

論文 更生工法により補修されたマンホールの耐震性能に関する解析的研究

玉井 宏樹^{*1}・片岡 宗太^{*2}・園田 佳巨^{*3}・関野 勇^{*4}

要旨：地中構造物である鉄筋コンクリート製マンホールの更生工法の1つに，セラミックタイルを既設マンホール内面に，不陸調整および目地材として耐硫酸型モルタルを用いて貼付するものがある。本論文は，更生されたマンホールに地震動が作用した場合，特に，レベル2地震動によりセラミックタイルの剥離が生じる可能性について，数値計算を行うことにより考察したものである。その結果，最大加速度が400gal以上の地震動では，セラミックタイルの剥離の可能性が確認された。

キーワード：マンホール，耐震，セラミックタイル，剥離

1. はじめに

劣化損傷した鉄筋コンクリート製マンホールの更生工法の1つに，汚泥焼却灰の有効活用を目的として，粘土と混合させて1000～1200℃の高温で焼いて製造したセラミックタイルを既設マンホール内面（劣化したコンクリート面）との間に，不陸調整および目地材として耐硫酸型モルタルを用いて貼り付けることで，劣化損傷したマンホールの更生を行うものがある。本工法は，2年前より施工されており，件数的には少ないが，1）汚泥焼却灰セラミックタイルという無機物を使用しているため，数十年間耐久性が可能で，無機物のための耐酸性，耐アルカリ性についても極めて強い，2）大型車輛等は使用せずにシンプルな道具だけでの施工が可能で，長時間の占有が困難な昨今の道路事情に適した工法である等の特長を有する。さらに，環境面から考えると，他の工法では裏止め方法として樹脂を用いており，臭気発生による周辺環境を汚染する恐れがあるが，本工法では，樹脂を用いていないため，臭気発生はほとんど起こらないなどの利点も有している。

しかし，セラミックタイルを劣化したコンク

リート面に，モルタルのみで接着する本工法の耐震性能については，十分に検討されているとは言い難く，地震時にセラミックタイルの剥離や落下が生じることが心配されている。

そこで，本研究は，更生されたマンホールに地震動が作用した場合の損傷レベルを照査するもので，特に，レベル2地震動によりセラミックタイルの剥離が生じる可能性について，有限要素法を用いた数値計算を行うことにより考察したものである。

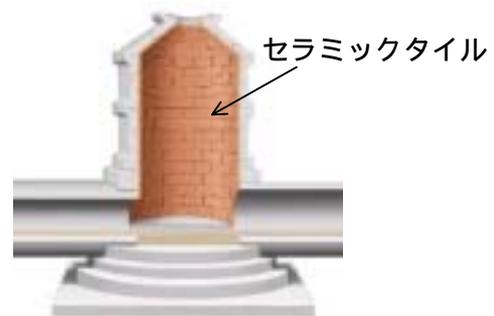


図-1 更生されたマンホール

2. 解析手法の概要

本研究では，汎用非線形構造解析プログラムであるMARC2005を用いて解析を実施した。

*1 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 博士後期課程 修(工) (正会員)

*2 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 修士課程 (正会員)

*3 九州大学大学院 工学研究院 建設デザイン部門 教授 工博 (正会員)

*4 エスジーシー下水道センター株式会社 営業部 部長 (非会員)

2.1 静的有限要素法による耐震計算法

地中構造物は周囲を地盤に囲まれているため、地震時には周囲の地盤変形に追随するように運動する。そのため、地中構造物の耐震設計は動的解析によって求めた自由地盤（地中構造物の存在を無視した地盤）の変位分布を構造物に与える応答変位法を用いることが一般的である^{1),2)}。本研究でも、まず、2次元有限要素法により自由地盤の地震応答解析を行い、それにより変位を算出し、次に、3次元有限要素法により、その変位を強制変位として構造物に与え、静的解析を行うといった手順を踏んで解析を実施した。

