

復旧期間を考慮した橋梁と盛土の 地震時安全性の整合化に関する研究

東北大学 助教 松崎 裕

概要：

道路は、橋梁区間、盛土区間、トンネル区間等の異種構造物の組み合わせから成る線状構造を有している。従って、ある道路区間の地震時復旧性を考えた場合には、最も長い復旧期間を要する構造物が当該区間における道路機能の停止期間を決定することになる。一方で、構造種別によって設計基準や復旧対応の考え方が異なることもあり、道路区間としての地震時復旧性がいかに確保されているのかが不明確となっているのは大きな課題である。

そこで、本研究では、異種構造物間における地震時安全性の整合化に関する研究として、特に橋梁と盛土のレベル2地震動作用後における応急復旧期間の整合化に関する検討を行った。盛土高10mまでの範囲で応急復旧期間の期待値について検討した結果、内部摩擦角30度に相当する締固め度では盛土高6m程度以上ではRC橋脚と整合化できない一方で、内部摩擦角が35度以上になるように締固めすることで地震時復旧性を考慮して耐震設計されたRC橋脚と同等以下の応急復旧期間の期待値となることが示された。

キーワード： 橋梁、盛土、レベル2地震動、応急復旧期間、整合化

1. はじめに

災害時の避難、救命・救急活動、復旧活動に必要な緊急輸送路をはじめとする道路は、日常はもとより、災害時こそ、その役割を果たす必要があり、災害後の早期復旧が求められる。道路は、橋梁区間、盛土区間、トンネル区間等の異種構造物の組み合わせから成る線状構造を有している。従って、ある道路区間の地震時復旧性を考えた場合には、最も長い復旧期間を要する構造物が当該区間における道路機能の停止期間を決定することになる。一方で、構造種別によって設計基準や復旧対応の考え方が異なることもあり、結果として、道路区間としての地震時復旧性が構造種別間でいかに確保されているのかが不明確となっているのは大きな課題である。地震後の早期復旧を図る構造計画や構造設計を実現するためには、異種構造物間において、ある構造物だけ著しく復旧期間が長期化することのないように、国民生活や企業の経済活動への影響を含めた路線の重要度や構造物の復旧性の違いを考慮した上で、復旧期間を念頭においた限界状態の評価・設定等を行うことが重要であると考えられる。

ここで、盛土は地震時に残留沈下が生じてオーバーレイを行うことで事後に容易に修復できる特徴があり、

また十分な排水処理と入念な締固めを前提にすれば被害は限定的である¹⁾。そのため、盛土工指針²⁾において、レベル1地震動に対する照査を行えば、レベル2地震動に対する照査は省略してよいとされており、内部摩擦角としては締固めた砂の場合に30度や35度が設計時に用いる土質定数として示されている。一方で、常田・小田²⁾が述べているように、盛土に対してはレベル2地震動に対する定量的な耐震性評価・設計法が明確化されていないために、効果的かつ経済的な対策に結び付いていないのが現状である。2004年新潟県中越地震や2011年東北地方太平洋沖地震等の既往の被害地震においても、橋梁本体構造は健全であっても、前後のアプローチ部分における盛土の被害のため、道路としての供用再開が遅延した事例³⁾⁴⁾は少なくない。また、各構造物の固有周期と地震動の卓越周期帯の関係もあるが、盛土に被害が生じていない場合であっても、橋梁に被害が生じて、道路としての復旧性を橋梁区間の損傷度が決定する場合もある。いずれにしても、道路ネットワークとしての耐震性を確保するためには、定量的な耐震性評価に基づいて異種構造物の耐震性を相互比較することが重要である。

