

下水道処理場の地震に対するリスク評価に関する検討 — 現状と対策後の定量評価 —

Earthquake Risk Manegiment for Sewage Treatment
— Fixed Quantity Evaluation —

山本賢一*, 大角恒雄**, 湯浅明***, 川上哲太郎****

Kenichi Yamamoto, Tsuneo Ohsumi, Akira Yuasa, Tetsutaro Kawakami

*工修, 国際協力銀行 (〒100-8144 東京都千代田区大手町 1-4-1)

** 博士 (工学), 日本工営株式会社中央研究所 (〒300-1259 茨城県稲敷郡茅崎町稲荷原 2304)

***博士 (工学), 株式会社システムソフト (〒111-0051 東京都台東区蔵前 3-1-10)

**** 博士 (工学), 東海大学助教授, 海洋学部海洋土木工学科 (〒424-8610 静岡県清水市折戸 3-20-1)

In the process of computing risk a detail method based on the analysis of bed and texture as well as earthquake incidence rate was used in the prediction of earthquake motions. Further, a numerical analysis based on the Ground Response Acceleration Method for Buried Structures was used in the estimation of the damage of the structure. And the conventional evaluation of earthquake-resistant structures has been conducted with an exemplification structure, only considering a specific earthquake motion. In the meantime, the earthquake risk management method enables the calculation of annual risks that are acquired by adding up the risks separated for each earthquake ranges and the occurrence probability of an earthquake. This enables us to monistically compare the reinforcement plan, which contributes the quantitative evaluation of the effect for seismic reinforcement of existing structures.

Key Words: sewage treatment plant, earthquake risk, Ground Response Acceleration Method for Buried Structures, seismic reinforcement design, non-linear analyses

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震において, 下水道施設も甚大な被害を被った。特に下水道普及率が9割を超える神戸市に生じた被害は, 下水道施設が社会基盤としてのみならず環境影響への配慮の点からも非常に重要であることを認識させた。

土木学会は, 社会基盤施設の耐震設計のあり方に関して3度にわたって提言¹⁾を行い, 活断層の挙動に基づく設定地震動を耐震設計の基本としている。また, 設定地震動に対する土木構造物の設計は, 損傷を許容する変形性能照査型に移行している^{2) 3) 4) 5)}。そのため, 構造物の損傷度を定量的に評価することが必要とされている。

損傷度を合理的に評価できる手法の一つとしてリスクマネジメントを考慮したリスク評価手法がある。リスクとは, ある事柄が起こることにより生じる損害のことであり, リスクマネジメントとは, 損害が発生する前に損害の可能性をいかに減らすか, あるいはコントロールするかを検討し実行することである⁶⁾。リスクマネジメントを考慮したリスク評価は, 設計者が発生しうる地震動すべてを考慮したうえで意志決定を客観的に行えることが特徴である。他方, リスク

評価は, 絶対安全な構造物はできないということを前提に, 地震による被害のリスクを対象としているため, 社会基盤施設の設計, 計画, 建設及び維持管理における実務にあたって, これまであまり表立った評価をされてこなかった経緯がある。

以上のことを踏まえて, 下水道施設構造物の耐震診断及び補強方法の選定について地震リスクマネジメントの概念を導入し, 「耐震設計基準をいかに強化してもその効果には限界がある」ということを前提に, 地震時の機能分析に基づいた効果的な対策を検討する手法を提案するものである。具体的には, 下水処理場での根幹施設である水処理槽 (要素構造物) を選定し, その現状及び耐震補強後の損傷度, 補強費・補修費の算定方法, およびリスク分析による耐震補強の効果の評価方法について例示をもって述べる。

なお, 本手法は, 1次診断に用いる評価手法と位置づけ提案を行った。よって, 実務的でありながら短時間で評価が可能な手法であることを前提としている。本手法により, 詳細な評価が必要と判断された場合は, 構造物の損傷モデル⁷⁾を考慮した手法, またはイベントツリー⁸⁾やフォルトツリー⁹⁾を考慮したより詳細な方法等により2次診断を実施し, 対象構造物の耐震性能が評価されるものとする。

2. 水処理槽の地震リスク評価手法の概要

要素構造物に対する耐震補強の選定フローを図-1に示す。

水処理槽の代表的な構造は、半地下構造物である水槽と地中からある程度突出した構造物である建屋が一体化した2重覆蓋構造物である。2重覆蓋構造物は、土木構造物の中でも特殊な構造である。

