

2005年宮城県沖地震によるスポパーク松森建物の被害への地盤の影響の考察

那須 誠¹・宮崎博敏²

¹前前橋工科大学建設工学科教授
(〒359-0021 埼玉県所沢市東所沢2-34-8)

E-mail: mktonasu@amail.plala.or.jp

²前前橋工科大学建設工学科

2005 年宮城県沖地震で天井落下等の被害が発生したスポパーク松森の建物について、余震観測結果や地盤状態をもとにその被害原因を考察した結果、地盤の影響が大きいことが推測された。地震被害の発生は地震条件や地盤条件、構造物条件に影響されるが、構造物の地震被害は地盤条件の変化点で多くみられることが調べられている。そのため地盤条件の変化点に着目して作成した数パターンの簡易モデルの地震応答解析結果を比較検討することによって、構造物の被害発生に地盤の影響を調べた。

Key Words : 2005 Miyagiken-oki earthquake, damage to building, ground condition, observed result of aftershock, earthquake response analysis, large differential displacement of ground

1. はじめに

2005年宮城県沖地震で天井落下等の被害が発生したスポパーク松森の建物について、最初に余震観測結果や地盤状態をもとにその原因として地盤の影響を推察した¹⁾。次に、構造物の地震被害は地盤条件の変化点で多くみられるため、地盤条件の変化点に着目して作成した数パターンの簡易モデルの地震応答解析結果を行って、構造物の地震被害に与えた地盤の影響について考察を行った²⁾。

2. 被害状態と地盤状態

(1) 被害状態

地震で図 1 に示すスポパーク松森(支持杭基礎)では温水プール天井の 9 割強に脱落が生じた³⁾。その天井落下はスポパーク松森内の南側にあるウォータースライダーの直上付近から始まったと言われている。また、建物の南側外周柱で V 字型ブレースと外周の軒天井面の取り合い部分の損傷(同図の a 点)、V 字型ブレースと柱側ガゼット PL との接合部ピンの塗装のはがれ(同図の b 点)等があり、このように力がかかった形跡が数箇所で見られる³⁾。上記 2 つのことよりその力は南側の地盤から作用したことが推察される。

(2) 地盤状態

図 2 に敷地内の土質調査位置と土質柱状図を示す³⁾。砂礫層以深の地盤の種類や深度をみると、この建物の付近が地盤条件の比較的に急な変化点に相当していると考えられる。

