

(134) 震後の上水道システムの機能的復旧予測モデル

攻玉社短期大学 正員 大野 春雄
武蔵工業大学 正員 星谷 勝

1. はじめに

ライフラインの供給機能の復旧シミュレーションにはネットワークの連結性や管網流量解析などの複雑な計算過程を組み込んだものが多い。複雑な計算過程を必要とする理由は、物理的被害とその結果がもたらす供給機能低下の関係を求めるためである。本研究では、著者らによる既往の機能評価モデル^{1), 2)}における物理的被害と機能支障の関係を求める解析過程を水道事業実務者の経験的判断に基づく経験法則に置き換え、簡略化した実用的な予測モデルの作成を目指したものである。この場合には、当然ながらノード間の水頭差やバルブ操作などを考慮した実務者の判断が反映されるので、ネットワーク連結性解析による従来のシミュレーションよりも予測精度が向上するものと考えられる。ここでは、本予測モデルを用いた神奈川県水道局藤沢事務所管内における事例解析の検討結果について示す。

2. 上水道機能の復旧予測モデル

本復旧予測モデルは、物理的被害の復旧過程を求める被害復旧サブモデル (Damage Restoration Model: DRM) および物理的被害から供給機能の支障率を求める供給支障サブモデル (Supply Interruption Model: SIM) により構成される。被害復旧サブモデルは、システムダイナミクス手法を用いたモデルである。これは、管径が400mm以上の上水道管網や浄水場、配水所などの重要施設における物理的被害が直接的な修復作業によって減少していく過程を求めるもので、この復旧過程の予測には、復旧戦略の指標を組み込んでいる。供給支障サブモデルは、物理的被害と機能支障の関係をエキスパートの経験的判断に基づいて求めることによりネットワークの連結性等の数値解析的な方法をby-passするモデルである。具体的には、対象システムを担当する水道事業実務者に質問調査を行い、被害を与えたシステムに対して、経験的判断により機能的支障を推定してもらい、得られたデータをもとに物理的被害と機能支障の関係を回帰分析で求めるものである。図-1に予測モデルの全体構成を示す。まず、システムの初期被害分布を与える。この時刻 $t=0$ における物理的被害の件数をもとに、被害復旧サブモデルで復旧戦略を考慮しながら各時刻の物理的被害の復旧を求める。次に、得られた物理的被害を入力値として、供給支障サブモデルで各時刻の機能支障率を求める。このようにして、逐次供給機能の復旧過程を求めることができる。なお、モデルの詳細は文献3)を参照して頂きたい。

1) 上水道ネットワークおよび被害の表現方法

従来の研究では、システムをネットワークモデルで表現し、被害時のネットワークの連結性や管網解析により、システムの供給信頼性を評価している。本研究では、国土地理院基準分割四次メッシュ (500m×500m) を利用し、対象とする上水道管網と各メッシュとの重なりをみて、重なるメッシュに

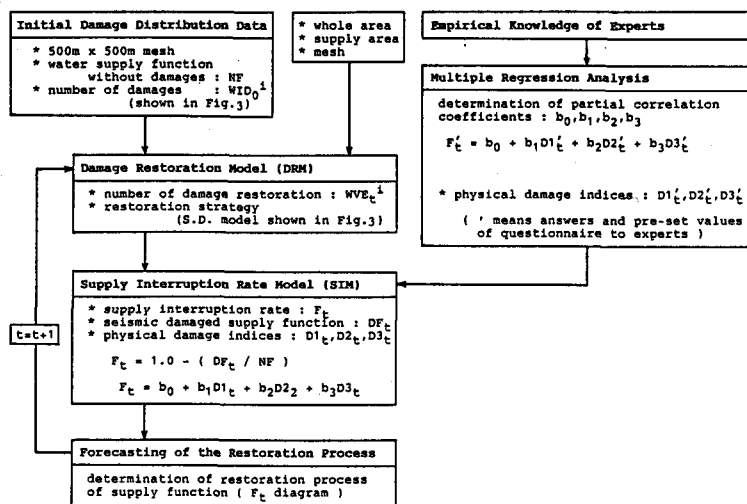


図-1 上水道機能の復旧予測モデルの全体構成

より上水道システムを表現する方法を用いた。これをネットワークモデルに代わる上水道システムのメッシュ表示モデルとした。図-2に神奈川県水道局藤沢事務所管内(藤沢市)の浄水場、配水池、ポンプ所および送配水管網の管径φ400mm以上を対象としたメッシュ表示モデルを示す。

