

السلوك الديناميكي للأبنية البيتونية المسلحة المعزولة زلزالياً باستخدام نظامي الكرات المعدنية والنواس الاحتكاكي

الدكتور عصام ناصر*

الدكتور عبد الرحمن السرحان بجبوج**

نسرين الجبيلي***

(تاريخ الإيداع 11 / 1 / 2009. قُبل للنشر في 8/10/2009)

□ ملخص □

يهدف هذا البحث إلى دراسة السلوك الديناميكي للأبنية البيتونية المسلحة المعزولة زلزالياً باستخدام نظامي الكرات المعدنية (ball system) والنواس الاحتكاكي (FPS). فقد تم استخدام النمذجة العددية لبعض الأبنية بمساعدة البرنامج Etabs، ثم تقييم الاستجابة الديناميكية للنموذج المدروس وفق اتجاهين أفقيين تحت تأثير زلزالي لوما برينا ولوس أنجلوس، قبل وبعد استخدام نظامي العزل المذكورين أعلاه. كما تناول البحث دراسة تأثير بارامترات العازل (FPS) المتمثلة بنصف قطر التفرع (R) ومعامل الاحتكاك (μ) على الاستجابة الديناميكية للأبنية المعزولة تحت تأثير زلزال نورثريدج. لقد أظهر السلوك الديناميكي للنموذج الرياضي المدروس انخفاضاً واضحاً في قيمة القوة المنتقلة، وكذلك في قيمة التسارع الطابقي المطلق الأعظمية، نتيجة استخدام هذين النوعين من أنظمة العزل الزلزالي. وأن قيم التسارع المطلق لأعلى طابق تتناقص مع زيادة نصف قطر التفرع. كما أظهرت النتائج أنه من أجل قيم منخفضة لمعامل الاحتكاك يكون هناك انتقال كبير في عازل FPS وأن هناك قيمة لمعامل الاحتكاك تكون من أجلها قيمة التسارع المطلق لأعلى طابق أصغرية.

الكلمات المفتاحية: العزل الزلزالي، الأبنية، النواس الاحتكاكي (FPS)، نظام الكرات، معامل الاحتكاك.

* أستاذ - قسم الهندسة الإنشائية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

** مدرس - قسم الهندسة الإنشائية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

*** طالبة دراسات عليا (ماجستير) - قسم الهندسة الإنشائية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

The Dynamic Behavior of Seismic Isolated Concrete Buildings by Ball System and Friction Pendulum System

Dr. Issam Nasser*
Dr. Abd Al Rahman Sarhan- Bajbouj**
Nisrine Bahjat Aljubayli***

(Received 11 / 1 / 2009. Accepted 8 / 10 / 2009)

□ ABSTRACT □

This paper aims to study the dynamic behaviour of seismic isolated concrete buildings by ball system and friction pendulum system. Numerical modelling of a building by using Etabs Program is performed, and then the dynamic response of studied model is evaluated, before and after using these two types of isolators. Also, studying the influence of isolator parameters (FPS), such as the radius of curvature(R) and the friction coefficient (μ), on the seismic response of base-isolated buildings is achieved. The results showed a clear reduction of the transmitted force and reduction of maximum absolute floor acceleration. Also, the results indicated that the top floor absolute acceleration decreases with the increase R, and for low values of μ , there is significant sliding displacement in the FPS. In addition, there exists a particular value of μ for which the top floor absolute acceleration attains the minimum value.

Key words: seismic isolation, building, friction pendulum system (FPS), Ball system, friction coefficient.

* Professor, Department Of Structural Engineering, Faculty Of Civil Engineering, Tishreen University, lattakia, Syria.

** Assistant Professor, Department Of Structural Engineering, Faculty Of Civil Engineering, Tishreen University, lattakia, Syria.

***Postgraduate student, Department Of Structural Engineering, Faculty Of Civil Engineering, Tishreen University, lattakia, Syria.

مقدمة:

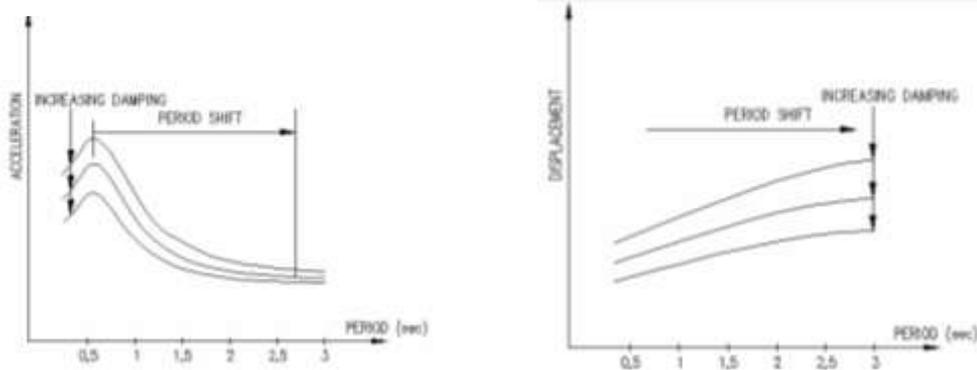
إنّ مسألة العزل الزلزالي هي شكل من أشكال الحماية الزلزالية، تتجلى بزيادة قدرة المنشأ على مقاومة الزلازل أو بتخفيض القوى الزلزالية المنتقلة إليه.

في التصميم التقليدي للمنشآت المقاومة للزلازل هناك خياران للتصميم:

- **زيادة صلابة المنشأ:** حيث تنخفض الانتقالات الطابقيّة، ولكن تزداد معها كل من كلفة المنشأ والتسارعات الطابقيّة. في هذه الحالة لن ينهار المنشأ بتأثير الزلازل، ولكن قد تسبب التسارعات الطابقيّة العالية أضراراً في العناصر غير الإنشائية وفي محتويات المنشأ.

- **زيادة مطاوعة المنشأ:** هذا الأمر يؤدي إلى انخفاض في كلفة المنشأ وفي قيم التسارعات الطابقيّة وبالتالي تتم حماية العناصر غير الإنشائية ومحتويات المنشأ، ولكن الانتقالات الطابقيّة الكبيرة ستؤدي إلى ضرر في العناصر المكونة للمنشأ. من هنا نجد أن التصميم التقليدي لا يؤمن حماية للمنشآت ومحتوياتها في آن معاً، لذلك جاءت أنظمة العزل الزلزالي كإحدى الحلول لهذه المشكلة [1].

يعتمد مبدأ العزل الزلزالي على وضع أنظمة ذات صلابة أفقية منخفضة بين المنشأ والأساس. وهذا سيؤدي إلى إطالة قيمة الدور الأساسي للمنشأ أكثر منه في حالة الاتصال الصلب مع القاعدة. وبالتالي سيتم تخفيض التسارعات وزيادة الانتقالات عند مستوي العزل، كما يظهر في الشكل (1). ويمكن استخدام أنظمة ذات تخامد عالٍ أو وضع عناصر مخددة إضافية تخفض الانتقالات القاعدية.



(b) طيف استجابة التسارع.

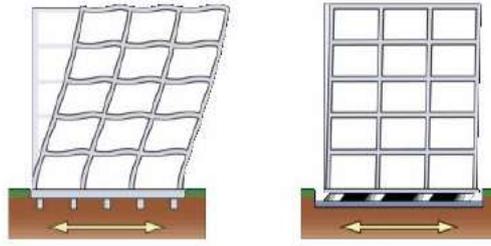
(a) طيف استجابة الانتقال.

الشكل (1) يبيّن طيف استجابة الانتقال والتسارع

عرّف Mays and Bucle (1990) [2] العناصر الأساسية الواجب توفرها في نظام العزل:

- 1- المرونة من أجل إطالة الدور وإعطاء أثر العزل. 2- التخامد، وبالتالي القدرة على امتصاص الطاقة المتسربة إلى المبنى. 3- وسائل تزود النظام بصلابة عالية من أجل مقاومة الحمولات في الظروف الطبيعية. كما أن هناك متطلبات أخرى مثل الديمومة والكلفة وسهولة التنفيذ .