この図より敷地の地盤は盛土とその下の表層地盤

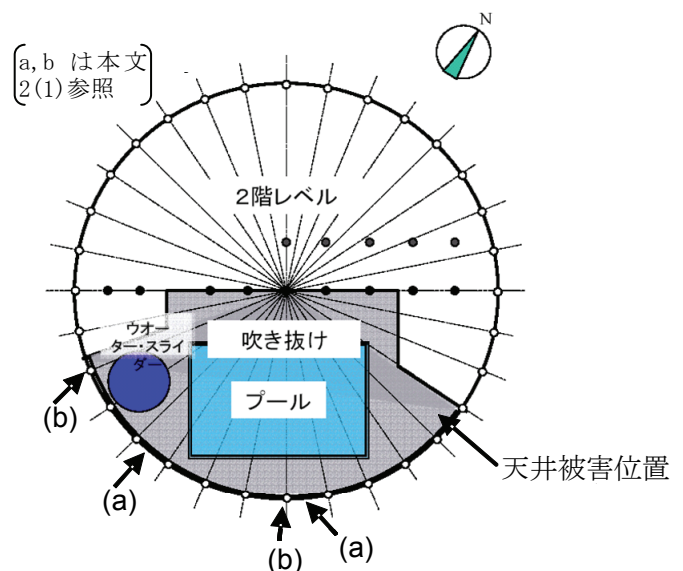


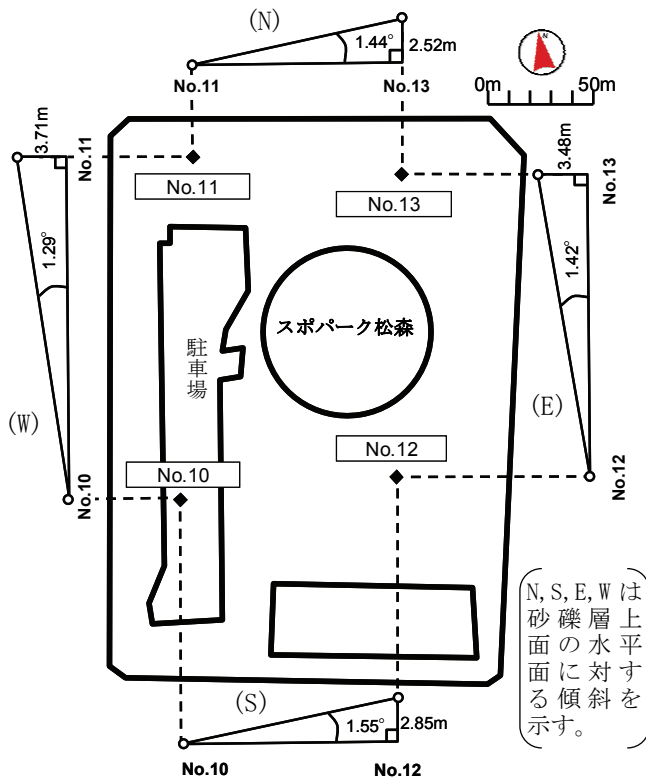
図1 スポパーク松森平面概要図と被害位置³⁾

が軟弱地盤であり、その底面(N 値が急に大きくなる砂礫層上面)と地表面は概略南(南西)方向に傾いていることがわかる。即ち、ボーリング地点の砂礫層の上面の深さを直線で結んでみると、図 2(a)の N, S, E, W 図のようになり、No. 12 と No. 10 の間は約 1.55° 、No. 13 と No. 11 の間は約 1.44° の角度で西側へ傾き、No. 11 と No. 10 の間は約 1.29° 、No. 13 と No. 12 の間は約 1.42° の角度で南側へ傾いており、砂礫層上面は全体的にはほぼ南西方向に傾いている。しかし、図 4 の土質柱状図を詳しく見ると、地震時の地盤変位の発生に大きく影響すると考えられる表層の有機物混じり粘土層は、南北方向には北側より南側の方が厚く(約 2 倍)、東西方向には東側より西側の方が薄く敷地全体で不均等な厚さで分布していることが分かる。また、最も厚いのは No. 12 地点で最も薄いのは No. 11 地点であり、その土層を 2 点間でつないだ方向(有機物混じり粘土層厚さの最大変化方向)は南南東-北北西となっており、その方向は(a)で推定した地震時の力の作用方向(ほぼ南方向)と近いことが分かる。

3. 余震観測結果より求めたフーリエスペクトル比の比

ここではまず、文献⁵⁾に示されているスポパーク松森周辺の計 4 ヶ所の観測点 A~D(図 3)における余震観測の結果の水平成分(2 方向のベクトル和)のフーリエスペクトル比をディジタイザー(Image to graph プログラム)によって数値化した(図 4)。なお、このスペクトル比は各観測点の泉電力ビルの観測点(岩盤上)に対する比であり、地

盤増幅特性を示すといわれるものである。次に、Excel によって同上スペクトル比の比 B/A , D/A を図 3 のように求めた。この比を観測点間の振動振幅比とみなし、図 3(a), (b)の 2 つのグラフを比較すると、 B/A のスペクトル比曲線は低周波数側域で 1.0 以上の値を示し駐輪場の地盤の方がスポパーク松森より大きく動くことが分かるし、 D/A のスペクトル