2.2 セラミックタイルの剥離のモデル化

補修用のセラミックタイルは、コンクリート表面に耐硫酸型モルタルを介して接着されている。付着強度に関しては、図-2(a),(b)に示すようにセラミックタイルとコンクリートの付着強度およびモルタルとコンクリートの付着強度が建研式引張試験により既に求められており、それぞれ 3.8N/mm^2 、 2.5N/mm^2 である。本研究では、両者の中で小さい値である 2.5N/mm^2 を付着強度と設定した。

本解析では、目地材である耐硫酸型モルタルを8節点ソリッド要素で表現し、式(1)に示すようにモルタル要素の壁面垂直方向応力が、モルタルとコンクリートの付着強度である 2.5N/mm^2 に達したときに要素剛性を失う判定条件を設定した。本機能は、MARC ユーザーサブルーチンを用いて定義したもので、モルタル要素の壁面垂直方向の応力が付着強度を超えた場合、剛性を失うとともに要素内に蓄積されたひずみエネルギーは失われるものとみなした。その際、当該要素は視覚的には消失したように表示される³⁾。

$$\sigma \geq \sigma_t \quad (1)$$

ここに、 σ はモルタル要素の壁面垂直方向の応力、 σ_t は付着強度を示す。

本研究では、タイル裏面のモルタル要素について、式(2)により、損傷レベルを求め、その値

が60%を超える場合、セラミックタイルが剥離したものと考えた。

$$D_d = \frac{A_d}{A} \times 100 \quad (2)$$

ここに、 D_d は損傷レベル(%), A_d は一枚のタイル裏面に位置する剛性を失ったモルタル要素の面積、 A は一枚のタイル裏面に位置するモルタル要素の初期面積を示す。

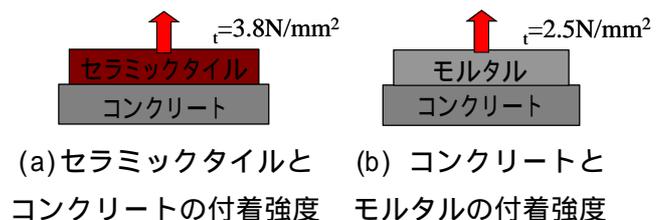


図-2 建研式引張試験により算出された付着強度

3. 更生されたマンホールの耐震計算の概要

まず、鉄筋コンクリート製マンホール本体が埋設された箇所の相対地盤変位を算出するために自然地盤の地震応答解析を行い、それにより算出された変位を用いて、鉄筋コンクリート製マンホールの静的解析を行い、耐震計算を行った。本章では、これらの解析の概要に関して順に説明する。

3.1 地盤変位解析

(1) 対象地盤

対象とする地盤は、N値を2程度とする砂質土およびN値を3程度とする粘性土の2通りを想定し、それぞれ基盤面を地表面から5mの深さに仮定した。また、表層地盤は議論を容易にするために理想化した単一層とした。

(2) 対象とした地震動

解析に用いた地震動には、レベル2相当の地震動として、図-3に示す4波形を用いた。本解析に用いる地震動は、最大加速度で区分し、Case 1は福岡県西方沖地震の行橋周辺地盤の記録で最大加速度約200galの波形、Case 2は新潟県中越地震の津南周辺地盤の記録で最大加速度約400galの波形、Case 3は北海道釧路沖地震の浦河周辺地盤の記録で最大加速度約600galの波形、Case 4は兵庫県南部地震の神戸海洋気象台の記