選定フローの①については、図-2に示す構造物を選定した。この断面は下水処理場としては国内外で最大断面に属する大きさである。

②③については、対象地点の過年度地震活動記録から対象地点における地震動強さとその発生確率を算出した。また、従来の地震リスク評価では、大きさがゼロから無限大の地震動による評価を行っていたが、本手法では、3レベルの地震動を設定する（以下、これらを発生確率の小さい方からレベルA、レベルB、レベルC地震動とする）。これらの地震動は、現在の耐震設計及び実務面を考慮して、レベルA地震動を処理場供用期間内に1～2度発生する確率を持つ地震動、レベルB地震動を同供用期間内に発生する確率が極めて低い強地震動、レベルC地震動を対象地点における既往最大の地震動とし、これら3レベルの地震動による算定結果を用いてリスク評価を行う手法を提案した。これは地震動により求まるリスクが本来連続的な量であるものを、3点で補間するものである。よって、補間された部分のリスクは厳密なリスクではない。しかし、レベルA、B及びC地震動が変形性能照査型設計で採用される地震動であることから、変形性能照査型設計法で設計された構造物に対しては、レベルBまたはC地震動の地震応答解析を行えば良く、また、性能照査型設計法以前に設計された構造物に対しては、レベルA地震動相当の地震荷重で設計されているため、リスク評価の際には、改めてレベルBおよびC地震動の評価を行えば良く、ともに本手法で算定される設計計算結果を用いてリスク評価が行えるという実務的なメリットがある。

④⑦については、特殊な構造である半地下構造物に適した解析手法を選定する必要がある。また、地震リスク評価で用いる解析は、最適工法の選定を行う際に反復して行われるため、簡易な手法が望ましい。さらに、耐震設計におけるレベル2地震動以上の解析であるため、構造物と地盤の非線形性、動的連成を考慮した手法であることが必要である。本研究では、半地下構造物に適用可能で、上記条件を満足する耐震計算法として非線形応答震度法を採用した。

⑤⑧については、変形性能照査型設計において損傷度を表す指標として用いられる応答塑性率により算定することにした。具体的には、応答塑性率と各費用の関係付けを行い、地震応答解析から求まる部材毎の応答塑性率から被害額を求めることにより損傷度評価

を行う。さらに、地震応答解析から求めた応答塑性率を基に耐震対策工法を選定し、対策を施した場合(⑧)についても同様の手法により損傷度評価を行う。

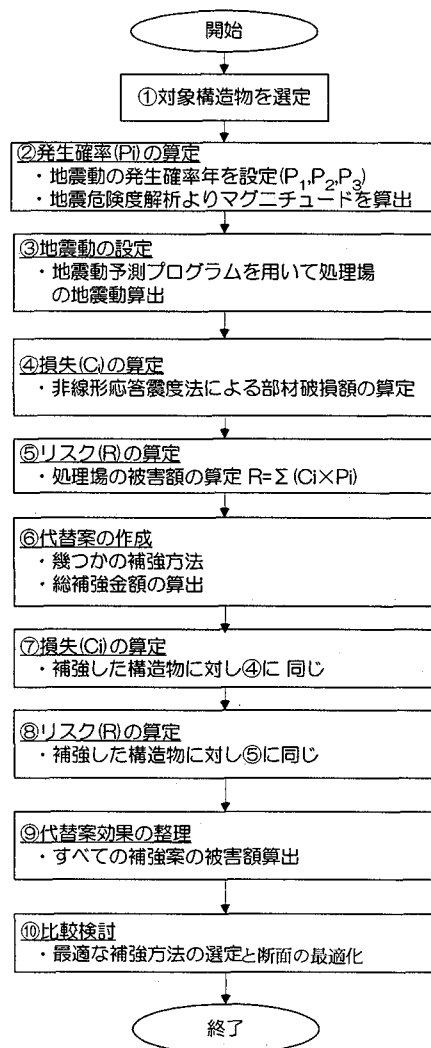


図-1 リスク評価手法による耐震補強の選定フロー

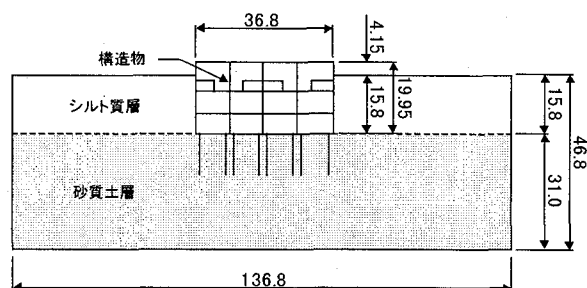


図-2 2重覆蓋構造物 (単位: m)

⑥⑨については、被害金額から既設構造物、対策案に対するリスクを算出し、リスク評価から最適な耐震対策工法を選定する。

⑩については、採用された耐震補強案に対し、断

面の最適化を行う。ここでは、設定した地震動に対し、地震応答解析を実施することにより部材毎の応答塑性率を算出するが、この応答塑性率の大きさ、発生箇所を参照することで構造物のウィーク・ポイントを把握できる。また、部材の断面または強度を変更し、地震応答解析のパラメータ・スタディを行うことで補強箇所又は強度と応答塑性率の関係を把握することができる。この情報を基に設計者は、選定した対策工法において既設断面を最適な断面に近づけることができる。