(a) 土質調査位置(文献 4)に追加

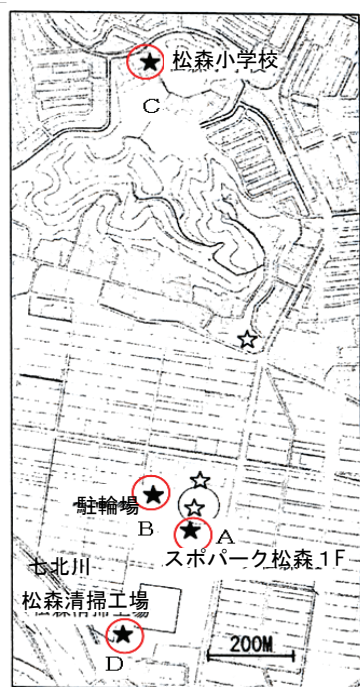
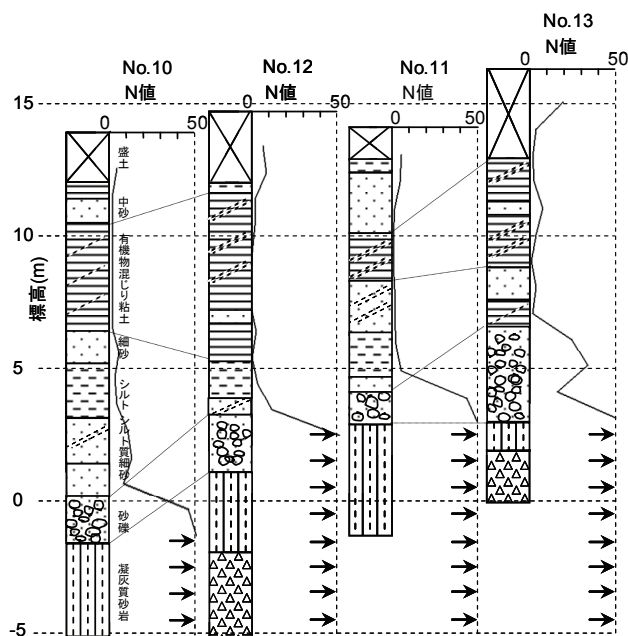


図 3 余震観測地点 A~D⁴⁾



(b) 土質柱状図⁴⁾

図 2 敷地内の地盤調査結果(整地前)

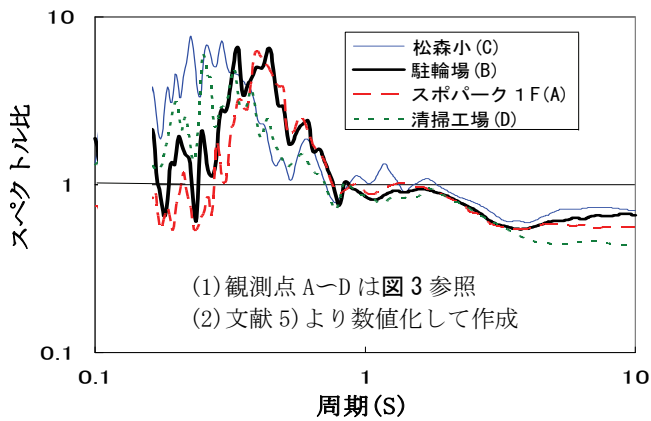


図 4 余震観測による水平成分のフーリエスペクトル比

ル比曲線は大きいピーク値を持っており、D 地点の地盤は A 地点の地盤より動きやすいことが分かる。

4. 被害機構の推定

被害状態や地盤状態及びスペクトル比の比から、今回のスポパーク松森の建物の地震被害機構は図 6 のように推察される。即ち、地震で地盤はその傾斜方向に動きやすいが、ウォーターライダーという重く基礎がさらにしっかりした構造部分が地盤の動き（その傾斜方向）に大きく抵抗したため、特に大きく動いた南側の地盤から基礎が大きい力（偏土圧）を受け、ダルマ落しのような現象が発生して天井落下等の被害が発生したことが考えられる。それには基礎杭が基盤にしっかりと根入れされていたため杭と基礎が地盤に人工的な不連続点をつくって地盤の動きに大きく抵抗したことが影響していると考えられる。

このように、地震によるスポパーク松森の建物被害は地盤と関係があり、人工的に地盤の不連続点を作って建物基礎が地盤から偏土圧を受けたために発生したことが考えられる⁶⁾。

5. 地震応答解析

地震で被害を生じるか否かは①地震条件や②地盤条件、③構造物条件に影響されるが⁷⁾、構造物の地震被害は地盤条件の変化点で多くみられることが調べられている⁶⁾。そのためここでは、前述したスポパーク松森の建物被害への地盤の影響を明らかにするために、簡易モデルを数パターン作成し、その地震応答解析結果を比較検討することによって、地震時に地盤が構造物に与える影響について考察する。

