

備蓄製品の固体群としての地震時 転倒安全限界に関する検討

寺島 博明¹・阿部 義²・長嶋 文雄³・橋本 博英⁴

¹首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 (〒192-0364 東京都八王子市南大沢一丁目一番地)
E-mail:terashima-hiroaki@c.metro-u.ac.jp

²石川島建材工業(株) (〒100-0006東京都千代田区有楽町1-12-1)
E-mail:tadashi_abe@ikk.co.jp

³首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 (〒192-0364 東京都八王子市南大沢一丁目一番地)
E-mail:fumio-n@ecomp.metro-u.ac.jp

⁴石川島建材工業(株) (〒100-0006東京都千代田区有楽町1-12-1)
E-mail:hirohide_hashimoto@ikk.co.jp

ストックヤードに不安定な状態で備蓄されている大型コンクリート2次製品(シールドトンネルセグメント)を対象にして、固体群としての耐震安全性について実験的および解析的に検討した。単体の転倒に関する知見は墓石の転倒問題等を通して得られているが、固体群の地震時転倒安全性については未だ不明な点が多く残されている。本報告では、まず単体における転倒限界加速度 α_T に関する理論的考察を行い、次に多列の場合、さらに多段の場合の α_T に関する検討を加振実験と数値シミュレーション解析を通して行い、両者の比較から固体群としての耐震安全性の基本的特性を明らかにしている。

Key Words : Seismic Turnover Safety, Stocked Solid Group, Shield Tunnel Segment, Shaking Table Test, 3D-Dynamic Analysis, Limit Turnover Acceleration

1. はじめに

大地震発生切迫性が高いとされ、そのための大規模地震対策特別措置法(昭和53年6月)が公布されて以来既に30年近く経過している南関東・東海地域には、我が国で最も工業生産量の多い京浜・東海工業地帯が存在している。平成14年4月には、東南海地震との連鎖的な地震が発生した過去の記録の分析や定点観測データの分析などにより、名古屋地区や紀伊半島東南部などが新たに強化地域として追加指定され、その強化地域は8都県236市町村へと拡張されている。このような強化地域の民間企業においては、重点的に様々な地震防災対策が採られているが、倉庫内やストックヤードに不安定な状態で積み重ねられている備蓄製品の耐震安定性を検討した例はあまり見受けられない。しかし、備蓄製品の重量によっては、備蓄製品そのものの被害に加えて、備蓄製品が崩れることによる人的被害が発生する可能性があり、また、備蓄製品を失うという1次被害の他に、復旧速度の遅延といった2次被害も発生する。

本研究では、備蓄工業製品の耐震安全性について実験的および解析的検討を行い、備蓄製品群の崩壊挙動を明らかにすることを目的としている^{1)~3)}。また、東海地区にあるコンクリート2次製品の製造工場における備蓄問題を例に挙げて、地震被害軽減策の検討を行い、常時および被災時の実践的な安全管理マニュアルの提案をすることを最終的な目的とする。

平成7年1月の兵庫県南部地震の際には、人的被害があまりにも多かったためか、または震源が比較的浅い直下型地震であり、高周波数成分の多い地震であったためと思われるが、備蓄工業製品の被害はそれほど報告されていない。しかし、南関東・東海・東南海地震は海溝型地震が想定されており、先の兵庫県南部地震に比べて長周期成分の多い地震波となり得る。

本報告は、理論による円弧状セグメントの転倒限界式の導出を行い、セグメント単体及び複数セグメントの模型実験、シミュレーション解析などを行い、備蓄製品の固体群としての地震時転倒安全性を明らかにしたものである。

2. 転倒限界加速度導出と耐震安全性の検討

(1)コンクリートセグメントの概略

本研究で取り扱うコンクリート2次製品(シールドトンネルで用いられるセグメント)のストック状況を図-1に示す。セグメントは、3本の台木(40mm×60mm×6000mm)の上に載せられているものとする。ここで D_o は弧の中心からセグメントの外側までの距離を半径とした円の直径である。 D_i は弧の中心からセグメントの内側までの距離を半径とした円の直径である。 B はセグメントの幅、 h はセグメントの桁高を表す。 ϕ はセグメントの中心角度、 d は2つの内面転倒支点間の距離を表す。 r は内面弦長を表す。 m はセグメント質量を表す。 e_o は重心位置から外面側転倒支点までの距離、 e_i は重心位置から内面側転倒支点までの距離である。代表的なセグメントタイプとして、表-1に示すように大、中、小の3タイプが候補として挙げられた。セグメントにx軸方向の水平加振を与えると、限界加速度に達するときにロッキング運動が発生するものとする。ロッキング運動の支点となる可能性があるのは、外側の台木とセグメントが接触する P_i (内面側転倒支点)と、中央の台木とセグメントが接触する P_o (外面側転倒支点)である。3タイプの内、最も扁平な形状をしている(転倒しやすい)タイプ1については転倒限界加速度の理論値と模型実験、解析シミュレーションで得られた転倒限界加速度 α_1 などとの比較を行った。

