

東京における地震水害

丸井 信雄* 安川 浩*
 宇井 正和* 新井 邦夫*

要 約

大地震後の、2次災害（例えば火災や水災）による損失は、時として地震そのものによる損失よりも深刻となる。本研究は東京における地震水害を概観している。

破壊が浸水原因となる構造物又は施設は次の通りである。

- 1) 堰堤
- 2) 給水塔又は給水タンク
- 3) 水道管
- 4) 0 m地帯の堤防および護岸
- 5) 地下鉄、道路トンネル、地下街等地下空間の水没

東京におけるこれらの施設およびその過去の地震時における反応について概要を述べた。

1 はしがき

我国における地震に伴う水災としては、一般によく知られる津波の他、山津波による河川の塞き止め出水（善光寺地震, 1847）、震災後の大雨出水（福井地震, 1948）、あるいは地盤沈下によって形成された0 m地帯の湛水（新潟地震, 1964）等が注目されてきた。

さて、例えば東京のように産業や人口の過密によって、あらゆる空間が高度に開発され利用されている大都市に激震が襲った場合どのような水災が発生するであろうか。又予想される水災に対する最良の対策として考えられるものは何であろうか。

これらの問題の解明が我々の研究目的であるが、この論文は地震水害研究の端緒として問題点を東京を例に整理したものである。まず都市における地震水害の概念を明確にし、次に東京における地震水害の可能性のある諸施設および空間を概観し、その問題点を示す。

2 都市における地震水害の概念（図—1）

図の左に、地下水、地表水、海水に大別される水および水理施設を示した。すなわち、都市生活者は取水施設

から下水処理場までの完全に管理された水の他、堤防等の構造物や井戸を媒介とし、なかば管理された自然状態の水に接する機会を持つ。

地震後の2次災害としての都市における水害は、人間による管理から解放された水に起因する。又一般に人間生活に害を与える水は物理条件として相応の運動エネルギーか位置エネルギーを所有しているものである。言い換えれば、考える地点で、管理されている水がかなりの速度で流れているか、又はその水面が生活の場より高く、量が多いことが、地震水害の潜在的条件である。

以上をもとに図の各施設を考えてみよう。

a) 堰等で構成される下流取水施設の破壊によって生ずる水流は河道又は水路内に限定され堤内地への影響はほとんどない。

b) 浄水場および下水処理場内にある各種の池の水位は一般に地盤高に等しいか又はそれ以下であるので、壁面の破壊によって、地表に流出する水の量は少ない。

c) 下水管渠網内の水は常時流れているが、その運動エネルギーは小さく、管渠の破壊を原因として水の地表への噴出はほとんど考えられない。ただし、地下空間に隣接する部分が破壊した場合には、そこへの流入が考えられる。