次節以降に、上記フローの各ステップについて具体的に述べる。

3. 断層モデルに基づく地震動の策定

地震動予測は代表地震動をレベル A 地震動、レベル B 地震動、レベル C 地震動（以下 A, B, C 地震動とする）の 3 レベルとし、波形を次のように決定した。まず、地震危険度解析を行い、対象地震の発生頻度（発生確率：P）と当該地点に起こりうる地震規模（マグニチュード：M）を P=30, 300, 1000 年、M=7.0, 7.9, 8.3 と算定した。そのうえで、地震動波形は南関東地震を想定し、著者らの一人が研究・作成した図-3 に示す原田・大角の断層モデルに基づく地震動算定システム^{9),10)}により人工地震動波形を作成した。耐震基盤での最大加速度はそれぞれ 99m/s², 680 m/s², 800 m/s²となる。

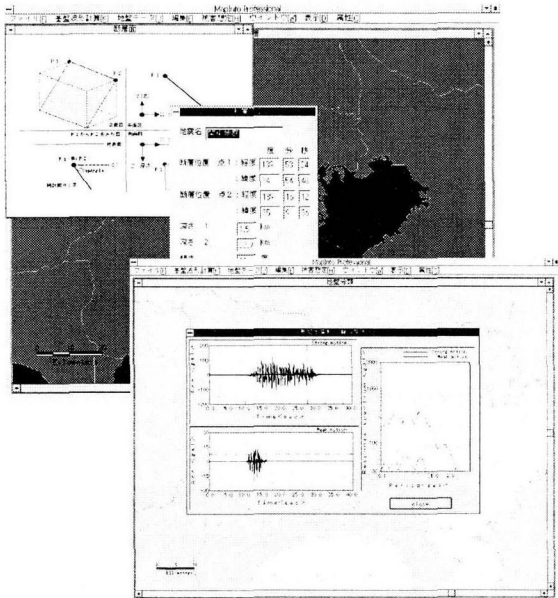


図-3 地震動作成システム¹⁰⁾

4. 非線形応答震度法の解析手法

地盤と構造物の非線形性が卓越するレベル 2 地震動以上による耐震計算を行う場合の問題点として、地盤と構造物の非線形特性と非線形性が反映された荷重

（震度）を考慮する必要がある。本手法で用いる非線形応答震度法¹¹⁾は、本研究用に研究・開発した手法で表-1 のようにこれらを考慮している。

表-1 非線形応答震度法のモデル化

	非線形モデル	荷重
地盤	1 次元 R-0 モデルによる割線剛性	1 次元 R-0 モデルによる応答加速度
構造物	バイリニアモデル	応答スペクトルによる固有値の震度

材料モデルとして、地盤に修正 Ramberg-Osgood モデル¹²⁾による 1 次元土柱モデルから時刻歴計算によって求めた最小割線剛性を用いた線形モデルを、構造物に降伏モーメントを折れ曲がり点とするバイリニアモデルを各々採用している。

また、荷重である震度に、上記の 1 次元土柱モデルによる解析から求められる構造物上下間の相対変位が最大となる時刻における地盤の加速度あるいは慣性力を採用し、地盤に作用させた。

構造物の震度については、半地下構造物であるため、1 次元土柱モデルによる解析から構造物底板位置での加速度応答スペクトルを算定し、構造物の固有周期の応答加速度を構造物頂部の震度とし、地盤の震度を構造物底板での震度として、両者の間は直線補間した震度を荷重として作用させた。

5. 耐震補強の選定方法

(1) リスクの算定

本論文では期待費用をリスクとし、年当りのリスクを評価する。年間リスクは何点が設定した発生確率ごとの地震動の大きさに対する被害額を求めることで算出する。年間リスクの算出過程¹³⁾を図-4～図-6 に示す。まず、発生確率ごとの地震動の強さを設定する（図-4）。次に現状（無補強時）及び補強時について被害額を地震動の大きさ毎に算定する（図-5）。具体的な被害額の算定方法は後述する。