في المنشآت المعزولة تنخفض قيم الانتقالات الطابقيّة بشكل كبير وبالتالي يسلك المنشأ الواقع فوق طبقة العزل سلوكاً صلباً [1]. يبيّن الشكل (2) الانخفاض الواضح لقيم الانتقالات الطابقيّة في حالة المنشأ المعزول.



الشكل (2) الاستجابة الزلزالية لمنشأ معزول وغير معزول
(a) منشأ معزول (b) منشأ غير معزول

أهمية البحث وأهدافه:

يهدف البحث إلى دراسة سلوك الأبنية المعزولة زلزالياً بنظامي الكرات المعدنية والنواس الاحتكاكي وتبيان مساهمة هذين العازلين في امتصاص الطاقة المتسربة إلى المبنى بفعل الهزات الأرضية، وإلى دراسة الاستجابة الزلزالية للنماذج المدروسة قبل العزل وبعده وإيضاح مدى فعالية نظامي العزل في تخفيض هذه الاستجابة وذلك بمساعدة البرنامج الهندسي Etabs. كما يبيّن البحث تأثير بعض العوامل (مثل نصف قطر التقرع للعازل ومعامل الاحتكاك) على أداء العازل وبالتالي على الاستجابة الزلزالية للمنشأ.

طرائق البحث ومواده:

تم في البداية عرض بعض أنواع أنظمة العزل الزلزالي المستخدمة عالمياً، ثم خصائص نظامي العزل المذكورين آنفاً و النمذجة الرياضية لهذين العازلين.

1- أنواع أنظمة العزل:

أ- نظام عزل مطاطي:

نميّز منه المطاط عالي التخماد (High Damping Rubber) (HDR)، المطاط منخفض التخماد (Low Damping Rubber) (LDR)، أو مطاط منخفض التخماد مع لب من الرصاص (Lead-plug Rubber) (LRB) Bearing [2].

ب- نظام عزل يعمل بالانزلاق:

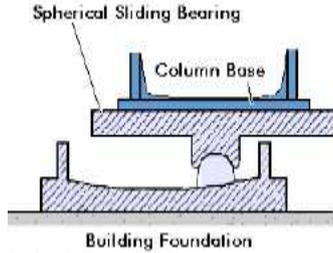
يعتبر هذا النظام من أكثر أنظمة العزل الفعّالة والشائعة الاستخدام إذ تنتم هذه الأنظمة ببساطتها وعملها الجيد تحت تأثير الحمولات الزلزالية القوية. لذلك تم استخدامها في العديد من مشاريع الأبنية والجسور. يشتمل هذا النظام على:

- الأجهزة التي تعمل بالاحتكاك الصافي على سطح مستوي (Pure-friction base isolator):

وهي أبسط نظام يعمل بالانزلاق [3]. وكمثال على ذلك استخدام طبقات من الرمل أو المتدحرجات في أساس المبنى. إن استخدام هذا النوع من العوازل الزلزالية قد يؤدي إلى انتقالات كبيرة، وقد يكون هناك انتقالات متبقية للمنشأ بعد زوال الحدث الزلزالي ولذلك يجب إضافة أجهزة أخرى تضمن إعادة المنشأ لوضعه الأصلي (إعادة التمرکز للمنشأ بعد زوال الحدث الزلزالي) [4].

– نظام النواس الاحتكاكي (Friction Pendulum System (FPS) شكل(3):

يستخدم عازل النواس الاحتكاكي خصائص النواس من أجل إطالة دور المنشأ المعزول، وذلك للتخفيف من تأثير القوى الزلزالية. يتم اختيار دور العازل اعتماداً على اختيار نصف قطر النقر لسطح العازل، إذ إن دور العازل مستقل عن كتلة المنشأ. وبما أن مركز صلابة العازل منطبق بشكل تلقائي مع مركز كتلة المنشأ فيمكن إهمال تأثير الفتل على المنشأ.



(b) مقطع في العازل



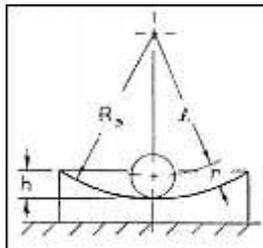
(a) عازل النواس الاحتكاكي

الشكل (3) عازل النواس الاحتكاكي

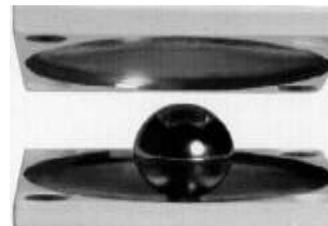
تتميز مساند النواس الاحتكاكي (FPS) بخصائص متعددة تلبى متطلبات مختلف الأبنية والجسور والمنشآت الصناعية. هذه الخصائص تتمثل بقيم دور العازل التي تتراوح ما بين (1~5 sec)، قدرة تحمله للحمولات الشاقولية، إذ يستطيع العازل تحمل حمولة شاقولية تصل إلى 133440KN [5]. كما يمكن أن يسمح هذا العازل بانتقال أفقي مقداره (60 inch)، أما قيم معامل الاحتكاك له تتراوح ما بين (20%~3)، ويعطي هذا العازل تخامد يتراوح ما بين (10 ~ 40%).

– نظام الكرات المعدنية Ball System شكل(4):

هذا النظام يجمع ما بين ميزات التدرج الحر (المتدحرجات Roller)، التي تتسم بقوى احتكاك صغيرة، وبين خاصية الإرجاع البسيطة التي تتمتع بها عوازل FPS. وله قدرة على تخفيض آثار الفتل الناتجة عن التوزع غير المنتظم للكتلة بالنسبة للأبنية غير المتناظرة .



(b) النموذج التحليلي



(a) جهاز العزل بالكرات-مفرد

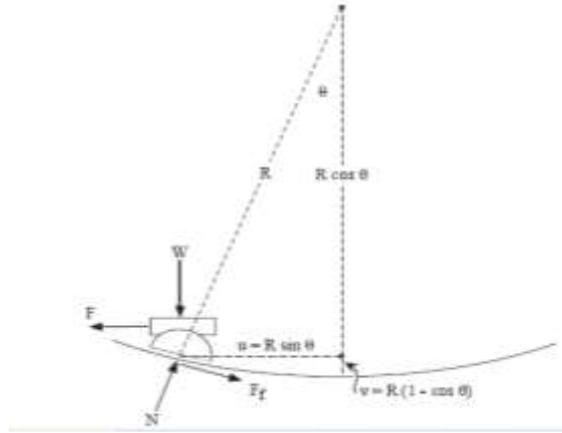
الشكل (4) عازل الكرات

2-خصائص أنظمة العزل:

نبيّن فيما يلي الخصائص الرئيسية لأنظمة العزل:

أ-عازل النواس الاحتكاكي (Friction Pendulum System FPS): تمت دراسة نظام FPS من الناحيتين النظرية والعملية، وقد أثبتت الدراسة فعالية هذا النظام بشكل واسع لأجل الكثير من المنشآت المختلفة [6]. يتألف نظام FPS من شريحة منزلقة (مغطاة بالنقلون) على سطح كروي مصنوع من المعدن المصقول. تتولد قوة

الإرجاع لهذا النظام من خلال انتقال المنشأ على طول السطح الكروي، بينما يتم تبديد الطاقة من خلال الاحتكاك. تتشكل القوة المطلوبة لإحداث الانتقال في المسند من قوة الإرجاع F_r المتولدة نتيجة الحركة النواسية، ومن قوة الاحتكاك F_f على طول سطح الانزلاق. يبين الشكل (5) مخطط الجسم الحر للاحتكاك FPS :



الشكل (5) مخطط الجسم الحر لنظام النواس الاحتكاكي

تعطى مركبتا الانتقال الأفقية والشاقولية بالعلاقتين [7]:

$$u = R \sin(\theta) \quad (1)$$

$$v = R(1 - \cos(\theta))$$

حيث R : نصف قطر التفرع لسطح الانزلاق الكروي.