* 東京都立大学都市研究センター・工学部

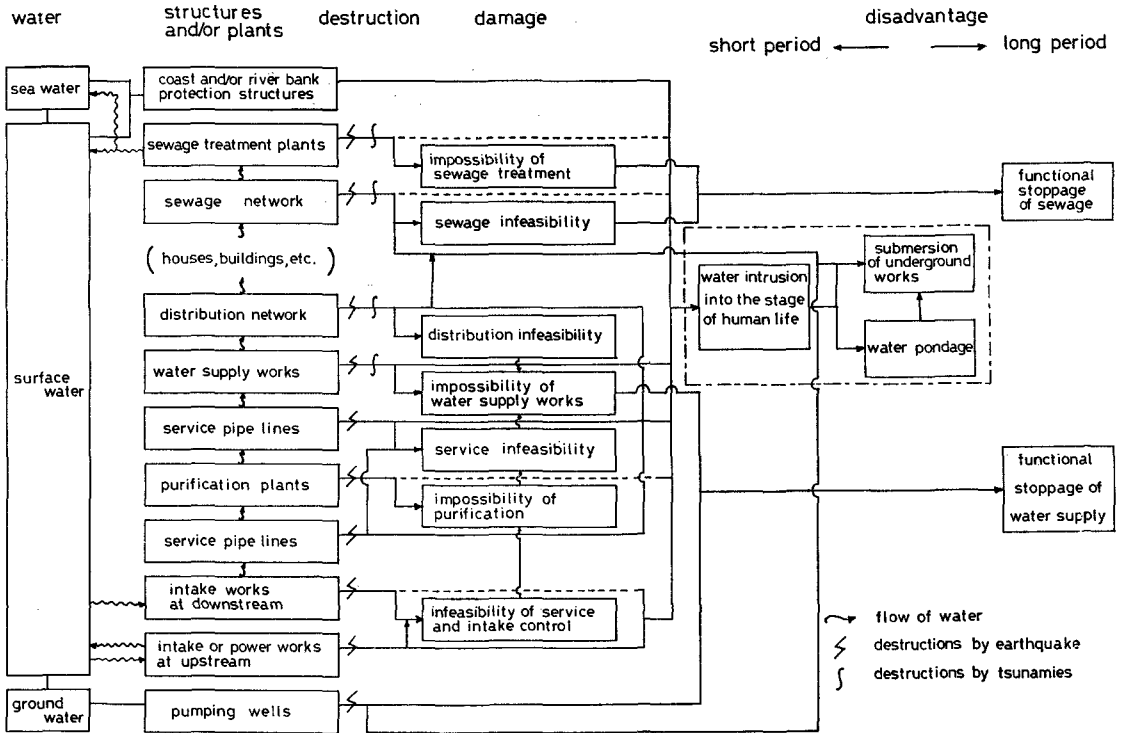


図-1 地震水害の概念

- d) 上流取水施設の貯水池および、給水場に設置されている給水タンク等に貯留されている水は大きな位置エネルギーを有している。したがってこれら構造物の破壊によって生ずる出水は水害原因となり得る。
- e) 堤防等の河海岸構造物に接する水が、例えば天井川、0m地帯のように常時周辺地盤より高い位置にある場合には、構造物が破壊すればただちに生活空間に流入してくる。
- f) 送配水管網中の水は、圧力がかけられているから、管が破裂すると地表に噴出する。ただし、さまざまな地点に設置された制水弁が事故後直ちに閉鎖されるから、水の噴出時間、噴出総水量は限定されよう。

以上の考察から、その破壊が水害原因となり得る水利構造物として、貯水池堰堤、給水タンク、0m地帯の堤防、上水道管網、地下空間に隣接した下水管渠等があることがわかる。これらの水を原因として発生する水害は現象的に、流水による破壊の他、地表湛水と地下空間への流入が考えられ、図中にこれらを一点鎖線で囲み、都市における地震水害と総称することにする。

他方、大地震によって上下水道の機能はほとんど完全にマヒする。この機能停止に関する問題は「水害」なる言葉の一般概念を越えているために、本研究では除外す

るが、被災後の復旧対策に適確さを欠くと、社会不安増大の主因の1つともなり、決しておろそかにできない。又これは事後対策さえ十分であれば、問題の大部分が解決されるはずであるから、それだけに事前の綿密な準備解析が肝要な問題であると言えよう。

3 東京において想定される地震水害

3-1 貯水池堰堤の破壊

現在東京都には4基の大堰堤がある(表-1)。小河内堰堤は、今までに国内で150基以上建設された重力式コンクリート堰堤のなかでも、その高さにおいて第3位をしめる程の大堰堤である。この種の大堰堤が決壊した例は今のところない。インドのKoyna堰堤では、1967年地震で堤頂に推定664galもの水平震度を受け、甚大な被害が発生したにもかかわらず決壊しなかった(Okamoto : 382)。国内では新潟地震における八久和堰堤が最も激しい震動(気象庁震度階V)を経験した堰堤であるようだが、ブロック間継手からの漏水が若干増大した程度の被災であった。(土木学会, 1966 : 636)。

一方土堰堤の破壊例を過去にみることは容易である。その破壊は現象的に次の4種に整理される。

表-1 東京都の堰堤

貯水池名	小河内	山口	村山上	村山下
所在地	奥多摩町原	所沢市上山口	東大和市芋窪	東大和市芋窪
竣工年月	Nov. 1957	Mar. 1934	Mar. 1924	Mar. 1927
形式	非越流型重力	心壁式アース	心壁式アース	心壁式アース
堤頂標高 (T.P.) (m)	530.0	121.7	118.6	107.9
堤高 (m)	149.0	35.0	24.2	32.6
堤頂長 (m)	353.0	690.9	318.2	587.3
堤頂幅 (m)	12.6	7.9	6.8	7.9
敷幅 (m)	131.1	184.6	163.6	181.8
上流面勾配	1:0.1	1:3	1:2.65	1:3
下流面勾配	1:0.78	1:2.5, 1:4, 1:3	1:1.9, 1:4, 1:3	1:2, 1:3, 1:3
有効水深 (m)	101.5	20.0	11.4	18.0
有効貯水量 (×10 ⁶ m ³)	185.4	19.5	3.0	11.8
余水吐	ローラーゲート 計画最大放水量 1,500m ³ /sec.	角落水門17門 越流量9.7m ³ /sec.	—	越流堰および角落 し水門3門 越流量9.7m ³ /sec.
設計震度	0.12	—	—	—