そこで、本研究では、道路を構成する異種構造物間における地震時安全性の整合化に向けた基礎的研究として、緊急輸送路等の重要路線を構成する単柱式RC橋脚で支

持された橋梁と盛土を対象として、まず各構造物の損傷度と想定される応急復旧期間の関係を整理する。その上で、各構造物の材料特性や変形性能等の評価式における不確定性を考慮して算定される最大地震応答の分布から、応急復旧期間の期待値を評価する。そして、橋梁の応急復旧期間の期待値に整合化できるような盛土の諸元や締固め度に関する条件について検討し、今後、異種構造物間において地震時安全性を整合化させるための基礎資料を得ることを目的とする。

2. 橋梁と盛土の地震時損傷度指標と応急復旧期間

(1) 橋梁の地震時損傷度指標と応急復旧期間

本研究では単柱式 RC 橋脚で支持された橋梁を検討対象とするが、地震時の損傷部位は RC 橋脚基部となる。ここで、RC 橋脚の損傷度は最大応答変位と強い相関関係にあることが知られており、最大応答変位に対応した剛性の低下に伴う固有周期の長周期化に着目した損傷度判定がなされている⁹⁾。本研究でも、RC 橋脚の損傷度に関する指標として、最大応答変位を用いることとした。

現行の道路橋示方書⁹⁾において、本研究で対象とするような重要度の高い B 種の橋梁は地震による損傷が限定的なものに留まり、橋梁としての機能の回復が速やかに行い得る耐震性能 2 を確保するように耐震設計されている。具体的には、耐震性能 2 の限界状態に相当する水平変位 δ_{k2} をさらに部分係数 $\alpha_2=1.2$ で除した水平変位に対応する許容塑性率を用いることで、耐震性能 2 の限界状態に対して一定の裕度を確保するように耐震設計がなされている。ここで、道路震災対策便覧⁷⁾では、既往の RC 橋脚の被災の特徴および模型実験結果に基づいて、被災度の判定を行っているが、耐震性能 2 を確保した場合には、ひび割れや局所的なコンクリートの剥離程度の損傷であり、被災度 C に相当する損傷である。

さらには、土木研究所の報告書⁸⁾において、道路震災対策便覧⁷⁾で判定される RC 橋脚の被災度と応急復旧期間の関係が整理されている。当然ながら、応急復旧期間は採用する工法にも依存し、画一的には定められない点には留意する必要があるが、本研究では、これらの文献^{7), 8)}に基づいて、RC 橋脚の最大応答変位の程度と応急復旧期間 T_i の関係を RC 橋脚の降伏変位 δ_y も考慮して表-1 のように想定した。耐震性能 2 の限界状態に対応する水平変位を超過した場合に応急復旧期間を一律 5 日としているが、数日程度以内で応急復旧できるか否かが主たる検討対象であることを踏まえて一律に設定している。

(2) 盛土の地震時損傷度指標と応急復旧期間

盛土の被災パターンとしては基礎地盤の破壊、盛土形状を保持しての沈下、滑り崩壊等の様々なパターンがある⁷⁾。本研究では、盛土が滑り崩壊すると想定して、滑

表-1 単柱式 RC 橋脚の最大応答変位と応急復旧期間

最大応答変位 δ	応急復旧期間
$\delta \leq \delta_y$	$T_1=0$ 日
$\delta_y < \delta \leq \delta_{k2}$	$T_2=1$ 日
$\delta_{k2} < \delta$	$T_3=5$ 日

δ_y : 降伏変位, δ_{k2} : 耐震性能 2 に相当する水平変位

表-2 盛土の残留変位と応急復旧期間

残留変位 δ_r (m)	応急復旧期間
$\delta_r \leq 0.02$	$T_1=0$ 日
$0.02 < \delta_r \leq 0.20$	$T_2=1$ 日
$0.20 < \delta_r$	$T_3=5$ 日

表-3 解析対象とした橋梁を支持する RC 橋脚の諸元

断面寸法	5,500mm×2,500mm
橋脚高さ	13,000mm
コンクリートの圧縮強度	23.5N/mm ²
鉄筋の降伏強度	345N/mm ²
軸方向鉄筋比	1.17%
横拘束筋体積比	0.53%