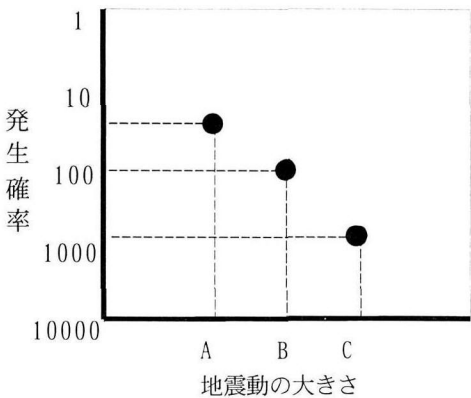


図-4 地震動の発生確率

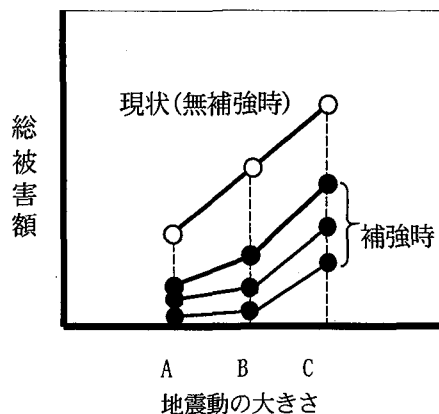


図-5 地震動毎の総被害額

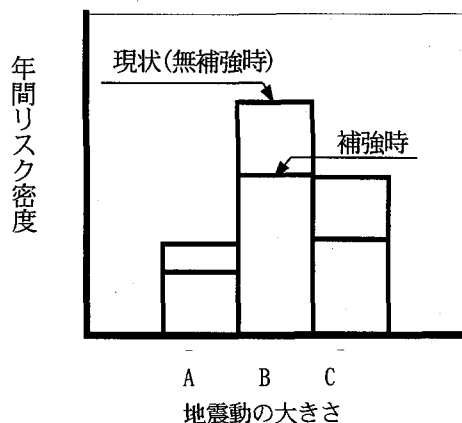


図-6 地震動毎の年間リスク密度

現状（無補強時）及び耐震補強を行った場合のリスク R は図-6 および式(1)に示す各リスクの和として求められる。

$$R = \sum_{i=1 \sim 3} (P_i \times C_i) + p \times E \quad (1)$$

ここに、 P_i : A, B, C 地震動の発生確率 ($i=1, 2, 3$) ,
 C_i : 現状（無補強時）の A, B, C 地震動による総補修費、
 または補強を行った場合の総補修費 ($i=1, 2, 3$) ,
 p : 耐震補強を行う確率（現状 $p=0$, 補強時 $p=1$ ）,

E : 耐震補強費である。なお、 $P_i \times C_i$ は年間リスク密度といい、地震動の大きさ毎のリスクを表す。

(2) 被害額算出方法

年間リスク算出過程における被害額の算定手法は、次の(i)～(iii)の手順で行う。

- 部材毎の損傷レベルを図-7により設定する。
- 地震応答解析より部材毎の応答塑性率を求める。
- 表-2の耐震性能毎に補修費を設定し、被害額を算定する。

なお、図-7の損傷レベルは表-3の状態を表している。

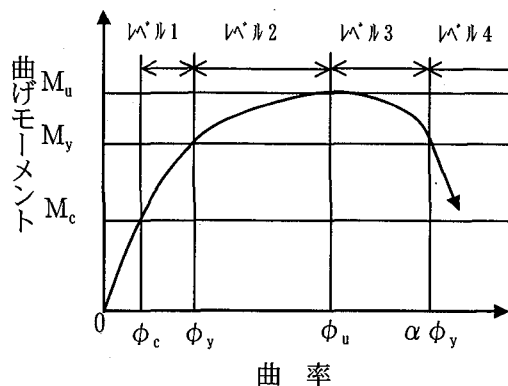


図-7 部材の損傷レベル

(3) 最適な補強工法を選択方法

ここでは実現可能な複数の耐震補強案について比較する。年当りの耐震補強の効果は次式で求められる。

$$\text{耐震補強の効果} = \text{無補強時の年間リスク}$$

$$- \text{耐震補強後の年間リスク}$$

さらに、耐震補強に伴う費用（供用年数を N 年とする）を考慮して、

$$\text{耐震補強の効果} = \text{耐震補強費} / N$$

より、複数の耐震補強案の中で、この値が最大となる耐震補強案を選定する。

表-2 耐震性能と部材損傷レベルとの関係

耐震性能	曲げ破壊モードの損傷レベル		せん断破壊モード の損傷レベル
	補修・補強が容易な部材 (スラブ・梁)	補修・補強が困難な部材 (壁・柱)	
耐震性能 1	部材損傷レベル 1		損傷なし
耐震性能 2	部材損傷レベル 2 又は 3	部材損傷レベル 2	
耐震性能 3	部材損傷レベル 3 (一部の部材で部材損傷レベル 4)		