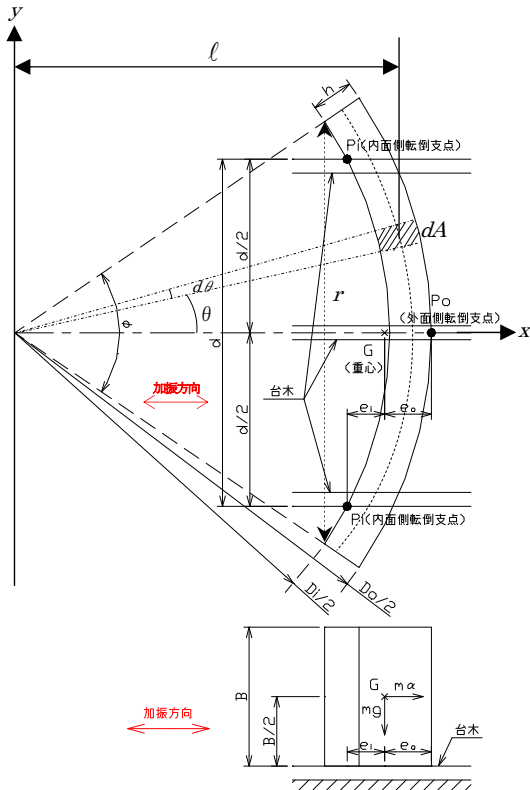


図-1 コンクリートセグメント設置状況

表-1 コンクリートセグメントの変数一覧表

変数	変数の詳細	タイプ1	タイプ2	タイプ3
D_o (mm)	セグメント外径	6600	5400	2351
D_i (mm)	セグメント内径	5960	4900	2000
B (mm)	セグメント幅	1600	1200	750
h (mm)	セグメント桁高	320	250	175
ϕ (rad)	セグメント分割角度	1.197	1.197	1.346
d (mm)	内面側転倒支点間距離	3158	2561	1047
r (mm)	内面弦長	3358	2761	1247
m (kg)	セグメント質量	4811	2312	480
e_o (mm)	重心と外面側転倒支点との偏心距離	344	276	168
e_i (mm)	重心と内面側転倒支点との偏心距離	429	335	155
g (mm/s ²)	重力加速度	9800	9800	9800
α (gal)	転倒限界加速度	422	451	405

(2)セグメントの転倒限界式の導出

転倒限界を判定する式を以下に記す。セグメントの重心位置に全質量を集中させ、加速度 α による転倒モーメント $m\alpha \times B/2$ と、抵抗モーメント mge_o 。または mge_i との大小関係を考えると、外面側に転倒する場合は式(1)、内面側に転倒する場合は式(2)の不等式が成り立つときに転倒が生じるものとする。

$$m\alpha \times \frac{B}{2} > mge_o \quad (1) \text{ 外面側に転倒する場合}$$

$$m\alpha \times \frac{B}{2} > mge_i \quad (2) \text{ 内面側に転倒する場合}$$

ここで質量 m は、次式で表される。

$$m = \pi \left\{ \left(\frac{D_o}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_i}{2} \right)^2 \right\} \times \frac{\phi}{2\pi} \times B \times \rho$$

$$= \frac{(D_o^2 - D_i^2) \phi B \rho}{8} \quad (\rho: \text{単位体積重量}) \quad (3)$$

また重心位置から外面側転倒側支点までの距離 e_o 、重心位置から内面側転倒支点までの距離 e_i は次のような手順で求められる。まず幾何学的関係より式(4)が成り立つ。

$$\left(\frac{d}{2} \right)^2 + \left\{ \frac{D_o}{2} - (e_o + e_i) \right\}^2 = \left(\frac{D_i}{2} \right)^2 \quad (4)$$

式(4)より $e_o + e_i$ は次式のように求められる。

$$e_o + e_i = \frac{D_o}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{D_i^2 - d^2} \quad (5)$$

セグメントの重心位置は次のように求められる。セグメントの微小角度を $d\theta$ 、微小部分の面積を dA とすると、弧の中心からモーメントの腕の長さは ℓ となるので式(6),(7)が成り立つ。

$$dA = \left(\frac{D_i}{2} + \frac{h}{2} \right) d\theta \times h \quad (6)$$

$$\ell = \left(\frac{D_i}{2} + \frac{h}{2} \right) \cos \theta \quad (7)$$

したがってy軸まわりの断面一次モーメント S_x は式(8)となる。

$$\begin{aligned} S_x &= 2 \int_0^{\frac{\phi}{2}} \left(\frac{D_i}{2} + \frac{h}{2} \right) d\theta \times h \times \left(\frac{D_i}{2} + \frac{h}{2} \right) \cos \theta \\ &= 2 \left(\frac{D_i}{2} + \frac{h}{2} \right)^2 \times h \times \sin \frac{\phi}{2} \end{aligned} \quad (8)$$