تعطى القوة الأفقية الجانبية من التوازن، F ، كالتالي [8]:

$$F = F_r + F_f \quad (2)$$

من الشكل السابق نحصل على العلاقة:

$$\sin(\theta) = \frac{F_r}{W} \longrightarrow F_r = W \frac{u}{R} \quad (3)$$

تعطى قوة الاحتكاك F_f بالصيغة التالية [9]:

$$F_f = \mu.N \quad (4)$$

استناداً إلى الشكل السابق يمكن أن نكتب:

$$\cos(\theta) = \frac{N}{W} \quad (5)$$

فتكون قوة الاحتكاك F_f بالشكل التالي:

$$F_f = \mu.W.\cos(\theta) \quad (6)$$

حيث W : الوزن المنقول عبر المسند. μ معامل الاحتكاك.

القوة الأفقية الكلية في العازل تصبح [7]:

$$F = W \frac{u}{R} + \mu.W.\cos(\theta) \quad (7)$$

من أجل الزوايا الصغيرة (θ) يمكن تبسيط المعادلة السابقة بالشكل [7]:

$$F = \frac{W}{R}u + \mu.W.\text{sgn}(\dot{u}) \quad (8)$$

حيث \dot{u} : السرعة sgn: تابع signum ويساوي 1- أو +1 وذلك تبعاً لقيمة السرعة هل هي سالبة أو موجبة على الترتيب .

بشكل عام يتم تصميم عازل الـ FPS من أجل انتقال $u < 0.2R$ وذلك من أجل تخفيض خطأ الحالة اللاخطية (linearization error) ومن أجل تخفيض القوى المتولدة في الأعمدة الإنشائية [7].

إن قوة الاحتكاك المتولدة على سطح الانزلاق تعتمد على القوة الناطمية، ضغط المسند، اتجاه وقيمة سرعة الانزلاق، ومكونات سطح الانزلاق. تمت دراسة الخصائص الاحتكاكية للتفلون والسطح الفولاذي المصقول من قبل Mokha (1988) و Constantinou (1990). وقد اقترح Constantinou علاقة من أجل تحديد معامل الاحتكاك الديناميكي [7].

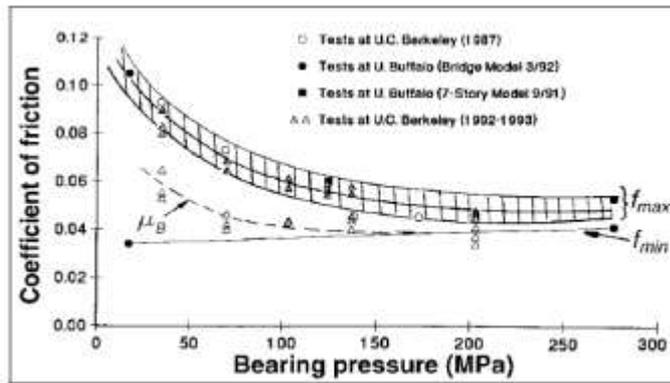
$$\mu_s = f_{\max} - (f_{\max} - f_{\min}) \exp^{-a|\dot{u}|} \quad (9)$$

حيث μ_s : معامل الاحتكاك بالانزلاق. \dot{u} : سرعة الانزلاق.

f_{\max} ، f_{\min} : معامل الاحتكاك عند السرعات المنخفضة والعالية على الترتيب .

a :معامل يحدد حسب الضغط على المسند وسرعة الانزلاق.

تحدد قيم f_{\max} ، f_{\min} ، a بشكل تجريبي بالاعتماد على ضغط المسند وقساوة السطح ومكونات الـ PTFE (التفلون) ويمكن الحصول على قيم هذه المتحولات من الاختبارات وفق Mokha (1988) [7].
يوضح الشكل (6) علاقة معامل الاحتكاك بالضغط المطبق على المسند.



الشكل (6) معامل الاحتكاك لمساند FPS

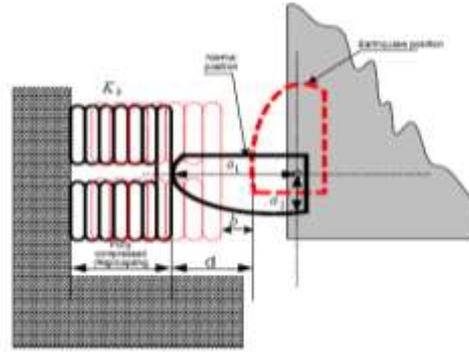
إن دور نظام العزل مستقل عن كتلة المنشأ. ويعطى بالعلاقة [7]:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{W}{gK}} \longrightarrow T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} \quad (10)$$

والذي يمكن للمصمم التحكم به من خلال اختيار نصف قطر النقر للعازل فقط.

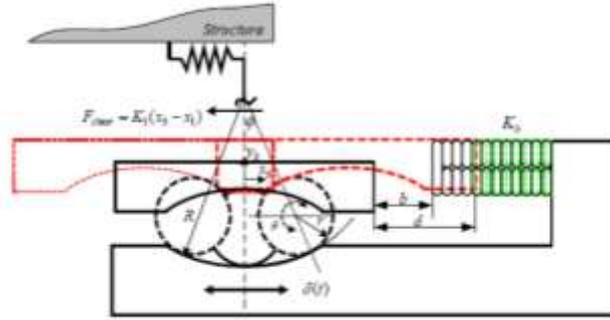
ب- نظام الكرات المعدنية Ball System :

عرض الباحثان H.Kaplan and A.Seirge [10] نظام عزل لحماية المنشآت من الزلازل يتألف من نظام الكرات المعدنية (Ball System) المزود بنظام نابض-حدبة (spring-cam).
إنّ العناصر الرئيسية لهذا النظام هي الكرات المعدنية - سطوح الاستناد الكروية - حدبة التحويل. كما يبيّن الشكل (7).



الشكل (7) آلية عمل الحدبة في مسند الكرات

يتضح من الشكل بأن النوابض الجانبية تكون مضغوطة تماماً بواسطة حدبات التحويل في الظروف الطبيعية للتحميل وبذلك يكون المنشأ متصلاً اتصالاً صلباً مع الأرض. وعند وقوع الحدث الزلزالي تدور الحدبة بزواوية 90° للسماح للنظام بالحركة الأفقية ومن ثم تعود لوضعها الأصلي بعد زوال التأثير [10].
يبيّن الشكل (8) آلية حركة القاعدة أثناء الحدث الزلزالي.



الشكل (8) آلية حركة القاعدة

يمثل x_b : انتقال القاعدة. $\delta(t)$: الانتقال الأرضي. ϕ : زاوية النواس. R : نصف قطر السطح الكروي. r : نصف قطر الكرات المعدنية. K_b : صلابة النوابض الجانبية. b : المسافة بين القاعدة والنابض عندما يكون حراً. d : المسافة بين القاعدة والنابض عندما يكون مضغوط تماماً.