表-4 解析対象とした盛土の諸元

盛土高	3m~10m まで 1m 刻み
内部摩擦角	30 度および 35 度
単位体積重量	16kN/m ³ および 17kN/m ³
粘着力	2.0kN/m ²

り崩壊に伴う残留沈下量に着目する。実際の盛土の損傷度判定においては、その他の被災パターンが生起する可能性も考慮する必要があるが、複数の被災パターン生起による影響の検討については今後の課題とし、本研究では、基礎的検討として、盛土が滑り崩壊するパターンに関して定量的に評価することを試みる。

盛土の残留沈下に伴う段差と応急復旧期間 T_i の関係については、常田・小田²⁾の研究を参考にして、表-2 のように想定した。段差 0.02m は新潟県中越地震等において緊急補修水準とされた段差レベルであり、小型車・大型車ともに定常走行ができる²⁾ことを念頭においている。1 日で応急復旧できる段差レベルである 0.20m は段差を通過する際に一旦停止し、ゆっくりと乗り上げるか降り降りるようにして段差を通過することに対応した上限値である。段差 0.20m 以上については、常田・小田²⁾の研究や 2011 年東北地方太平洋沖地震時の事例⁴⁾に基づいて、5 日程度で復旧できる段差レベルであることを念頭に想定した。

表-5 考慮した不確定要因とその統計量

	基準値	平均値	変動係数
コンクリートの圧縮強度	23.5N/mm ² ⁹⁾	28.2N/mm ² ⁹⁾	10% ⁹⁾
鉄筋の降伏強度	345N/mm ² ⁹⁾	414N/mm ² ⁹⁾	7% ⁹⁾
鉄筋の弾性係数	2.06×10 ⁵ N/mm ² ⁹⁾	2.0×10 ⁵ N/mm ² ⁹⁾	1% ⁹⁾
耐震性能2に相当する水平変位	—	道路橋示方書 ⁹⁾ に基づく算定値	16.1% ¹⁰⁾
内部摩擦角	—	30 度, 35 度	15% ¹¹⁾
粘着力	—	2.0kN/m ²	15% ¹¹⁾

3. 解析対象とした橋梁および盛土

(1) 解析対象とした橋梁

現行の道路橋示方書⁹⁾に基づいて耐震設計されたⅡ種地盤上における単柱式 RC 橋脚で支持された重要度の高い B 種の橋梁を解析対象とした。RC 橋脚の諸元を表-3 に示す。橋軸方向と橋軸直角方向の両方向について、現行の道路橋示方書の照査を満足させているが、以降の地震時復旧性の議論においては、盛土の地震時復旧性との相互比較が主目的のため、橋軸方向のみについて検討対象とする。

(2) 解析対象とした盛土

対象道路区間に盛土高 3m～10m の盛土区間があると想定した。ここで、法面勾配は 1:1.8 とし、内部摩擦角は盛土工指針⁹⁾を参考に 30 度と 35 度の場合を想定して、盛土の諸元は表-4 のように設定した。表-4 において、内部摩擦角と単位体積重量はそれぞれ小さい順に対応する値であり、盛土の施工における締固め度の違いを反映させている。

4. 地震時復旧期間の評価法

(1) RC 橋脚のモデル化

RC 橋脚の水平荷重－水平変位関係について骨格曲線に道路橋示方書⁹⁾により算定される降伏点を折れ点とするバイリニアモデル、履歴曲線に Takeda 型モデルを用いた。橋軸方向に対して 1 自由度系の動的解析(減衰定数 0.02)を行い、最大応答変位を算定した。

(2) 盛土のモデル化

盛土の残留変位の算定に当たっては、ニューマーク法を用いた。ニューマーク法は、入力パラメータの設定がしやすく簡便な手法であり、盛土工指針⁹⁾等の指針類においても採用されている。剛体としての滑りを仮定しているため、大変位の算定には課題があるが、本研究において残留変位の許容値として考える 0.02m, 0.20m 程度の残留変位であれば盛土高に比較して小さな変位であり、適用できると判断した。