全断面積 A は式(9)で表される。

$$\begin{aligned} A &= 2 \int_0^{\frac{\phi}{2}} dA \\ &= 2 \int_0^{\frac{\phi}{2}} \left(\frac{D_i}{2} + \frac{h}{2} \right) \times h d\theta \\ &= \left(\frac{D_i}{2} + \frac{h}{2} \right) \times h \times \phi \end{aligned} \quad (9)$$

重心位置は断面一次モーメントを面積で除すことにより求められるので式(10)が成り立つ。

$$\begin{aligned} \frac{D_o}{2} - e_o &= \frac{S_x}{A} \\ &= \frac{2 \left(\frac{D_i}{2} + \frac{h}{2} \right)^2 \times h \times \sin \frac{\phi}{2}}{\left(\frac{D_i}{2} + \frac{h}{2} \right) \times h \times \phi} \\ &= \frac{(D_i + h)}{\phi} \sin \frac{\phi}{2} \end{aligned} \quad (10)$$

よって重心から外面側転倒支点までの距離 e_o は次式のように表される。このことから e_o はセグメント形状パラメータのみによって定まり、一定値を与えることがわかる。

$$e_o = \frac{D_o}{2} - \frac{(D_i + h)}{\phi} \sin \frac{\phi}{2} \quad (11)$$

式(5)、式(11)より e_i は式(12)で表され、セグメント形状パラメータだけでなく台木間距離 d の関数となっている。

$$e_i = \frac{(D_i + h)}{\phi} \sin \frac{\phi}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{D_i^2 - d^2} \quad (12)$$

$e_i > e_o$ のとき外面側に転倒し、 $e_o > e_i$ のとき内面側に転倒する。したがって転倒限界加速度 α_T は、不等式(1)(2)を等式に置き換え、さらに変形すると次式ようになる。

$$\alpha_T = \frac{2ge_o}{B} \quad (e_i > e_o) \quad (13) \quad \text{外面側に転倒する場合}$$

$$\alpha_T = \frac{2ge_i}{B} \quad (e_o > e_i) \quad (14) \quad \text{内面側に転倒する場合}$$

本研究で用いた3タイプのモデルでは何れも $e_i > e_o$ であるから、理論上ではセグメントは常に後方に転倒することになる。

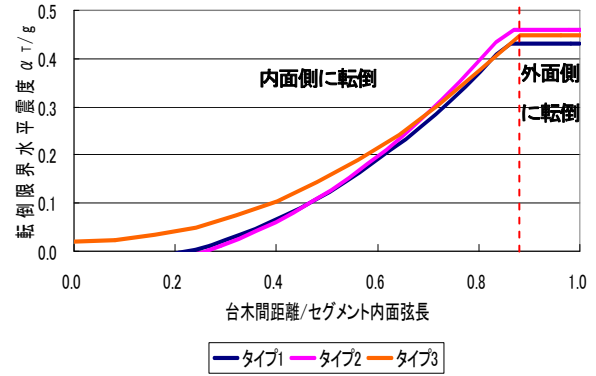


図-2 転倒限界加速度と台木間距離の関係

転倒限界加速度 α_T は、セグメントの形状が与えられるならば、台木間距離 d のみを変数として表されることがわかる。 α_T と d の関係は、 α_T を重力加速度 g で除し、 d を内面弦長 r で除すことによって無次元化すると、図-2のようになる。タイプ1、タイプ2において、台木間距離がある程度狭く、重心が内面側転倒支点より内側にある場合はセグメントを台木に載せた時点で内面側に傾き自立しなくなる。タイプ3においては、セグメント幅 B が小さいため、台木間距離が狭くなくても自立しないことはない。また、タイプ1、2では台木間距離が約0.86を超えるとセグメントは外面側に転倒するようになり、その時の転倒限界加速度は台木間距離に拘わらず一定となる。このことから、セグメントのストック時の耐震安全性はセグメント形状、及び、台木間距離により決定し、台木間距離をなるべく大きく設定することが有効であると考えられる。

次にセグメントを図-3に示すように、2段、3段に積み重ねた場合の転倒限界加速度について考える。多段に積み重ねるときはセグメントとセグメントの間に台木を置くが、その台木(板厚40mm)を無視して考える。図-3よりセグメントが一体となって動くとするとき2段、3段に積み重ねた場合の重心位置は2倍、3倍となる。したがって転倒条件は式(13)より式(15),(16)となる。