表-3 部材の損傷レベルの基準

破壊モード	レベル	内 容	備 考
曲 げ 破 壊	損傷レベル 1	軸方向鉄筋が引張降伏に至らない状態（曲げ降伏以前）.	クラックから降伏までの範囲. 図-7 に示す $\phi_c \sim \phi_y$ 間.
	損傷レベル 2	かぶりコンクリートの圧縮破壊に至らない状態（発生荷重が最大耐力に至らない状態）.	降伏から最大耐力までの範囲. 図-7 に示す $\phi_y \sim \phi_u$ 間.
	損傷レベル 3	部材が曲げ降伏時の荷重以上の耐力を有する状態.	最大耐力から応答塑性率 10 ($\alpha=10$) までの範囲. 図-7 に示す $\phi_u \sim \alpha \phi_y$ 間.
	損傷レベル 4	部材の耐力が曲げ降伏時の荷重以下となる状態.	応答塑性率 10 以上の範囲. 図-7 に示す $\alpha \phi_y$ 以上.
せん断破壊	—	部材のせん断力がせん断耐力を越えた場合.	—

6. 適用例

前節までに述べた対象構造物（図-2 に示す水処理場）に対して、南関東地震を想定した地震リスク評価結果を以下に示す。

(1) 代替案の提案

まず、現状（無補強時）の部材の損傷度について、地震応答解析から求めた応答塑性率 1 以上の部材の個数と補修費を表-4 に示す。現状では多くの部材が損傷し補修費も大きいことがわかる。

耐震補強案は、構造物全体の耐力を高めることを目的とし、耐震性能を満足するような 2 工法を選定した（図-8、図-9）。工法①は柱・梁材にコンクリートを打増しする工法、工法②は袖壁（開口壁などの耐力壁を含む）・バットレスを用いる工法である。耐震補強費を表-4 に示す。工法①より工法②の補強費の方が 3 割程度安いことがわかる。なお、図-8、図-9 は断面図であるが、実際は奥行きを考慮してお

りスラブ・梁がある。各対策工法は適用対象部分に施している。

次に、工法①、②の断面に対し同様に地震応答解析から求めた応答塑性率 1 以上の部材の個数と補修費を表-4 に併せて示す。A 地震動の補修費は応答塑性率 1 以下（ひびわれ）の費用で、対策を施した構造の補修費は、工法①の方が工法②より高く地震被害に対する損傷が大きいことがわかる。

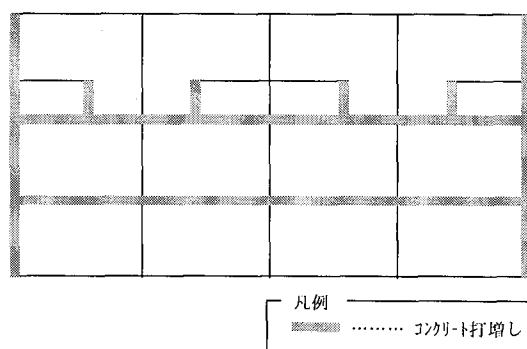


図-8 対策工法①

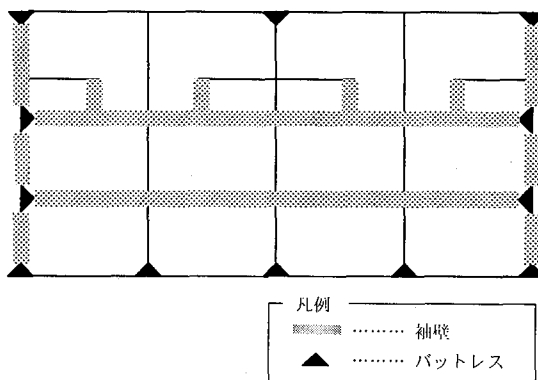


図-9 対策工法②

表-4 応答塑性率 1 以上の部材の個数と補修費/補強費

応答塑性率1以上の 部材の個数		総補修費 (円)	補強費 (円)
現状			
A地震動	0	¥65,950,000	—
B地震動	30	¥3,844,800,000	
C地震動	43	¥6,675,000,000	
工法①			
A地震動	0	¥11,480,000	¥242,699,000
B地震動	4	¥189,300,000	
C地震動	6	¥208,260,000	
工法②			
A地震動	0	¥2,418,000	¥193,296,000
B地震動	12	¥304,244,000	
C地震動	13	¥575,357,000	

(2) 最適な補強工法を選択

年間リスク密度と地震動の大きさの関係を図-10に示す。A 地震動では工法①より工法②の方が耐震補強に効果的であるが、B 地震動以上では効果が逆転しており、地震動の大きさに対し工法②の方が脆性的であると判断される。従って、工法①と工法②では年間リスク密度の面からは耐震補強としての優劣をつけることができない。

次に、年間リスクと耐震補強に対する効果を表-5に示す。供用年数 N は建設から 10 年経過したと仮定し N=40 年とした。表-5 からでは工法②の方が工法①より耐震補強の効果が大きいと判断できる。

