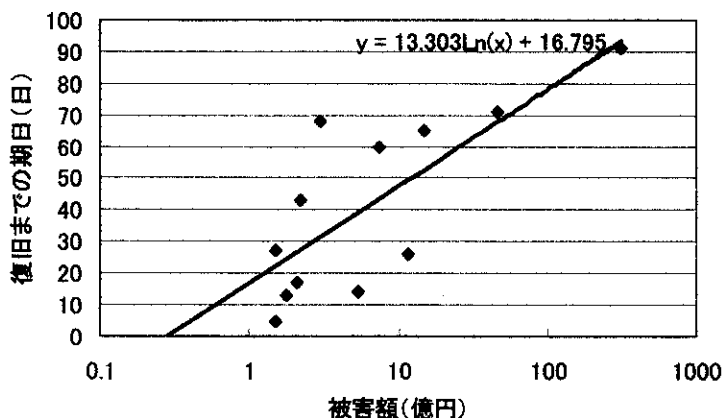


図 2.2 口径別配水管被害率



(a) 主な地震



(b) 兵庫県南部地震

図-2.3 配水管被害率と復旧までの期日の関係

比較が可能か疑問が残る。それ以上に兵庫県南部地震の値がその他の値からかけ離れている。

次に、阪神・淡路大震災の際の被害額と復旧までの期日の関係を各自治体ごとにみたが、自治体の規模に拠らず被害額と復旧までの期日の間には概ね相関が存在する。

3. 管網解析による復旧分析

3.1 概説

本章では解析によって水道管路流の状態を明らかにする。配水区の中での被害の分布が復旧速度にどのような影響を与えるのかを管路内の水頭を元に判断し、耐震化や復旧対策のマニュアルの構築に役立てたいと考える。

3.2 管網解析の概要

(1)配水管網解析の目的

管網とは、市街地の地下に埋設されている水道管や下水管のように、多数本の管路が複雑に連結している状態をいう。配水管網は配水管で構成される管網であり、その最上流部に位置する配水池内に貯えられている上水を下流側の給水管まで輸送する役割をもつ。市民の水需要が満足されるためには（蛇口を捻ったときに上水が勢いよく流出するためには）、給水管系の損失水頭と流出速度水頭および蛇口の高さの和よりも高い位置に配水管内の水位がなければならない。この水位はすなわち動水位（全水頭）である。通常は、この動水位を地表面から測った地盤上残存水頭 RP で表し、その値が 15~20m 程度であればよいとされている。しかし、本研究では、地震時の最低限必要な水頭を考察する必要がある、配水管網解析の目的は、配水管の各場所における動水位 RP_i を算出し、所要の値以上になっていることを確認することにある。本来の管網解析では、もしも所要の値が確保されていないときは、管径の増大や上流側で圧力を高める必要がある。

管網解析法によれば、配水管網内の各場所におけるエネルギー位のみならず、管内の流量も求められる。ただし、エネルギー位に比べて流量の算出はさほど重要ではなく、せいぜい管内流速のチェックに利用されるくらいであり、さらに注意すべき点は、配水管内のエネルギー位が所要の値以上にならなければ、そのときに計算された流量が流れていないことになる³⁾。このことにより、地震発生後のネットワークが切れた状態や配水池からの配水量が減った状態での供給回復が判定できる。

(2)管網解析の原理

管網の幾何学的構成を抽象化すると、点としての節点と線としての管路から成り立っていると見ることができる。ここで節点とは、①配水池、②水量流出点、③ポンプ、④減圧弁、⑤管径ないしは管種の異なる管路の接続点など、水流の始・終点と不連続点の総称である。

まず、各1本の管路内の水頭については、流量と損失水頭の間でコールブルック・ホワイト式(3.1)を使用し、この関係が満足されなければならない。

$$H_{ij} = \sum_{l=1}^n \left\{ f_l \frac{L_l}{D_l} + (\sum f_r)_l \right\} \frac{8}{\pi^2 g} \frac{Q_l^2}{D_l^4} \quad (3.1)$$

H_{ij} : 点 i, j の水位差(m)

f_n : 摩擦損失係数

f_r : その他の損失係数

D : 管径(m)

L : 管の長さ(m)

g : 重力加速度(m/s²)

Q : 流量(m³/s)

管網解析では計算の困難さと局所損失、とくに分岐合流損失が正しく評価出来ないため、管内の損失としては摩擦損失のみを取り上げる。よって上式が損失水頭を表す。また、流量は

ヘーゼン・ウイリアムス式：

$$Q = 0.27853 C_H I^{0.54} D^{2.63} (k = 1 \cdot 10^{-6} \sim 1 \cdot 10^{-4} \text{ m}) \quad (3.2)$$

高桑式：

$$Q = C_T I^{0.5124} D^{2.637} (k = 1.5 \cdot 10^{-4} \sim 2 \cdot 10^{-3}) \quad (3.3)$$

マニング式：

$$Q = 0.31169 n_M^{-1} I^{1/2} D^{8/3} (k = 2 \cdot 10^{-3} \sim 1 \cdot 10^{-2}) \quad (3.4)$$

ここに、

Q : 流量(m³/s)

D : 管径(m)

I : 動水勾配

C_H : 流速係数

C_T : 流量係数

n_M : 粗度係数

で表現され絶対粗度 k (m)の値の範囲によって式(3.2), (3.3), (3.4)いずれかが選択される。プログラムは図-3.1に見られるようにメインプログラムと4つのサブプログラムから成っている。まず、1つ目のサブプログラムで各接点に隣接する節点と管路を求