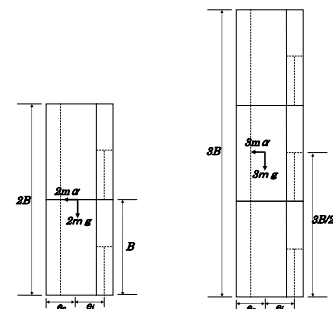


図-3 多段積みセグメントの側面図

$$2m\alpha \times B > 2mge_o \quad (15) \quad 2 \text{ 段の場合の転倒条件}$$

$$3m\alpha \times \frac{3}{2}B > 3mge_o \quad (16) \quad 3 \text{ 段の場合の転倒条件}$$

式(15),(16)から、転倒限界加速度 α_T が次式のように求められる。

$$\alpha_T = \frac{ge_o}{B} \quad (17) \quad 2 \text{ 段の場合の転倒限界加速度}$$

$$\alpha_T = \frac{2ge_o}{3B} \quad (18) \quad 3 \text{ 段の場合の転倒限界加速度}$$

転倒限界加速度は、式(13)(17)(18)より2段に積み重ねた場合は単体の1/2,3段に積み重ねた場合は1/3となる。よって例えばセグメントタイプ1では2段の場合転倒限界加速度は211gal程度、3段の場合は141gal程度となる。

3. セグメント単体における模型実験

(1)実験概要

転倒限界を明らかにする目的で 1/10 スケールモデルを用いて、最も簡単なセグメント単体における転倒実験を行った。試験状況を写真-1 に、振動台(リンク方式、最大搭載重量：1ton、水平方向最大振幅：±75mm、最大加速度：±980gal)の概要を図-4、5に示す。セグメントの挙動はレーザー変位計を用いて計測した。実験に用いたセグメント模型の諸元を表-2に示す。実験方法は、振動台に正弦波を入力し、振幅一定のまま周波数を増加させてセグメント転倒時の周波数より加速度を求めた。実験ケースとして、セグメントに与える正弦波の入射角度は0°～90°、振幅は10～75mmの組み合わせで実験を行った。

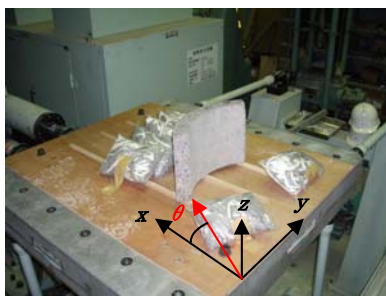


写真-1 実験状況(単体)

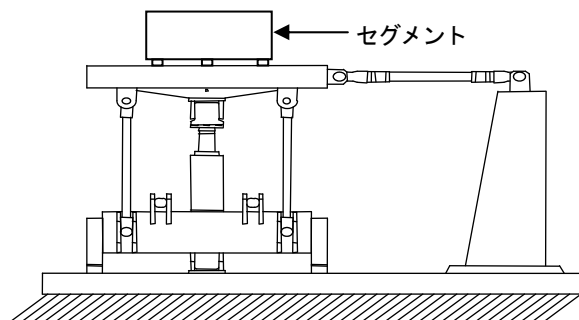


図-4 振動台図 (正面)

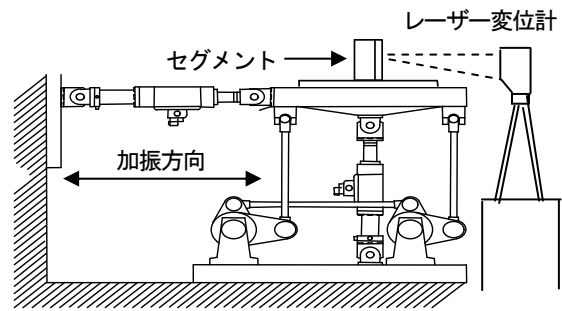


図-5 振動台図 (側面)

表-2 セグメント模型(1/10)の緒元

変数	変数の詳細	値
D_o (mm)	セグメント外径	649
D_i (mm)	セグメント内径	547
B (mm)	セグメント幅	247
h (mm)	セグメント桁高	51
ϕ (rad)	セグメント分割角度	1.346
d (mm)	内面側転倒支点間距離	341
r (mm)	内面弦長	348
m (kg)	セグメント重量	8.12
e_o (mm)	重心と外面側転倒支点との偏心距離	48
e_i (mm)	重心と内面側転倒支点との偏心距離	63
g (mm/s ²)	重力加速度	9800
α (gal)	転倒限界加速度	377

(2)実験結果

実験結果を図-6に示す。入射角が0° の場合、転倒限界加速度 α_T は227～359gal、平均値は300galとなった。これは式(13)を用いて計算された377galに比べて小さい値となった。この原因として、スケール効果や同じ供試体・台木を用いたことによって供試体の欠けや台木の磨耗等が影響していることなどが考えられる。また入射角ごとの平均転倒加速度は、入射角が大きくなるにつれて、増大していることがわかる。このことより、セグメントストック時の耐震検討は入射角0° に対してのみ考えればよいと言える。

