

(52) 高盛土造成地盤の地震時挙動解析

京都大学防災研究所 正会員 土岐 憲三
 榑鴻池組 土木本部 正会員 嶋村 貞夫
 榑鴻池組 土木本部 正会員○河西 寛
 榑銭高組技術研究所 正会員 尾儀 一郎

1. はじめに 近年、山岳空港等において最大盛土高が 50m 以上で、その盛土幅が 400m にもおよぶような盛土構造物が建設されるようになってきており、そのほとんどで複数の盛土材を用いたゾーニング工法が採用されている。このような高盛土造成地盤の地震時挙動の特徴を把握しておくことは、その耐震性の検討を行う上で重要なことと考えられる。

本研究では、このような複数の盛土材によってゾーニングされた高盛土造成地盤が、地震時にどのような挙動を示すのか、また、その挙動や安定性がゾーニングの方法や入力地震動の違いによりどのように異なるのか、2次元有限要素法を用いた地震応答解析により検討を行った。地震応答解析では、のり面崩壊に代表される盛土構造物の地震時被害状況などをできるだけ忠実に表現するため、地盤の降伏といった材料非線形性と接触面などでの剝離や滑動といった構造非線形性を考慮した¹⁾。また、これらの地震応答解析により明らかになった高盛土造成地盤の地震時挙動を、ジョイント要素を配置した静的な震度解析でどの程度表現することができるのか検討を加えた。

2. 解析モデル 解析の対象とした高盛土造成地盤は、新秋田・釧路・新青森・新岡山・新高松の各山岳空港施工例²⁾を参考に想定したもので、その断面形状およびゾーニング方法を図-1に示す。断面形状は、実施工例よりひと回り大きな、最大盛土高75m、盛土幅 450mとした。使用する盛土材は、N値が 5程度の普通土(砂)、10程度の良質土(砂)および20程度のロック材の3種類とし、これらの盛土材によるゾーニング方法として、A~Cの3種類を設定した。Aはのり面をロック材で被覆し、その奥と滑走路部に良質土を配置したゾーニング方法である。Bはのり面の下半分にロック材を配置し、その上部と滑走路部に良質土を配置したゾーニング方法であり、のり面付近以外はAと同一である。Cは盛土全体が良質土でゾーニングが無い場合である。

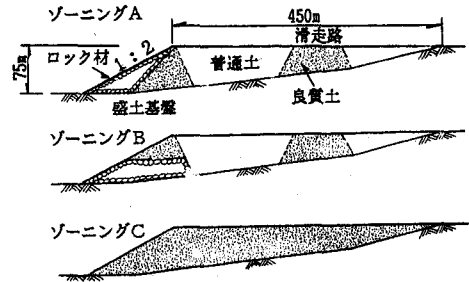


図-1 形状寸法およびゾーニング

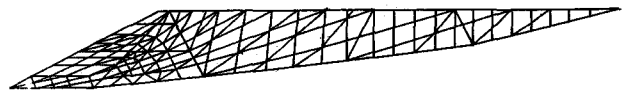


図-2 有限要素モデル図

本研究では、解析モデル基盤面を盛土基盤層の上面に設定し、盛土基盤層より上部の盛土地盤を2次元アイソパラメトリック平面歪み要素(弾性-完全塑性体; 降伏条件はMohr-Coulombの破壊条件式を用いる)にモデ

表-1 盛土地盤の物性値

	単位体積重量 γ (t/m ³)	粘着力 c (t/m ²)	内部摩擦角 ϕ (度)	弾性係数 E (t/m ²)	δ の比 ν	減衰定数 h
普通土	1.8	0.0	25	5 500	0.35	0.10
良質土	2.0	0.0	30	10 800	0.35	0.10
ロック	2.1	0.0	35	17-100	0.30	0.10

表-2 ジョイント要素の物性値

ジョイント要素の配置場所	I	II	III
道路、せん断方向バネ定数(t/m ²)	10 000		
付着力 c (t/m ²)	0.0		
摩擦角 ϕ (度)	25	30	35

(備考)

I: 普通土内、普通土との境界面
 II: 良質土内、ロック及び盛土基盤と良質土との境界面
 III: ロック内、ロックと盛土基盤との境界面

ル化を行うとともに、隣り合うアイソパラメトリック要素との境界面および盛土基盤層との境界面には、滑動や剥離を考慮できるジョイント要素を配置した。図-2に有限要素モデルを、表-1、表-2に、これらの力学モデルの入力物性値を示す。なお、これらの解析モデルや物性値は静的および動的解析に共通であるが、静的解析では地盤は線形弾性体と仮定した。