表-6 単柱式 RC 橋脚の最大応答変位レベルとその確率

最大応答変位 δ	当該応答レベルになる確率
$\delta \leq \delta_y$	p_{c1}
$\delta_y < \delta \leq \delta_{k2}$	p_{c2}
$\delta_{k2} < \delta$	p_{c3}

δ_y : 降伏変位, δ_{k2} : 耐震性能 2 に相当する水平変位

表-7 盛土の残留変位レベルとその確率

残留変位 δ_r (m)	当該応答レベルになる確率
$\delta_r \leq 0.02$	p_{e1}
$0.02 < \delta_r \leq 0.20$	p_{e2}
$0.20 < \delta_r$	p_{e3}

(3) 考慮する不確定要因とモンテカルロシミュレーション

コンクリートおよび鉄筋の材料特性の不確定性は足立・運上⁹⁾, RC 橋脚の変形性能評価に係る不確定性は Sakai & Hoshikuma¹⁰⁾, 盛土および表層地盤の地盤定数の不確定性は田中ら¹¹⁾に基づいて表-5 のように設定した。なお、全ての変数について正規分布を仮定した。試行回数 10,000 回のモンテカルロシミュレーション(MCS)に基づき、これらの不確定性を考慮した。

(4) 入力地震動

道路橋示方書⁹⁾におけるレベル 2 地震動のタイプ I およびタイプ II のそれぞれのⅡ種地盤の標準加速度応答スペクトルにフィッティングされた設計地震動を入力地震動として用いた。すなわち、タイプ I とタイプ II の異なる加速度振幅特性、スペクトル特性、継続時間を考慮した上で、各地震動について 3 波形を入力することで、地震動の位相特性の違いを考慮していることになる。

(5) 地震時復旧期間の算定法

RC 橋脚の最大応答変位および盛土の残留変位が各応答レベルとなる確率を表-1 および表-2 に対応させて、表-6 および表-7 のように算定する。これらの確率に各応答レベルの場合の応急復旧期間 T_i を乗じて各構造物で全ての応答レベルについて総和をとることで、式(1)および式(2)に基づいて、RC 橋脚および盛土の応急復旧期間の期待値(以下、期待復旧期間) T_e および T_e を評価する。

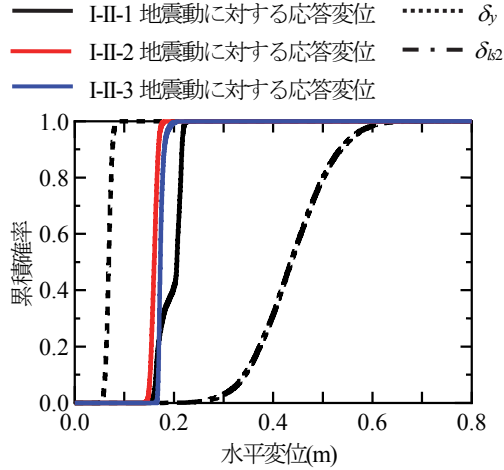


図-1 レベル2地震動のタイプIに対するRC橋脚の最大応答変位と限界変位

表-8 レベル2地震動のタイプIに対してRC橋脚の各応答レベルとなる確率および期待復旧期間

地震動	p_{c1}	p_{c2}	p_{c3}	T_c
I-II-1	0.000	0.999	0.001	1.0 日
I-II-2	0.000	0.999	0.001	1.0 日
I-II-3	0.000	0.999	0.001	1.0 日