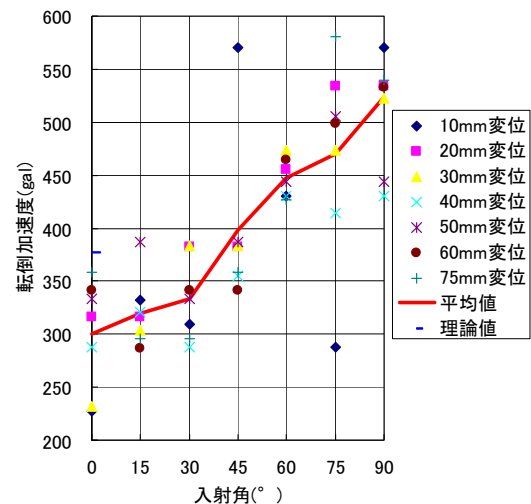


図-6 入射角と転倒加速度の関係

4. 複数セグメントによる模型実験

(1)実験概要

複数セグメントによる模型実験では、固体群としての耐震安定性を明らかにする目的で、1/8 スケールモデル ($s=1/8$) を用い、振動台による加振実験を通して、セグメントの列数、段数、加振方向などをパラメータとして検討を行った。写真-2 は2 段積み(上段、下段共に3 列)の場合の実験状況を示したものである。上段の、向かって右側セグメントが転倒しているが、例えこのように転倒に至った場合でも、天蚕糸(てぐす)によって、支える構造となっており、安全性に配慮している。また1/8 スケールモデル ($s=1/8$) の諸元を表-3 に示す。



写真-2 実験状況(2段)

表-3 セグメント模型(1/8)の緒元

変数	変数の詳細	値
$D_o(\text{mm})$	セグメント外径	825
$D_i(\text{mm})$	セグメント内径	745
$B(\text{mm})$	セグメント幅	200
$h(\text{mm})$	セグメント桁高	40
$\phi(\text{rad})$	セグメント分割角度	1.197
$d(\text{mm})$	内面側転倒支点間距離	395
$r(\text{mm})$	内面弦長	420
$m(\text{kg})$	セグメント重量	8.58
$e_o(\text{mm})$	重心と外面側転倒支点との偏心距離	43
$e_i(\text{mm})$	重心と内面側転倒支点との偏心距離	54
$g(\text{mm/s}^2)$	重力加速度	9800
$\alpha'(\text{gal})$	転倒限界加速度	422

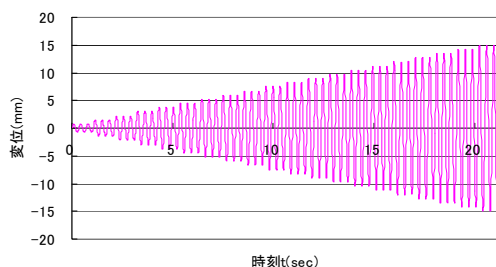


図-7 漸増型強制入力変位

振動台に図-7に示すような漸増型の正弦波(周波数一定として $\sqrt{s} = 2.828 \text{ Hz}$, 実寸では1Hz 相当)を発生させ、セグメント転倒時の振幅より α_T を求めた。振幅は3 波毎に20 段階で増加させたが、加速度では2.7gal 刻みとなる。従って最大入力加速度は約470gal となり、これはセグメント単体の転倒加速度を上回るものである。実験は各ケースに対して2 回行い、結果に違いが出た場合は3 回測定し値の近い2 回を選択し α_T の平均を求めた。本実験では、ロッキング開始時を不安定現象発生時とした。実験は単体、1 段3 列、2 段(上段3 列、下段3 列)、3 段(上段1 列、中段3 列、下段3 列)の4 ケースとした。またそれぞれのケースに対して転倒防止治具(スペーサー)を取り付けた場合の実験を行った。さらに加振方向の違いによる影響も90° 入力方向を変化させて調べることにした。

(2)実験結果

a)1 段の場合

単体の場合のロッキング開始時加速度は $\alpha_T=370\text{gal}$ 程度となった(図-8)。これは理論値(422gal)の90%弱の値である。この理由としては模型実験によるスケール効果などが考えられる。また1 段3 列では $\alpha_T=360\text{gal}$ 程度となり(図-9)、セグメントを複数並べてもほとんど α_T は変わらないことが確認できた。転倒防止治具を取り付けた場合(図-10)は加振時間全体にわたって、安定した状態が続きロッキングは起こらなかった。したがって転倒防止治具を取り付けた場合には安定性が増し、 $\alpha_T>470\text{gal}$ となることがわかった。

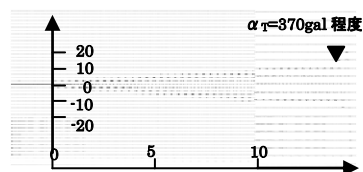


図-8 単体の実験結果

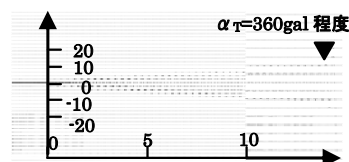


図-9 1段3列の実験結果

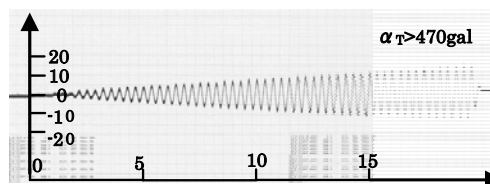


図-10 1段3列の転倒防止治具付の実験結果

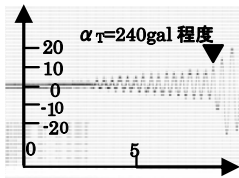


図-11 2段の結果(転倒防止治具無)