める。そこからホワイト式を使い、損失水頭、そのほかに各管路流出量の和を算出する。次に、3つ目のサブプログラムを使い

$$E_i - E_j = \sum_{n=1}^l H_n \quad (3.5)$$

の管路損失水頭式を満たす上端流量 Q' を

$$Q' = Q'' + \Delta Q' \quad (3.6)$$

によって求める操作を補正值 $\Delta Q'$ が十分に小さくなるまで繰り返す。これが節点 i のまわりの流量収支を許容限度内で満足しているか調べ、満足していないならば、

$$E = E' + \Delta E \quad (3.7)$$

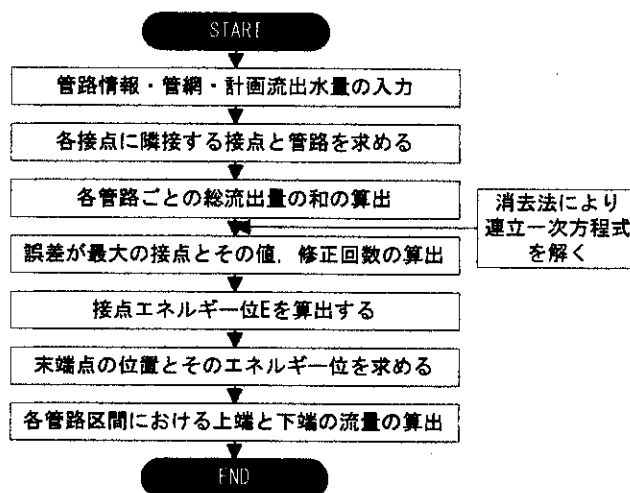


図-3.1 解析の流れ

によって得られる E を E' とおいてもう一度 Q' を求める。このとき、消去法によって連立一次方程式を解くサブプログラム 2 を使用する。その結果、節点エネルギー位が求まる。最後に、サブプログラム 4 で末端点の位置とそのエネルギー位を求め、そこから、各管路の区間の上端流量と下端流量を算出する³⁾。

3.3 東灘第 2 低層管路網と被災の復旧状況

(1) 解析対象配水管網

管網解析によるシステム特性把握と復旧分析については、図-3.2⁴⁾にみられるように東灘第 2 低層において被害件数が跳び抜けて多く、さまざまなケーススタディが行えると考え、東灘第 2 低層について考察することにした。

そこで、東灘第 2 低層における流網解析を行うため、管路図を用い管路と管路の交点および分岐点すべてに図-3.3 のに例示するように管路番号と節点番号を付け、番号・管路情報をプログラムに入力する。その際にネットワークとしての重要性の点から $\phi 75 \sim \phi 100$ の管路を省略した。また、現在入手している管路図は現時点のものであり 1995 年当時には国道 2 号線上にあった左右の配水区とのバックアップの役割を成す管路が存在していなかったため、この管は配水区内で閉じているものとする。

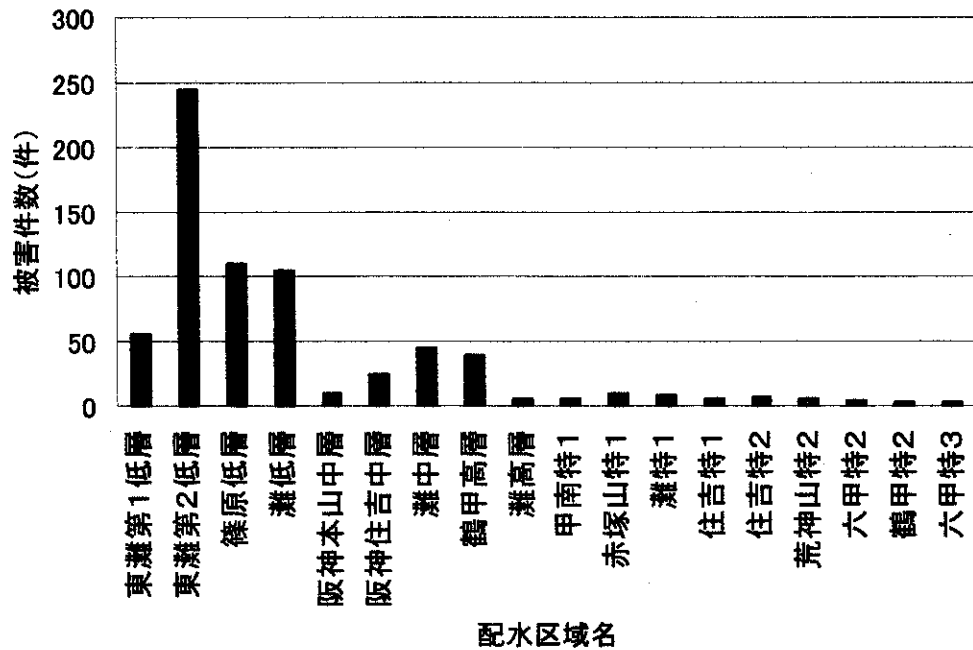


図 3.2 配水区別被害件数

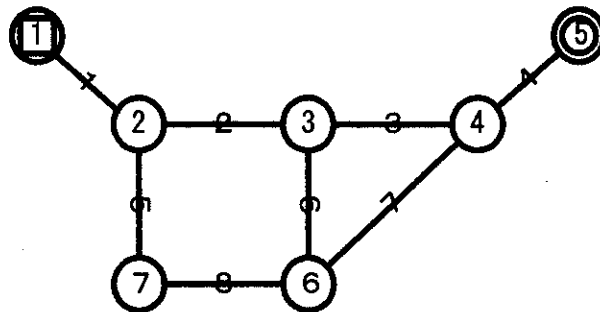


図 3.3 管路図

(2) 被災状況

図 3.4 には東灘第 2 低層の配水管路網および 1 月 17 日(地震発生当日)の被災管路を示している。また、表 3.1 には一例として東灘区第 2 低層の一部地域における管路被害位置と管路被害が復旧された日付を神戸市水道局の記録を抜粋して示している。また、図 3.5 は東灘第 2 低層の配水池における地震発生直後からの実測流量および、次節の通水プロセスシミュレーションで設定した流量過程を示している。