2) 供給支障サブモデル

供給支障サブモデルは、物理的被害と供給支障の関係を求めるものである。物理的被害の状況は、被害復旧サブモデルの復旧完了指標²⁾ WRC_t^i を用いて、物理的被害率 $D1_t$ 、物理的被害分散度 $D2_t$ および

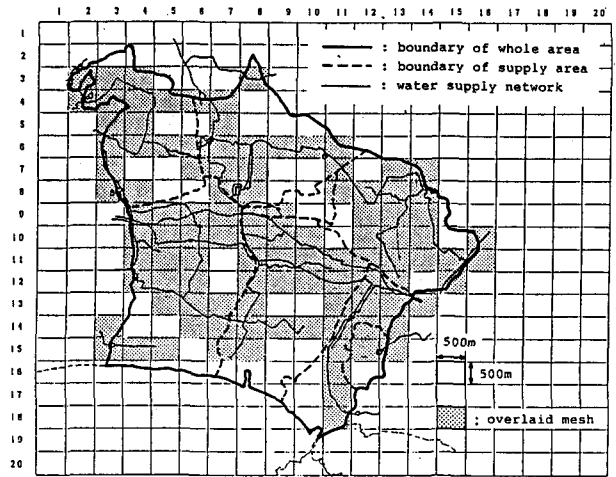


図-2 藤沢事務所管内の上水道管網およびメッシュ表示モデル

重要施設被害率 $D3_t$ により示す。供給支障の程度は供給支障率 F_t で示し、水道事業実務者に対する質問調査により、対象システムに物理的被害を与えたときの供給機能を給水量および給水戸数(水栓数)で推定してもらい求める。以下に供給支障サブモデルの供給支障率 F_t 、物理的被害率 $D1_t$ 、物理的被害分散度 $D2_t$ および重要施設被害率 $D3_t$ の定式化を説明する。

供給支障率 F_t は、時刻 t における上水道の機能的供給支障の程度を示すものである。全面的な水供給停止時を $F_t=1.0$ とし、平常時の水供給時を $F_t=0.0$ とする。ここで用いている平常時の水供給機能 NF および被害時の供給機能 DF_t は、給水量または給水戸数で求める。この供給支障率 F_t は、対象地域(水道局管内)を分割する供給エリアごとに求める。これを(1)式に示す。

$$F_t = 1.0 - (DF_t / NF) \quad (1)$$

DF_t : 被害時の水供給機能(給水量および給水戸数) NF : 平常時の水供給機能(給水量および給水戸数)

上水道管網の物理的被害状況は、メッシュ表示モデルのオーバーレイメッシュ内に被害があるか否かによって示される。メッシュ内の被害の存在の有無は、被害復旧サブモデルの復旧完了指標 WRC_t^i により求められる。物理的被害率 $D1_t$ は被害量の程度を示す量であり、この WRC_t^i を用いて上水道管網のオーバーレイメッシュ総数と被害の存在するメッシュ総数の比により求める。これを(2)式に示す。

$$D1_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N WRC_t^i \quad (2)$$

t : 時刻

WRC_t^i : 被害復旧サブモデルの復旧完了指標

i : メッシュ番号

i メッシュ内に被害がある場合: $WRC_t^i=1$

N : 上水道管網のオーバーレイメッシュ総数

i メッシュ内に被害がない場合: $WRC_t^i=0$

上水道管網の被害の広がり度合を物理的被害分散度 $D2_t$ により示す。これは被害のあるメッシュ間の距離の総和と上水道管網のオーバーレイメッシュ間の距離の総和の比で求める。これを(3)式に示す。

$$D2_t = \left(\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{k=i+1}^N d_{ik} WRC_t^i WRC_t^k \right) / \left(\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{k=i+1}^N d_{ik} \right) \quad (3)$$

d_{ik} : 上水道管網のオーバーレイメッシュ i とオーバーレイメッシュ k との図心間距離

重要施設(浄水場、配水所、ポンプ所、送水管等)の被害は、水供給機能の予測に影響を与える因子となられると思われるので、これを考慮することとした。そこで、重要施設被害率 $D3_t$ は重要施設の位置するオーバーレイメッシュの総数と被害のある重要施設のメッシュ数の比で求める。これを(4)式に示す。