即ち、以上のような推定結果から地盤条件変化点に着目した建物の地震応答解析を行うことにする。

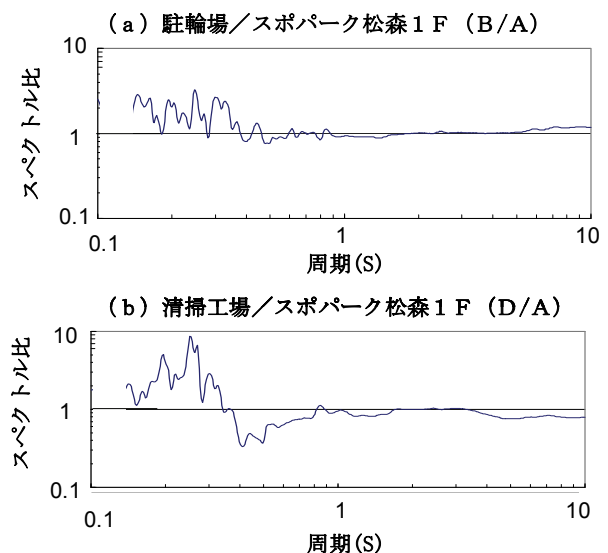


図 5 各点の余震観測記録とスポパーク松森 1F とのフーリエスペクトル比の比曲線

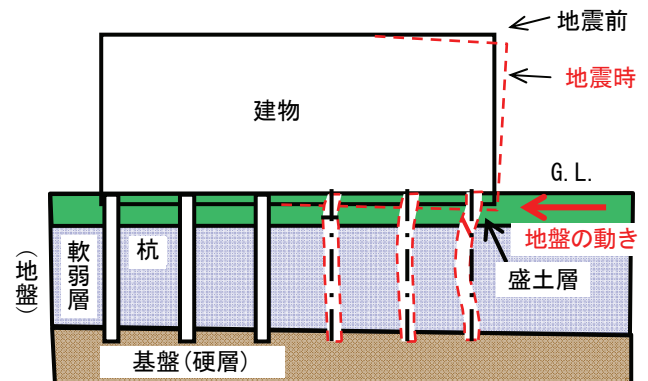
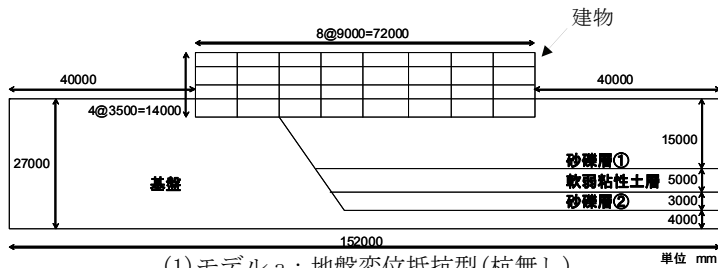


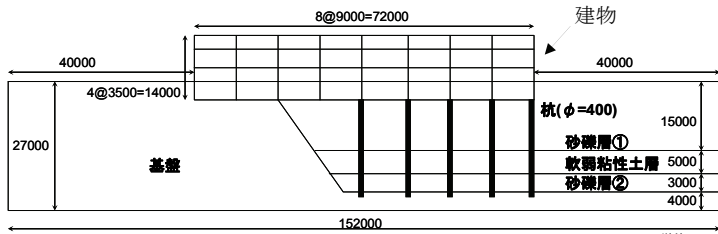
図 6 建物の地震被害と地盤と基礎の関係の推定図 (文献6)を修正)

解析モデルとして建物は地上 3 階、地下 1 階のラーメン構造で鉄筋コンクリート造、基礎は PC 杭、土層は上から砂礫層、軟弱粘性土層、砂礫層、基盤からなる 4 層に設定した。図 7 に示すように、全部で 4 通りのモデルの解析を行って、地盤条件変化点の有無や杭基礎の有無によりどのような影響があり実際の地震被害と比べてどのような違いがあるかも検討する。