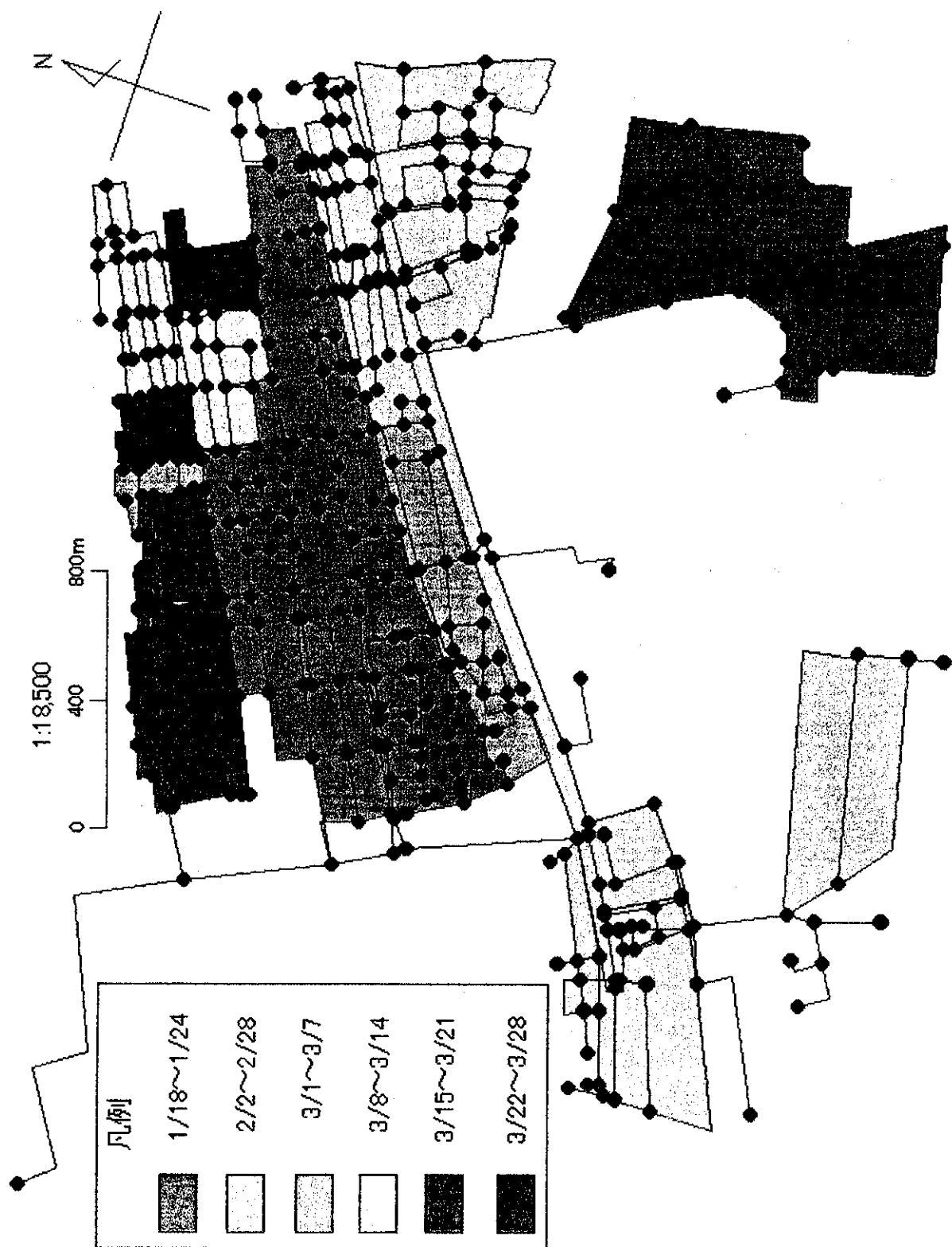


图 3.4 供給回復日

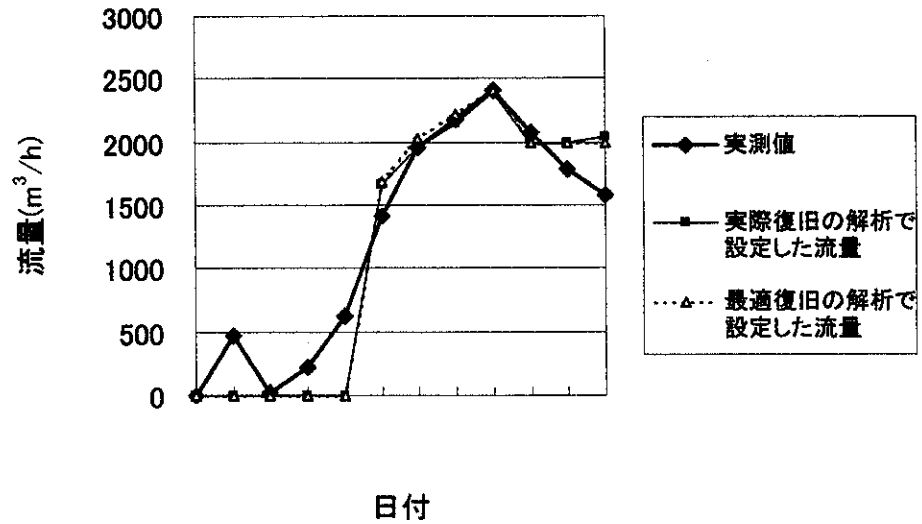


図-3.5 流量変化

表 3.1 東灘第 2 低層の配水管被害位置と復旧日一例

住所	口径	日付
東灘区森南町1丁目6	200	3/2
東灘区森南町1丁目8-4	150	3/5
東灘区森南町1丁目8-9	150	3/4
東灘区森南町1丁目8-9	150	3/4
東灘区森南町1丁目9-21	150	3/10
東灘区森南町1丁目13	150	3/24
東灘区森南町1丁目14-15	150	3/24
東灘区森南町2丁目7、8の間	150	3/17
東灘区森南町3丁目1	150	3/1
東灘区森南町3丁目1	150	3/5
東灘区森南町3丁目1	200	3/5
東灘区森南町3丁目4	150	3/3
東灘区森南町3丁目4-11	150	3/24
東灘区魚崎南町1丁目3	300	2/2
東灘区魚崎南町2丁目5	150	2/2
東灘区魚崎南町3丁目	300	2/10
東灘区魚崎南町3丁目	400	2/19
東灘区魚崎南町3丁目	300	2/20
東灘区魚崎南町3丁目2-1	300	2/19
東灘区魚崎南町3丁目11-13	150	1/24
東灘区魚崎南町3丁目11-16	150	1/24
東灘区魚崎南町4丁目3	150	2/10
東灘区魚崎南町4丁目3	150	2/10
東灘区魚崎南町4丁目14-1	150	2/10
東灘区魚崎南町6丁目	400	1/29
東灘区魚崎南町8丁目	400	3/19
東灘区魚崎南町8丁目7-6	200	3/8