$$D3_t = \left(\sum_{i=1}^N I_i WRC_t^i \right) / \left(\sum_{i=1}^N I_i \right) \quad (4)$$

iメッシュ内に重要施設が存在する場合 : $I_i=1$

iメッシュ内に重要施設が存在しない場合：I_i=0

質問調査の結果をもとに、(5)式に示す重回帰モデルを適用して供給支障サブモデルを求める。すなわち、物理的被害 $D1_t$ 、 $D2_t$ 、 $D3_t$ で供給機能を説明できるものと仮定する。

$$F_t = b_0 + b_1 D1_t + b_2 D2_t + b_3 D3_t \quad (5)$$

3. 神奈川県水道局藤沢事務所管内を対象とした事例解析

藤沢市は神奈川県下5番目の人口(33万人)を抱え、市域総面積は69.63Km²である。神奈川県水道局藤沢事務所は、藤沢市域の南半部を管内として、藤沢市の中心部分を担当している。また、藤沢事務所は、この管轄地域を8つの供給エリアに分割し管理している。本事例解析では、復旧予測モデルの藤沢型供給支障率サブモデルの構築およびある被害を与えたときの復旧シミュレーション計算例を示す。

1) 藤沢型供給支障率サブモデル

物理的被害と供給支障の関係を求めるために、神奈川県水道局藤沢事務所の水道事業実務者に対して質問調査を行った。調査実施にあたっての設定条件を下記の①～⑥に示す。

①被害想定時期：夏・平日・昼間（ピーク時）

昭和63年夏期の給水量 日量：110654m³，戸数：83109戸（水栓数）

②被害原因：地震（南関東地震クラス）

③被害対象施設：φ400mm以上の送水管・配水管、延長：63km、管種：ダクトイル鋳鉄管、高級鋳鉄管、
アーク溶接鋼管、印ろう継手鋼管、口径：400～1200mm

④被害形態：被害箇所の前後のバルブは閉止操作され、その区間の供給は完全に停止するものとする。
φ400mm未満の管路被害は考慮しないで供給支障の評価をする。

⑤供給支障の：藤沢事務所管内は8つの供給エリアで構成される。評価の単位は、被害時の給水量、水評価単位 桧数(戸数)を平常時に対する百分率で示す。

⑥被害パターン：被害箇所の想定は、管種・地盤・地形等の状況から基本的にはエキスパートにお願いした。被害発生件数は、1, 2, 5, 7, 10, 15, 20件として、各被害発生件数ごとに4種類の分布パターンを設定した。合計28被害パターンとした。

以上の調査の設定条件は、他地域でのデータ収集の共通の指針となると考えられる。

被害想定時期は、夏・

表-1 被害想定時期における平常時の水供給機能：NF

平日・昼間（ピーク時） として、この時期の昭和 63年の給水実績を平常 時の水供給機能：NFの値 とした。これを表-1に	供給 エリア	供給 エリア Ⅰ	供給 エリア Ⅱ	供給 エリア Ⅲ	供給 エリア Ⅳ	供給 エリア Ⅴ	供給 エリア Ⅵ	供給 エリア Ⅶ	供給 エリア Ⅷ	全エリア 合計
給水量 (m ³ /日)		9,190	13,541	25,260	30,340	2,419	16,960	9,787	2,100	110,654
水栓数 (戸)		7,867	10,456	20,902	21,782	2,174	12,312	6,194	1,422	83,109

示す。

質問調査の結果、得られたデータは28被害パターンの28サンプルである。物理的被害状況を示す $D1_0$, $D2_0$, $D3_0$ および供給支障率 F_0 を表-2に示す。なお、供給支障率 F_0 は給水量 ($m^3/\text{日}$)の DF_0 , NF を用いた。

表-2に示す結果をもとに、重回帰分析により(5)式に示す b_0 , b_1 , b_2 , b_3 のパラメータ推定を行い、藤沢型供給支障サブモデル(SIM)を求める。この結果を(6)式に示す。重回帰係数は $R=0.969$ である。