- a) 堤体沈下：基礎地盤の支持力減少や圧密によって発生する。一般に被災は堤体全体におよび、特に軟弱地盤上に築堤されたものでは原形を全くとどめない程に沈下した例も多い（土木学会，1926，1966）。
- b) クラックの発生：せん断力や不等沈下によって発生する。発生の方向により横断クラックと縦断クラックに大別される。新潟地震における調査では横断クラックの発生した土堰堤は100例のうち3例にすぎなかった（土木学会，1966：777）。
- c) ノリ面のすべりおよびはらみ出し：前記b)の縦断クラックと関連している場合が多い。上流ノリ面が破壊した場合は漏水が促進される。
- d) 付属構造物の破壊：余水ばき，取水門，樋管等付属構造物が破壊する場合。

新潟地震において14基の農業用土堰堤が決壊又は貯水不能となった。表-2に示したように樋管破壊および、横断クラック（3例のうち2例まで決壊又は使用不能）が土堰堤にとって致命的打撃であることがわかる。

村山，山口貯水池のうち村山上貯水池のみが水深15.4m（総水深16.1m）の状態で関東大震災を経験した。しかしその被害は極めて軽微であった（東京都水道局：189）。

これらの堰堤は 1) 堅固な第3系を基盤としており， 2) 完成後40～50年以上経過しているため十分に締め固

表-2 新潟地震において決壊又は貯水不能となった農業用土堰堤の破壊原因（土木学会1966）

原因	数
基礎地盤の支持力不足	1
横断クラック	2
縦断クラック	1
上流ノリ破壊	1
樋管破壊	8
不明	1
計	14

まっております。3) 平時の管理が農業用貯水池等に比べ格段に徹底している。

したがって通常考えられる地震によって破壊することはほとんど考えられない。決壊に結びつく破壊が発生するとすれば，断層運動によって横断方向にクラックが走るか，越水によって下流ノリ面が破壊されるかであろう。特に後者については，関東大震災の際，村山貯水池において，「……激震が突発するや，丈余の水柱を捲き起こし……」たという観察がある（東京都水道局：189）にもかかわらず，これに関して現在まで見るべき研究がなされていず，水理学的にも検討が急がれる課題と思われ

る。

以上述べてきた通り、東京にある堰堤の地震破壊に対する不安は少ないが、これらの決壊によって予想される水害は、水量が多いだけに極めて深刻である。特に村山、山口貯水池では都市化の進行によって堰堤直下ま

で住宅地が進出しており、破堤によって水流の影響を直接受ける柳瀬川氾域内(図-2)の、人口は、埼玉県所沢市、東京都東村山市、清瀬市、あわせて約3万人を下らない。したがって、これら地域では、堰堤決壊を考慮した避難計画をつくるために、避難余裕時間を示せるような出水計算が必要である。

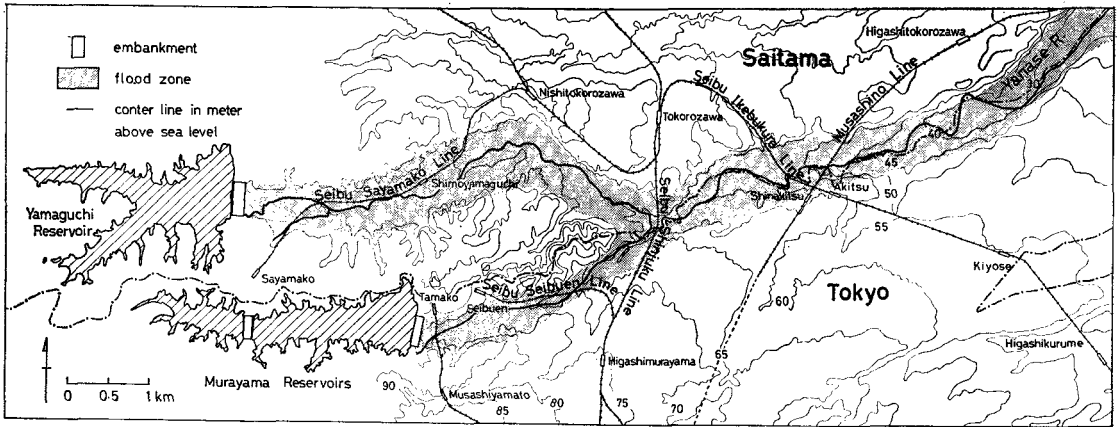


図-2 村山、山口貯水池とその出水影響域

3-2 堤防および護岸

堤防および護岸は一般に地震に弱い。関東大震災では東京中の堤防および護岸の総延長約211kmのうち、約10%に当たる20kmが被災した(土木学会, 1926:1)。当時の護岸のほとんどが石積であったから、現在の護岸に当時の被害程度をそのまま当てはめることはできない。しかしながら、現代的護岸の代表の一つである鋼矢板式護岸は新潟地震において、新潟港内約6500mのうち、950mを残し、実に85%が完全に水没した(運輸省, 1965)。この地区は地盤沈下によって0m地帯が形成され、護岸がかさ上げされていた上に、津波に対し、防潮堤の役目を果たさざるをえなかったとはいえ、10mの矢板および十分考慮したと思われるひかえ等によって構成される矢板護岸が、砂の流動化により手ひどい被災を受けたことは関係者にとって衝撃であった。