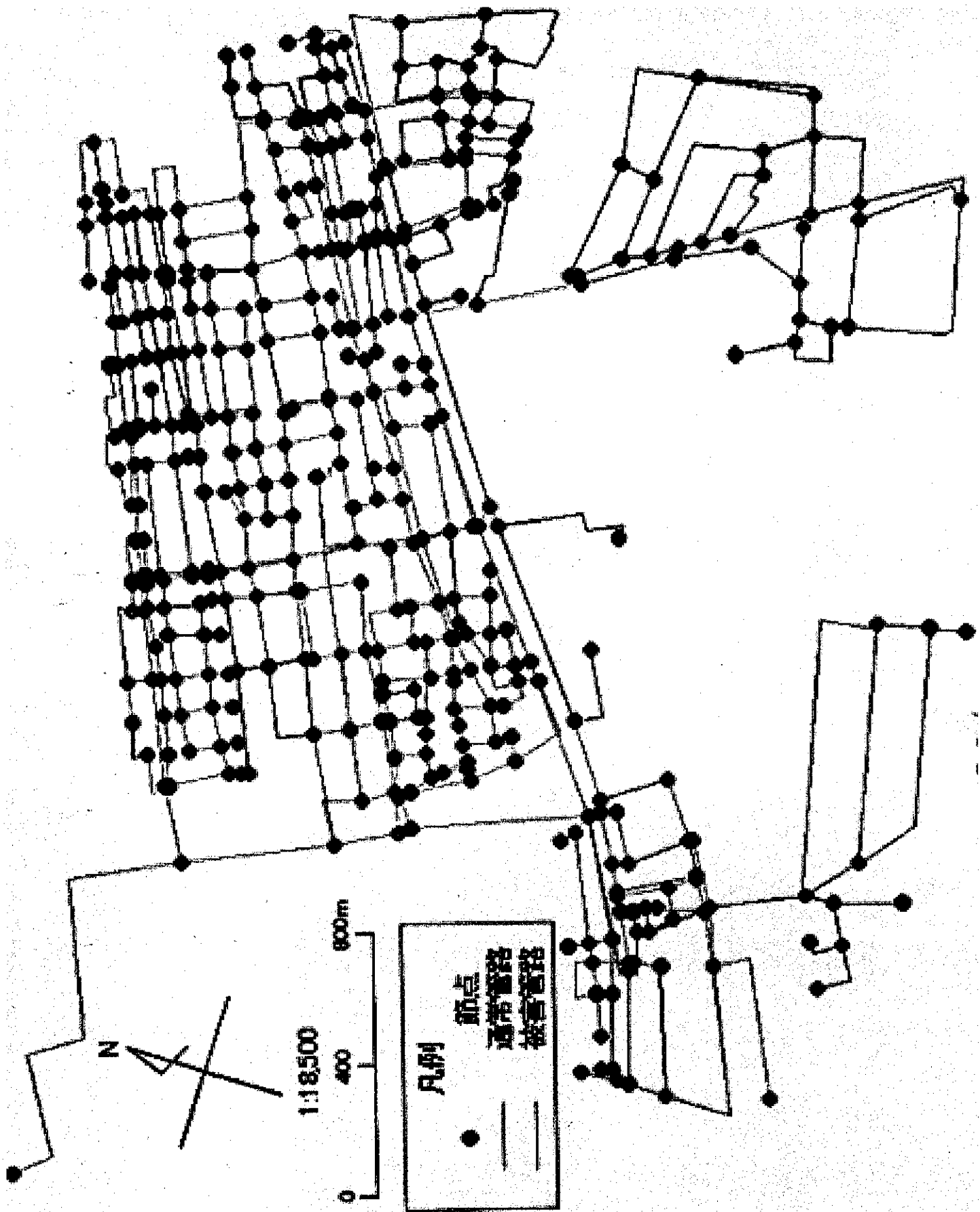


图3.6 1月24日被害管路(实际复旧)