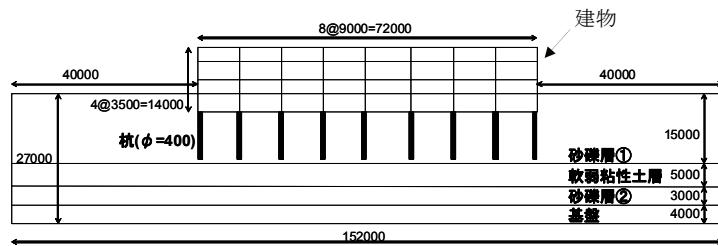
解析に用いた構造物と地盤の特性値、及び地盤の非線形性を考慮するための特性曲線を表 1 と図 8⁸⁾に示す。地震応答解析を行うに当たっては 2 次元地震応答解析プログラム micro-FLUSH⁹⁾を用いた。入力地震動は 1995 年兵庫県南部地震の際に神戸海洋気象台で観測された地震波 (NS 成分、図 9)¹⁰⁾であり、最大値を 300gal に調整して解析モデル基盤側から入力して解析モデルを水平方向に加振する。



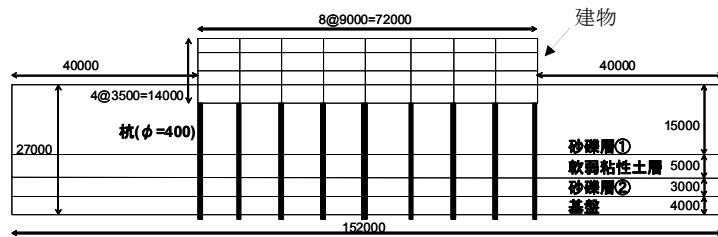
(1) モデル a：地盤変位抵抗型(杭無し)



(2) モデル b：地盤変位抵抗型(支持杭付)



(3) モデル c：地盤変位追従型(摩擦杭付)



(4) モデル d：地盤変位追従型(支持杭あり)

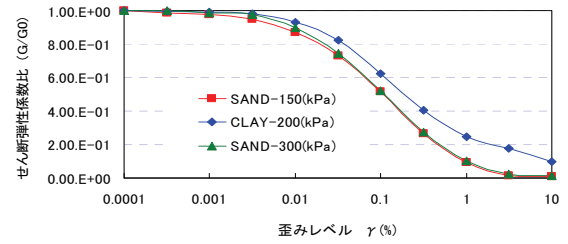
図 7 応答解析モデル

6. 解析結果

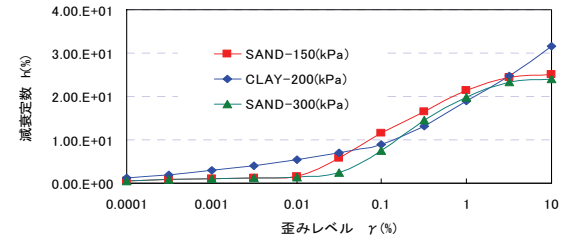
解析により各種のデータが得られるが、今回は相対変位に着目した。図 10(1)は建物左端における水平方向の相対変位の鉛直方向分布、同(2)は建物右端における水平方向の相対変位の鉛直方向分布である。図 11 はモデル a～d のメッシュ変位図である。図 10, 11 より以下のことが分かる。

(1) 地盤変位抵抗型モデル(モデル a, b)

建物左端部の表層地盤内の変位は異種支持地盤状態にあるモデル a, b で小さく、同種支持地盤状態にあるモデル c, d で大きく、支持地盤の違いが現れているが、屋上の変位はモデル a, c, d の 3 つでほぼ同じ変位で、モデル



(1) せん断弾性係数比



(2) 減衰定数

図 8 地盤材料のひずみ非線形特性曲線⁸⁾

b ではそれより大きい変位となっている。しかも、モデル a, b では建物左端部の表層地盤内の変位は建物右端部の表層地盤内の変位よりもかなり大きく、大きい不同変位が発生している。