録で最大加速度約 800gal の波形を用い,全て NS 成分を採用した。

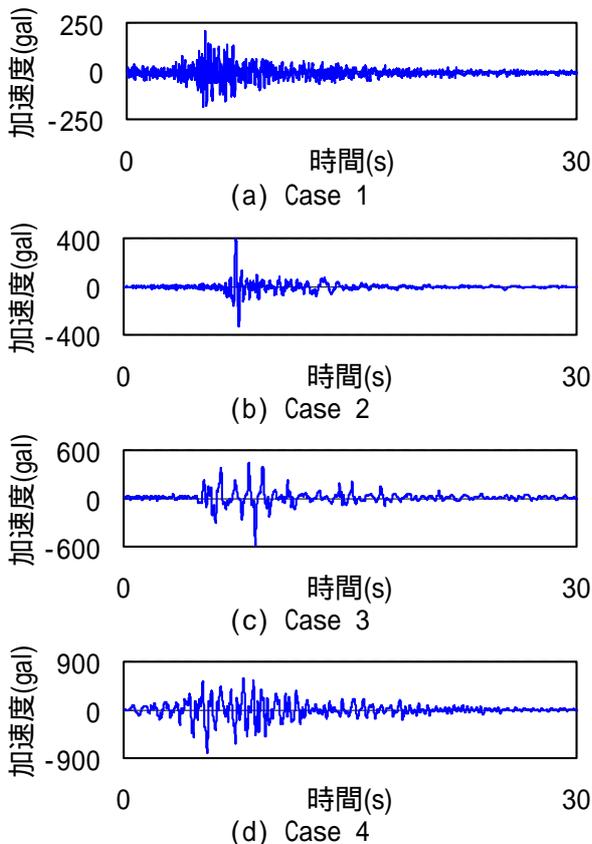


図-3 入力地震動加速度波形

(3) 解析モデル

本解析では,地盤の力学特性を線形弾性体と仮定し,平面ひずみ状態を想定した2次元アイソパラメトリック要素を用いてモデル化した。境界条件には,モデル側方の境界を水平方向自由とし,底部に基盤面に相当する剛体を配置し,その剛体に地震動を入力した。ただし,地盤モデルの底部と剛体は完全に接着しているモデルとした。また,地盤の弾性係数は,粘性土の場合には式(3)を,砂質土の場合には式(4)を用いて算定した。式(3)および(4)は土木研究所の式である⁴⁾。

$$E = 10(5N + 70) \cdot g \quad (3)$$

$$E = 70N \cdot g \quad (4)$$

ここに, E は弾性係数, N は N 値, g は重力加速度を表す。

(4) 得られた地盤応答変位

Case 1~4 の地震加速度を2種類の自然地盤モデルの基盤面にそれぞれ入力し,時刻歴応答解析により得られた応答変位のうち地盤表面部が最大となる時刻の応答変位を出力した。この応答変位は,基盤面位置を基準に相対変位で表したものである。図-4(a)に,粘性土に Case 1~4 の地震加速度を入力した際の応答変位を示す。最大加速度約 800gal の case 4 の場合,地表面での応答変位は約 27cm である。また,今回対象としたマンホールは地表面から深さ約 1.2m (図中の太線で示してある範囲)までに位置していることから,その位置における相対変位を3.2の解析の強制変位として用いた。case 4 の場合,地表面における相対変位は約 2.1cm である。砂質土に関して同様に解析により得られた応答変位を図-4(b)に示す。当然であるが,砂質土の場合は,粘性土の場合と比較して大きな応答変位値となっており,その差は,case 4 の場合で約3倍の値を示した。