(6) 式では重要施設被害率 $D3_t$ に掛かるパラメータが負になっている。これは重要施設被害に送水管被害を含めていることが考えられる。送水管には供給エリアを通過するだけで、そのエリアの供給機能に影響しない場合もあるため、供給支障率と重要施設被害率の関係が明確に示されなかったと思われる。

$$F_t = -0.020 + 4.263 D1_t + 7.370 D2_t - 1.860 D3_t \quad (6)$$

2) 復旧シミュレーション計算例

表-2 藤沢型供給支障サブモデルの構築に用いたデータ

本復旧予測モデルを用いたシミュレーション計算例を示す。図-3に初期被害分布データ、図-4に計算結果を示す。図-3に示す初期被害分布図には、供給エリア分割およびオーバーレイメッシュ番号を示している。網目で示したメッシュが被害メッシュである。配水管被害は16件、重要施設被害は4件である。重要施設被害には配水管被害の2倍の重みを付けたため総被害件数は26件となった。本予測モデルのシステムでは物理的被害の復旧過程を図-3に示すようなメッシュマップ上に

被害ハターン NO.	被害 件数	被害 メッシュ数	F	D 1	D 2	D 3
1	1	1	0.022	0.0094	0.00000	0.0000
2	1	1	0.003	0.0094	0.00000	0.0000
3	1	1	0.000	0.0094	0.00000	0.0000
4	1	1	0.037	0.0094	0.00000	0.0000
5	2	2	0.059	0.0187	0.00014	0.0000
6	2	2	0.037	0.0187	0.00017	0.0000
7	2	2	0.037	0.0187	0.00017	0.0208
8	2	2	0.033	0.0187	0.00014	0.0000
9	5	4	0.071	0.0374	0.00084	0.0417
10	5	5	0.133	0.0467	0.00133	0.0208
11	5	5	0.155	0.0467	0.00117	0.0208
12	5	5	0.200	0.0467	0.00147	0.0000
13	7	6	0.144	0.0561	0.00220	0.0208
14	7	6	0.107	0.0561	0.00203	0.0525
15	7	7	0.211	0.0654	0.00327	0.0208
16	7	7	0.266	0.0654	0.00258	0.0417
17	10	7	0.144	0.0654	0.00292	0.0417
18	10	9	0.248	0.0841	0.00570	0.0625
19	10	10	0.298	0.0935	0.00605	0.0417
20	10	10	0.410	0.0935	0.00601	0.0625
21	15	12	0.285	0.1122	0.00885	0.1042
22	15	12	0.386	0.1122	0.00888	0.0417
23	15	13	0.425	0.1215	0.01106	0.0833
24	15	12	0.568	0.1122	0.01022	0.0417
25	20	16	0.535	0.1495	0.01889	0.0833
26	20	13	0.379	0.1215	0.01077	0.1250
27	20	18	0.598	0.1682	0.02599	0.1042
28	20	17	0.810	0.1589	0.02154	0.0833

表示され、その時点での地域全体の供給支障率 P_t も示される。供給支障率の復旧シミュレーションでは、被害復旧サブモデルの復旧戦略WR、復旧作業能力WB等の初期値は固定し、総復旧作業人員WTNを変化させたときの結果を図-4に示している。

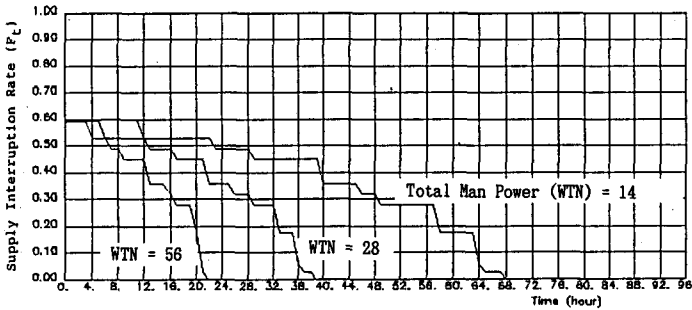


図-4 供給支障率の復旧シミュレーション計算例

4. 今後の展開

本復旧予測モデルの詳細な敏感度解析により、水道システムの耐震性に対し具体的な提案を導出した。さらに、将来は多くのシステムに拡張し、システムのタイプごとの汎用性のある予測モデルを作成して行きたい。最後に、研究の討論に参加していただいた福山大学千葉利晃助教授に感謝いたします。また、質問調査において多大な協力をしていただいた神奈川県企業庁水道局藤沢事務所飯岡副技幹に深謝いたします。なお、本研究は文部省科研費重点領域研究(1)研究代表者佐武正雄の研究助成金によるものである。