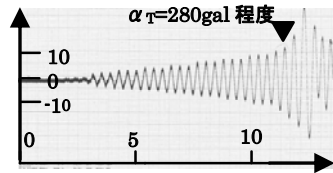


図-12 2段の結果(上段下段固定)

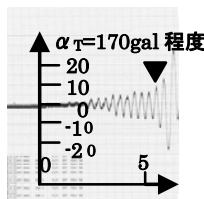


図-13 3段の結果(転倒防止治具無)

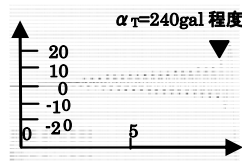


図-14 3段の結果(中段下段固定)

b)多段の場合

2段ではまず転倒防止治具を取り付けずに上段における α_T を測定した。転倒限界加速度 $\alpha_T=240\text{gal}$ 程度となった(図-11)。これは当然のことながら、単体の場合の $\alpha_T=370\text{gal}$ と比べ小さかったが、2段の理論値(211gal)よりは大きくなった。この原因として、2段においては単体の場合と比べて重心位置が上昇すること、また2段の理論計算では上下段セグメントは一体化して挙動するという条件の下に理論値が算出され、安全側の値となったことが挙げられる。上段のみに転倒防止治具を取り付けた場合は、 $\alpha_T=250\text{gal}$ 程度であり、転倒防止治具を取り付けない場合とほとんど変わらなかった。下段3列を転倒防止装置(複数のセグメント間にスペーサーを置き一体化し、耐震安全性を高めたもの)で固定した場合は $\alpha_T=230\text{gal}$ 程度でありほとんど変わらなかった。上段に転倒防止治具を取り付け下段は転倒防止装置で固定すると $\alpha_T=280\text{gal}$ 程度となり、多少 α_T は増加した(図-12)。

3段の場合で、転倒防止治具などを取り付けないときには、 $\alpha_T=170\text{gal}$ 程度となり(図-13)、3段の理論値

(141gal)を幾分上回った。3段の場合も2段の場合と同じ傾向が見られ、多段積みの場合はセグメントを一体化させて考えたときの理論値はかなり安全側の値となることがわかった。下段のみ転倒防止装置で固定したところ、 $\alpha_T=190\text{gal}$ 程度となり、中段と下段を転倒防止装置で固定した場合には、 $\alpha_T=240\text{gal}$ 程度となり安定性が向上した(図-14)。以上の結果を図-15に理論値を加えてまとめて示す。

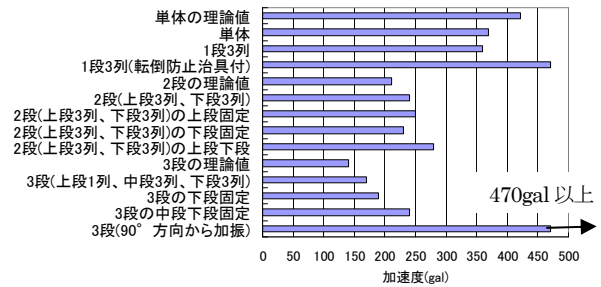


図-15 理論値と各実験の転倒加速度の比較

c)加振方向による影響

3段において加振方向を 90° 変えて実験を行った。加振時間全体にわたって、安定した状態が続きロッキングは起こらなかった。このことから $\alpha_T>470\text{gal}$ である。加振はセグメントの対称軸を含む法線方向に行えば、安全側の結果が得られることが分った。

5. シミュレーション解析

(1)解析条件

汎用解析プログラム LS-DYNA で有限要素法を用いてシミュレーション解析を行った。解析モデルはタイプ1の実物大とした。台木の全ての節点に強制入力変位を与えた。入力変位はx軸方向に与え、周波数1.0Hz、振幅40mm～200mm、3波毎に40mm刻みで増加、入力最大加速度790galとした。台木の底面の節点はx軸方向以外を拘束した。またセグメントと台木の静摩擦係数を0.6、動摩擦係数を0.2とした。その間は滑らかな指数関数によって補間されている。セグメント同士はともに0.5とした。セグメントと台木の質量密度、ヤング係数、ポアソン比といった物性値を表-4にまとめた。

表-4 セグメント及び台木の物性値

	セグメント	台木
質量密度 $R_\rho(\text{kg/mm}^3)$	2.45E-06	2.77E-07
ヤング係数 $E(\text{N/mm}^2)$	2.30E+07	1.30E+07
ポアソン比 ρ_σ	1.80E-01	1.50E-01