ひるがえって東京には地盤沈下によって形成された約16km²の干潮面以下の0m地帯があり、その地盤は、液化現象による流動化の危険性の大きな軟弱地盤である(運輸省, 1973)。特に隅田川と荒川放水路に挟まれたいわゆる江東三角地帯は、多数の内部河川と運河とがあり、その護岸は数次のかさ上げによって極めて不安定な状態にある(東京都, 1973)。このような下町における浸水害については、東京都防災会議により、詳細に調査研究がなされ、その結果を生かす内部河川耐震対策事業が昭和46年度から着手されている。この事業の主たる目的は、江東三

角地帯を東西に2分し、地盤の低い東半分の水路を外水から完全に遮断し、その水位をA.P.0mに維持し、西半分の水路護岸を強固な耐震構造にすることにある(図-3)。現在までにこの事業の成否を左右する扇橋閘門、木下川排水機場がほぼ完成し、付帯事業が進行している。このように、江東三角地帯の地震水害に一応の目途がついた現在は、荒川放水路以東の地域における水害について検討を急がねばならない。又同時に三角地帯内について、上記事業完成を想定した水害についての検討が必要である。

いずれにしても、水理学的には外水位の推定が重要である。現在までの研究成果によれば東京湾外に発生した津波によって東京都の海岸が影響を受けることはほとんどないと言われている(伊藤, 1970)。しかしながら関東大地震における驗潮記録によれば(図-4)、確かに波高は高々1.5m程度ではあるが、津波は襲来しているし、自然潮位より0.5~1.0m程度高い異常潮位が5~6時間継続した。湾内に震源がある場合の津波の挙動も含め、湾内の水面動揺についての解析が必要である。

3-3 給水塔および給水タンク

現在東京都水道局は9基の給水塔又は給水タンクを使用している(表-3)。これらのうち駒沢給水塔のみが関東大地震を経験したが、付帯設備に亀裂が入った程度で本体は被害を全く受けなかった(Okamoto, : 504)。新潟地震においては多数の石油タンクが地盤条件を主因