تعطى القيم المثلى للمتحويلات R , b حسب ما ورد في عدد من المراجع منها [10,11] بالشكل:

$$2.5 \leq R \leq 4 \quad (m) \quad 0 \leq b \leq 0.15 \quad (m)$$

يحدد دور الحركة بالمساواة [12]:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} : L = 2(R - r) \quad (11)$$

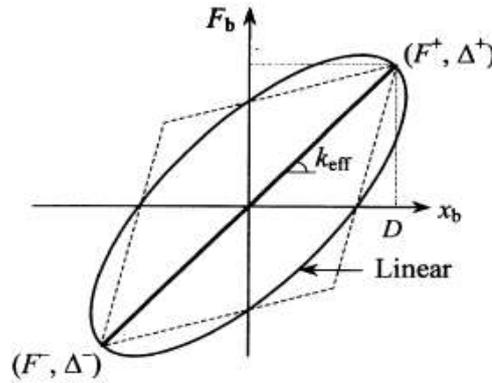
3- النمذجة الرياضية للعوازل :Mathematical Modelling of Isolators

يمكن أن تتم نمذجة العوازل إما كنموذج خطي مكافئ أو نموذج لاخطي:

أ- **النموذج الخطي المكافئ للعوازل:** يمكن استبدال خاصية اللاخطية لعلاقة قوة-انتقال بنموذج خطي مكافئ من خلال استخدام الصلابة المرنة الفعالة والتخامد اللزج الفعال. يتم حساب الصلابة المرنة الخطية المكافئة من أجل كل دورة تحميل (cycle of loading) من مخطط قوة-انتقال الذي يتم الحصول عليه تجريبياً للعازل والذي يعبر عنه بالعلاقة التالية [13]:

$$K_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| - |\Delta^-|} \quad (12)$$

حيث F^+ و F^- القوى الموجبة والسالبة الموافقتين للانتقالات التجريبية Δ^+ و Δ^- على التوالي. يبين الشكل (9) الحلقة التخلفية حيث تمثل K_{eff} الميل للقيمتين الطرفيتين.



الشكل (9) علاقة قوة-انتقال للنموذج الخطي المكافئ [13]

يمكن أن يعبر عن نسبة التخامد اللزج الفعال للعوازل المحسوبة من أجل كل دورة تحميل بالمساواة التالية [13]:

$$\beta_{eff} = \frac{(2E_{Loop})}{\pi K_{eff} (|\Delta^+| - |\Delta^-|)^2} \quad (13)$$

في هذه المساواة: E_{loop} تمثل الطاقة المبددة خلال دورة تحميل واحدة.

ب- **النموذج الثنائي الخطية للعوازل:** يمكن استخدام النموذج الثنائي الخطية (Bilinear) من أجل جميع أنظمة العزل المستخدمة حيث يمكنه أن يعكس السلوك اللاخطي لأنظمة النواس الاحتكاكي الشائع الاستخدام كوسيلة عزل زلزالي. يمكن أن تتم نمذجة السلوك قوة-انتقال اللاخطي لنظام العزل من خلال الحلقة التخلفية الثنائية الخطية بالاعتماد على ثلاثة متحولات، كما يظهر في الشكل (10):

• الصلابة المرنة K_1 .

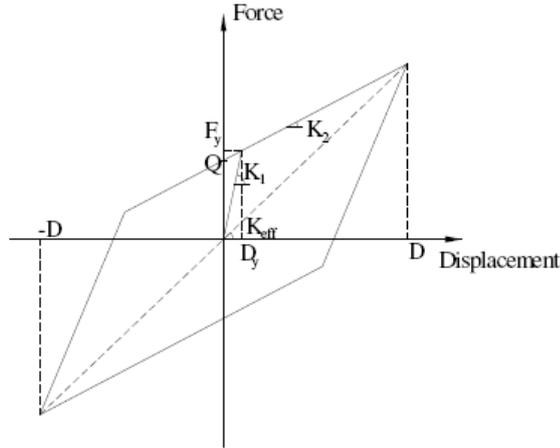
• المقاومة المميزة (قوة الخضوع) Q التي تتعلق بمعامل الاحتكاك للنواس الاحتكاكي [13]:

$$Q = \mu.W \quad (14)$$

• الصلابة ما بعد الخضوع K_2 [5]:

$$K_2 = \frac{W}{R} \quad (15)$$

يحدث الخضوع عند انتقال D_y و الذي تكون قيمته صغيرة جداً من مرتبة ($D_y = 2 \text{ mm}$) [13].



الشكل (10) علاقة قوة-انتقال للنموذج الثنائي الخطية [1]

من أجل انتقال تصميمي D يعبر عن الصلابة الفعالة بالعلاقة التالية [1]:

$$K_{eff} = K_2 + \left(\frac{Q}{D}\right) \quad D > D_y \quad (16)$$

$$K_{eff} = \frac{W}{R} + \frac{\mu W}{D} \quad (17)$$

حيث D_y يمثل الانتقال اللدن ويعطى بالصيغة التالية [1]:

$$D_y = \frac{Q}{(K_1 - K_2)} \quad (18)$$

يعبر عن التخماد الفعّال بالمساواة التالية [1]:

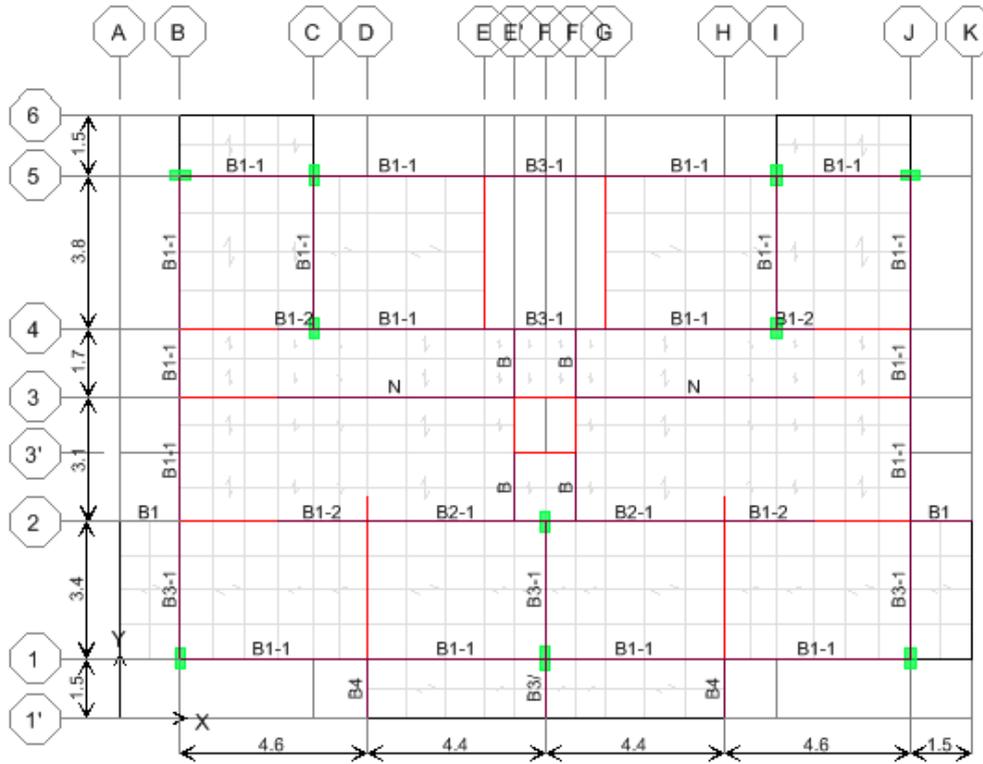
$$\beta_{eff} = \frac{4Q(D - D_y)}{(2\pi \cdot K_{eff} D^2)} \quad (19)$$

النتائج والمناقشة:

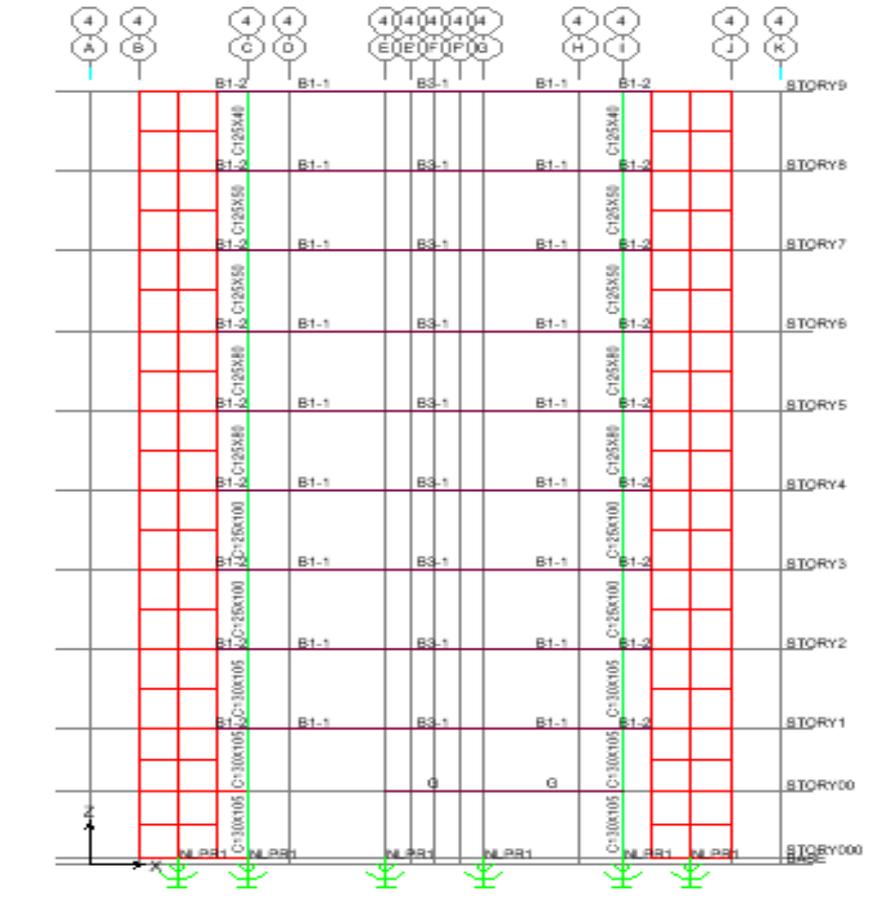
من أجل مقارنة أثر نظامي العزل FPS و Ball system على الاستجابة الديناميكية للأبنية، تمت دراسة سلوك بناء من البيتون المسلح قبل العزل وبعده باستخدام البرنامج الهندسي ETABS. حيث استخدمنا التحليل اللاخطي للسجل الزمني. وقد قمنا باستخدام السجل الزلزالي لزلزال لومابريتا ($Acc_x=1.874, Acc_y=2.384\text{m/s}^2$)، وكذلك السجل الزمني لزلزال لوس أنجلوس ($Acc_x=2.173, Acc_y=2.507\text{m/s}^2$).

-خصائص المبنى قيد الدراسة:

- أبعاد جوائز المبنى في كافة الطوابق (cm): $25 \times 55, 80 \times 50, 50 \times 25$.
- مقاطع الأعمدة (cm): $125 \times 30, 120 \times 25, 105 \times 30, 100 \times 25, 80 \times 25, 50 \times 25, 40 \times 25$.
- سماكة مقطع جدران القص (cm): $20, 25, 30$.
- ارتفاع الطابق المتكرر 3m ، الحمولة الميتة على البلاطات 0.3 Ton/m^2 والحمولة الحية 0.2 Ton/m^2 .
- إن الوزن الكلي للمبنى ($W=4360.56 \text{ ton}$) ودوره الأساسي ($T_s=0.9135 \text{ sec}$).
- يبين الشكلان التاليان (11),(12) مسقطاً للطابق المتكرر ومقطعاً في المبنى قيد الدراسة.



الشكل (11) مسقط الطابق المكرر



الشكل(12)مقطع في المبنى المدروس

1- حساب خصائص أنظمة العزل قيد الدراسة:

لقد تمت نمذجة عناصر العزل من خلال استخدام عنصر ربط لاخطي (The nonlinear linke element) Nllink)والمعرف بـIsolator2 في برنامج ETABS، والذي يبدي سلوكاً لاخطياً يعتمد على الخصائص الموضحة في الجدول (1):

الجدول(1) خصائص نظامي العزل المعتبرين

عازل الكرات المعدنية(Ball System)	عازل النواس الاحتكاكي(FPS) Isolator2			
695651.95	695651.95	الصلابة الفعالة K_v (ton/m)	الخطي	U1 (Ver)
695651.95	695651.95	الصلابة K_v	اللاخطي	
90.1	135.64	الصلابة الفعالة K_{eff} (ton/m)	الخطي	الاتجاهين الأفقيين (U2,U3)
709	4461.034	الصلابة K_l (ton/m)		
-	0.07	معامل الاحتكاك من أجل السرعة الكبيرة f_{max}		

-	0.03	معامل الاحتكاك من أجل السرعة الصغيرة f_{min}	اللاخطي
-	50	معامل التحكم a (m/sec)	
1	1.55	نصف قطر التفرع لسطح الانزلاق R (m)	
0.4358	0.31	الانتقال الجانبي المسموح D_{all} (m)	
0.1	-	نصف قطر الكرات المعدنية r (m)	
0.01	0.01	معامل الاحتكاك بالتدرج μ_0	
1.8	-	الطول المكافئ $L=2(R-r)$ (m)	
45.54	-	صلابة النابض K (ton/m)	

أ- عازل النوايس الاحتكاكي (FPS):

نختار الدور التصميمي لنظام العزل $T_D=(2\sim 3\text{sec})$

بافتراض أن $T_D=2.5 \text{ sec}$ نحصل على نصف قطر التفرع للعازل: $R=1.55\text{m}$ $2.5 = 2\pi \sqrt{\frac{R}{9.81}}$

فيكون الانتقال المسموح به $D_{all} = \frac{R}{5} = 0.31\text{m}$ ، بافتراض معامل الاحتكاك من أجل السرعات الكبيرة والصغيرة 0.07, 0.03 كما هو وارد في المرجع [7] .

تحسب الصلابة الفعالة من العلاقة (17) فنحصل على الصلابة الفعالة لنظام العزل المكون من 28 عازلاً:

$$K_{eff} = \frac{4360.56}{1.55} + 0.07 \frac{4360.56}{0.31} = 3797.91$$

استناداً للكود FEMA450 وشرحه الوارد في الملحق FEMA451 فإن جميع العوازل لها الخصائص ذاتها على اعتبار أنّ لها الحجم نفسه، وباعتبار وجود ديافرام صلب عند مستوي العزل، فتكون الصلابة الفعالة لعازل واحد:

$$K_{eff} = \frac{3797.91}{28} = 135.64\text{ton/m}$$

تحسب الصلابة الشاقولية بافتراض الدور الشاقولي للعازل مساوٍ لـ $T_v=0.03\text{sec}$ [5] ، من العلاقة

$$K_v = \frac{W}{g} \cdot \frac{(2\pi)^2}{(T_v)^2} . K_v = 695651.95\text{ton/m}$$

بافتراض $D_y=2.5\text{mm}$ كما هو وارد في المرجع [5]، نحصل على الصلابة الأولية K_1 من الصيغة (18) وذلك بعد حساب قيمة K_2 من العلاقة (15) وقيمة Q من المساواة (14):

$$K_2 = \frac{4360.56}{1.55} = 2813.26 \text{ ton / m}$$

$$Q = 0.07 * 4360.56 = 305.24 \text{ ton}$$

$$K_1 = 2813.26 + \frac{305.24}{0.0025} = 124909.26 \text{ ton / m}$$

فتكون الصلابة الأولية لعازل واحد:

$$K_1 = \frac{124909.26}{28} = 4461.034 \text{ ton/m}$$

$$\beta_{eff} = 0.165 \text{ فيكون } \beta_{eff} = \frac{2}{\pi} \frac{\mu}{\mu + \frac{D}{R}} \text{ بحسب التخامد الفعال من المساواة [14]:}$$