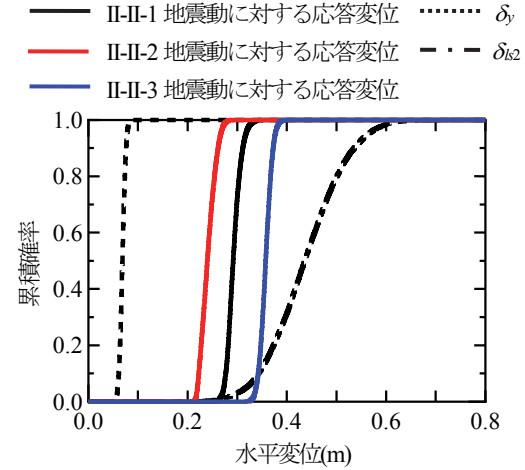


図-2 レベル2地震動のタイプIIに対するRC橋脚の最大応答変位と限界変位

表-9 レベル2地震動のタイプIIに対してRC橋脚の各応答レベルとなる確率および期待復旧期間

地震動	p_{c1}	p_{c2}	p_{c3}	T_c
II-II-1	0.000	0.971	0.029	1.1 日
II-II-2	0.000	0.996	0.004	1.0 日
II-II-3	0.000	0.848	0.152	1.6 日

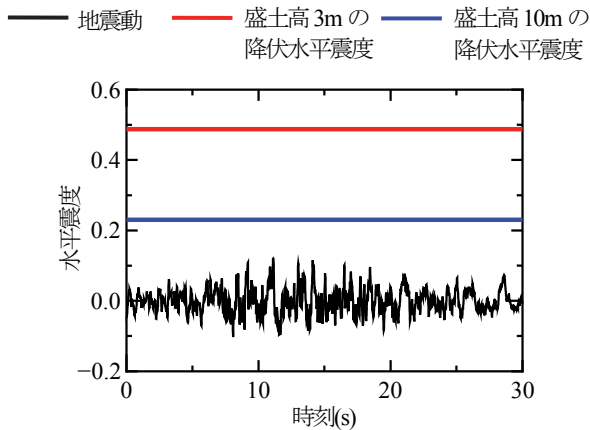


図-3 レベル1地震動と盛土の降伏水平震度の関係
(盛土の内部摩擦角 30 度)

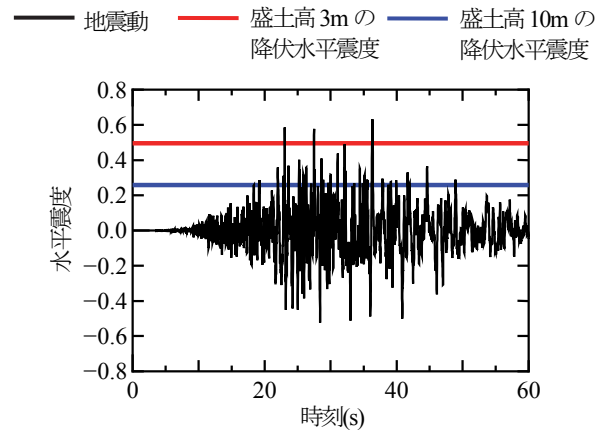


図-4 I-II-1地震動と盛土の降伏水平震度の関係
(盛土の内部摩擦角 30 度)

$$T_c = \sum p_{ci} T_i \quad (1)$$

$$T_e = \sum p_{ei} T_i \quad (2)$$

5. 橋梁と盛土の地震時復旧期間に関する考察

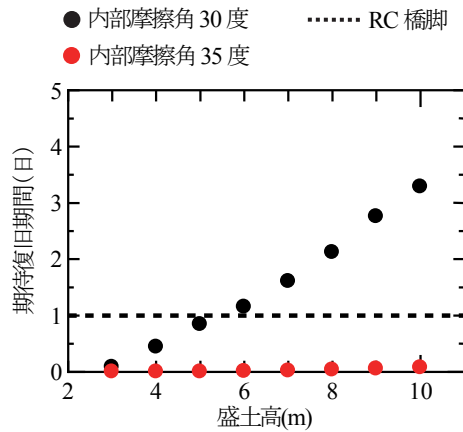
(1) 橋梁の地震時復旧期間

レベル2地震動のタイプIおよびタイプIIのそれぞれに対するRC橋脚の最大応答変位の分布について、降伏変位や終局変位の分布と比較する形で図-1および図-2に示す。また、各応答レベルに属する確率および期待復旧