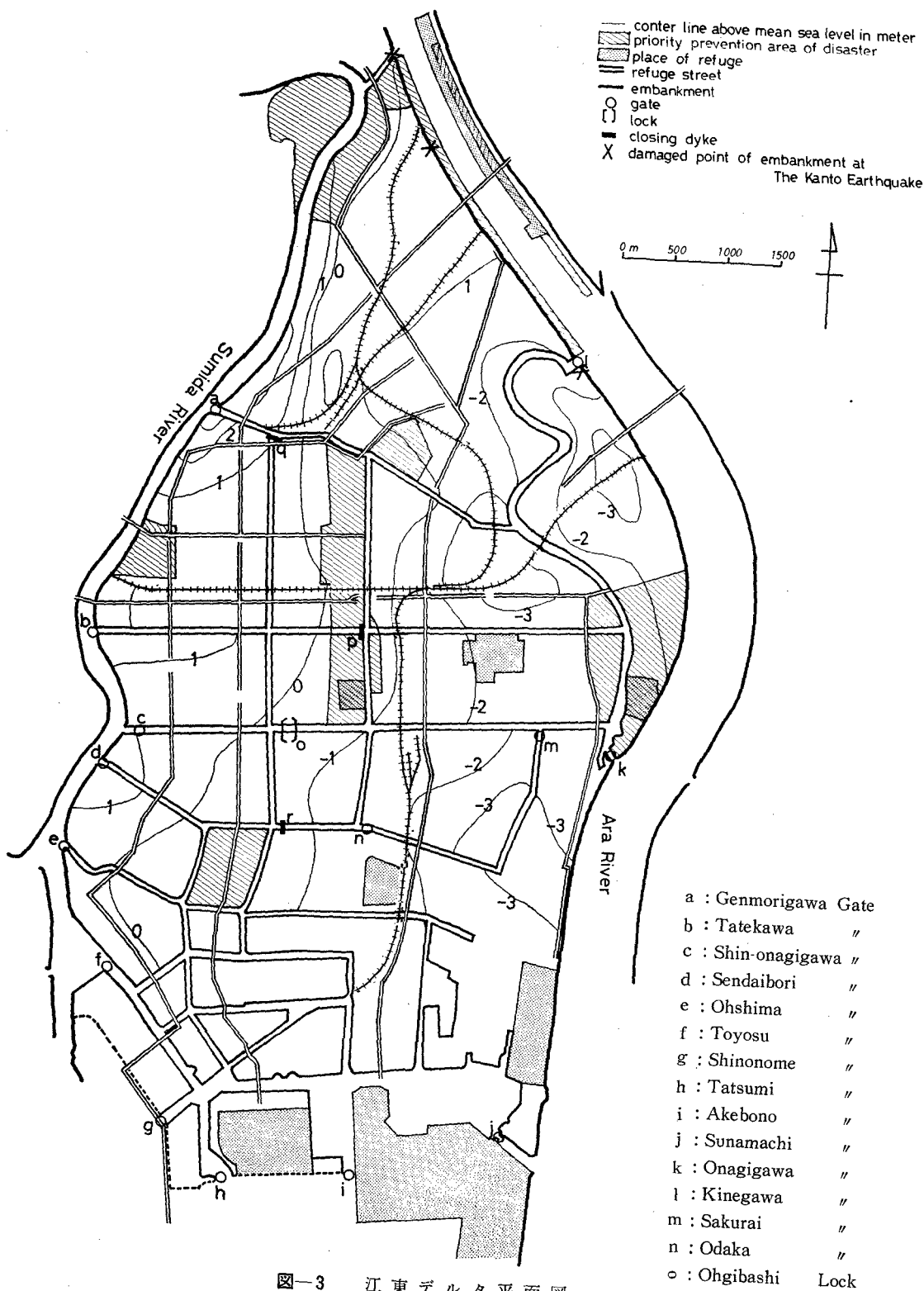


図-3 江東デルタ平面図

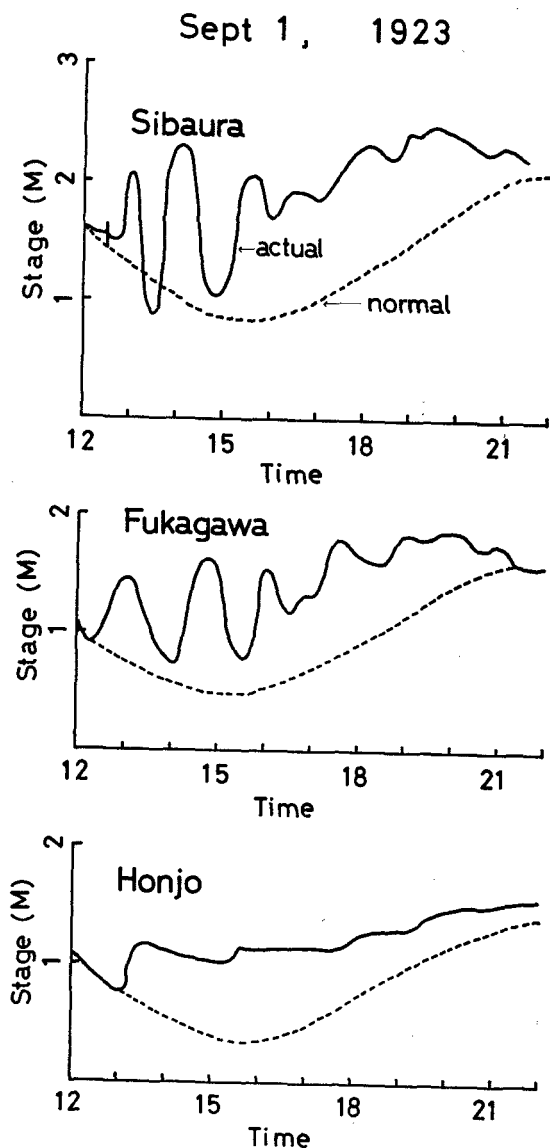


図-4 関東大地震における験潮記録

として被災し、油を流出させたが、地盤改良を施した2万 m^2 以上の大タンクはほとんど被害を受けなかった(土木学会, 1966:617)。

一般に水道施設の設計水平震度は100~300 galの範囲内で決められるが、塔状構造物等に対しては最も危険な状態になることを考慮し、400gal以上、さらに軟弱地盤地帯に設置する場合には地盤改良を義務付けている(日本上水道協会, 1966)。又水道施設の平時の管理は、著しく厳格であるから、表に示した構造物が通常考えられる地震によって破壊することはほとんど考えられない。

しかしながら、駒沢の塔が築造後50年以上経過していること、又鋼製タンクがいずれも流動化危険地帯にあり、かかる大タンクの地震による液面動揺について未解明な部分があること等の若干の不安材料もあり、現象面からの検討と同時に、破壊を想定した被害についての解析は必要であろう。