注) 本研究は星谷が全般的な研究指導を、大野がモデル化と解析を担当した。

- 【参考文献】
- 1) 星谷勝・大野春雄：『震災時ライフラインの相互影響を考慮した復旧過程の機能評価法』、土木学会論文集第386号、昭和62年10月
 - 2) 大野春雄：博士論文『ライフラインの地震災害の相互影響と機能評価に関する研究』、武蔵工業大学、昭和63年3月
 - 3) 研究代表者 佐武正雄：『都市供給施設における震害の防止・軽減並びに復旧対策に関する研究(第1年度)』、昭和63年3月

1st NO.	2nd NO.	被害種:A 被害数:B	被害種:A 被害数:B	被害種:A 被害数:B	被害種:A 被害数:B
1	2	1	0	SLP: 1	
2	1	0	0	SLP: 0	
3	11	0	1	SLP: 3	
4	17	0	1	SLP: 2	
	25	0	1	SLP: 0	
	26	0	1	SLP: 0	
	27	0	1	SLP: 0	
	28	0	1	SLP: 0	
	29	0	1	SLP: 0	
	30	0	1	SLP: 0	
	31	0	1	SLP: 0	
	32	0	1	SLP: 0	
	33	0	1	SLP: 0	
	34	0	1	SLP: 0	
	35	0	1	SLP: 0	
	36	0	1	SLP: 0	
	37	0	1	SLP: 0	
	38	0	1	SLP: 0	
	39	0	1	SLP: 0	
	40	0	1	SLP: 0	
	41	0	1	SLP: 0	
	42	0	1	SLP: 0	
	43	0	1	SLP: 0	
	44	0	1	SLP: 0	
	45	0	1	SLP: 0	
	46	0	1	SLP: 0	
	47	0	1	SLP: 0	
	48	0	1	SLP: 0	
	49	0	1	SLP: 0	
	50	0	1	SLP: 0	
	51	0	1	SLP: 0	
	52	0	1	SLP: 0	
	53	0	1	SLP: 0	
	54	0	1	SLP: 0	
	55	0	1	SLP: 0	
	56	0	1	SLP: 0	
	57	0	1	SLP: 0	
	58	0	1	SLP: 0	
	59	0	1	SLP: 0	
	60	0	1	SLP: 0	
	61	0	1	SLP: 0	
	62	0	1	SLP: 0	
	63	0	1	SLP: 0	
	64	0	1	SLP: 0	
	65	0	1	SLP: 0	
	66	0	1	SLP: 0	
	67	0	1	SLP: 0	
	68	0	1	SLP: 0	
	69	0	1	SLP: 0	
	70	0	1	SLP: 0	
	71	0	1	SLP: 0	
	72	0	1	SLP: 0	
	73	0	1	SLP: 0	
	74	0	1	SLP: 0	
	75	0	1	SLP: 0	
	76	0	1	SLP: 0	
	77	0	1	SLP: 0	
	78	0	1	SLP: 0	
	79	0	1	SLP: 0	
	80	0	1	SLP: 0	
	81	0	1	SLP: 0	
	82	0	1	SLP: 0	
	83	0	1	SLP: 0	
	84	0	1	SLP: 0	
	85	0	1	SLP: 0	
	86	0	1	SLP: 0	
	87	0	1	SLP: 0	
	88	0	1	SLP: 0	
	89	0	1	SLP: 0	
	90	0	1	SLP: 0	
	91	0	1	SLP: 0	
	92	0	1	SLP: 0	
	93	0	1	SLP: 0	
	94	0	1	SLP: 0	
	95	0	1	SLP: 0	
	96	0	1	SLP: 0	
	97	0	1	SLP: 0	
	98	0	1	SLP: 0	
	99	0	1	SLP: 0	
	100	0	1	SLP: 0	
	101	0	1	SLP: 0	
	102	0	1	SLP: 0	
	103	0	1	SLP: 0	
	104	0	1	SLP: 0	
	105	0	1	SLP: 0	
	106	0	1	SLP: 0	
	107	0	1	SLP: 0	
	108	0	1	SLP: 0	
	109	0	1	SLP: 0	
	110	0	1	SLP: 0	
	111	0	1	SLP: 0	
	112	0	1	SLP: 0	
	113	0	1	SLP: 0	
	114	0	1	SLP: 0	
	115	0	1	SLP: 0	
	116	0	1	SLP: 0	
	117	0	1	SLP: 0	
	118	0	1	SLP: 0	
	119	0	1	SLP: 0	