ب- عازل الكرات المعدنية (Ball System):

من أجل مقارنة أداء العازلين، تم افتراض الصلابة الجانبية للعازل نفسها: $K_{eff} = 135.64 \text{ ton/m}$
 بافتراض أن نصف قطر التقرع $R=1 \text{ m}$ ، نصف قطر الكرات المعدنية $r=0.1 \text{ m}$ فيكون طول النواس المكافئ
 $L = 2(R - r) = 1.8 \text{ m}$. يعطى الانتقال الجانبي المسموح بالاستناد للشكل (b-4) بالعلاقة:
 $D_{all} = \sqrt{2Rh - h^2} = \sqrt{2*1*0.1 - 0.1^2} = 0.4358 \text{ m}$

تحتسب الصلابة الفعالة من العلاقة (17) بعد استبدال نصف قطر التقرع (R) بطول النواس المكافئ (L)
 بالشكل الآتي:

$$K_{eff} = \frac{W}{L} + \frac{\mu_0 W}{D} \text{ ، بافتراض أن معامل الاحتكاك بالتدرج } \mu_0 = 0.01 \text{ كما توصي به المراجع [10,11]}$$

، نحصل على الصلابة الفعالة لعازل واحد $K_{eff} = 90.1 \text{ ton/m}$ ، فتكون صلابة النابض الجانبي مساوية
 لـ $(K = 135.64 - 90.1 = 45.54 \text{ ton/m})$.

$$K_1 = K_2 + \frac{Q}{D_y} \text{ من الصيغة (18) } D_y = \frac{Q}{(K_1 - K_2)} \text{ نحصل على الصلابة الأولية } K_1 \text{ بالشكل الآتي}$$

$$K_1 = \frac{W}{L} + \frac{\mu_0 W}{D_y} \text{ بتعويض الصيغتين (14) و (15) مع استبدال } (R) \text{ بـ } (L) \text{ في العلاقة السابقة نحصل على:}$$

فتكون الصلابة الأولية لنظام العزل:

$$K_1 = \frac{W}{L} + \frac{\mu_0 W}{D_y} = \frac{4360.56}{1.8} + \frac{0.01 * 4360.56}{0.0025} = 19864.77 \text{ ton/m}$$

وبالتالي الصلابة الأولية لعازل واحد:

$$K_1 = \frac{19864.77}{28} = 709 \text{ ton / m}$$

يظهر الجدولان (2) و (3) مقادير الاستجابة للنموذج المدروس تحت تأثير زلزال لوما بريتا ولوس أنجلوس:

الجدول (2) مقادير الاستجابة للنموذج المدروس بتأثير زلزال لوما بريتا			
بعد العزل	قبل العزل	رقم الطابق	الواحدة

				FPS	Ball system
Maximum Floor Displacements(X) الانتقال الطائقي الأعملي وفق المحور X	Cm	9	12.98	-6.51	-7.760
		8	11.55	-6.24	-7.670
		7	10.03	-5.96	-7.510
		6	8.41	-5.68	-7.390
		5	6.68	-5.42	-7.260
		4	4.92	-5.16	-7.130
		3	3.22	-4.93	-7.010
		2	1.7	-4.75	-6.890
		1	0.55	-4.63	-6.800
		0	0.12	-4.57	-6.710
			base	0	-4.54
Maximum Floor Acceleration(X) التسارع المطلق الأعملي لكل طابق وفق المحور X	m/sec ²	9	6.693	1.77	-0.859
		8	5.249	1.52	-0.736
		7	-4.664	-1.27	-0.605
		6	-4.258	-1.03	-0.465
		5	-3.77	0.92	0.399
		4	-3.29	0.90	0.373
		3	2.768	-0.89	0.384
		2	2.454	1.06	-0.441
		1	1.99	1.29	-0.534
		0	1.884	1.41	-0.582
			base	1.874	1.46
القص القاعدي(X)	ton		-1207	433.80	210.800
Maximum Floor Displacements(Y) الانتقال الطائقي الأعملي وفق المحور Y	Cm	9	10.68	-11.52	-13.670
		8	9.32	-11.20	-13.420
		7	7.96	-10.87	-13.160
		6	6.58	-10.54	-12.890
		5	5.2	-10.21	-12.620
		4	3.88	-9.89	-12.340
		3	2.64	-9.58	-12.070
		2	1.53	-9.30	-11.830
		1	0.65	-9.06	-11.640
		0	0.19	-8.78	-11.520
			base	0	-8.66
Maximum Floor Acceleration(Y) التسارع المطلق الأعملي لكل طابق وفق المحور Y	m/sec ²	9	7.651	2.41	0.899
		8	6.046	2.07	0.791
		7	5.043	1.73	0.717
		6	4.941	1.37	0.668
		5	4.63	1.17	0.676

تابع الجدول(2)

Maximum Floor Acceleration(Y)	الوحدة	رقم الطابق	قبل العزل	بعد العزل	
				FPS	Ball system
التسارع المطلق الأعظمي لكل Y طابق وفق المحور	m/sec ²	4	-4.267	1.16	0.714
		3	-3.755	1.37	0.753
		2	3.082	1.63	0.788
		1	2.667	1.88	0.816
		0	2.438	2.04	0.831
		base	2.384	2.16	0.837
القص القاعدي (Y)	ton		1486	-524.20	342.800
الطاقة الداخلة				76.56	48.350
الطاقة الممتصة من قبل العازل				36.61	10.350
الطاقة المتسربة إلى المبنى				39.95	38.00
الجدول (3) مقادير الاستجابة للنموذج المدروس بتأثير زلزال لوس أنجلوس					
Maximum Floor Displacements(X)	الوحدة	رقم الطابق	قبل العزل	بعد العزل	
				FPS	Ball system
الانتقال الطائفي الأعظمي وفق المحور X	Cm	9	13.84	10.03	13.36
		8	12.22	9.72	13.04
		7	10.5	9.39	12.7
		6	8.69	9.04	12.35
		5	6.84	8.68	11.99
		4	4.99	8.31	11.63
		3	3.24	7.94	11.28
		2	1.73	7.6	10.97
		1	0.58	7.33	10.72
		0	0.13	7.18	10.49
		base	0	7.12	10.42
Maximum Floor Acceleration(X)	m/sec ²	9	7.721	2.823	-1.325
		8	6.223	2.432	-1.177
		7	4.894	2.017	-1.024
		6	4.572	1.571	-0.8671
		5	4.278	1.095	-0.7249
		4	3.953	-1.096	-0.6499
		3	3.866	-1.284	-0.6938
		2	3.17	-1.613	-0.7689
		1	2.149	-1.783	-0.8385
		0	2.192	-1.929	-0.875
		base	2.173	2.287	-0.8936
القص القاعدي (X)	ton		-1212	557	-388

تابع الجدول (3)