なお、レベル 2 地震動相当である兵庫県南部地震においては 5 市の公共下水道及び 4 流域下水道が被害を受けた。その被害額の平均は 3 8 億 3 千万円¹⁴⁾であり、本手法による B 地震動による被害額 3 8 億 4 千万円とほぼ同じ値となった。

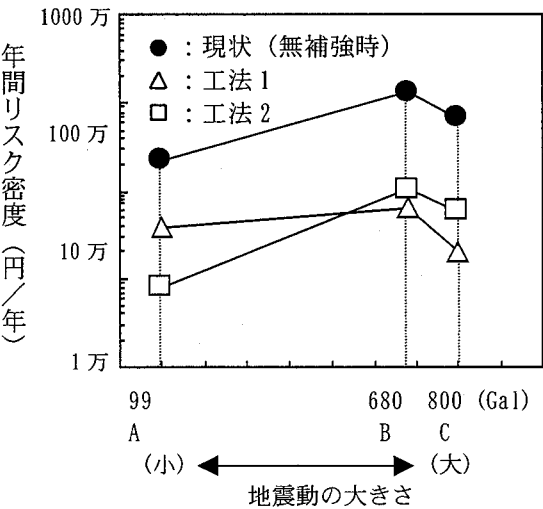


図-10 年間リスク密度

7. 補強断面の最適化

本節では地震応答解析を行い、設計条件を満足する構造を試行錯誤的に繰り返し設計を行いながら求める。一度設計が決定された後、構造の一部を修正していくが、この時に前の設計の応答塑性率を活用し変更断面の方向性を決める事ができる。また、設計者は算出されるリスクを用いることにより意思決定を客観的に行うことが出来る。

表-5 年間リスクと耐震補強に対する効果

	①無補強時の年間リスク	②耐震補強後の年間リスク	③年当りの耐震補強効果 (①-②)	④耐震補強費 (万円)	効果 ③・④/N
工法 1	2169	606	1563	24270	956
工法 2	2169	483	1686	19330	1202

(1) 最適化の方法

本手法による最適化の手順を図-11に示す。④では基本設計で求めた応答塑性率の大きさ、発生箇所からの分布から断面の変更を経験的に判断し、代替案を提案する。⑤では代替案に対し地震応答解析を行い応答塑性率、リスクを算出し代替案の効果の定量的評価を行う。以上④、⑤の作業を設計者が満足するような代替案が見つかるまで繰り返す。

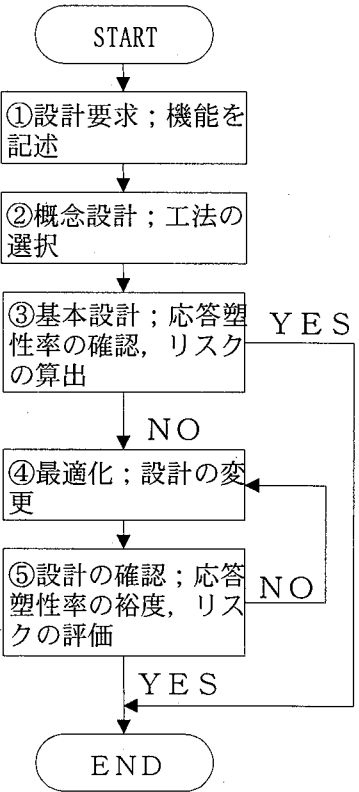
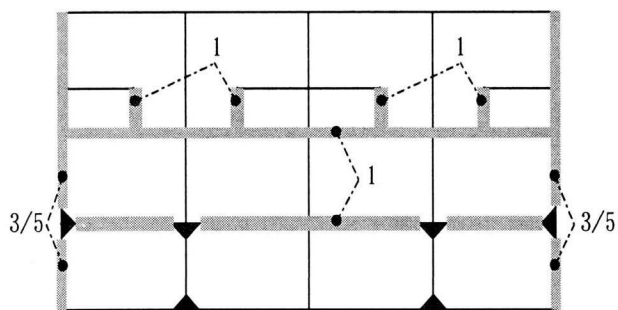