3-4 水道管

地中浅く埋設される管類も又、水道管に限らず地震に極めて弱い。新潟地震では布設延長約471 kmの水道管のうち実に68%に当る約320 kmの付け替えを余儀なくされた(土木学会, 1966:663)。又関東大震災時の東京では、直径75mm以上400mm未満の破損被害率(漏水は含まない)は0.22箇所/kmであり、400mm以上のそれは0.16であった(久保他)。現在、東京都水道局は直径100mm以上の給水管だけで約1200kmの布設延長を有している。したがって、前記の被害率を考えると、同規模の地震によって二千数百カ所以上の破損箇所が生ずることになる。当時と比べ、鋼管に順次切り替える等耐震性が考慮されているから、これ程の数にはのぼるまいが、道路舗装が完備し、ガス等の他系統の管類と複雑に錯綜して布設されているから、たとえ被害件数が少なくなったとしても、復旧には多大の資金、労力および時間を費やさざるをえまい。

図-5に関東地震における東京での管破裂又は折損箇所の位置を示した。この図からは布設密度との関係が明

表-3 都内の配水塔および配水タンク

給水場名	所在地	種別	数	総有効容積 (m^3)	完工年	地盤
駒沢	世田谷区弦巻2-41-5	鉄筋コンクリート、塔	2	9616	1924	洪積台地
馬込	大田区西馬込2-15-6	" "	2	12080	1951	"
小右衛門	足立区中央本町3-8-1	鋼製タンク	2	40000	1966	沖積低地
東小松川	江戸川区松江3-4-21	" "	1	3000	1961	"
西瑞江	江戸川区西瑞江2-12	" "	2	20000	1963	"