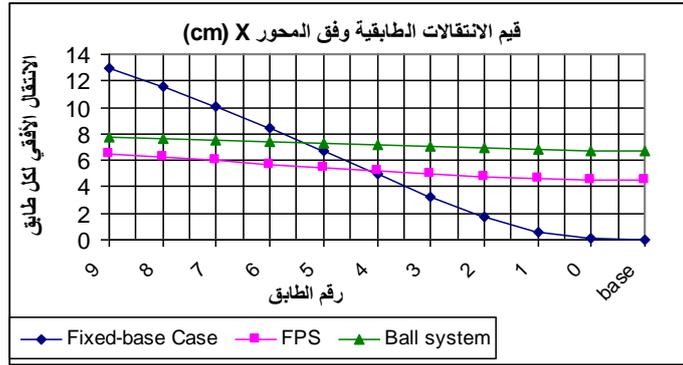
	الوحدة	رقم الطابق	قبل العزل	بعد العزل	
				FPS	Ball system
Maximum Floor Displacements(Y) الانتقال الطائقي الأعظمي وفق المحور Y	Cm	9	9.75	-6.41	-19.87
		8	8.68	-6.1	-19.47
		7	7.55	-5.79	-19.06
		6	6.32	-5.47	-18.63
		5	5.05	-5.16	-18.2
		4	3.76	-4.85	-17.77
		3	2.52	-4.56	-17.34
		2	1.44	-4.28	-16.94
		1	0.57	-4.04	-16.59
		0	0.18	-3.82	-16.24
			base	0	-3.69
Maximum Floor Acceleration(Y) التسارع المطلق الأعظمي وفق المحور Y	m/sec ²	9	7.681	2.759	-1.605
		8	5.219	2.266	-1.454
		7	3.959	1.76	-1.298
		6	4.54	-1.325	-1.144
		5	4.734	-1.081	-0.9962
		4	4.611	-1.081	-0.9572
		3	4.365	-1.424	-1.057
		2	3.614	-1.66	-1.158
		1	2.693	-2.302	-1.244
		0	2.498	-2.23	-1.289
			base	2.507	-2.325
القص القاعدي (Y)	ton		-1220	540.8	471.9
الطاقة الداخلة				35.59	25.39
الطاقة الممتصة من قبل العازل				23.07	8.785
الطاقة المتسربة إلى المبنى				12.52	16.605

نسب تخفيض قوى القص وقيم الطاقة للعازلين المدروسين مبيّنة بالجدول (4).

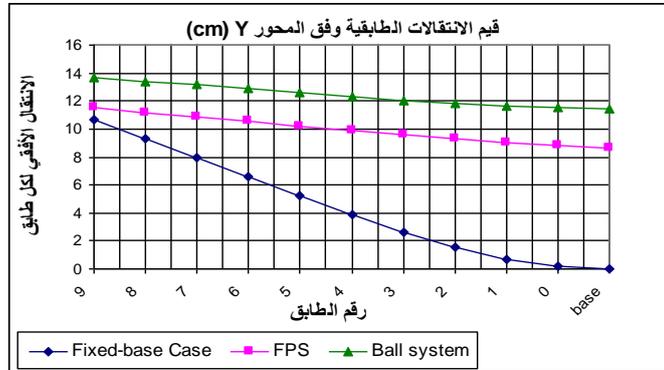
الجدول (4) نسب التخفيض لكل من القص والطاقة بالنسبة للعازلين المعتمدين.

لوس أنجلوس		لوما بريتا		
Ball System	FPS	Ball System	FPS	
67.987	54.043	82.535	64.059	نسبة تخفيض القص القاعدي وفق المحور X %
61.32	55.672	76.931	64.724	نسبة تخفيض القص القاعدي وفق المحور Y %
34.60	64.82	21.41	47.819	نسبة الطاقة الممتصة إلى الطاقة الداخلة %
65.40	35.18	78.59	52.181	نسبة الطاقة المتسربة إلى الطاقة الداخلة %

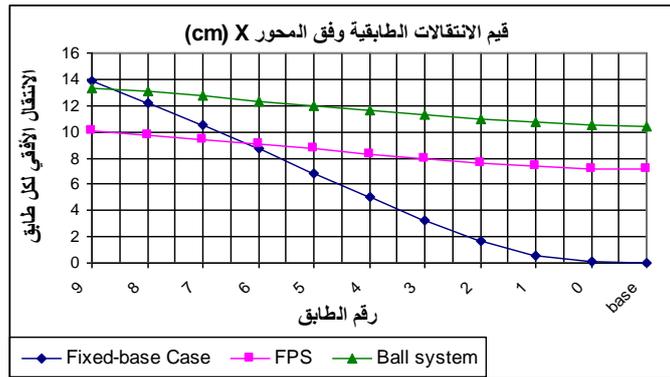
تظهر الأشكال (13,14,15,16) قيم الانتقالات الطائقية للمبنى تحت تأثير زلزالي لوما بريتا ولوس أنجلوس.



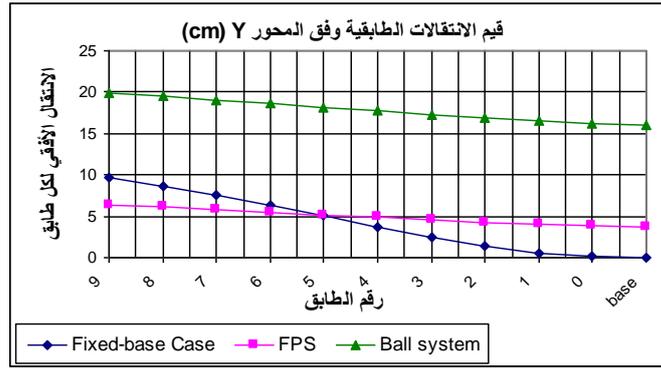
الشكل (13) قيم الانتقالات الطابقية للمبنى قبل العزل وبعده وفق المحور X تحت تأثير زلزال لوما بريتا



الشكل (14) قيم الانتقالات الطابقية للمبنى قبل العزل وبعده وفق المحور Y تحت تأثير زلزال لوما بريتا



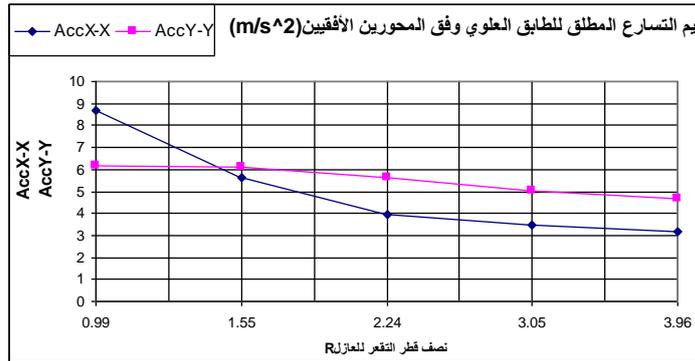
الشكل (15) قيم الانتقالات الطابقية للمبنى قبل العزل وبعده وفق المحور X تحت تأثير زلزال لوس أنجلوس



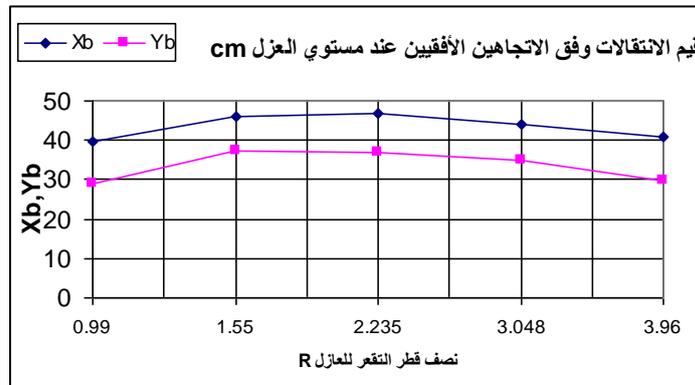
الشكل (16) قيم الانتقالات الطابقية للمبنى قبل العزل وبعده وفق المحور Y تحت تأثير زلزال لوس أنجلوس

2- دراسة تأثير بارامترات العازل (FPS):

تم دراسة تأثير نصف قطر التفرع للعازل FPS ($R=0.99m \sim R=3.962m$) ومعامل الاحتكاك ($\mu=0.03 \sim 0.15$) على الاستجابة الزلزالية للأبنية المعزولة، من خلال تقييم قيم التسارع المطلق لأعلى طابق، على اعتبار أنه متناسب بشكل مباشر مع القوى المتولدة في المنشأ العلوي والناجئة عن تأثير الزلزال المحرض، والانتقال القاعدي للمبنى وذلك بسبب علاقته المباشرة بتصميم العازل، تحت تأثير زلزال نورثريدج (Sylmar) ($Acc_x=8.268, Acc_y=5.926$). المنحنيات المبينة بالأشكال (17,18) تظهر علاقة التسارع المطلق لأعلى طابق والانتقال القاعدي بنصف قطر التفرع للعازل.