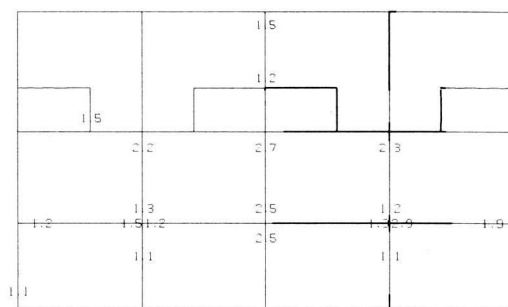
図-11 最適化の手順

(2) 最適化例

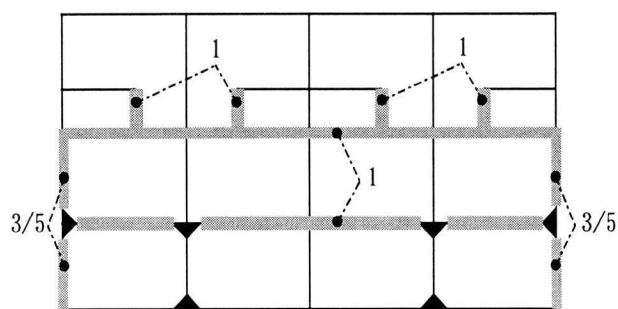
断面の変更は施工性を考え、各スパン単位の変更とした。工法①に対し最適化を行った結果とその過程(変更過程における断面とその応答塑性率の一例)を図-12 および図-13 に示す。図-13 中に示す数値は、基本設計(図-8)に対する断面強度の低減率を表す。また、袖壁などに表示された塑性率は、同断面の奥行き方向にある柱の塑性率を示している。



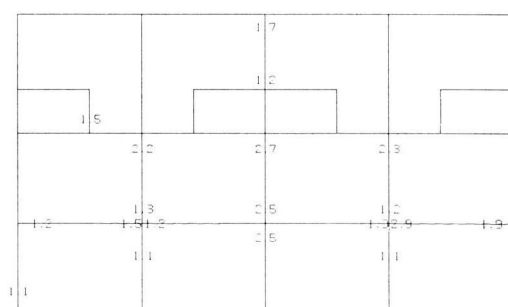
(a) 対策工法①-1



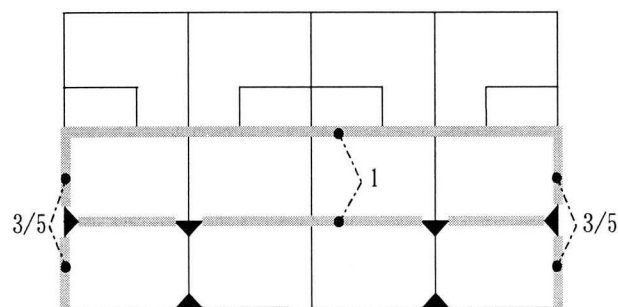
(a) 対策工法①-1 の応答塑性率



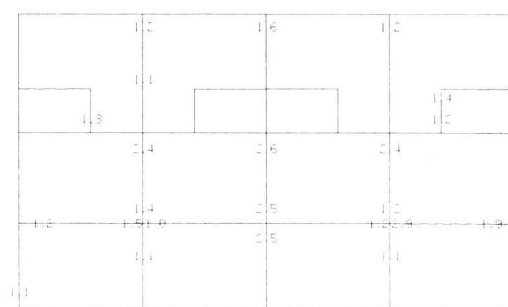
(b) 対策工法①-2



(b) 対策工法①-2 の応答塑性率



(c) 対策工法①-3



(c) 対策工法①-3 の応答塑性率

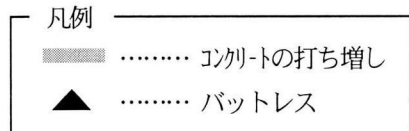


図-13 対策工法①の応答塑性率（1以上）

図-12 対策工法①の断面変更

表-6 各過程の年間リスク

	①無補強時の 年間リスク	②耐震補強後 の年間リスク	③年当りの耐 震補強効果 (①-②)	④耐震補強費 (万円)	効果 ③-④/N
工法①-1	2169	349	1820	13967	1471
工法①-2	2169	324	1845	12957	1521
工法①-3	2169	162	2007	6469	1845
工法②-3	2169	384	1785	15356	1401

基本設計から最適断面と判断した断面(図-12c)までの過程数は12ステップであった。このステップは当然設計者の経験により異なる。図-13は最適化断面における応答塑性率を示す。レベルB地震動における結果が重要と考え、同地震動による応答塑性率を示した。他のレベルの地震動に対しても耐震性能を満足していることを確認している。図-13aから図-13cの順に応答塑性率1以上の分布が広がり、荷重が構造物全体で保持される構造となっていることが確認できる。

次に、工法①の各過程の年間リスク、および比較のため工法②の最適化後年間リスクを、各々表-6に示す。表より、最適化が進むにつれ、年間リスクも減少していることが確認できる。ここまでの最適化のステップは17である。工法①-3と工法②-3の比較を行うと前者の方がリスクが小さく、より最適な代替案であると判断できる。

最後に、年間リスクを利用した最適化の各ステップの効果を図-14に示す。この図は、工法①において代替案の効果を小さい順に並べたものである。図から、工法①-1から工法①-2の最適化よりも工法①-3の最適化がより効果的であることが確認できる。設計者は、このような情報を経験として蓄積することでより効果的な最適化が可能になると考えられる。