セグメントの要素分割数は横に14分割とした。縦の分割数は単体で1～4分割で解析を行った結果、同様な結

果が得られた。要素数が多いと計算時間が長くなるので、計算時間短縮のために、縦の分割数は1分割を採用した。台木は各セグメントとの要素接触状況をmm単位まで等しくなるように要素細分割を行った。セグメントと台木はともに弾性体とした。セグメントはロッキングを開始してから転倒するまで時間を要するが、安全性の判定基準はロッキング開始時点までの入力最大加速度とした。

(2)解析結果

a)1 段の場合

セグメント単体でのシミュレーション解析を行った後に、セグメントを3列に並べて解析を行った。その挙動と強制変位より、ロッキングは3個同時に6.70s前後に開始したと言える(図-16)。そのときの加速度は約470galである。また転倒加速度の理論値422galに近い値となった。

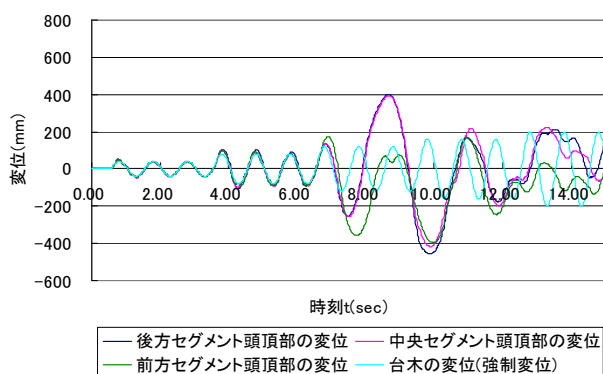


図-16 3列のセグメント頭頂部と台木の変位

b)2 段の場合(上段1列、下段3列の場合)

続いてセグメントを2段に積んで同じ強制変位を与えてシミュレーションを行った。上段に1個、下段に3個並べたモデルを図-17に示す。図-18より上段のセグメントは3.80sにロッキングを開始する。このときの加速度は約320galである。この値はセグメント単体で得られた加速度より小さく、理論値211galより大きい値となった。この結果から実験のときと同様に、2段に積むことによる重心位置の移動のみを考えると、安全側過ぎる判断となることが確認できた。下段のセグメントは9.84sに3個同時にロッキングを開始する。この時刻の加速度は約630galであり、この値は単体で得られた値の130%強となった。下段のセグメントはその上に台木やセグメントを置くことによって安定したと言える。

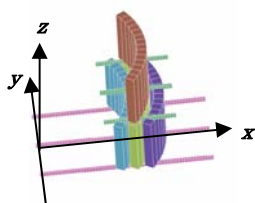


図-17 2段の解析モデル

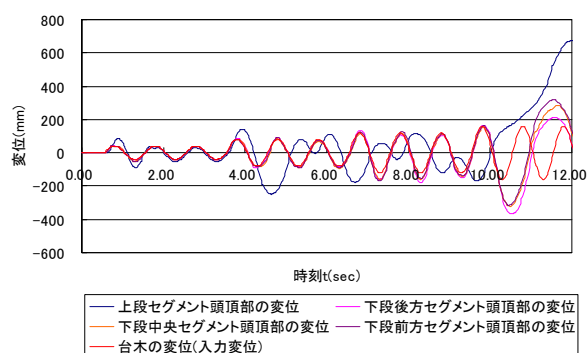


図-18 上段1個、下段3個のときの変位

c)3 段の場合(上段3列、中段3列、下段3列の場合)

次に3段に3個ずつセグメントを並べ解析を行った。図-19より上段のセグメントは0.80sでロッキングを開始し、このときの加速度は約160galである。この値は理論値141galよりも幾分大きくなった。図-20より中段は5.30sにロッキングを開始し、加速度は約320galである。図-21より下段は9.72sにロッキングを開始し、加速度は約630galである。これらは2段の上下段と同じ値となった。

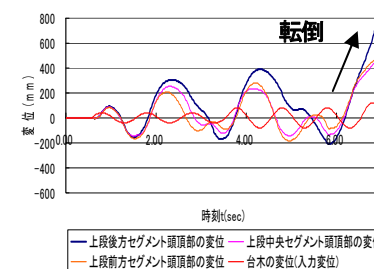


図-19 上段3個の頭頂部と台木の変位

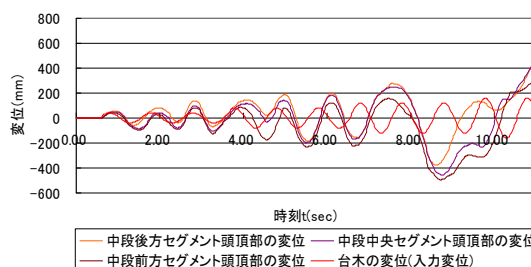


図-20 中段3個の頭頂部と台木の変位

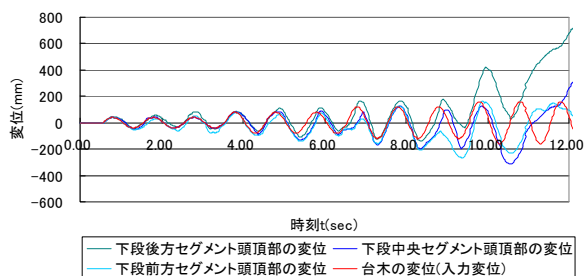


図-21 下段3個の頭頂部と台木の変位

多段に積まれたセグメントは、最上段がロッキングを開始するまでは一体となって動く。最上段がロッキングを開始した後、最上段と中下段は独立した動きとなるため、中下段は2段の場合と等しい加速度になると考えられる。