地盤変位抵抗型モデルのモデル a～d では基礎と砂礫層②ではほとんど変位せず、軟弱粘性土層で一度大きく変位する。地表面にあたる高さ 27m 付近から建物の屋上に向かって急激に大きく変位していることが分かる。屋上に当たる高さ 37.5m の地点ではモデル a で 0.1m、モデル b で 0.2m 変位を示している。建物変位に関していえばモデル b の方が 2.5 倍の変位を示す。

(2) 地盤変位追従型モデル(モデル c, d)

建物左端部の表層地盤内の変位は、地盤変位追従型モデルのモデル c, d では地盤変位抵抗型モデルのモデル a, b と比べて表層地盤内での変位はほぼ一定の約 0.1m とおおよそ 2 倍の値となっている。しかも、建物左端部の表層地盤内の変位と建物右端

表 1 建物と杭と地盤の材料特性

(1) 建物と杭

	ポアソン比 ν	単位体積重量 $\gamma_t(\text{tf/m}^3)$	せん断弾性係数 $G_0(\text{tf/m}^2)$	初期せん断弾性係数 $G_0(\text{tf/m}^2)$	初期減衰定数 $h(\%)$	材料特性曲線 $G \sim \gamma, G \sim h$ 曲線
柱	0.2	25	8800	201029	0.0054	0.833
梁	0.2	25	4800	200829	0.0131	0.833
杭	0.2	25	6600	201735	0.0031	0.7

(2) 地盤⁸⁾

	ポアソン比 ν	単位体積重量 $\gamma_t(\text{tf/m}^3)$	初期せん断弾性係数 $G_0(\text{tf/m}^2)$	初期減衰定数 $h(\%)$	材料特性曲線 $G \sim \gamma, G \sim h$ 曲線
砂礫層①	0.49	1.8	5453	5	SAND-150(kPa)
軟弱粘性土層	0.45	1.4	357	10	CLAY-200(kPa)
砂礫層②	0.49	1.8	5453	5	SAND-300(kPa)
基礎	0.45	2	50000	3	一定

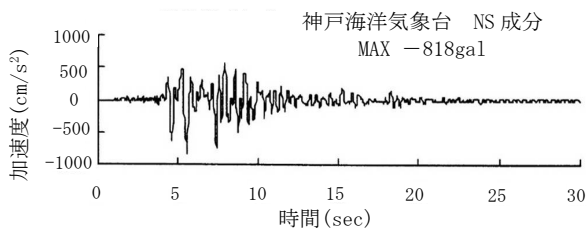


図9 地震入力波形¹⁰⁾

部の表層地盤内変位はほぼ等しく、これは地盤の動きに追従して基礎と建物がともに地盤とほぼ平行に変位したことを表している。また、地表面より上方をみると高くなるほど大きい変位が発生しているが、その増加割合はモデルdの方がモデルcよりも大きく、屋上では両モデルでほぼ同じ変位となっている。なお、摩擦杭のモデルcの方が支持杭モデルdよりも大きい変位を示しており、基礎構造の違いが現れている。図11からも上記(1)、(2)のことが分かる。

7. まとめ

2005年宮城県沖地震の際のスポパーク松森の建物の被害原因を明らかにするために、余震観測結果や地盤状態等を調べるとともに、地震応答解析を行った。その結果を次に述べる。

- 余震観測結果や地盤状態、被害状態を調べた結果、スポパーク松森の建物被害は地盤と関係があり、しっかりした杭が人工的な地盤の不連続点を作って建物基礎が地盤から偏土圧を受けたために発生したことが推察される。
- 地震応答解析結果から、水平方向に硬質地盤と軟質地盤の境界部がある場合(異種支持地盤状態、モデルa, b)、軟弱地盤側に支持杭を持つ建物は持たない建物よりも建物の変位が大きくなる。それは基礎まで杭がしっかり根入れされていると杭と基礎が地盤に人工的な不動点を作り、地震時の地盤の動きに大きく抵抗して大きい偏土圧を受けるためその