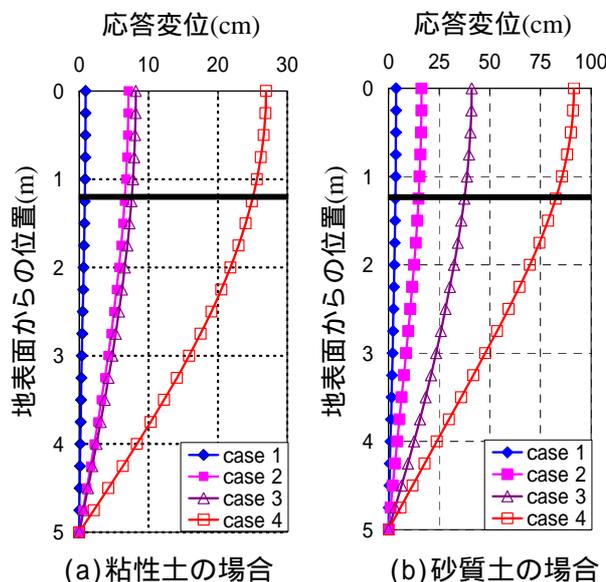


図-4 応答変位

3.2 マンホールの静的解析

(1) 解析対象

通常,図-1 に示したようにマンホール下部では下水管が接続されているが,本解析では,図-5 に示すように下水管を含まないマンホールの

みを解析対象とした。また、マンホールは鉄筋コンクリート製管であり、マンホール内側にはセラミックタイルが耐硫酸型モルタルによって貼り付けられている。モルタルの厚さは 2cm、配筋状況は、鉄筋径は全て 5mm、かぶり厚は 3cm であり、マンホール直壁部分では、主鉄筋 20 本、帯鉄筋 13 本、斜壁部分では、主鉄筋 20 本、帯鉄筋 6 本となっている。更生されたマンホールの寸法形状は、高さ 1253mm、上部内径 289mm、下部内径 430mm となっている。また、セラミックタイルは、マンホール内面に沿うように曲率を有し、厚さ 2cm、幅 30cm、高さ 15cm となっており、マンホール斜壁部分にはセラミックタイルを幅方向に半分にしたものを貼り付けている。本解析対象における補修用に貼付されるセラミックタイルの枚数は総数 80 枚である。

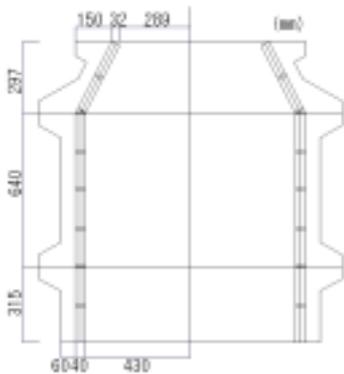
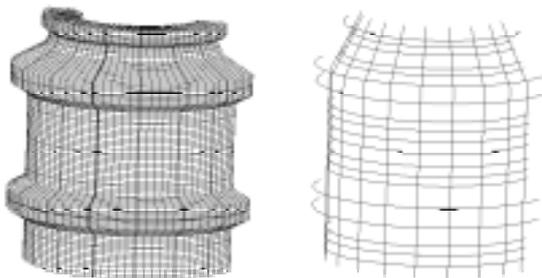


図-5 解析対象（断面図）



(a) 全体図 (b) 鉄筋要素モデル図

図-6 解析モデル図

(2) 解析モデル

図-6 に解析モデルを示す。本解析では、解析時間短縮のため、対称性を考慮した全節点数 46159、全要素数 41280 の 1/2 モデルを採用した。また、コンクリート、モルタル、セラミックタ

イルは 8 積分点を有するアイソパラメトリックソリッド要素を、鉄筋には、図-6(b)に示すようにトラス要素を用いてモデル化した。鉄筋とコンクリートの付着特性に関しては、滑り等の影響は考慮せずに完全付着を仮定した。また、境界条件として、この解析モデルの底面に位置する節点を全自由度拘束とし、3.1 により算出された構造物位置における相対変位を強制変位としてマンホール側面の各節点に与えた（図-7）。

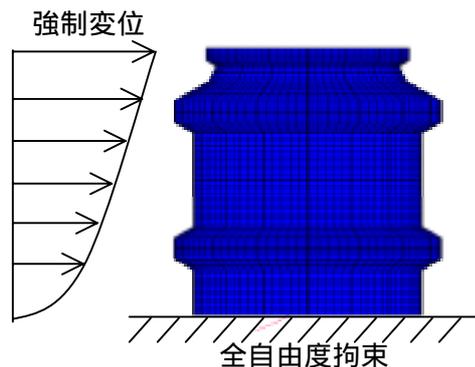


図-7 境界条件

(3) 材料物性値および構成モデル

本解析では、コンクリートおよび鉄筋は弾塑性体、モルタルおよびセラミックタイルは線形弾性体と仮定し、表-1 に示す物性値を各材料に用いた。セラミックタイルの弾性係数は、一軸圧縮試験および曲げ試験を行うことによって算出したものであるが、それ以外の材料定数に関しては、本解析においては各材料の一般的な値を採用した。