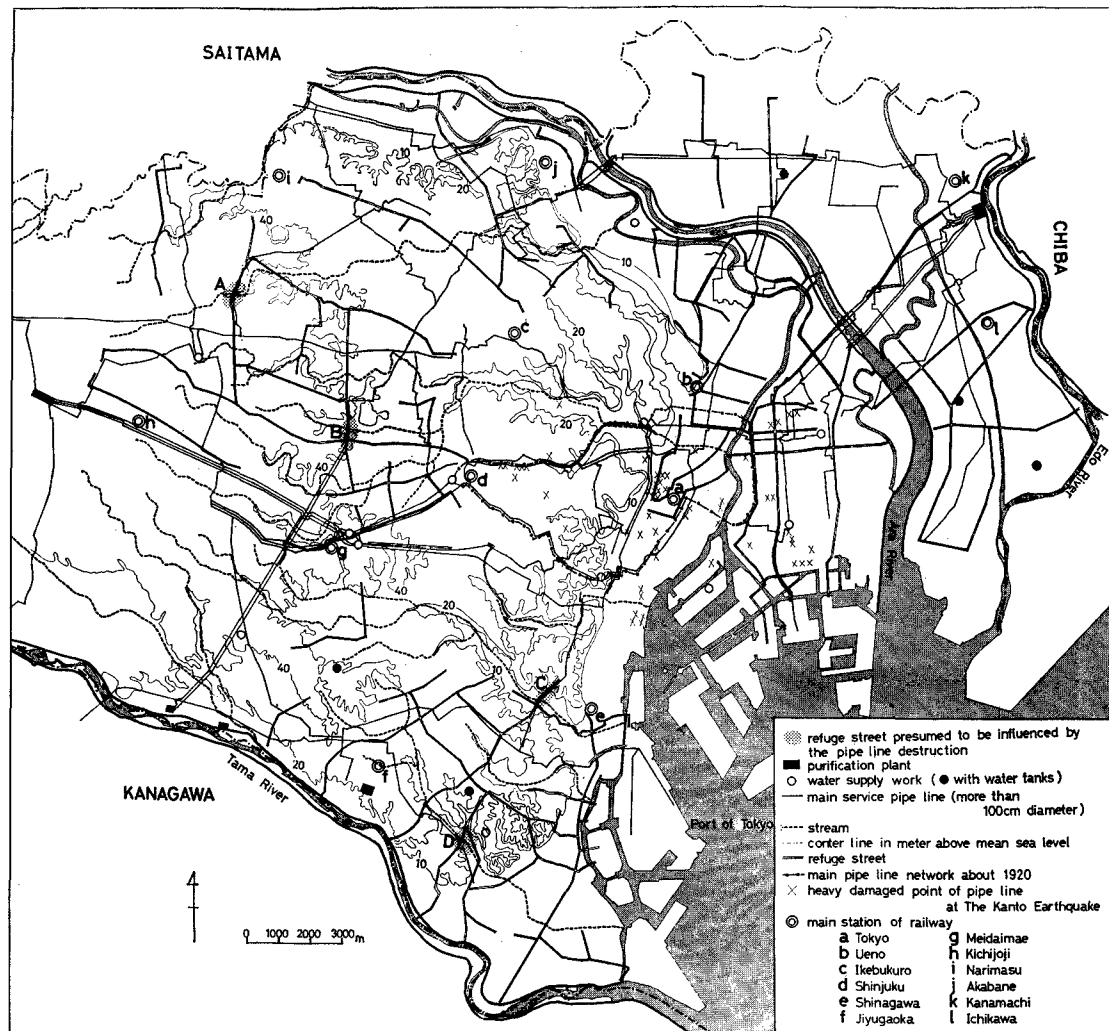


図-5 東京都内の水道管網

らかでないで、ただちに低地の被害率が大いというわけにはいかない。

久保等は、関東地震における東京について、1 kmメッシュ毎に被害率を一般化した震害系数と、平均地盤種と卓越振動数によって区別される地盤型を比較し、硬い地盤から軟かい地盤へ移行する地区の被害が大いことを指摘した。

これは水道管の耐震設計上極めて重要な指針であり、このような地点での破壊機構の解明と、破壊防止方法の研究を急ぐ必要がある。

一方浸水害の面からは、現在布設されている台地上の水道管のうち、河谷を横断するような地点について重点的に検討すればよいことになる。同じ図に現在布設されている水道管のうち直径100 cm以上の管網を示した。こ

の管網のうち、上記条件を満たす部分は、およそ90個所にのぼり、それぞれについて管破壊を想定し、浸出水の動態について検討しなければならない。

又これらの部分が重要施設に接している場合にはそれなりの注意が必要である。例えば、図中に現在設定されている避難路を示したが、A～Dと付号を付けた4カ所の避難路は、表-4に場所を示しておくが、水道管破壊の可能性の大いな所で、出水に対する配慮を忘れてはならないと考えられる。

3-5 地下空間

現在までに東京では、地下鉄道(地下部分総延長約170km)、道路トンネル(総延長約5.1km)の他主要なも

表一4 水道管破壊の影響を受ける避難路

記号	場所
A	練馬区高野台1丁目～南田中1丁目
B	杉並区高円寺北2丁目～目南2丁目
C	品川区東五反田4丁目～西五反田7丁目
D	大田区久ヶ原2丁目

のだけで13カ所も数えられる地下街等、地下空間が高度に開発、利用されている。一般に地下の地震動は地表のその $\frac{1}{2}$ ～ $\frac{1}{4}$ であると考えられており、地下構造物そのものが地震によって致命的打撃を受けることは少ないと考えられているが、地下空間は停電による暗やみ、空気汚染、パニック等地震に関して特有の不安材料を持つ都市施設である。しかも東京都防災会議が解析の前提としている大地震発生時刻(夕食時)には、この地下空間内に少なくとも数十万人の人口の存在が推定され、行政側の震災対策のなかでも重要な位置を占める。しかしながら、過去にこのような大規模な地下空間の震災を類推できるような地震はまったく存在せず、対策はおろか調査研究の糸口さえ見い出せぬまま今日に到った。したがって、まして地震水害に関しては、管理担当者ですら、十分な対策案を持っていないのが現状である。

都内の地下空間のうち最も浸水の危険性のある部分は、江東三角地帯内にある地下鉄トンネル(都営1号線、都営10号線、国鉄新総武線、営団東西線)である。これらの線では、駅出入口の止水板又は防水扉、通気口の浸水防止機、トンネル内の強制換気装置、開口部の防水壁、トンネル内の防水扉等さまざまな防止装置を取り付け、浸水に備えている(渡辺, 1971)。しかしながらこれらはいくまでも、河川氾濫、高潮等事前準備が可能な一般水害を想定して造られており、地震のような突発災害の際に、多様な装置をすべて正常に機能させるか疑問である。このために、種々の原因によって浸入する水の動態を明らかにすると共に、これら装置を機能させるための余裕時間を検討する必要がある。

都内には、上記の江東三角地帯以外にも地下鉄等のトンネルが小河川や堀に接近している部分が40カ所以上存在する。それぞれについて万一浸水が発生した場合の水の動態を検討すると同時に、都内地下空間における浸水の全体像を把握しておく必要がある。

4 水理学上の問題点

地震時において、貯水池で問題になるのは、主として壁体に及ぼす流体の動水圧であり、貯水池の大きさと地震の継続時間の短い事から推察しても、水面の動揺即ち

波が発達して、直接破壊の原因となるのは、非常にまれな事であろう。しかし、この貯水池のディメンションが小さくなったものと考えられる石油や液化ガスの貯槽の場合は、固有周期との関係上流体の動水圧と同様に、液面の波動も構造物の破壊に対して大きな役割を果たすことになる。実際新潟地震においては、この液面動揺(sloshing)による石油貯槽が大きな危険性をはらんでいるのは、その内容物が可燃性物質であることや、それらが市街地あるいはその近傍に構築されているためでもあるが、さらに石油備蓄のための海中貯油槽というような積極的な目的のために貯槽の安全性に関する検討が進められており、特に最近はこのsloshingに関連した多くの文献が発表されている。