反動で建物には大きな変位が生じて層崩壊などの被害が発生しやすいことを示すものと考えられる。また、この場合、地盤に大きい不同変位が発生するとともに、建物の軟弱地盤側に支持杭を持たない建物でも変位は大きいので、支持杭の有無に関わらず被害を受けやすいことが分かる。

c) また、地震応答解析結果から、水平方向に一樣な地盤の場合(同種支持地盤状態、モデルc, d)、支持杭を持つ建物は摩擦杭の建物よりも変位の高さ方向の増加割合が大きい、建物屋上では両モデルでほぼ同じ変位となっている。また、建物底面部の地盤変位は一樣であり、これらのことから摩擦杭を持つ建物は地盤の変位に追従するため建物は被害を受けにくい傾向にあること、支持杭を持つ建物は地盤の変位に抵抗して地盤から偏土圧を受けやすく被害が発生しやすい傾向があることを示唆することが推察される。

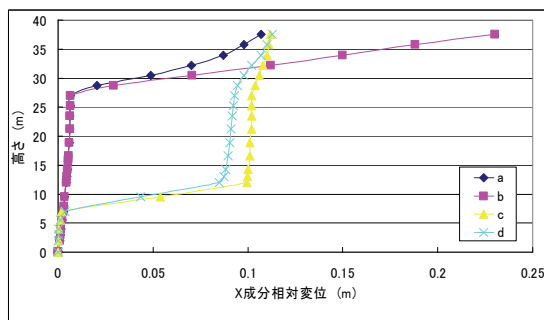
以上の結果から、スポパーク建物はモデルdに相当しているため、その地震被害には地盤変位の影響が大きかったことが推察される。

8. おわりに

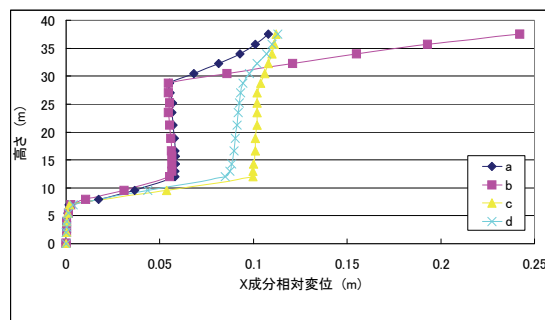
以上の地震応答解析は簡易モデルで行ったものであり、今後とも詳細な解析を続けて建物の地震被害原因追究の深度化を図る予定である。

なお、以上のような構造物の地震被害防止、軽減のためには、地盤の不連続点をつくらないようにすることが必要と考えられる。それには、地盤の動きに追従する摩擦杭や浮き基礎構造にすること^{1), 6)}、あるいは建物周囲にドライエリアを設けて周囲地盤の影響を受けないようにすることや、建物周囲を幅広く地盤改良すること等が有効であると考えられる。

最後に、今回の研究を進めるに当たってお世話になった東北大学大学院の源栄正人、佐藤健両先生と文献の著者の方々、並びに地震応答解析でお世話になった(株)地震工学研究所と(株)基礎地盤コンサルタンツの関係者に厚く御礼を申し上げます。