d)加振方向による影響

3 段において加振方向を 90° 変えて解析を行った。実験結果を図-22 に示すが、上段ではロッキング開始が 9.30s であり、転倒加速度は約 640gal となる。中段、下段においても同様の結果が得られた。このことからシミュレーション解析においても、セグメントを多段にしても加振はセグメントの対称軸を含む法線方向に行えば、安全側の結果が得られることを確認できた。

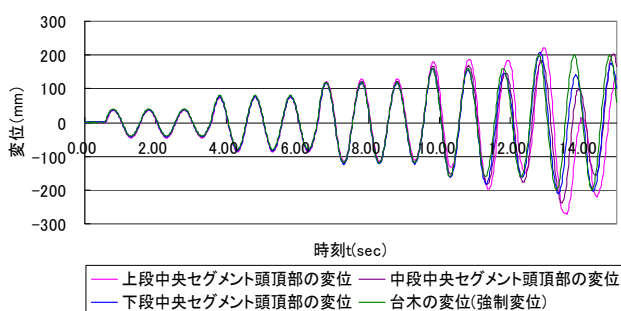


図-22 入射角 90° のときの各段中央セグメント頭頂部と台木の変位

(3)シミュレーション解析結果の考察

セグメントを多段に積み重ねると、上段のセグメントのロッキング開始時刻が単体の場合より早くなり、下段では遅くなることが確認できた。この性質を利用して転倒防止治具の工夫をすることができのかもしれない。多段積みにおいては相対的な重心位置の上昇が起これ、耐震安全性が低下する。しかし、単に重心位置の移動だけでは安定性を説明することはできない。最上段のセグメントが先にロッキング開始するので、その時点で一体化の条件が成立しなくなるからである。

6. まとめ

地震時におけるコンクリート 2 次製品(シールドトンネルセグメント)固体群としての崩壊挙動を明らかにすることを目的に、理論検討・模型実験・シミュレーション解析を行った。その成果として、円弧状のセグメントでは単体の転倒限界加速度を理論的に求め、それを基にして 2 段、3 段の転倒式を導いた。また台木間距離と転倒限界加速度との関係を明らかにした。

セグメント単体の模型実験より、ロッキング開始加速度 α_T の実験値は常に理論値を幾分下回る結果が得られた。この理由としては、スケール効果の他に、理論値がセグメントと床を完全な剛体と仮定しているのに対して、実験では台木とセグメントに弾性があることが考えられる。また表面に凹凸があること、さらには実験回数を重ねるに連れてセグメント底部の隅角部のコンクリートに多少欠落が生じること、また台木表面も多少劣化すること等も原因として考えられる。

複数セグメントの模型実験より単体と 1 段多列の場合を比較したところ、 α_T は殆ど変わらないが、多列の方が互いの接触等による緩衝効果により、転倒に至るまでの時間が長くなり、僅かであるが安定度が増す結果となった。また多段にすると、1 段の場合に比べて α_T は低くなり、積み上げた段数が増すに連れて不安定となる。この理由として、単なる重心移動だけでは説明ができないことがわかった。

また、シミュレーション解析では多段にセグメントを積むことにより、最上段からセグメントはロッキングを開始し、一体化でなく独立した動きとなることが明らかになった。上段では不安定になり、下段では安定性が増す結果が得られた。

さらに、転倒防止治具を付けた場合、 α_T が大きくなり、ある程度の耐震安全性の効果が確認された。

参考文献

- 1) 石川島建材工業(株) 阿部義、橋本博英、首都大学東京 長嶋文雄、杵築秀征「ストックヤードにおけるセグメントの耐震安全性に関する検討」土木学会第60年次学術講演会(平成17年9月)
- 2) 首都大学東京 寺島博明、長嶋文雄、石川島建材工業(株) 橋本博英、阿部義「セグメントの多段積み備蓄時耐震安全性に関するシミュレーション解析」土木学会第61年次学術講演会(平成18年9月)
- 3) 首都大学東京 寺島博明、長嶋文雄 石川島建材工業(株) 橋本博英、阿部義「セグメントの備蓄時耐震安全性に関する振動台実験」土木学会第61年次学術講演会(平成18年9月)

(2007. 6.29 受付)