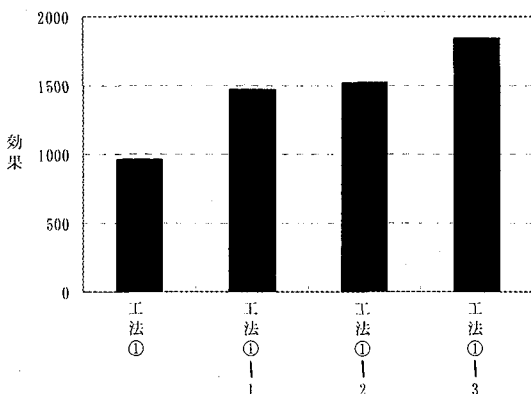


図-14 工法①における効果の比較

8. 終わりに

本研究は、地震リスクマネジメントとして下水道処理場に適用可能な地震リスク評価とそれを用いた耐震補強設計の最適化の手法を提案したものである。従来の耐震評価が特定の地震動の大きさだけを想定して実施されることにに対し、本手法では規模別の地震リスクと地震の発生確率を合積して求められる年間のリスクを簡易に算出でき、補強対策案の一次的比較が可能となることを示した。さらに、複数の耐震対策工法に対し客観的に工法を選定できることを示した。今後の公共投資には、医療の分野で行われている「インフォームド・コンセント(説明と同意)」と同様のプロセスが必要であり、事業の必要性や投資効果に対し、事業主と担当者、受益者間で十分な協議が前提となっていくものと考えられる。そのために、本稿で提案するリスクマネジメントが有効な手段となるであろう。

最後に、今後の課題として以下の事が挙げられる。第一に、本手法は実務的な手法として、被害想定は1次的被害(構造物のダメージ)を考慮し、2次的被害(機械系統や電気系統など付属設備の被害、汚水流失による疫病発生など)を考慮していない。これは、本手法が簡易に最適対策補強工法の選択ができることを目的としており、2次的被害量は1次的被害量から相関が高いものとして副次的に想定できると考えたからである。第二に、破壊が進んだ時の構造物の不静定性も考慮すべきである。第三に、ライフラインシステムの評価を行う必要がある。地震リスク評価として、本手法のように要素構造物(ポンプ場、下水処理施設といった個別の構造物)を対象とした場合と地震時のライフラインシステム(ポンプ場、下水処理施設やこれらを繋ぐ下水管など下水道システム全体、または他の処理場との連携システムなど)を対象とした場合があるが、厳密な機能評価としては、これらライフラインシステムのリスク評価を行う必要がある。以上のことは今後の主な課題と考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：土構造物の耐震設計法等に関する,第3次提言と解説 2000.6.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書（V耐震設計編）・同解説,1996.
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書（平成8年制定）・耐震設計編, 1996.
- 4) 鉄道総合研究所 編：鉄道構造物等設計標準・同解説－耐震設計,1999.
- 5) 土木学会：LNG地下タンク躯体の構造性能照査指針,1999.
- 6) 草野直幹：土木分野におけるリスクマネジメントの必要性,土木学会誌, vol.85, pp.6-8,July,2000
- 7) 星谷勝,石井清：構造物の信頼性解析,鹿島出版 pp50-95.
- 8) 中村孝明,水谷守：地震リスクマネジメントにおけるイベントツリー解析,第3回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム, pp.75-80,1995.
- 9) Ohsumi,T., Darama,H. and Harada,T. : Engineering simulation of ground motions using a seismological model, *ICOSSAR'97 (7th International Conference on Structural Safety and Reliability)*, ISBN9054109785, Vol.3, pp.1471-1478, November, Kyoto, Japan, 1997.
- 10) 大角恒雄, 山本賢一：断層モデルを考慮した地震動簡易策定システムの開発, 地盤工学会第33回地盤工学研究発表会, E-8, pp.1131-1132, 1998.
- 11) 湯浅明, 大角恒雄, 山本賢一, 川上哲太郎：下水道施設に適用する非線形応答震度法の解析手法について, 構造工学論文集, Vol. 46A, pp345-352, 2000.
- 12) Jennings,P.C.:Periodic response of a yielding structure,*Proc.ASCE*,No.EM2,pp.131- 163,1964.
- 13) Mizutani,M.: Basic Methodology of a Seismic Risk Management(SRM) Procedures, *ICOSSAR'97 (7th International Conference on Structural Safety and Reliability)*, November, Kyoto, Japan, 1997.
- 14) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会；阪神・淡路大震災調査報告, ライフライン施設の被害と復旧, 土木学会・地盤工学会・日本機械学会・日本建築学会・日本地震学会, pp.141-253

(2001 年 9 月 14 日受付)