鉄筋およびコンクリートの単軸での応力-ひずみ曲線を図-8、9 に示す。鉄筋の構成モデルは、図-8 に示すように弾完全塑性型を適用した。コンクリートの構成モデルに関しては、図-9 に示すように、圧縮側は圧縮強度に達した後、ひずみ硬化係数を設定することで、剛性が 1/100 に低減するバイリニア型を、引張側には引張強度に達した後、軟化特性を有するモデルを適用した。ただし、軟化勾配 H' は 200N/mm^2 とし、引張強度に達した後、せん断剛性伝達率を 0.2 とすることで、ひび割れ発生後もせん断力を伝達するモデルとなっている。

表-1 材料特性

材料	物性値		
	コンクリート	弾性係数	20
ポアソン比		0.2	-
圧縮強度		30	N/mm ²
引張強度		3	N/mm ²
鉄筋	弾性係数	210	kN/mm ²
	ポアソン比	0.3	-
	降伏強度	300	N/mm ²
モルタル	弾性係数	18	kN/mm ²
	ポアソン比	0.2	-
セラミック タイル	弾性係数	31	kN/mm ²
	ポアソン比	0.2	-

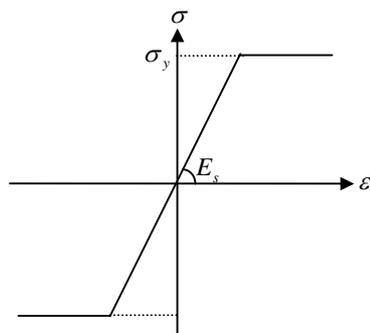


図-8 鉄筋の構成モデル

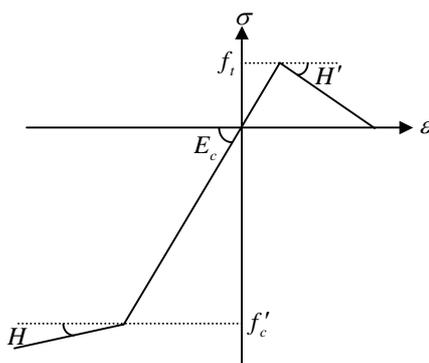


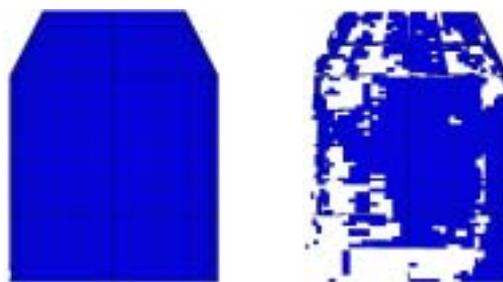
図-9 コンクリートの構成モデル

(4) 解析結果および考察

図-10 に、Case 1 および Case 4 の地震動を砂質土に与えたときのマンホール（モルタル要素のみ）の損傷状況を示す。図-10(a)より、Case 1 の地震動の場合、損傷レベル D_d が 60%を超えるセラミックタイルは無く、ほとんど損傷は見られず、セラミックタイルの剥離の可能性はない

と考えられる。また、Case 2, 3, 4 の場合、損傷レベル D_d が 60%を超えるモルタル要素が見受けられ、その中でも Case 4 の場合では、セラミックタイルは総数 80 枚中、28 枚の剥離が確認できた(図-10(b)参照)。つまり、最大加速度 400gal 相当またはそれ以上の地震動では、セラミックタイルの剥離が起こる可能性は高いものと考えられる。

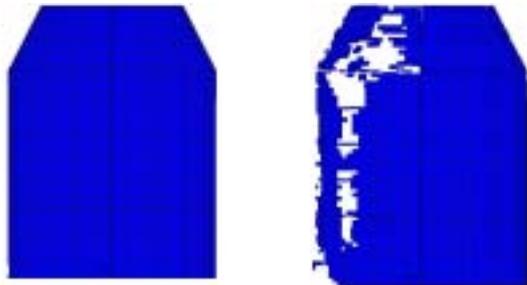
また、この際のマンホール本体（鉄筋コンクリート部）に関しては、Case 1 の場合、全自由度拘束とした底面において、引張強度を超える応力が発生している要素が少し見受けられたが、マンホール本体の性能を著しく損なうものではないと考えられる。また、Case 4 の場合では、底面に加え、マンホール内面であるモルタルとの接触部にまで引張強度を超える応力が発生している要素が見受けられた。