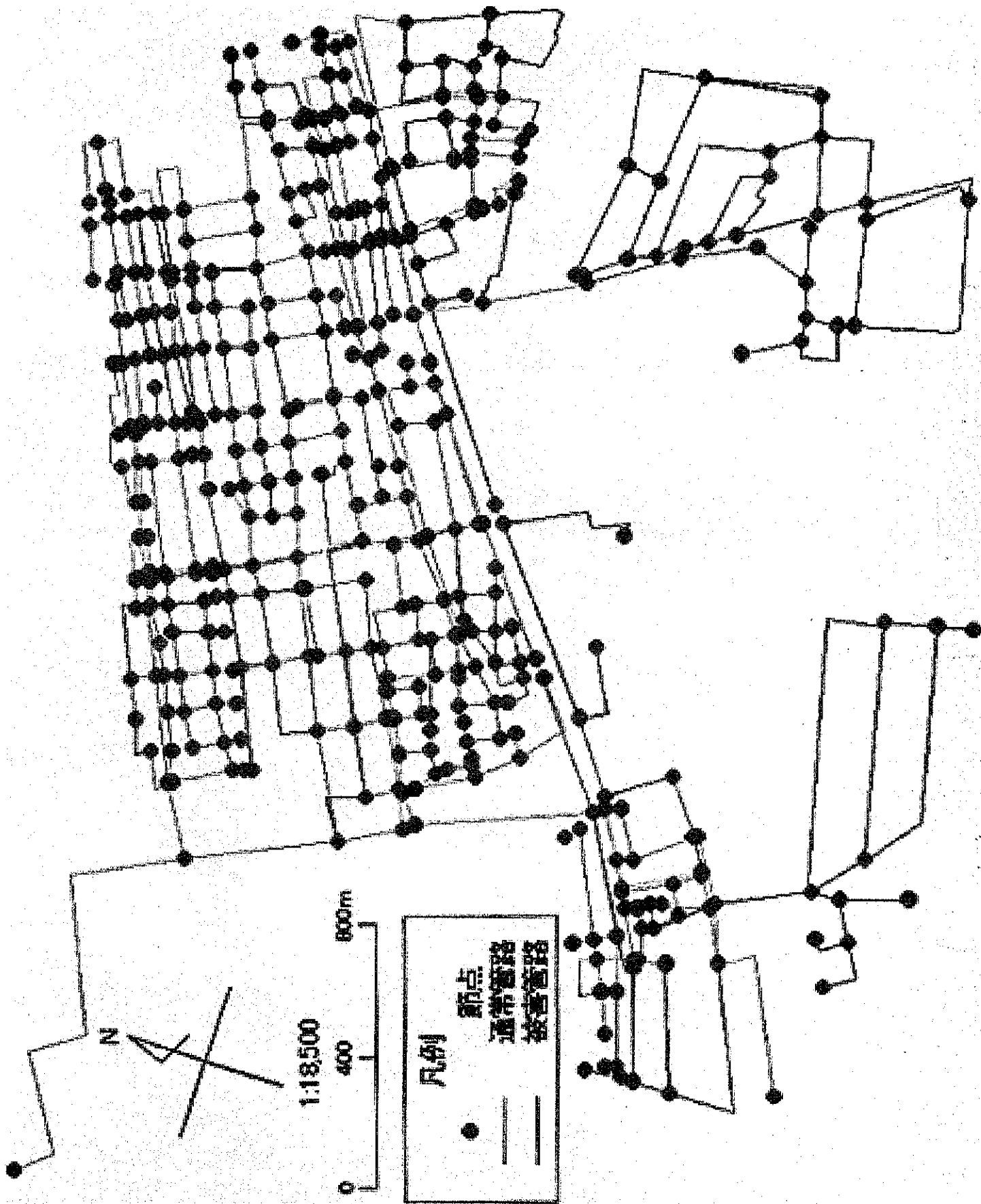


图3.7 1月31日被害管路(实际复旧)

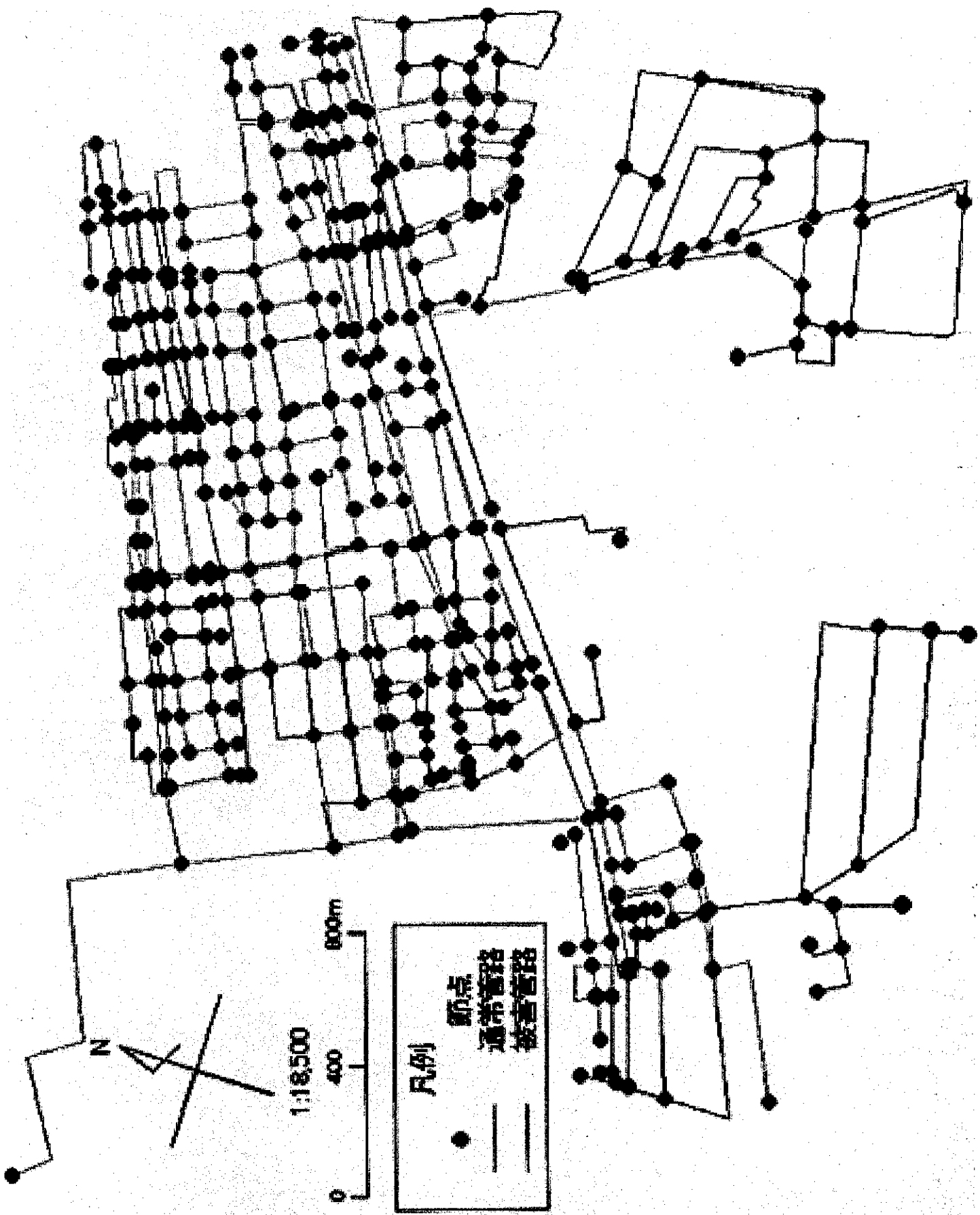


图3.8 2月7日被毒管路(实际复旧)