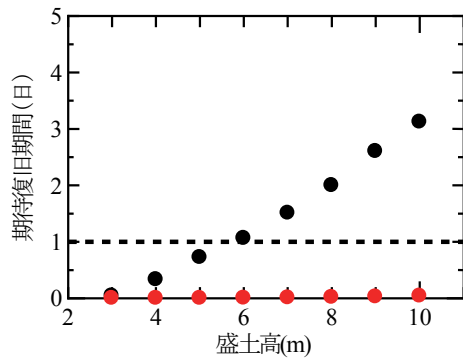
期間について、表-8および表-9に示す。本研究で対象としたレベル2地震動に対しては、RC橋脚は確実に降伏して塑性化している。その一方で、前記したように、設計時の部分係数 $\alpha_2=1.2$ を考慮することにより、材料特性や限界値の算定式における不確定性を考慮した場合であっても、概ね耐震性能2の限界状態に対応する水平変位に収まる程度の地震応答に留まっている。従って、設計地震動に対する応急復旧期間としては設計思想通り、概ね1日程度の損傷に収まることが確認される。

(2) 盛土の地震時復旧期間

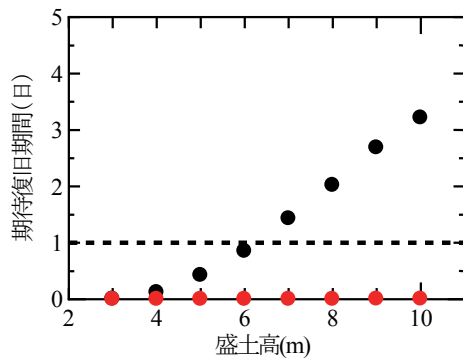
盛土についても、RC橋脚と同様に、レベル2地震動



(a) I-II-1 地震動



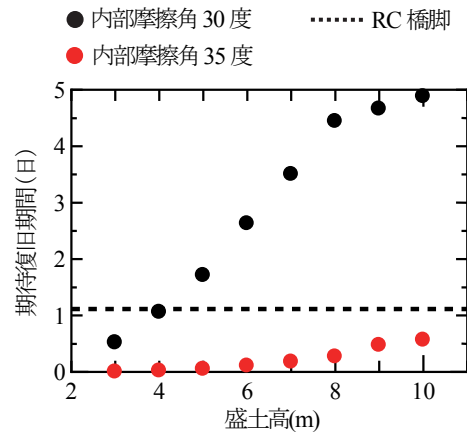
(b) I-II-2 地震動



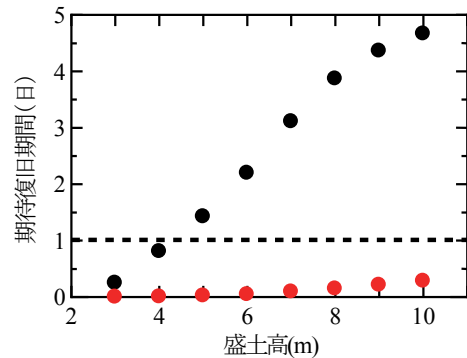
(c) I-II-3 地震動

図-5 レベル2地震動タイプIに対する盛土の期待復旧期間

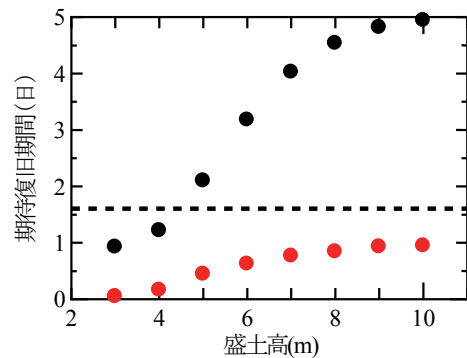
に対する期待復旧期間について議論するが、前提条件として、レベル1地震動に対する安定性を確認しておく。ここで、盛土は滑り抵抗を上回る作用があった場合に滑ることから、作用力としての水平震度と抵抗としての降伏震度の関係について検討する。図-3は、盛土が相対的に緩く締固められている内部摩擦角 30 度の場合を例に、最も滑りやすい盛土高 10m と最も滑りにくい盛土高 3m の場合において、表-5 の平均値を用いて評価した水平震度と降伏震度の関係を示したものである。