3. 地震応答解析 地震応答解析では、El Centro (1940)のNS成分および八戸(1968)のEW成分の最大加速度を200galに修正した波形を解析モデル基盤面へ6秒間水平入力し、それ以降4秒間の自由振動を加えた合計10秒間の時刻歴応答解析を実施した。これらの解析結果より、八戸波形を入力した際の各ゾーニングの変形状況を時間の経過を追って示したものが、図-3～図-5である。

ゾーニングAでは、まず最初に、滑走路部の良質土とのり面部の良質土に挟まれた普通土のゾーニング境界近傍(領域a, b)において塑性化や滑動現象が発生し、地表面に沈下や亀裂が発生する(状態①、②)。次に、のり尻からはらみ出しが始まり(状態②)、ロック材と良質土との境界面において滑動が発生するようになると、このはらみ出しがのり面全体に及ぶ(状態③)。地震入力終了後は、これらの変形や滑動はほとんど増加せず、自由振動後収束するようであり、のり肩付近の残留水平変位量および沈下量は、それぞれ、20cm, 15cm程度と考えられる。ゾーニングBもAとほぼ同様であるが、のり尻に加えのり面中腹部のロック材と良質土との境界(領域d)からもはらみ出しが始まる。時間の経過に伴い、これらのはらみ出しが大きくなり、のり面上半部の良質土において表層の崩壊が見られる。地震入力終了後も、ゾーニングAとほぼ同様に、自由振動後収束するようであり、のり肩付近の残留水平変位量および沈下量は、それぞれ、60cm, 40cm程度と考えられる。一方、ゾーニングCは盛土全体が良質土でゾーニングが無いため、ゾーニングAやBのように沈下や亀裂が発生しやすいゾーニング境界近傍といった局所的な弱点は認められない。しかしながら、早い時点からのり面全域ではらみ出しが発生するとともに、のり肩付近(領域a)に沈下や亀裂が発生する(状態①)。時間の経過に伴い、このはらみ出しが大きくなり、のり面の崩壊が表層から深部へ順次進行する。また、盛土地表面の沈下ものり肩から盛土中

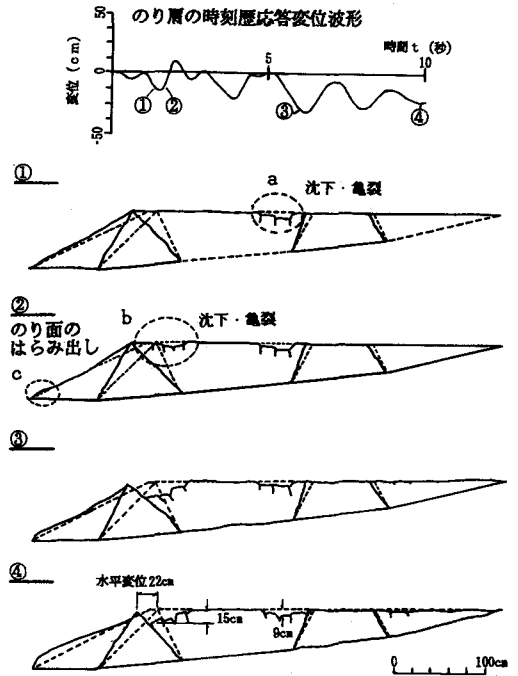


図-3 変形状況(ゾーニングA, 八戸)

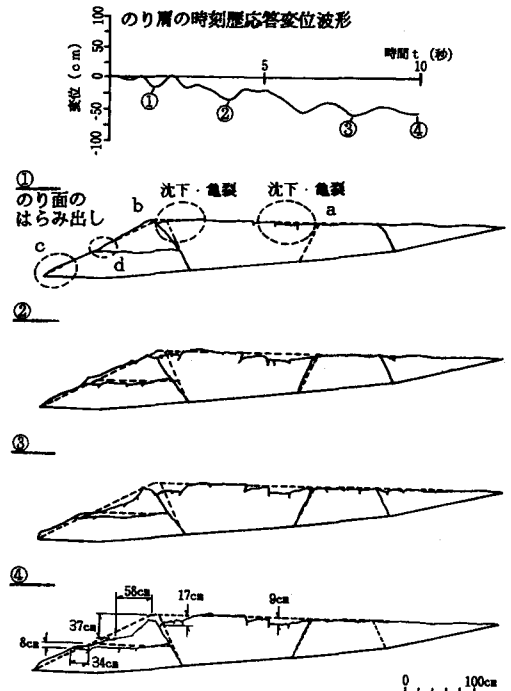


図-4 変形状況(ゾーニングB, 八戸)