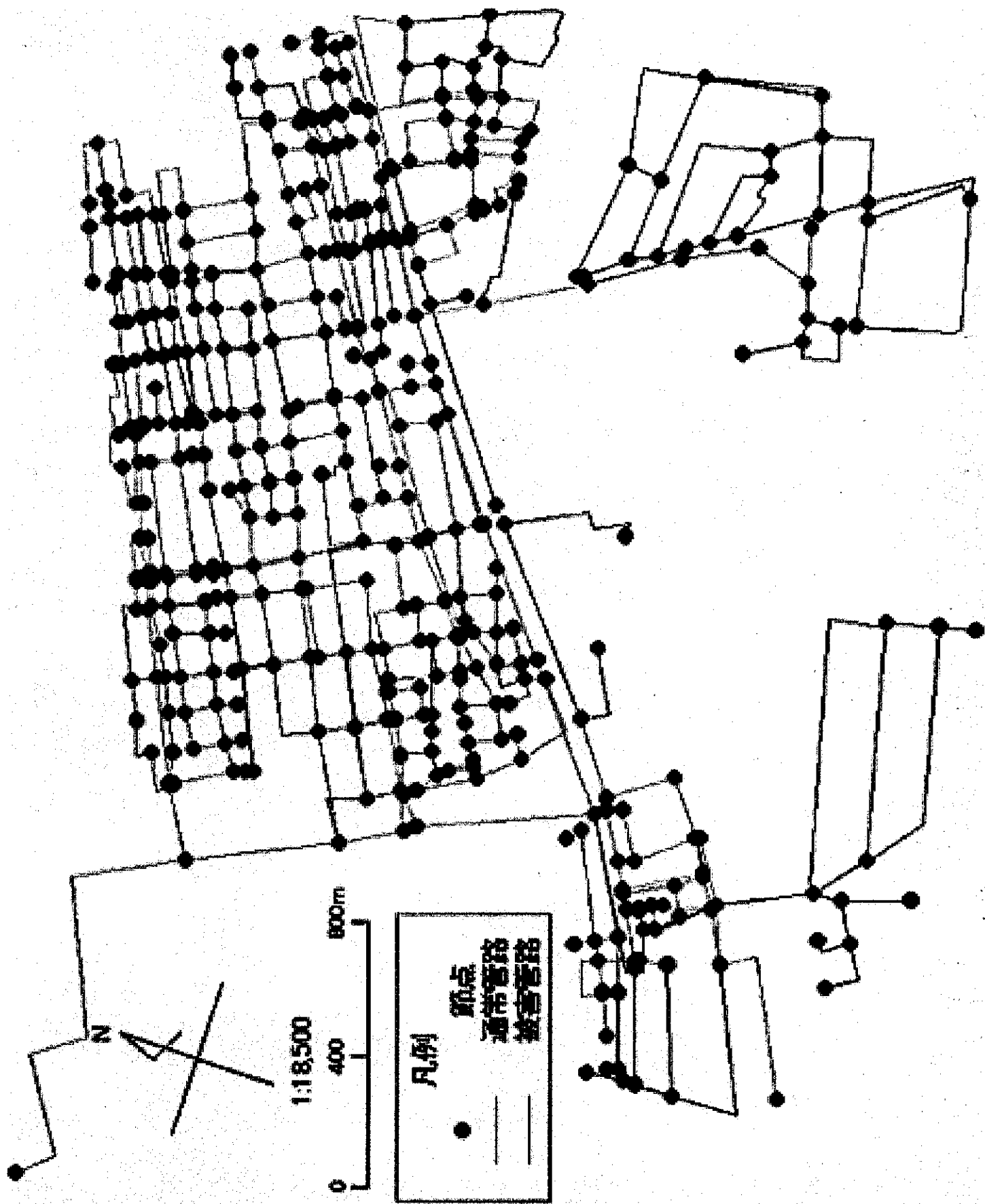


图3.9 2月14日被害管路(实际復旧)

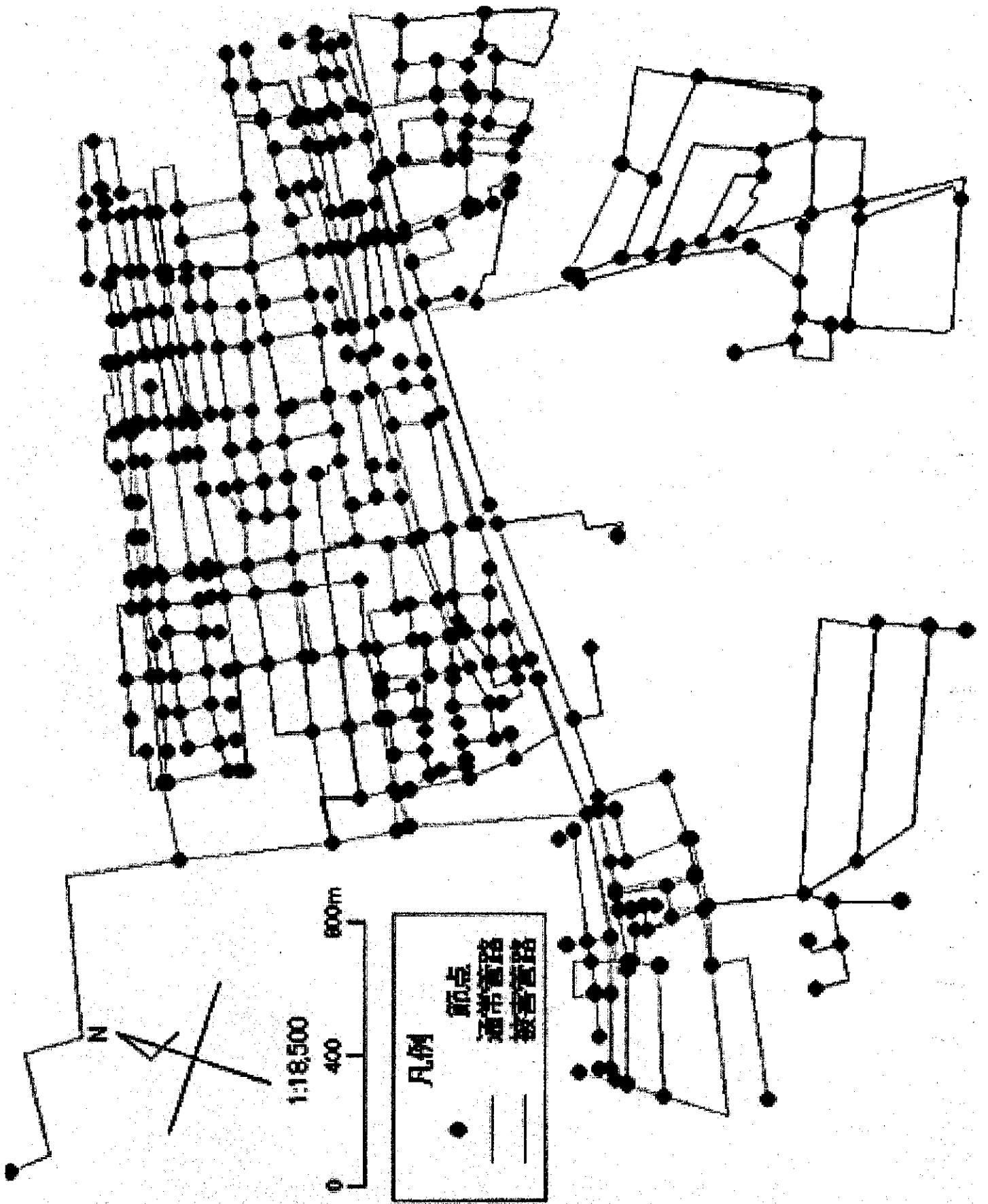


图3.10 2月21日被害管路(实际复旧)