図から、平均値ベースで作用力が抵抗力を上回ることがないことが確認されるが、表-5 の不確実性を考慮した場合も、レベル1地震動に対しては、本研究で対象とした諸元を有する盛土が安定性を失うことはないことを確認している。続いて、同条件の盛土にレベル2地震動である I-II-1



(a) II-II-1 地震動



(b) II-II-2 地震動



(c) II-II-3 地震動

図-6 レベル2地震動タイプIIに対する盛土の期待復旧期間

地震動が作用した場合について、同様に表-5 の平均値を用いて評価した水平震度と降伏震度の関係を図-4 に示す。盛土高が 3m の場合には、ほとんど降伏震度を超過する水平震度の作用はないが、盛土高が 10m になると、繰り返し降伏震度を超過する水平震度が作用していることが確認される。

このことを踏まえて、引き続き、表-5 における地盤物性の不確実性を考慮して、全てのレベル2地震動について期待復旧期間を算定した結果を図-5 および図-6 に示す。図-3 にも示したように、最も滑りやすい内部摩擦角 30 度の盛土であっても、レベル1地震動に対する安定性は失っておらず、盛土工指針^りではレベル2地震動に対する照査を省略しても構わない条件である。しかしながら、レベル2地震動が作用した場合には、タイプI地震動に

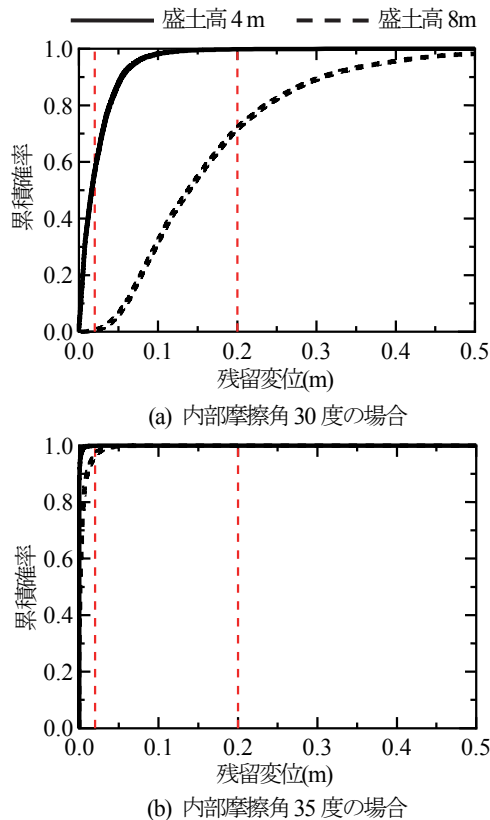


図-7 内部摩擦角が残留変位分布に及ぼす影響

対しては盛土高 8m 程度から、タイプ II 地震動に対しては盛土高 6m 程度から RC 橋脚の期待復旧期間と有意な差が生じることが確認される。これは、図-7 に示すように、内部摩擦角 30 度の条件では、地盤物性の不確定性を考慮すると、盛土高が高くなるのに伴って有意に応答変位が 0.20m を超過するからである。