中央部（領域b, c）へ順次進行する。地震入力終了後も、のり肩の変形は増加する傾向を示し、のり面の安定性は損なわれているようである。

このように、ゾーニング方法の違いは、高盛土造成地盤の安定性や残留変形量などに大きな影響を及ぼす可能性がある。しかしながら、地震時にのり面のはらみ出しや盛土表面の沈下・亀裂が発生しやすいという特徴は、いずれのゾーニング方法にも共通している。のり面のはらみ出しは、のり尻やのり面のゾーニング境界から始まり、のり肩方向へ伝播する。このはらみ出しが大きくなると、のり面の崩壊が表層から深部へ順次進行する。盛土表面の沈下・亀裂現象は、ゾーニングCのように盛土全体が均一な場合には、のり肩付近において最も発生しやすく、ここから盛土中央部へ順次進行する。ところが、ゾーニングAやBのように複数の盛土材でゾーニングを行った場合には、沈下や亀裂はゾーニング境界近傍において最も発生しやすい。これは、盛土材の剛性の違いにより地震動に対するその変形特性が異なるためと考えられる。換言すると、盛土地盤は地震時に右や左に交替的にせん断変形するが、この時、変形方向の前側が普通土で後側が良質土となる場合には、柔らかい普通土のほうが硬い良質土よりも変形しやすいため、良質土との境界付近の普通土は、水平方向に引張られた状態になる。このようになると、地盤の拘束圧の減少に伴う塑性化や鉛直方向に配置したジョイント要素の垂直応力の減少に伴う滑動や剥離が発生しやすくなるためと考えられる。

なお、El Centro 波形を入力した場合でも、前述したような八戸波形入力時の高盛土造成地盤の滑動や沈下現象の発生しやすい箇所や変形パターンの特徴はほとんど変わらなかった。しかしながら、入力地震波形の違いは、その応答量に大きな影響を及ぼす可能性があり、El Centro より八戸波形を入力した方が、盛土中央部で約2倍程度、非線形性が顕著に現われるのり面付近で2～数倍程度大きい応答を示し、のり面の安定性も悪い。これは、解析モデルの卓越周期が2秒付近にあるのに対し、この周期付近における両波形の応答スペクトルを比較すると、八戸波形の方が2倍程度大きな値を示しているためと考えられる。