	120	0	1	SLP: 0	
	121	0	1	SLP: 0	
	122	0	1	SLP: 0	
	123	0	1	SLP: 0	
	124	0	1	SLP: 0	
	125	0	1	SLP: 0	
	126	0	1	SLP: 0	
	127	0	1	SLP: 0	
	128	0	1	SLP: 0	
	129	0	1	SLP: 0	
	130	0	1	SLP: 0	
	131	0	1	SLP: 0	
	132	0	1	SLP: 0	
	133	0	1	SLP: 0	
	134	0	1	SLP: 0	
	135	0	1	SLP: 0	
	136	0	1	SLP: 0	
	137	0	1	SLP: 0	
	138	0	1	SLP: 0	
	139	0	1	SLP: 0	
	140	0	1	SLP: 0	
	141	0	1	SLP: 0	
	142	0	1	SLP: 0	
	143	0	1	SLP: 0	
	144	0	1	SLP: 0	
	145	0	1	SLP: 0	
	146	0	1	SLP: 0	
	147	0	1	SLP: 0	
	148	0	1	SLP: 0	
	149	0	1	SLP: 0	
	150	0	1	SLP: 0	
	151	0	1	SLP: 0	
	152	0	1	SLP: 0	
	153	0	1	SLP: 0	
	154	0	1	SLP: 0	
	155	0	1	SLP: 0	
	156	0	1	SLP: 0	
	157	0	1	SLP: 0	
	158	0	1	SLP: 0	
	159	0	1	SLP: 0	
	160	0	1	SLP: 0	
	161	0	1	SLP: 0	
	162	0	1	SLP: 0	
	163	0	1	SLP: 0	
	164	0	1	SLP: 0	
	165	0	1	SLP: 0	
	166	0	1	SLP: 0	
	167	0	1	SLP: 0	
	168	0	1	SLP: 0	
	169	0	1	SLP: 0	
	170	0	1	SLP: 0	
	171	0	1	SLP: 0	
	172	0	1	SLP: 0	
	173	0	1	SLP: 0	
	174	0	1	SLP: 0	
	175	0	1	SLP: 0	
	176	0	1	SLP: 0	
	177	0	1	SLP: 0	
	178	0	1	SLP: 0	
	179	0	1	SLP: 0	
	180	0	1	SLP: 0	
	181	0	1	SLP: 0	
	182	0	1	SLP: 0	
	183	0	1	SLP: 0	
	184	0	1	SLP: 0	
	185	0	1	SLP: 0	
	186	0	1	SLP: 0	
	187	0	1	SLP: 0	
	188	0	1	SLP: 0	
	189	0	1	SLP: 0	
	190	0	1	SLP: 0	
	191	0	1	SLP: 0	
	192	0	1	SLP: 0	
	193	0	1	SLP: 0	
	194	0	1	SLP: 0	
	195	0	1	SLP: 0	
	196	0	1	SLP: 0	
	197	0	1	SLP: 0	
	198	0	1	SLP: 0	
	199	0	1	SLP: 0	
	200	0	1	SLP: 0	
	201	0	1	SLP: 0	
	202	0	1	SLP: 0	
	203	0	1	SLP: 0	
	204	0	1	SLP: 0	
	205	0	1	SLP: 0	
	206	0	1	SLP: 0	
	207	0	1	SLP: 0	
	208	0	1	SLP: 0	
	209	0	1	SLP: 0	
	210	0	1	SLP: 0	
	211	0	1	SLP: 0	
	212	0	1	SLP: 0	
	213	0	1	SLP: 0	
	214	0	1	SLP: 0	
	215	0	1	SLP: 0	
	216	0	1	SLP: 0	
	217	0	1	SLP: 0	
	218	0	1	SLP: 0	
	219	0	1	SLP: 0	
	220	0	1	SLP: 0	
	221	0	1	SLP: 0	
	222	0	1	SLP: 0	
	223	0	1	SLP: 0	
	224	0	1	SLP: 0	
	225	0	1	SLP: 0	
	226	0	1	SLP: 0	
	227	0	1	SLP: 0	
	228	0	1	SLP: 0	
	229	0	1	SLP: 0	
	230	0	1	SLP: 0	
	231	0	1	SLP: 0	