一方で、図-5 および図-6 から確認されるように、本研究で対象とした盛土高 10m の範囲では、内部摩擦角が 35 度となるように十分に締固めを行うことで、レベル 2 地震動に対しても、RC 橋脚と同等以下の応急復旧期間となることが確認される。このことは、内部摩擦角の条件だけが異なる図-7 のように、不確定性の存在下においては、密実に締固めを行い、内部摩擦角を高めて限界値の平均値を大きくし、応答の限界値に対する余裕度を向上させることの効果が大きいことを示唆している。

6. まとめ

本研究では、異種構造物間における地震時復旧期間の整合化に向けた基礎的研究として、RC 橋脚と盛土を対象とした検討を行った。具体的には、盛土高 10m までの範囲を対象として、レベル 2 地震動に対する耐震性能が明確に規定されている RC 橋脚と同程度の応急復旧期間とするための盛土の諸元に関する条件について、材料特性や評価式の不確定性を考慮して検討した。

その結果、内部摩擦角 30 度では、レベル 1 地震動に対して地震時安定性に問題がなく、盛土工指針ではレベル 2 地震動による照査を省略してよい場合であっても、レベル 2 地震動の作用下においては概ね盛土高 6m 程度以上の場合において地震時復旧性を RC 橋脚と整合化できないことが示された。一方で、十分に締固めを行い、盛土の内部摩擦角を 35 度以上に高め、地震時の抵抗力を高めることで、地震時復旧性を考慮して耐震性能 2 に基づいて耐震設計された RC 橋脚と同等以下の応急復旧期間で盛土の地震時復旧が可能になることを示した。このことは、不確定性の存在下においては、密実に締固めを行い、内部摩擦角を高めて限界値の平均値を大きくすることで、応答の限界値に対する余裕度を向上させることの効果が大きいことを示唆している。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路土工—盛土工指針(平成22年度版)，2010.
- 2) 常田賢一，小田和広：道路盛土の耐震性能評価の方向性に関する考察，土木学会論文集C，Vol. 65，No. 4，pp. 857-873，2009.
- 3) 国土交通省国土技術政策総合研究所，独立行政法人土木研究所：平成16(2004)年新潟県中越地震土木施設災害調査報告，国総研研究報告，No. 27，土木研究所報告，No. 203，2006.
- 4) 星隈順一：耐震性能を踏まえた道路橋の構造計画と研究ニーズ，第16回性能に基づく橋梁等の耐震設計法に関するシンポジウム，特別講演，2013.
http://committees.jsce.or.jp/eec204/system/files/speciallecture_HPVer_hoshikuma.pdf
- 5) 土木研究所：インテリジェントセンサを用いた橋梁地震被災度判定手法に関する研究，土木研究所報告，No. 213，2009.
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，丸善出版，2012.
- 7) 日本道路協会：道路震災対策便覧(震災復旧編)平成18年度改訂版，丸善，2007.
- 8) 土木研究所：道路橋の耐震設計における部分係数設計法に関する研究，平成19年度重点プロジェクト研究報告書，<http://www.pwri.go.jp/jpn/results/prize/seika/project/2007/pdf/2007-9-4.pdf>
- 9) 足立幸郎，運上茂樹：材料特性等のばらつきが鉄筋コンクリート橋脚の地震応答特性評価に及ぼす影響，第25回地震工学研究発表会講演論文集，pp. 961-964，1999.
- 10) Junichi SAKAI and Jun-ichi HOSHIKUMA: EVALUATION OF DUCTILITY CAPACITY OF REINFORCED CONCRETE BRIDGE COLUMNS CONSIDERING PLASTIC HINGE DEVELOPMENT, Proceedings of the International Symposium for Bridge Earthquake Engineering in Honor of Retirement of Professor Kazuhiko Kawashima, pp. 73-88, 2013.
- 11) 田中博文，沖村孝，鳥居宜之：盛土の地震応答特性評価に地盤の空間的不均質性が及ぼす影響，土木学会地震工学論文集，Vol. 28，論文番号0005，2005.