4. 静的震度解析 図-6は、ジョイント要素を配置し、のり面に全体的な滑動が発生するまで水平震度 (K_h) を0.05ずつ漸増させた静的震度解析結果よ

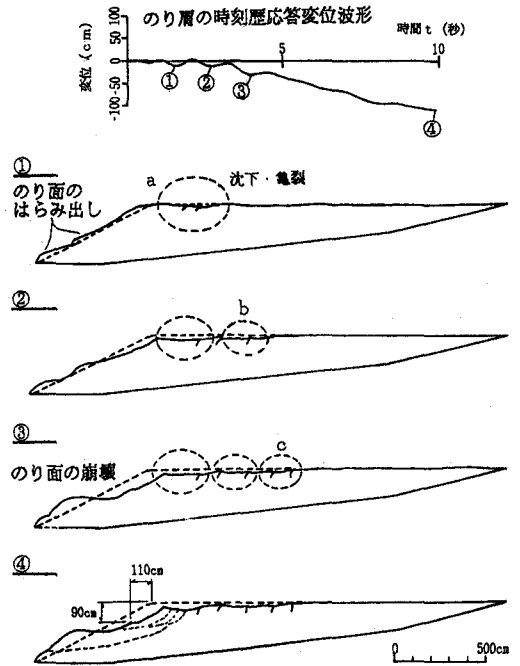


図-5 変形状況（ゾーニングC，八戸）

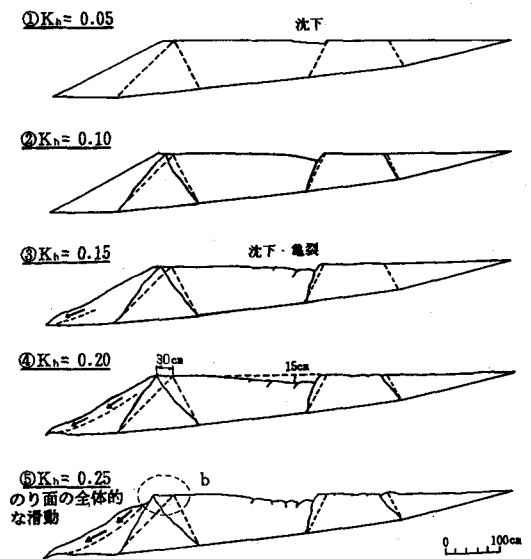


図-6 水平震度と変形状況（ゾーニングA）

り、ゾーニングAにおける K_h と変形状況の関係を示したものである。

ゾーニングAでは、まず、滑走路部に配置した良質土とその左側の普通土とのゾーニング境界近傍で滑動が発生し、普通土側が沈下する。つぎに、のり尻での滑動が始まり、その滑動は K_h が大きくなるにつれてのり尻からのり肩へ向かって伝播して行き、 $K_h = 0.25$ になると、その滑動がのり肩付近の地表面まで貫通し、のり面が崩壊する。この結果を地震応答解析結果と比較すると、滑動・沈下現象の発生箇所やその伝播状況および変形パターンの特徴は、ほぼ一致する。同様なことが、ゾーニングBおよびCについても言える(図-7、図-8)。しかしながら、これらの静的震度解析では、ゾーニングAとBののり肩付近のゾーニング境界近傍(領域b)における滑動・沈下現象を表現できない。これは、水平震度を一方向にのみ作用させたためであり、交番に作用させれば、図-9に示したように、これらの現象を表現することができる。

5. まとめ

本研究では、地盤の降伏といった材料非線形性と接触面などでの滑動や剥離といった構造非線形性を考慮した地震応答解析により高盛土造成地盤の地震時挙動の特徴を明らかにした。また、これらの地震時挙動の特徴をジョイント要素を配置した静的震度解析によりどの程度表現できるのか明らかにした。これらの結果を要約すると、以下に示すとうりである。

- ①地震時に高盛土造成地盤に発生しやすい非線形挙動は、のり面のはらみ出しや盛土地表面の沈下・亀裂現象である。
- ②のり面のはらみ出しは、のり尻やのり面のゾーニング境界から始まり、のり肩方向伝播する。このはらみ出しが大きくなると、のり面崩壊が表層から深部へ順次進行する。
- ③盛土地表面の沈下・亀裂現象は、盛土全体が均一な場合には、のり肩付近から始まり盛土中央部へ順次進行するが、複数の盛土材でゾーニングを行った場合には、ゾーニング境界近傍において最も発生しやすい。
- ④入力地震波形がE1 Centro (NS)でも八戸(EH)でも、これらの挙動の特徴はあまり変わらなかった。
- ⑤ジョイント要素を配置した静的震度解析でも、これらの挙動をほぼ定性的に表現できる。したがって、滑動や沈下といった非線形挙動の伝播過程や、相対的な弱点部を把握するような場合には、この解析はかなり有効であろう。

なお、本研究は(財)建設コンサルタンツ協会近畿支部『地盤と基礎研究委員会』の研究の一環として行ったものである。

参考文献

- 1)例えば、土岐憲三、佐藤忠信、三浦房紀：強震時における地盤と構造物の間の剥離と滑動、土木学会論文報告集、No. 302 pp31~41, 1980
- 2)例えば、(財)建設コンサルタンツ協会近畿支部：地盤と基礎研究委員会報告書、高盛土造成地盤の安定性に関するケーススタディ、1989

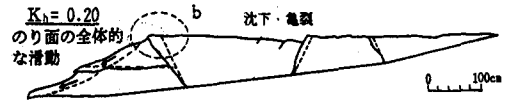


図-7 水平震度と変形状況(ゾーニングB)

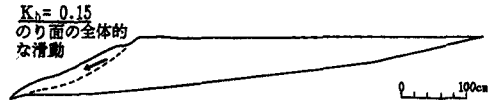


図-8 水平震度と変形状況(ゾーニングC)

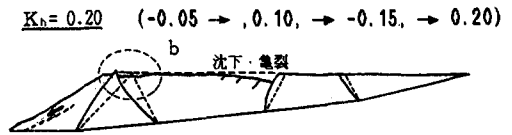


図-9 水平震度を交番作用させた場合の変形状況(ゾーニングA)