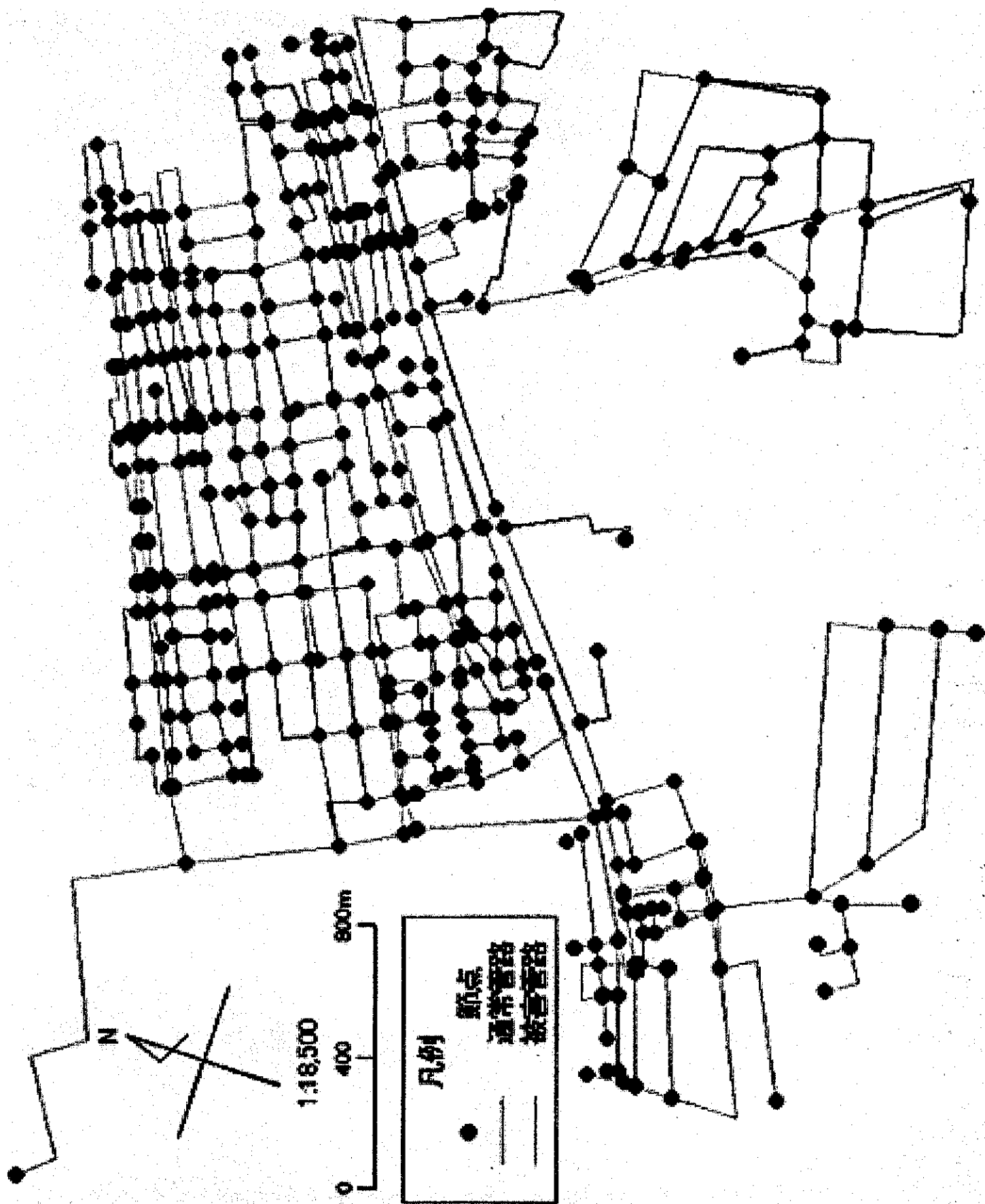


图3.11 2月28日被害管路(实际复旧)