(1) 建物左端におけるX(水平)成分相対変位



(2) 建物右端におけるX(水平)成分相対変位

図10 相対変位解析結果

建物
砂礫層①
軟弱粘性土層
砂礫層②
基礎

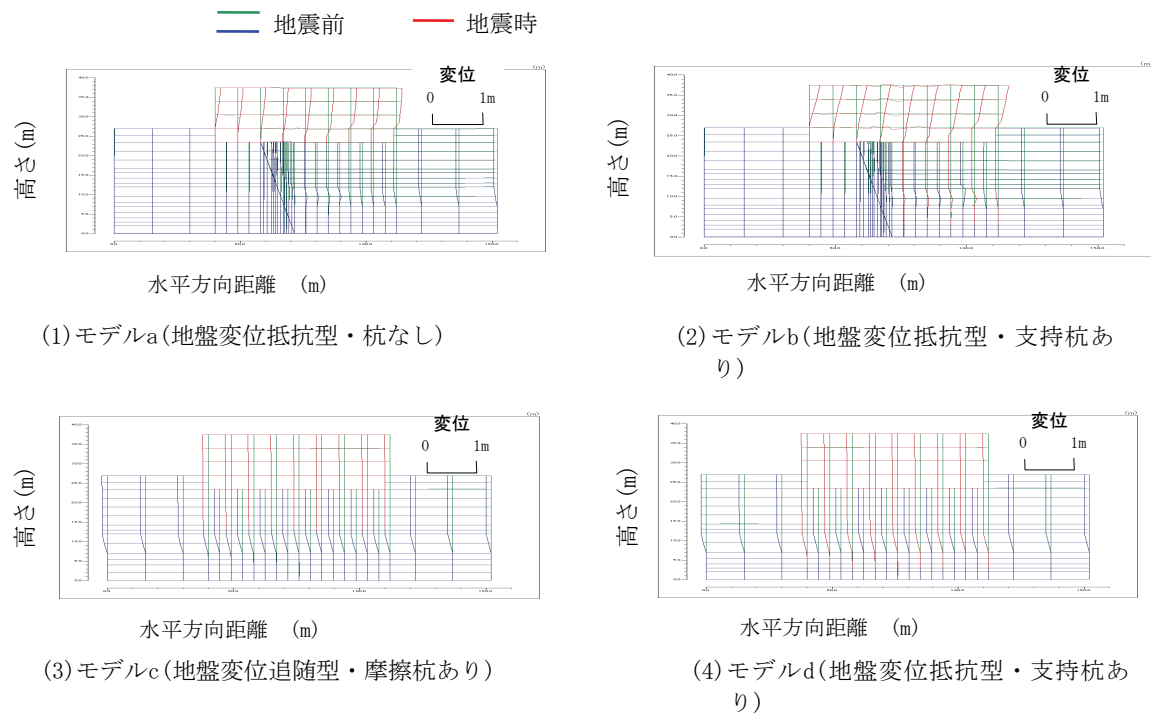


図 11 メッシュ変位図(最大変位応答値)

参考文献

- 1) 那須誠, 宮崎博敏, 中田良輔: 2005 年宮城県沖地震による建物被害と地盤の関係の考察, 第 26 回日本自然災害学会学術講演会講演概要集 CD-ROM, pp107-108, 2007. 9.
- 2) 宮崎博敏, 那須誠: 地盤条件変化点の建物の地震被害への影響, 土木学会第 35 回関東支部技術研究発表会講演概要集 CD-ROM, No. 43, 2008, 3.
- 3) 日本建築学会シェル・空間構造委員会, 耐震性能小委員会編: 2005 年 8 月 16 日宮城県沖を震源とする地震による天井落下被害速報, 日本建築学会 AIJ ホームページ, 2005. 8.
- 4) (仮称) 松森工場関連市民利用施設整備事業要求水準書(変更案), 平成 15 年 3 月 31 日, 仙台市.
- 5) 山本優, 阿部雅史, 源栄正人, 山中浩明, 元木健太郎: 仙台市松森周辺における余震・微動観測と地盤震動特性, 第 24 回日本自然災害学会学術講演会概要集, pp. 37-38, 2005. 11.
- 6) 那須誠: 地震による被害構造物と無被害構造物の地盤の違い, 土木建設技術シンポジウム 2003 論文集, pp. 299-306, 2003. 7.
- 7) 池田俊雄: 新編 地盤と構造物, pp. 151, 鹿島出版会, 1999. 1.
- 8) 那須誠, 羽矢洋: 鉄道線路沿いの土の動的性質, 鉄道総研報告, Vol. 2. No1, pp. 45~51, 1988. 1.
- 9) (株) 基礎地盤コンサルタンツ編: Flush Complex マニュアル, 2000.
- 10) (財) 日本気象協会編: 平成 7 年兵庫県南部地震の記録, 1995.

A STUDY ON EFFECT OF GROUND UPON DAMAGE TO SPO-PARK MATSUMORI BUILDING DUE TO THE 2005 MIYAGIKEN-OKI EARTHQUAKE

Makoto Nasu, Toshihiro MIYAZAKI

The Spo-park Matsumori buiding had been damaged by the 2005 Miyagiken-oki. At first, it has been made clear from damaging states, observed result of aftershock and ground condition that its damage was greatly influenced by ground. Next, in order to confirm influence of ground, earthquake response analyses have been carried out by using four analyzing models made from view point of changing point of ground condition