(a) Case 1 の場合 (b) Case 4 の場合
図-10 砂質土の場合における損傷状況

同様に、図-11 に、Case 1 および Case 4 の地震動を粘性土に与えたときのマンホールの損傷状況を示す。Case 1 の場合、図-11(a)に示すように、砂質土と同様、ほとんど損傷は見られなかった。また、Case 2, 3, 4 の場合、損傷レベル D_d が 60%を超え、剛性を失ったモルタル要素が見受けられ、特に Case 4 の場合では、セラミックタイルは総数 80 枚中、12 枚の剥離が確認できた(図-11(b)参照)。つまり、砂質土の場合と同様に、最大加速度 400gal 相当またはそれ以上の地震動では、セラミックタイルの剥離が起こる可能性は高いものと考えられる。また、マンホール本体の損傷状況に関しては、砂質土の場合

と同様に，Case 4 の場合では，底面に加え，マンホール内面であるモルタルとの接触部にまで引張強度を超える応力が発生している要素が見受けられた。



(a) Case 1 の場合 (b) Case 4 の場合

図-11 粘性土の場合における損傷状況

これらの結果をもとに，セラミックタイルの剥離状況をまとめたものを表-2 に示す。今回の計算では，比較的N値の低い自然地盤を対象とするという安全側の仮定を設けて検討を行ったこと，コンクリートにおける圧縮側の軟化を考慮していないことから，コンクリートに生じる応力を過大評価したと考えられ，セラミックタイルが剥離する可能性も実際より過大に評価されていると考えられる。

表-2 セラミックタイルの剥離結果

	砂質土	粘性土
Case 1	無損傷	無損傷
Case 2	剥離 (26%)	剥離 (19%)
Case 3	剥離 (28%)	剥離 (23%)
Case 4	剥離 (47%)	剥離 (26%)

4. 結論

本研究により得られた成果を以下に示す。

- 1) レベル2地震動によりセラミックタイルの剥離が生じる可能性を数値計算によって再現できた。
- 2) 更生されたマンホールは，最大加速度約200galの地震動であればほとんど無損傷であると考えられる。最大加速度が400gal以上の地震動では，セラミックタイルの剥離が

生じる箇所が見られ，タイルが剥離する可能性があると考えられる。特に，最大加速度が800galの地震動では，大部分のモルタル要素で付着強度以上の応力値を示しており，剥離する可能性は非常に大きいものと予測できる。

- 3) 最大加速度800galの地震動では，セラミックタイルの剥離以外に，マンホール本体の損傷も無視できないことが確認できた。

本研究では，解析対象において比較的N値の低い地盤を想定したこと，解析条件において地盤を線形弾性体として捉えたこと，マンホール底面の境界条件として全自由度を拘束したこと，圧縮側のコンクリートの構成モデルに軟化勾配を設けていないことなどを考えると，セラミックタイルの剥離の可能性を過大に評価したと言える。そこで，今後は，更にセラミックタイルが剥離するか否かの可能性を的確に評価するために，コンクリートの構成モデルの検討や，地盤，マンホールを一体化した3次元モデルを構築し，時刻歴応答解析を行う予定である。

参考文献

- 1) 大塚久哲：最新地中・基礎構造の耐震設計，初版発行，2001
- 2) (社)日本道路協会：共同溝設計指針，1986
- 3) MSC Software：MSC. MARC 2003 日本語オンラインマニュアル，2003
- 4) 建設省土木研究所トンネル研究室：トンネル掘削時地盤変状の予測・対策マニュアル(案)，土木研究所資料第3232号，pp.19，平成6年