ダム等によってせきとめられた貯水池と貯油槽内で生ずる流体運動は全て同様方法で解析されるものでありそれ自身区別されるものではないが、そこに生ずる現象の差異は、主にその容器の大きさによる固有振動数 ω_n は、 $(\frac{n\pi}{\ell} \tanh \frac{n\pi}{\ell} h \times g)^{1/2}$ で表わされるが、 $\ell = 2 \text{ km}$, $h = 50 \text{ m}$ の貯水池における次の固有周期は約3分であるのに対し、通常の貯油槽 $\ell = 20 \text{ m}$, $h = 10 \text{ m}$ の場合には5秒程度となる。(一般的に高次の固有周波数は大きな効力を持たないとされている。)

それ故この貯油槽の固有周期は通常地震の周期の範囲内にあり、これによって液面振動が共振を起す可能性を十分含んでいるわけである。共振周波数における液面動揺については微小振巾波の線型理論を基にして解析的に解かれており(曾我部他, 1974 a, b), 特に共振するまでの過渡的な波の発達状況は実験的にも十分な精度で立証されている。しかし、このような線型理論による完全共振状態の解析は、運動に対する減衰効果が小さい事(曾我部他, 1974 b)から見ても、水面変動が増大するため微小振巾波の仮定が成立しない領域に入ってくるものと考えられる。

これに比して、貯水池の場合には、固有周期が地震の周期から離れているために共振現象を起すことはほとんど無いであろうし、また、大きな水面波の生ずる可能性も薄いといえる。貯水池における水面変動は、共振が重要な問題となる貯油槽の場合とは異なり、単なる造波運動として扱うことができよう。実際、海中貯油槽の水面変動に関して高山(1976)は、固有振動数とは異なる振動数による振動応答も検討しており、理論と実験とのよい一至を見ているが、外力振動数が固有振動数から離れるにつれてその応答倍率は急激に縮小することを示している。

さらに水深が浅い場合には、水面は波というよりも、波がおしつまった状態で進行する段波の発生(Chesler, W, 1968)が、実験的に報じられているが、これらの解析は今までの線型理論では困難となり、有限振巾波として

の取り扱いが必要になる。また関東地震での“丈余の高さの波”が発生したとの記録からも、今後有限振幅波理論に基づく非線型的展開の方向に検討を進めて行く必要がある。

5 今後の課題

前節までに述べた問題総てについて形なりにも満足のいく結果を得るまでにはかなりの時間を必要とするが、さし当り次の2点に重点をおいた研究が遂行されよう。

1) 地下空間の水没：東京のごとく高度に開発された地下空間を有する都市が地震に遭遇した例はなく、そのため、他の施設に比べ地震時の水害に関する事前対策は著しく遅れているのが現状である。したがって考えられる様々な状況下における地下施設の浸水を解析的に検討し、その結果に基づく対策案を具体化しなければならない。

2) 基礎理論の確立：ほとんどの地震水害は、水理学的には、容器内の地震による水面動揺か、段波の問題に関与している。いずれも理論的に未解明な部分があり、明析な、理論講成が急がれる。

文 献 一 覧

伊藤剛・日野幹雄

1970 『東京近海における地震にともなう津波の特性について』東京都防災会議

運輸省港湾局・第1港湾建設局

1965 『新潟地震港湾被害報告』運輸省

運輸省第2港湾建設局

1973 『大都市震災対策調査報告書』運輸省

久保慶三郎・他

「地下埋設管震害の定量的解析」別刷

曾我部潔・柴田碧

1974 a 「円筒液体貯槽の液面動揺の応答 第1報」『生産研究』Vol. 26, No. 3, 東京大学

1974 b 「円筒液体貯槽の液面動揺の応答 第2報」『生産研究』Vol. 26, No. 4, 東京大学

高山知司

1976 「振動外力をうけるタンク内発生波の非定常解について」『港湾技研報告』Vol. 15, No. 2, 運輸省港湾技術研究所

東京都

1973 『地震に関する地域危険度測定調査報告書』東京都, pp. 55~71

東京都水道局

1952 『東京都水道史』東京都水道局

土木学会

1926 『大正12年関東大地震震害調査報告書 第1巻 第2編』土木学会

1966 『昭和39年新潟地震震害調査報告』土木学会日本

水道協会

1966 『水道施設基準解説』日本水道協会

渡辺時男

1971 「地下鉄と地震」『大地震』全国加除出版社
Chester, W.

1968 "Personant Oscillation of Water Waves." Proc. of Royal Society of London, Vol 36

Okamoto, S.

1973 "Introduction to Earthquake-Engineering." University of Tokyo Press.