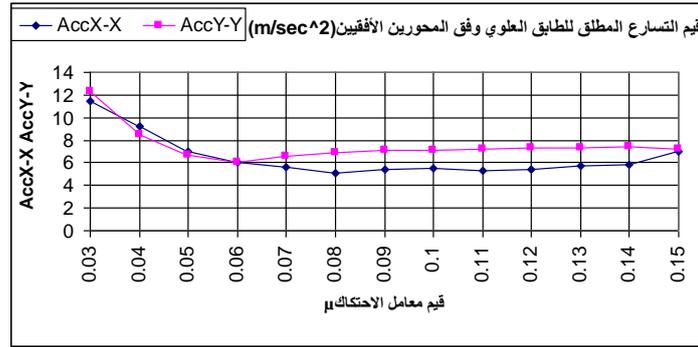


الشكل (17) علاقة التسارع المطلق لأعلى طابق بنصف قطر التفرع

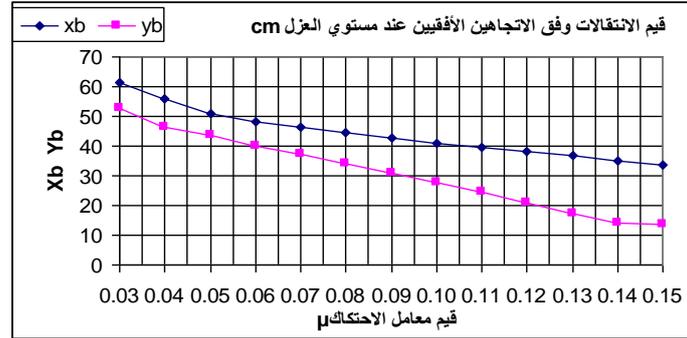


الشكل (18) علاقة الانتقال القاعدي بنصف قطر التفرع

كما نورد بالشكلين (19,20) قيم التسارع وقيم الانتقال بالاتجاهين x,y تبعاً لمعامل الاحتكاك.



الشكل (19) علاقة التسارع المطلق لأعلى طابق بمعامل الاحتكاك



الشكل (20) علاقة الانتقال القاعدي بمعامل الاحتكاك

الاستنتاجات والتوصيات:

- 1- نلاحظ من القيم الواردة في الجدولين (2,3) أنّ التسارعات في المبنى المعزول قد انخفضت بشكل واضح، وبالتالي يمكن القول بأن محتويات المبنى والأجهزة التي قد يحتويها ستكون بمنأى عن التأثيرات الضارة للزلازل.
- 2- يبيّن الجدول (4) مدى فعالية كلا العازلين في تخفيض قوى القص في الاتجاهين x,y تحت تأثير الزلازلين المعترضين. فقد انخفضت قيم قوى القص القاعدي في هذا المثال بنسب تتراوح ما بين 54% و 82% .
- 3- تظهر الأشكال (13,14,15,16) مقدار التخفيض الحاصل في قيم الانتقالات الطابقية والذي يعتبر مقياساً لمدى فعالية العازل في تخفيض الأضرار التي قد تصيب العناصر الإنشائية وغير الإنشائية.
- 4- يمكن القول بأن عازل الـ FPS يعمل على تبديد الطاقة بشكل أكبر منه في حالة الـ Ball system وهذا يعود لألية الانزلاق بالاحتكاك (تبديد الطاقة عن طريق الاحتكاك).
- 5- نلاحظ من الشكل (17) أن قيم التسارع المطلق لأعلى طابق تتناقص مع زيادة نصف قطر التقرع للعازل (أي مع زيادة دور العزل).
- 6- يظهر الشكل (19) أن قيمة التسارع المطلق لأعلى طابق تتناقص أولاً حتى تصل لقيمة صغيرة، ومن ثم تعود لنتزايد مع زيادة معامل الاحتكاك، وهذا يدل على وجود قيمة معينة لمعامل الاحتكاك تكون من أجلها قيمة التسارع المطلق لأعلى طابق أصغر.
- 7- يبيّن الشكل (20) مدى فعالية معامل الاحتكاك في تخفيض قيم الانتقال القاعدي وبالتالي تصغير حجم العازل.
- 8- يجب أن يتم الانتباه للانتقالات القاعدية، إذ يجب أن لا يكون هناك أي عائق يمنع الحركة الأفقية عند وقوع الزلازل.

المراجع:

- [1]-URGU, M. İ. *Design Of Seismic Isolated Structures*. Izmir, August 2006, <<http://www.fbe.deu.edu.tr/tezler/2006/YL-p2053.pdf>>.
- [2]- KELLY, T.E. *Base isolation Of Structures*. New Zealand, July 2001. <www.holmesgroup.com/designguides/BaseIsolationDesignGuidelines-TOC.pdf>.
- [3]- WULIN, T. ; CHIHOONE, C. *Base Isolation By Free Rolling Rods Under Basement*. Journal of Earthquake Engineering And Structural Dynamics U.S.A. Vol.22, N^o.3, 1993, 261-273.
- [4]- MOKHA, A.; CONSTANTINOU, M.C.; ZAYAS, V.A. *Experimental study of friction-pendulum isolation system*. Journal of Structural Engineering U.S.A. Vol.117 N^o.4, 1991, 1201-1217.
- [5]- Earthquake Protection Systems (EPS), *Friction Pendulum Seismic Isolation Bearing*. October 15, 2008. <<http://www.earthquakeprotection.com>>.
- [6]- ALMAZAN, J.L.; LLERA, J.CDL. *Analytical Model Of Structures With Frictional Pendulum Isolators*. Journal of Earthquake engineering and structural dynamics U.S.A. Vol.31, N^o. 2, 2002, 305-332
- [7]- BARROSO, L. R. *Performance Evaluation Of Vibration Controlled Steel structures Under Seismic Loading*. March 2006. <<http://ceprofs.tamu.edu/lbarroso/research/papers/THESIS.PDF>>.
- [8]- OZER, M. *The Linear Formulations For The Equations Of The Dynamic Responses Of Rigid And Flexible Structures Supported By Friction Pendulum Sliding (Fps) Bearings*. <<http://userwww.sfsu.edu/~ozler/Paper%20N0-1675-OZER.pdf>>.
- [9]- PRANESH, M.; SINHA, R. *VFPI: an isolation device for aseismic design*. Journal of Earthquake Engineering And Structural Dynamics .U.S.A. Vol .29, N^o. 5, 2000, 603-627.
- [10]- KAPLAN, H.; SEIREG, A. *A computer controlled system for earthquake protection of structures*. International journal of Computer Application in Technology U.S.A. Vol .13, N^o.1/2, 2000, 25-41.
- [11]- KAPLAN, H.; SEIREG, A. *Optimal design of a base isolated system for a high-rise steel structure*. Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics U.S.A. Vol.30, N^o.2, 2001, 287-302.
- [12]- CALIÒ, I. ; MARLETTA, M.; VINCIPROVA, F. *Seismic response of multi-storey buildings base-isolated by friction devices with restoring properties*. Journal of computers and Structures U.S.A. Vol. 81, N^o. 28, 2003, 2589–2599.
- [13]- MATSAGAR, V. A.; JANGID, R.S. *Influence of Isolator Characteristics on the Response of Base-Isolated Structures*. Journal of Engineering Structures U.S.A. Vol.26, N^o.12, 2004, 1735–1749.
- [14]- NAEIM, F. *The Seismic Design Handbook*. 2nd .ed., International Conference of Building Officials, Structural Engineers Association National Council, Inc Los Angeles, California, 2001, 830.