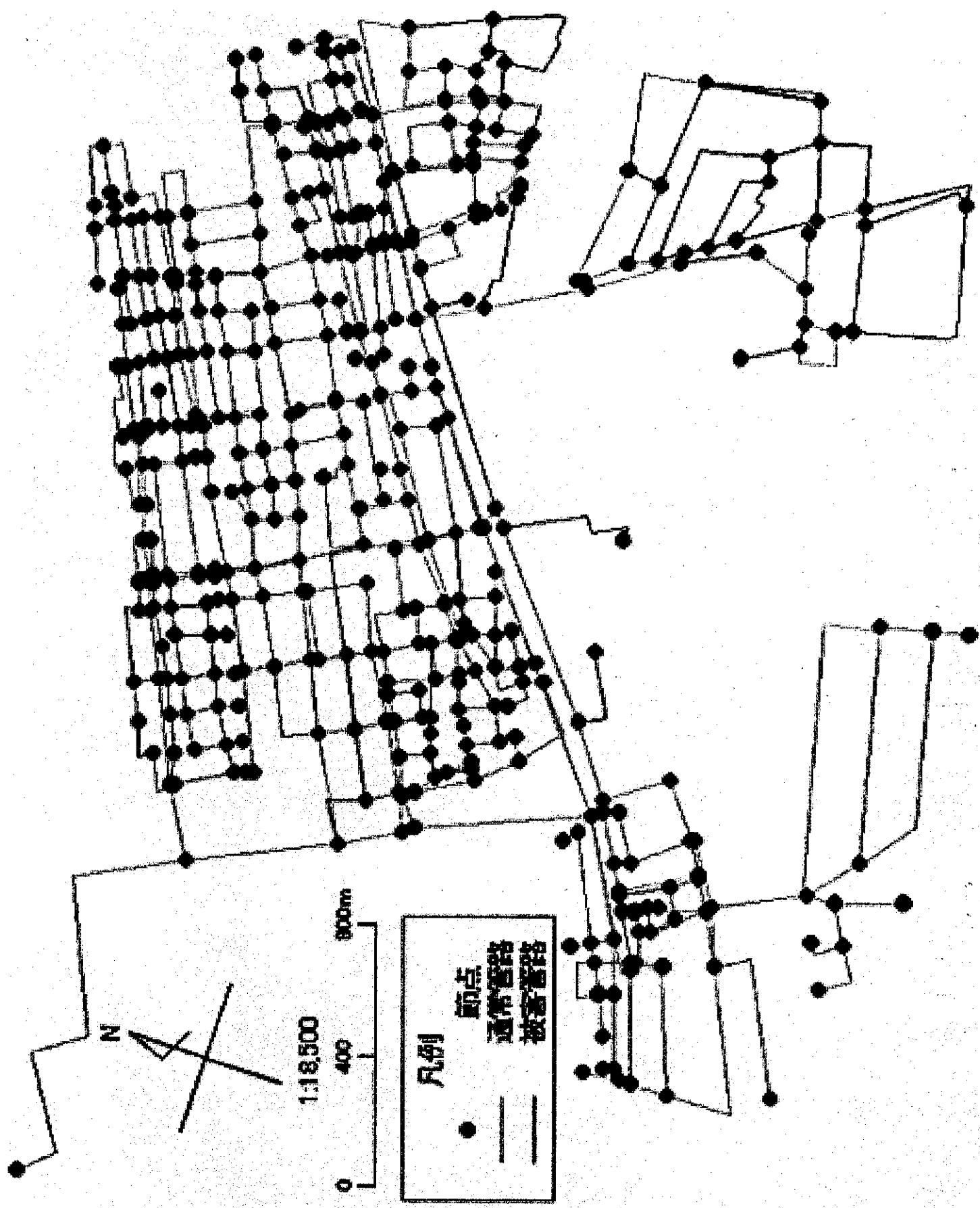


图3.12 3月7日被害管路(实际复旧)

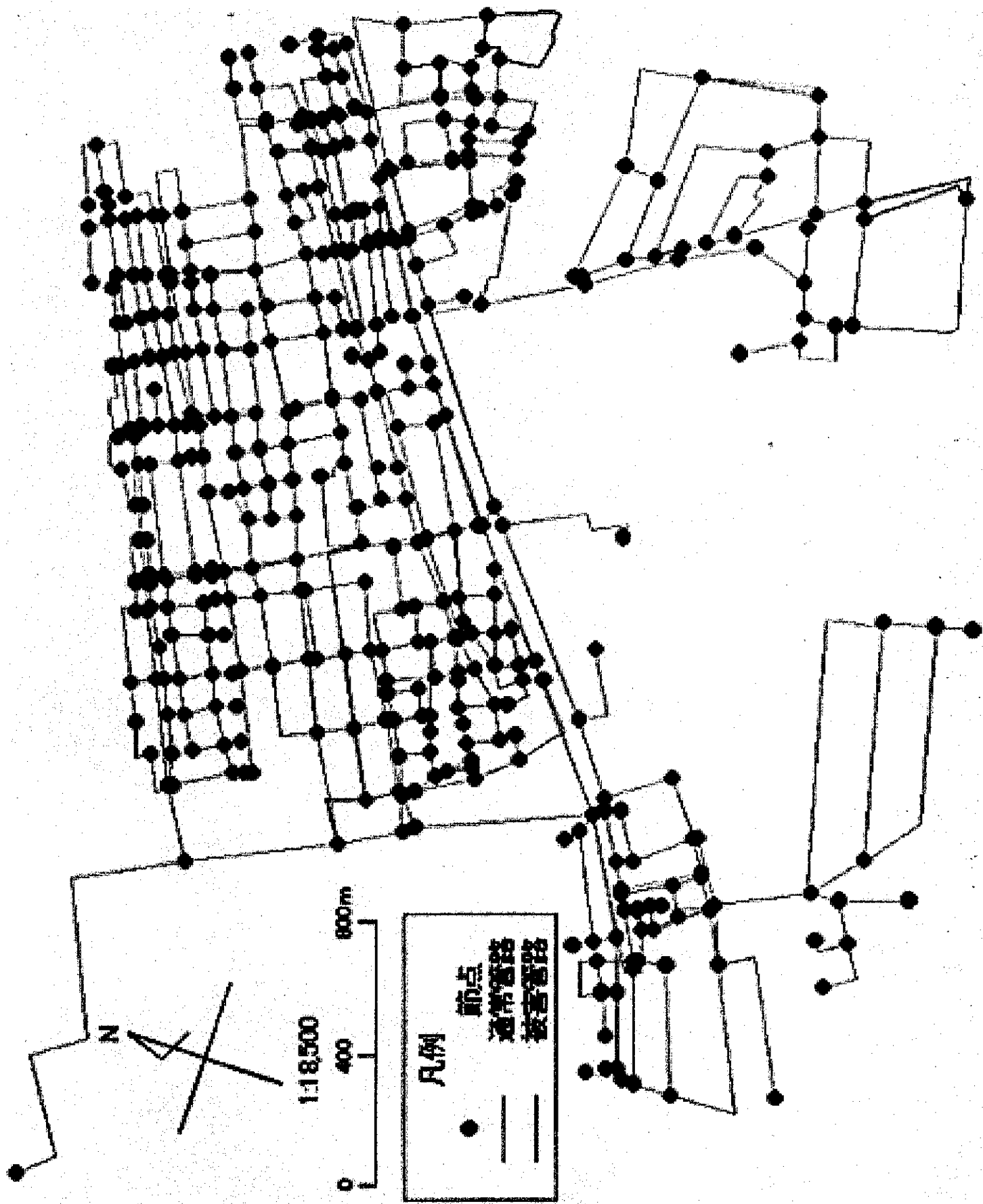


图3.13 3月14日被害管路(实际复旧)